



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۵۳ تا ۶۴  
Vol. 48, No. 1, Spring 2016, pp. 53-64



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

AmirKabir Journal of Science & Research  
Civil and Environmental Engineering  
(ASJR-CEE)

## نمودارهای اندرکنش ستون بتنی مسلح توخالی محصور با FRP

مجید برقیان\*<sup>۱</sup>، مسعود فرزاد<sup>۲</sup>، پری رضانی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشیار، دانشکده عمران، گرایش سازه، دانشگاه تبریز
- ۲- استادیار، دانشکده عمران، گرایش سازه، دانشگاه تبریز
- ۳- کارشناس ارشد، مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۲۹)

### چکیده

ستون‌های توخالی بتن مسلح برای کاهش هزینه و کاهش نسبت وزن به سختی اعضا استفاده می‌شوند. این ستون‌ها اغلب بارهای محوری همراه با لنگر خمشی را تحمل می‌کنند.

مقاوم‌سازی ستون توخالی بتن مسلح با پوشش FRP حالت محصورشدگی برای بتن فراهم می‌کند. در این مطالعه ستون‌ها بدون پوشش و با پوشش پیرامونی FRP بررسی و تحلیل شده، نمودار اندرکنش هر گروه با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، افزایش لایه‌های FRP تا اندازه‌ای در افزایش مقاومت ستون موثر است، اما افزایش لایه‌ها به بیش از ۵ لایه اقتصادی نیست. استفاده از سه لایه، مقاومت محوری ستون‌ها را بین ۳۰٪ تا ۴۰٪ افزایش می‌دهد، اما در خمش خالص این مقدار به ۵۰٪ هم می‌رسد. افزایش مقاومت با هفت و نه لایه حدود ۵٪ بیشتر از مقاوم‌سازی با پنج لایه است. همچنین افزایش ابعاد سوراخ باعث کاهش مقاومت نهایی ستون‌ها می‌شود. مقایسه ستون‌های با سوراخ مربعی و دایره‌ای نشان می‌دهد ستون‌های با سوراخ دایره‌ای عملکرد بهتری دارند.

### کلمات کلیدی:

ستون بتنی توخالی، مقاوم‌سازی، ورق‌های FRP، بارگذاری خارج از مرکز

## ۱- مقدمه

ستون‌های بتنی مسلح اعضای کلیدی مقاوم در برابر بارهای افقی و قائم سازه‌های بتنی محسوب می‌شوند. از این رو مقاوم‌بودن این اعضا نقش مهمی در مقاومت کل سازه دارد. اغلب ستون‌ها به دلیل سهولت در ساخت دایره‌ای و مستطیلی شکل هستند [۲].

با توجه به هزینه‌ی قابل ملاحظه‌ی نوسازی مجدد سازه‌ها، مسئله‌ی تقویت و ترمیم سازه‌های ضعیف و خسارت‌دیده به منظور تحمل بارهای بیشتر از طراحی، بهبود نارسایی‌های ناشی از فرسایش، افزایش مقاومت و یا شکل‌پذیری سازه با استفاده از مصالح مختلف و شیوه‌های اجرایی متنوع در سطح وسیعی مطرح شده‌است. استفاده از پیش‌تنیدگی خارجی، غلاف فولادی یا بتنی و صفحات الیاف پلیمری (FRP) برخی از روش‌های متعارف هستند. مقاوم‌سازی مقاطع بتنی با استفاده از FRP یکی از راهکارهای نوین مقاوم‌سازی است که جایگزین روش‌های قدیمی مانند زره‌پوش کردن فولادی یا بتنی شده است.

در بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده رفتار ستون‌های توپر بررسی شده‌است. تحقیقات کمی بر روی ستون‌های توخالی بتن مسلح با پوشش FRP انجام شده‌است [۳]. ستون‌هایی که در قسمت مرزی سازه‌ها خصوصاً در گوشه‌ها و نزدیک بازشوها واقع هستند، معمولاً تحت ترکیبی از بارهای محوری و لنگرهای خمشی قرار می‌گیرند که معادل یک بار با خروج از مرکزیت است. با توجه به اینکه بیشتر مطالعات انجام‌شده در مقاوم‌سازی ستون‌ها بر اساس بارگذاری محوری است، رفتار ستون‌های دورپیچ‌شده با FRP تحت بارهای خارج از مرکز در مقایسه با بارگذاری محوری کمتر شناخته شده است.

## ۱-۱- محصورشدگی در بتن

رفتار بتن تحت تنش با منحنی تنش - کرنش آن مشخص می‌شود. رابطه‌ی تنش - کرنش بتن غیرخطی است و در کشش و فشار نیز متفاوت است. چنانچه نمونه‌ی بتنی در زمان بارگذاری تحت تأثیر فشار جانبی قرارگیرد، شرایط به صورت محصورشده تلقی می‌شود و منحنی به صورت اساسی تغییر وضعیت خواهد داد؛ به طوری که مقاومت فشاری آن افزایش یافته و هم‌چنین کرنش شکست نهایی آن نیز به مراتب افزایش می‌یابد. اگر در یک عضو بتنی از میلگردهای عرضی به شکل دورپیچ و یا فواصل نزدیک استفاده شود، تا حدی شرایط محصورشدگی فراهم می‌گردد. ایجاد شرایط محصورشدگی رفتار نرم‌تر و شکل‌پذیرتری را برای عضو بتنی فراهم می‌کند.

## ۱-۲- ستون‌های توخالی

اعضای سازه‌ای توخالی یک راه‌حل برای افزایش نسبت مقاومت به وزن، نسبت سختی به وزن و کاهش وزن وارده به پی است که نهایتاً منجر به کاهش هزینه می‌شود. مطالعات نشان دادند ستون‌های توخالی که با فولادهای طولی و عرضی مناسبی مسلح شده‌اند، در صورت دارا بودن ضخامت دیواره‌ی کافی و نسبت بار محوری به ظرفیت محوری کم عملکرد مناسب و شکل‌پذیری زیادی در خمش دارند [۴]. ستون‌های بتنی مسلح توخالی ممکن است به دلیل نسبت‌های نامتعادل بار محوری

و کماتش زودرس میلگردهای طولی ناشی از فاصله‌ی زیاد میلگردهای عرضی، رفتار شکننده‌ای داشته‌باشند. بنابراین برای افزایش کارایی ستون و جلوگیری از کماتش زودرس میلگردها می‌توان از پوشش خارجی FRP استفاده کرد [۵].

## ۱-۳- مواد کامپوزیتی (FRP)

ویژگی‌هایی مانند سهولت در ساخت و حمل، انعطاف‌پذیری کاربرد به عنوان پوشش برای سطوح در شکل‌های مختلف، مقاومت در مقابل خوردگی و عوامل شیمیایی مانند اسیدها و بازها، وزن کم، حذف تجهیزات ساختمانی مثل داربست، کاهش هزینه‌های مربوط به نیروی انسانی و تولید، دارا بودن سختی مناسب بسته به نیازهای طراحی، ظرفیت بالای تغییرشکل، عدم محدودیت عملی FRP در اندازه و ابعاد و مقاومت کششی بالا به گسترش روزافزون این مصالح کمک بسیاری کرده است [۶].

دوام و عملکرد درازمدت FRP نیازمند تحقیقات بیشتر است. در حال حاضر داده‌های میدانی درازمدت در دسترس نیست و برآورد دقیق عمر سیستم‌های مقاوم‌کننده‌ی FRP مشکل است. اثرات محیطی و دوام درازمدت معمولاً به صورت اعمال ضرایب کاهش در شرایط محیطی گوناگون لحاظ می‌شود. اغلب سیستم‌های FRP بعد از قرارگرفتن در برابر عوامل محیطی از جمله دما، رطوبت و شرایط شیمیایی، ویژگی‌های مکانیکی کاهش‌یافته‌ای را از خود بروزمی‌دهند. البته عوامل مربوط به دوام سیستم FRP روی مدول الاستیسیته‌ی کششی مصالح استفاده شده در طراحی تأثیری ندارد [۱].

سیستم FRP با دورپیچ کردن کامل یا پوشاندن قسمتی از عضو، موجب افزایش مقاومت آن می‌شود. محصورشدگی هم‌چنین می‌تواند با افزایش شکل‌پذیری باعث بهبود عملکرد سازه‌ای شود.

## ۲- پیشینه تحقیق

مطالعات انجام‌شده توسط Teng و همکاران [۶]، Samaan و همکاران [۷]، Spolstra و Monti [۸]، Toutanji و Balaguru [۹] نشان داد که پوشش FRP رابطه‌ی بین تنش - کرنش بتن متفاوتی با پوشش فولادی نشان می‌دهد. تفاوت در رفتار بتن دورپیچ با فولاد و FRP، ناشی از تفاوت رفتار فولاد و FRP است. فولاد یک ماده‌ی الاستوپلاستیک است که تا مقدار تسلیم تغییرشکل الاستیک دارد و با حذف بار به حالت اولیه خود بازمی‌گردد. بعد از بار تسلیم حتی با ثابت ماندن مقدار بار، فولاد تغییرشکل زیادی دارد. بنابراین بعد از بار تسلیم، در محاسبات ساده‌ی تنش فرض می‌شود پوشش فولادی یک تنش دورپیچی ثابت فراهم می‌کند. برخلاف فولاد، FRP تحت بار کششی تا شکست یک تغییرشکل خطی دارد.

شکل (۱) نمودار تنش - کرنش بتن در سه حالت محصورنشده، محصورشده توسط خاموت و محصورشده توسط خاموت و FRP را نشان می‌دهد. بهبود رفتار اعضای محصورشده با FRP در کاهش کرنش فولادهای تسلیم داخلی با به تأخیرانداختن تسلیم آن‌ها است [۲].

چنین حالت فشار سه محوری با فراهم کردن محصورشدگی برای بتن حاصل می‌شود. اگر بتن مسلح باشد و پوشش خارجی هم وجود داشته باشد، حالت مطلوبی از تنش سه محوری قابل دسترسی است. در ستون‌ها، محصورشدگی با تأمین میلگردهای عرضی به صورت خاموت یا ماریچج قابل حصول است. برای ستون‌هایی که به صورت خارجی دورپیچ شده‌اند، این محصورشدگی با پیچیدن کامپوزیت به دور آن حاصل می‌شود.

برای مدل کردن رفتار بتن دورپیچ شده با فولاد، در ستون‌های توپر روابطی ارائه شده‌اند که به نظریه رسد اغلب آن‌ها بر اساس معادله (۱) که توسط Richart و همکاران [۱۶] برای مقاومت بتن محصور با فولاد بیان شده‌است، به دست آمده‌اند. مطالعات Teng و همکاران [۶]، Samaan و همکاران [۷]، Spoelstra، Monti [۸]، Toutanji و Balaguru [۹] نشان می‌دهد مدل‌هایی که برای پوشش فولادی تعریف شده‌اند باید برای بتن محصور با FRP دوباره تعریف شوند.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + K_1 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (1)$$

$f'_{cc}$ : مقاومت فشاری بتن محصور شده (MPa)،  $f'_{co}$ : مقاومت فشاری بتن محصور نشده (MPa)،  $f_l$ : تنش محصورکننده جانبی و  $K_1$ : ضریب موثر محصورشدگی است که توسط Richart و همکاران [۱۶] مقدار ۱/۴، توسط Teng و همکاران [۶] مقدار ۲، پیشنهاد شده‌است. مطالعات Samaan و همکاران [۷] و تحقیقات بسیار دیگری نشان داد که استفاده از ضریب پیشنهادی Richart و همکاران [۱۶] خصوصاً در بارگذاری محوری محافظه کارانه است. Karbhari و Gao [۱۷] رابطه‌ی (۲) را پیشنهاد کردند.

$$f_{cc} = f_{co} + 3.1 f_{co} v_c \left( \frac{2 f_{frp} t_{frp}}{d E_c} \right) + \left( \frac{2 f_{frp} t_{frp}}{d} \right) \quad (2)$$

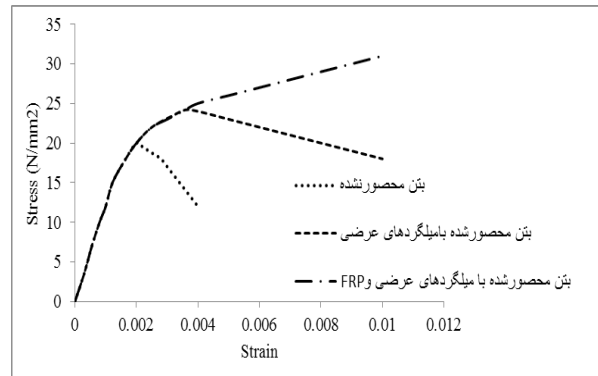
$f_{cc}$ : مقاومت فشاری بتن محصور شده (MPa)،  $f_{co}$ : مقاومت فشاری بتن محصور نشده (MPa)،  $v_c = 0.2$ : ضریب بواسون بتن بر اساس ACI318 [۱۸] و AS3600 [۱۹]،  $E_{frp}$ : ضریب ارتجاعی FRP (MPa)،  $t_{frp}$ : ضخامت FRP پوشش  $d$ : قطر مقطع محصور شده و  $E_c$ : ضریب ارتجاعی بتن.

وقتی که ستون بتنی تحت بار فشاری محوری قرار می‌گیرد هسته‌ی بتن به طور جانبی افزایش عرض خواهد داشت، با ایجاد تنش‌های کششی در FRP از این افزایش عرض ممانعت می‌شود. وقتی که مقدار تنش‌های محیطی به مقاومت نهایی FRP می‌رسد، گسیختگی اتفاق می‌افتد [۶]. برای محاسبه‌ی تنش محصورشدگی  $f_l$  در ستون‌های توپر دایره‌ای Lam و Teng [۲۰] رابطه‌ی (۳) را پیشنهاد کردند.

$$f_l = \frac{2 f_{frp} t_{frp}}{d} = \frac{\rho_{frp} f_{frp}}{2} \quad (3)$$

$$\rho_{frp} = \frac{A_{frp}}{A_{column}} \quad (4)$$

در روابط بالا  $f_l$ : تنش محصورکننده‌ی جانبی  $f_{frp}$ : مقاومت کششی FRP در جهت حلقه‌ای،  $t_{frp}$ : ضخامت پوشش FRP،  $d$ : بعد ستون دایره‌ای یا



شکل ۱: نمودار تنش - کرنش بتن در سه حالت محصور نشده، محصور شده توسط خاموت و محصور شده توسط FRP [۹]

## ۲-۱- ستون‌های تقویت شده با FRP

محصور کردن بتن با مواد مرکب، مقاومت و شکل‌پذیری بتن را افزایش می‌دهد. افزایش تعداد یا ضخامت لایه‌ها باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری بتن می‌شود.

آزمایش Balagura و Toutanji [۹] نشان داد شکل مقطع و فاصله‌ی نواری‌های FRP به طور مستقیم اثر محصورشدگی پوشش FRP را تحت تأثیر قرار می‌دهد. زاویه‌ی الیاف نیز یک مسئله‌ی مهم در ویژگی‌های مکانیکی (کارایی) FRP است. جهت‌گیری فیبر در یک سمت باعث مقاومت و سختی خیلی زیاد در آن سو می‌شود. افزایش زاویه‌ی الیاف تا حدود ۳۰ درجه باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری بتن شده و بعد از آن مقاومت و شکل‌پذیری بتن را کاهش می‌دهد. چیدن لایه‌ها به صورت یک در میان نسبت به حالت متقارن مؤثرتر است. همچنین تحقیقات موجود در اکثر موارد بر نتایج آزمایشگاهی استوار است و مدل‌سازی به وسیله‌ی نرم‌افزارها با دشواری بیشتری همراه است.

## ۲-۲- مطالعات انجام گرفته در مورد محصورشدگی ستون‌های

### بتنی با FRP

مطالعات مختلفی در این زمینه به صورت کارهای آزمایشگاهی و مدل‌های تحلیلی و عددی انجام شده‌است. ابتدا از مدل ارائه شده برای بتن محصور با خاموت‌های فلزی استفاده شد. اما مطالعات بعدی نشان داد که استفاده از این مدل برای مواد مرکب که دارای رفتار خطی و ترد هستند غیرمحافظه کارانه است.

مطالعات انجام شده توسط Nanni و Bradford [۱۰]، Mirmiran و Shahawy [۱۱]، Li و Rizkalla [۱۲]، Hadi و Li [۱۳]، Hadi [۱۴]، Mathys و همکاران [۷] نشان می‌دهد شکل‌پذیری و مقاومت ستون‌های بتنی با پوشش ورق‌های FRP دور ستون بهبود می‌یابد. مدل‌هایی برای مقاومت و شکل‌پذیری ستون‌های توپر محصور شده با کامپوزیت‌ها در سال‌های اخیر معرفی شده‌اند [۱۵]. اما برای ستون‌های توخالی این مطالعات کمتر است.

## ۲-۳- مدل‌های محصورشدگی

مطالعه‌ی انجام شده توسط Richart و همکاران [۱۶] نشان داد مقاومت و ظرفیت شکل‌پذیری در حالت فشار سه محوری افزایش زیادی دارد.

$\varepsilon_{cc}$ : کرنش فشاری بتن متناسب با تنش فشاری  $f_c$ ،  $f'_{cc}$ : بیشترین تنش فشاری بتن محصورشده،  $f'_{co}$ : مقاومت فشاری بتن بدون پوشش است. مقدار  $\varepsilon_{cc}$  از معادله (۵) به دست می‌آید.  $E_c$ : مدول الاستیسیته‌ی بتن بدون پوشش است که با استفاده از معادلات (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$\text{for } f'_{co} \leq 40 \text{ MPa,} \quad (10)$$

$$E_c = \rho^{1.5} (0.043 \sqrt{f'_{co}}) \text{ MPa}$$

$$\text{for } f'_{co} > 40 \text{ MPa,} \quad (11)$$

$$E_c = \rho^{1.5} (0.024 \sqrt{f'_{co}} + 0.12) \text{ MPa}$$

$\rho$  چگالی بتن برحسب ( $\text{Kg/m}^3$ ) است که معمولاً  $2400 \text{ Kg/m}^3$  در نظر گرفته می‌شود.

#### ۲-۴- مطالعات آزمایشگاهی

Fam و همکاران [۱۲] مطالعه‌ای روی لوله‌های FRP - که با بتن پر شدند و تحت بارهای مختلف محوری و خمشی قرار گرفتند - انجام دادند. Hadi [۲] شش ستون توپر که باری با خروج از مرکزیت  $42.5 \text{ mm}$  داشت را آزمایش کردند. ستون‌ها با یک، سه و پنج لایه الیاف کربنی محصور شدند. استفاده از FRP بعضی از ویژگی‌های ناخواسته‌ی بتن مانند شکست ترد را کاهش می‌دهد. Li و Hadi [۱۳] در آزمایشی کارایی ستون بتنی مسلح پرمقاومت محصورشده را تحت بار خارج از مرکز بررسی کرده؛ تأثیر دو نوع ماده‌ی محصورکننده‌ی الیاف کربن و شیشه را مقایسه کردند. متغیرهای مورد مطالعه در آزمایش آن‌ها نوع تسلیح (داخلی و خارجی)، تعداد لایه‌های FRP و نوع مصالح محصورکننده شامل کربن تک‌جهته و الیاف شیشه‌ای بود. Hadi در مطالعاتی رفتار ستون‌های توپر دورپیچ‌شده با دو نوع مواد تحت بارگذاری خارج از مرکز را بررسی کرد. نتایج نشان داد افزایش خروج از مرکزیت باعث کاهش ظرفیت مقاومتی ستون می‌شود، اما استفاده از تسلیح خارجی ظرفیت باربری ستون را افزایش می‌دهد. این افزایش با بیشتر شدن تعداد لایه‌های خارجی پوشش چشمگیرتر است. افزایش مقاومت نمونه‌های غیرمسلح تحت بار خارج از مرکز به اندازه‌ی بارگذاری محوری محسوس نیست. استفاده از CFRP به عنوان تسلیح خارجی مقاومت ستون را افزایش می‌دهد. افزایش تغییرشکل نسبت به افزایش مقاومت خصوصاً در بتن‌های بدون تسلیح داخلی محسوس‌تر است. افزایش لایه‌های FRP به ستون این امکان را می‌دهد که بارهای خارج از مرکز را با زیاد شدن تغییرشکل‌های جانبی تحمل کند. بررسی مصالح نشان می‌دهد که CFRP محصورشدگی بیشتری را نسبت به GFRP فراهم می‌کند.

#### ۲-۵- نمودار اندرکنش ستون‌های توخالی

نمودار P-M یک منحنی پیوسته برای تعیین ظرفیت بار محوری و لنگر خمشی مقطع ستون بتنی مسلح است. یک نقطه روی منحنی ممکن است بیانگر بارگذاری محوری، بارگذاری خارج از مرکز و یا بار خمشی خالص باشد. Hadi و Yazici [۳] ستون‌های دایره‌ای توخالی بتن مسلح تحت بار را با خروج از مرکزیت‌های مختلف و خمش خالص بررسی کردند. نتایج

بعد معادل ستون مربعی،  $f_{fpp}$ : چگالی FRP،  $A_{fpp}$ : سطح مقطع FRP و  $A_{column}$ : سطح مقطع ستون است.

Kusumawardaningsih و Hadi [۲۱] برای بررسی رفتار ستون‌های توخالی بتن مسلح دارای سوراخ مربعی و دایره‌ای مدلی را بر اساس تحقیقات Lam و Teng [۲۰] پیشنهاد کردند.

اگرچه تنها تفاوت آشکار با ستون‌های توپر محصور وجود قسمت توخالی مرکزی است، مکانیسم دورگیری FRP ستون توخالی تحت بار محوری تا حدودی متفاوت است. تنش‌های دورگیری در ستون‌های توخالی ناشی از پوشش FRP تا حدی پیچیده و غیریکنواخت است. یک تنش متوسط دورگیری برای ستون تحت بارهای فشاری ناشی از پوشش FRP فرض می‌شود. طبق این فرض ساده پوشش جانبی FRP در جداره‌ی ستون دایره‌ای توخالی از افزایش قطر لوله جلوگیری می‌کند [۱۸]. برخلاف مقطع دورپیچ توپر بتنی، هیچ تنش فشاری دورگیری بر سطح داخلی دیواره منحنی در جهت شعاعی وارد نمی‌شود [۲۲].

با فرض این که بتن تحت محصورشدگی دومحوری است، مقاومت فشاری و ظرفیت تغییرشکل افزایش می‌یابد. چون مدل‌های تنش - کرنش بتن محصور با FRP، رفتار بتن را مانند ستون‌های توپر تحت شرایط تنش سه‌محوری بیان می‌کنند، برای بتن محصور دومحوری در حالت ستون توخالی مناسب نیستند [۳]. برای تعیین  $f_{cc}$  در نتیجه‌ی استفاده از پوشش FRP، نمودار اندرکنش ساده‌ای به وسیله‌ی Mander و همکاران [۱۵] در سال ۱۹۹۸ ارائه شد که این نمودار در اصل از مطالعات William و Warnke [۲۳] به دست آمده است. Mander و همکاران [۲۴] رابطه‌ی کلی برای کرنش شکست بتن تحت پوشش به دست آوردند:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left( 1 + R \left( \frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right) \quad (5)$$

که در آن  $\varepsilon_{co} = 0.002$ : کرنش متناسب با تنش حداکثر بتن بدون پوشش، مقدار ثابت  $R$  توسط Mander و همکاران [۲۴]، برای بتن‌های تحت فشار سه‌محوره مانند ستون‌های توپر ۵ تعیین شده است. Darwin و Pecknold [۲۵] بعد از آزمایش پانل‌های بتنی تحت بار دومحوری مقدار متوسط  $3/25$  را برای  $R$  تعیین کردند. مقادیر کوچکتر  $R$  کرنش خردشدگی کوچکتری را می‌دهد و نشانگر این است که بیشترین مقدار تنش، معادل با کمترین مقدار تغییرشکل بتن است. معادلات (۶) تا (۱۱) بیانگر مدل تنش - کرنش Mander و همکاران [۲۴] هستند. اساس این معادله توسط Popovics [۲۶] پیشنهاد شده است.

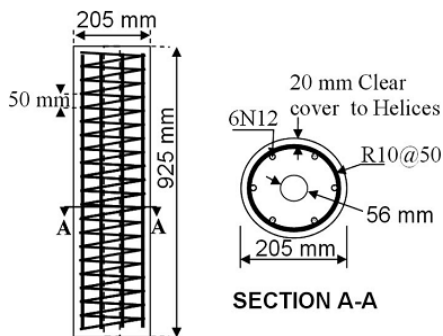
$$f_c = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^y} \quad (6)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \quad (7)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (8)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (9)$$

است. ظرفیت تغییرشکل جانبی تحت بار با خروج از مرکزیت بعد از پوشش با CFRP به طور اساسی افزایش یافت.



شکل ۲: مشخصات هندسی ستون‌های آزمایش شده توسط Hadi و Yazici [۳]



شکل ۳: اندازه‌گیری تغییرشکل محوری و جانبی ستون‌های آزمایش شده توسط Hadi و Yazici [۳]

### ۳-۱- نحوه‌ی مدل‌سازی

ستون‌های فوق در نرم‌افزار اباکوس مدل شده و بارگذاری مشابه با مطالعه‌ی Hadi و Yazici [۳] صورت گرفت و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. برای به دست آوردن منحنی تنش- کرنش بتن از مدل ارائه شده توسط Mander و همکاران [۲۴] استفاده شده است. مقاومت فشاری بتن در نمونه آزمایشگاهی ۶۰ MPa و ضریب پواسون آن ۰/۲ است. برای مدل کردن رفتار پلاستیک بتن از مدل آسیب خمیری (Concrete damaged plasticity) استفاده شده است. مشخصات سایر مصالح در جداول (۱) تا (۳) آورده شده است. متغیرهای خرابی بتن بر اساس تحقیقات انجام شده توسط Jankowiak و Lodygowski [۳۰] به دست آمده است. در نرم‌افزار زاویه اتساع بتن ۳۶ درجه و  $K = 0/66$  تعریف شده است.

نمونه‌ی مدل شده در شکل (۴) نشان داده شده است. مدول الاستیسیته بتن و فولاد به ترتیب با روابط (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده‌اند. نوع عضو (المان) انتخاب شده برای بتن C3D8R و برای FRP از عضو (المان) Shell استفاده شده است.

$$E_c = 2400^{1.5} (0.024 \sqrt{60} + 0.12) = 36000 \text{ MPa} \quad (12)$$

$$E_s = 210000 \text{ MPa} \quad (13)$$

نشان داد افزایش مقاومت در ستون‌های محصور با CFRP تحت بار محوری بیشتر از بار اعمال شده با خروج از مرکزیت است.

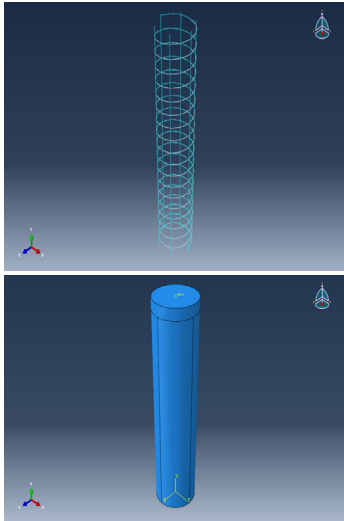
Yuan و همکاران [۲۷] مطالعه‌ای در مورد مدل‌های تنش - کرنش بتن انجام دادند و نتایج آن را برای ستون‌های بتنی مسلح محصور با FRP تحت بارهای محوری و خمشی به کار بردند. Saaticioglu و Ozbakkaloglu ستون‌های در مقیاس بزرگ با مقطع مربعی به ضلع ۲۷۰ mm و مقاومت بتن ۹۰ MPa محصور در FRP تحت بار شبیه‌سازی شده‌ی لرزه‌ای را آزمایش کردند [۲۸].

Lignola و همکاران [۲۹] رفتار مقاطع غیردایره‌ای توخالی که تحت ترکیب بار محوری و خمش قرار گرفته‌اند و مکانیسم مقاومت‌سازی آن‌ها با پوشش FRP را بررسی کردند. بر اساس نتایج حاصل پوشش‌های کامپوزیتی می‌تواند کارکرد سازه‌ی ستون‌های بتنی را تحت بارهای خارج از مرکز در زمینه‌ی مقاومتی تا ۱۵٪ افزایش دهد. افزایش مقاومت به خروج از مرکزیت بار وارده وابسته است (خروج از مرکزیت کمتر بهبود مقاومت بیشتر). شکل‌پذیری ستون‌های محصور نیز نسبت به ستون‌های بدون پوشش به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. شکست اعضای غیرمحصور تحت تأثیر کمانش میلگردهای فشاری و خرد شدن بتن پوشش است. پوشش FRP این مکانیسم را به تأخیر می‌اندازد، بنابراین مقاومت و شکل‌پذیری اعضا را حتی در خروج از مرکزیت‌های بالا افزایش می‌دهد.

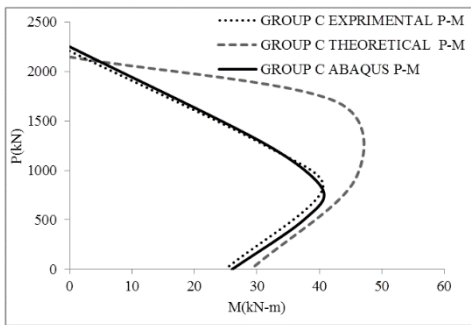
### ۳-۲ مدل‌سازی در نرم‌افزار

در مطالعه‌ی حاضر هدف بررسی نمودارهای اندرکنش ستون بتنی مسلح توخالی محصور با FRP تحت بارهای محوری و خارج از مرکز است. در این مطالعه تعدادی ستون توخالی در نرم‌افزار اباکوس مدل‌سازی شده و رفتار آنها بررسی شده است. متغیرهای مورد مطالعه شکل ستون، شکل و ابعاد سوراخ و تعداد لایه‌های الیاف برای دورپیچی است و تأثیر هر کدام از موارد فوق در میزان ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون مسلح بتنی توخالی مقایسه شده است. برای بررسی درستی مدل‌سازی، ستون توخالی بتن مسلح که توسط Hadi تحت اثر بار با خروج از مرکزیت‌های مختلف و خمش خالص آزمایش شده در نرم‌افزار اجزاء محدود اباکوس مدل شده و نتایج حاصل با نتایج آزمایش تجربی مقایسه گردیده است. پس از مشاهده‌ی انطباق قابل قبول بین این دو سری نتایج، همان ستون با یک، سه، پنج، هفت و نه لایه FRP تقویت شده است. مشخصات هندسی ستون‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. ستون‌ها در دو گروه C (بدون پوشش خارجی) و L (محصور با سه لایه FRP) ساخته و آزمایش شدند. تغییرشکل محوری ستون در انتهای آزاد و تغییرشکل جانبی در وسط ستون مطابق شکل (۳) اندازه‌گیری شد. هدف در این مطالعه، آزمایش ستون تحت خروج از مرکزیت‌های کوچک و نسبتاً بزرگ است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد ستون‌های محصور با CFRP بار محوری و خمش بیشتری نسبت به گروه دیگر تحمل می‌کنند؛ ولی افزایش مقاومت در ستون‌های تحت بار هم‌مرکز بیشتر از بار اعمال شده با خروج از مرکزیت

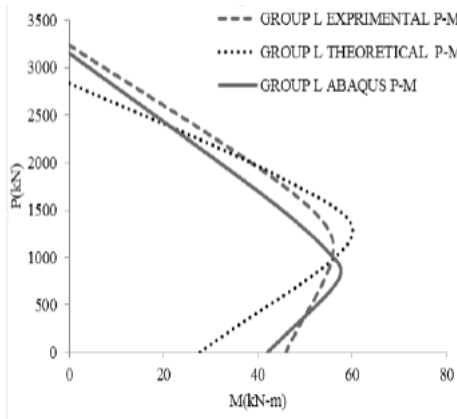




شکل ۴: ستون مدل‌سازی شده در نرم‌افزار اباکوس



شکل ۵: مقایسه منحنی اندرکنش حاصل از آزمایش و نمونه‌ی مدل‌سازی شده در اباکوس (ABAQUS) بدون پوشش



شکل ۶: مقایسه منحنی اندرکنش حاصل از آزمایش و نمونه‌ی مدل‌سازی شده در اباکوس با سه لایه پوشش

از مرکزیت صفر تا ۷۵ mm بارگذاری شده‌اند. CB تحت خمش قرار گرفته‌است. نمونه‌های L0 تا LB نیز با پوشش FRP تحت همان شرایط بارگذاری بررسی شده‌اند.

نمونه با یک، سه، پنج، هفت و نه لایه FRP پوشانده شد و نتایج تحلیل به دست آمد. در ادامه تغییر ابعاد سوراخ ستون در نتایج بررسی شد. برای تعیین نوع سوراخ مناسب برای ستون‌های دایره‌ای، مدل مورد نظر با سوراخ مربعی تحلیل شد و نتایج به دست آمد با سوراخ دایره‌ای

در شکل‌های (۵) و (۶) منحنی‌های اندرکنش نمونه‌های مدل‌سازی شده با نرم‌افزار و منحنی حاصل از آزمایش نشان داده شده‌است. نمودار آزمایشگاهی و نمودار تئوری از Hadi و Yazici [۳] انتخاب و نمودار تحلیل تحقیق حاضر با خطر نشان داده شده‌است. از نمودار مشخص است که نتایج تحلیلی با نتایج تحلیل تحقیق حاضر هم‌خوانی خوبی دارند.

جدول ۱: خصوصیات پلاستیک بتن در فشار و کشش

آسیب بتن	تنش تسلیم (MPa)	کرنش پلاستیک	تنش تسلیم (MPa)	کرنش ترک خوردگی
۰	۲۴	۰	۵	۰
۰	۳۲	۰/۰۰۰۳	۳	۰/۰۰۰۷
۰	۴۳	۰/۰۰۰۶	۰/۴	۰/۰۰۲
۰	۵۲	۰/۰۰۰۹	-	-
۰	۶۰	۰/۰۰۱۴	-	-
۰/۸۵	۵۱	۰/۰۰۱۹	-	-
۰/۵۵	۳۳	۰/۰۰۲۴	-	-
۰/۳۲	۱۹	۰/۰۰۲۹	-	-
۰/۲۱	۱۳	۰/۰۰۳۵	-	-
۰/۱۵	۹	۰/۰۰۶۵	-	-

جدول ۲: خصوصیات پلاستیک میلگردهای طولی و عرضی

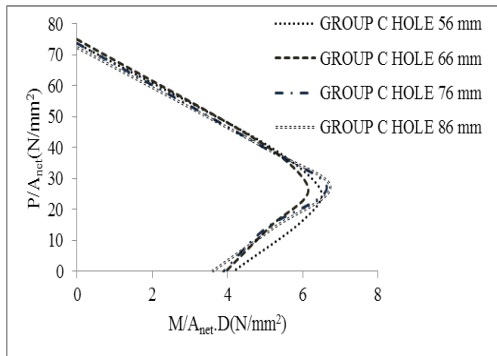
میلگردهای طولی	تنش تسلیم	کرنش پلاستیک
میلگردهای طولی	۵۵۰	۰
میلگردهای طولی	۷۰۰	۰/۱
میلگردهای عرضی	۳۰۰	۰
میلگردهای عرضی	۳۷۵	۰/۱

مشخصات ورق‌های FRP

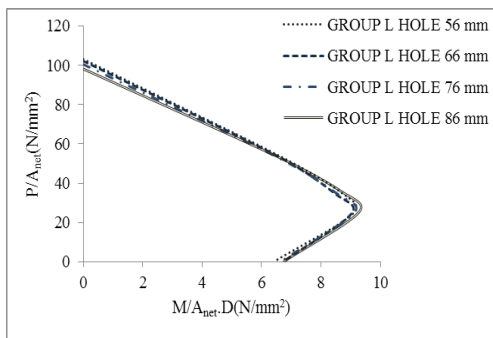
$E_1$ (MPa)	$۴/۶ \times ۱۰^۴$
$E_2$ (MPa)	$۱/۵ \times ۱۰^۴$
$\nu_{12}$	۰/۳
$G_{12}$ (MPa)	$۱/۵ \times ۱۰^۴$
$G_{13}$ (MPa)	$۱/۵ \times ۱۰^۴$
$G_{23}$ (MPa)	$۱/۵ \times ۱۰^۴$

### ۳-۲- ستون دایره‌ای با سوراخ دایره‌ای

یک گروه از ستون‌های دایره‌ای به قطر خارجی ۲۰۵ mm و قطر داخلی ۵۶ mm که در آن نسبت قطر داخلی به قطر خارجی برابر ۲۷٪ است، در مرحله‌ی اول بدون پوشش خارجی و در مرحله‌ی بعد با یک، سه، پنج، هفت و نه لایه FRP تحلیل شدند و نتایج آن در شکل (۷) آمده‌است. نمونه‌های C0 تا C75 ستون‌های بدون پوشش هستند که با خروج



شکل ۸: مقایسه‌ی ابعاد سوراخ دایره‌ای در ستون دایره‌ای بدون پوشش



شکل ۹: مقایسه‌ی ابعاد سوراخ دایره‌ای در ستون دایره‌ای با سه لایه پوشش

در بارهای خارج از مرکز نسبت فوق با افزایش قطر سوراخ روند کاهنده دارد. در خمش خالص با وجود کاهش مقاومت نهایی، با افزایش قطر سوراخ مقاومت در حالت محصورشده نسبت به وضعیت بدون پوشش روند افزایشی نشان می‌دهد.

#### ۴-۱- ستون دایره‌ای با سوراخ مربعی

در مرحله‌ی بعد، ستون فوق با سوراخ مربعی به طول ۵۰ mm، ۵۵ mm و ۷۵ mm بدون پوشش و با سه لایه FRP طراحی و تحلیل می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است.

در حالت  $B_1/R_e = 24\%$  افزایش مقاومت در بار محوری حدود ۳۶٪ است که این مقدار با افزایش خروج از مرکزیت کاهش می‌یابد، ولی در خروج از مرکزیت ۷۵ mm افزایش مقاومت به حدود ۷۰٪ می‌رسد.

بررسی نسبت‌های مختلف  $B_1/R_e$  در دو حالت بدون پوشش و محصورشده نشان می‌دهد که افزایش مقاومت در حالت خمش خالص نسبت به بارگذاری محوری کمتر است. در بارگذاری محوری نسبت مقاومت نهایی ستون محصورشده به ستون بدون پوشش ۴۲٪ است که در حالت خمش خالص این مقدار به ۳۰٪ می‌رسد. نتایج به‌دست آمده از تحلیل نشان می‌دهد افزایش مقاومت در خروج از مرکزیت‌های ۵۰ mm و ۷۵ mm بیشترین مقدار و در خمش خالص کمترین مقدار را دارد، به طوری که در خروج از مرکزیت ۷۵ mm نسبت افزایش مقاومت به ۷۰٪ می‌رسد. در این حالت که نسبت طول سوراخ به قطر دایره ۳۹٪ است، روند

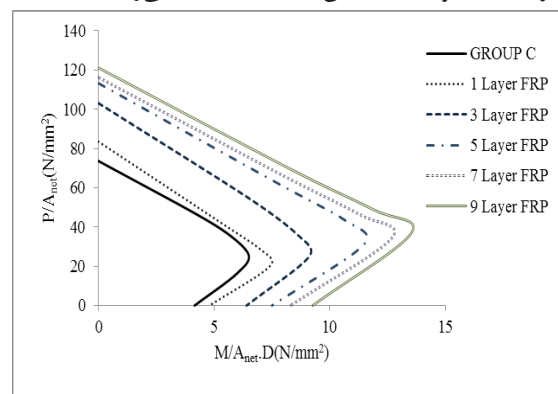
مقایسه‌شد. برای رسیدن به مقطع بهینه، ستون مربعی با سطح مقطعی معادل ستون دایره‌ای مدل شد و نوع و اندازه‌ی سوراخ نیز در این مدل تغییر یافت و تأثیر تغییر این موارد در ظرفیت بارگذاری بررسی شد.

#### ۴- تحلیل نتایج

مشاهده شد دورپیچ کردن ستون با لایه‌های الیاف کامپوزیتی باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری در ستون‌های توخالی دایره‌ای می‌شود. یک لایه FRP کربنی باعث افزایش مقاومت خیلی کمی می‌شود. سه لایه در افزایش مقاومت تأثیر خوبی نسبت به یک لایه دارد. به طوری که در بارگذاری محوری سه لایه دورپیچی ۴۰٪ و پنج لایه حدود ۵۰٪ مقاومت را افزایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود پنج لایه در بارهای محوری و خروج از مرکزیت کم، افزایش مقاومت کمتری نسبت به خروج از مرکزیت‌های بالاتر و خمش خالص دارد. نتایج تحلیل هفت و نه لایه دورپیچی نشان می‌دهد با افزایش تعداد لایه‌ها مقاومت به طور مداوم افزایش نمی‌یابد. چنانچه افزایش مقاومت با حضور هفت و نه لایه به اندازه‌ی سه و پنج لایه چشمگیر نیست. بنابراین می‌توان گفت با افزایش تعداد لایه‌ها تا یک حد مشخص مقاومت و شکل‌پذیری ستون‌ها افزایش می‌یابد و بعد از آن افزایش تعداد لایه‌ها با توجه به نتایج به‌دست آمده مقرون به صرفه نیست. هفت و نه لایه FRP نسبت به پنج لایه به ترتیب ۷٪ و ۱۰٪ افزایش مقاومت دارند.

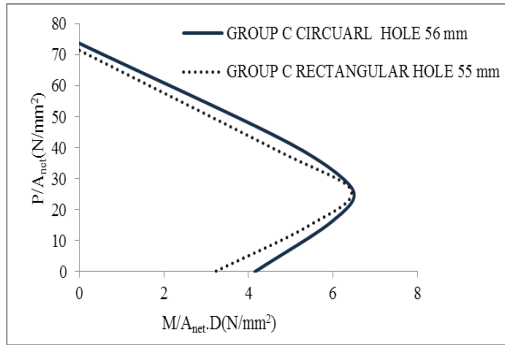
در گام دوم، همین ستون با تغییر قطر سوراخ به ۶۶ mm، ۷۶ mm و ۸۶ mm بدون پوشش و با سه لایه FRP طراحی و تحلیل شده تا تأثیر این تغییر در نتایج به‌دست‌آمده بررسی شود. نتایج حاصل از تحلیل در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده‌است.

مقایسه‌ی نتایج حاصل از تغییر قطر در شکل‌های (۸) و (۹) نشان می‌دهد که با افزایش قطر سوراخ مقاومت نهایی مقطع در وضعیت بدون پوشش و حالت محصور کاهش می‌یابد. هرچه قطر سوراخ بزرگتر باشد مقطع ضعیف‌تر خواهد بود. در ستون با سوراخ به قطر ۵۶ mm در حالت محوری افزایش مقاومت با سه لایه FRP حدود ۴۰٪، در قطر ۶۶ mm ۳۶٪ و در قطر ۷۶ mm و ۸۶ mm این نسبت به ۳۵٪ می‌رسد.

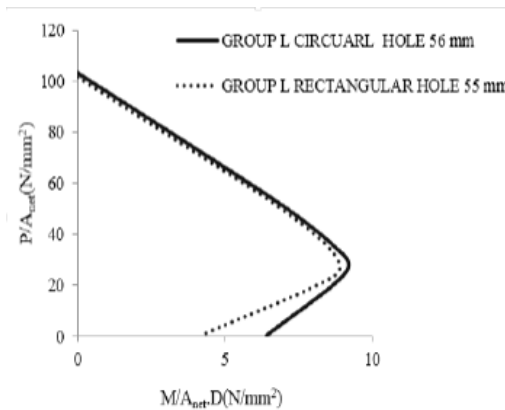


شکل ۷: مقایسه‌ی تأثیر تعداد لایه‌های پوشش در افزایش مقاومت در ستون دایره‌ای با سوراخ دایره‌ای با نسبت  $(R_1/R_e = 27\%)$

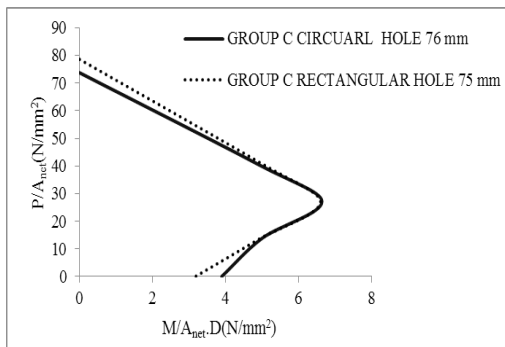
نتایج حاصل در شکل (۱۶) آمده است. مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهند یک لایه FRP در وضعیت خمشی افزایش مقاومت مطلوبی دارد.



شکل ۱۲: مقایسه‌ی شکل سوراخ در ستون دایره‌ای بدون پوشش ( $R_f/R_e = 27\%$ )



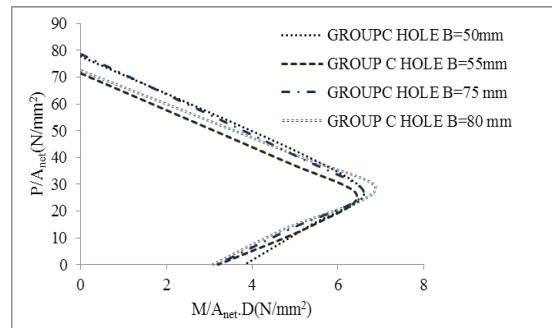
شکل ۱۳: مقایسه‌ی شکل سوراخ در ستون دایره‌ای با سه لایه پوشش ( $R_f/R_e = 27\%$ )



شکل ۱۴: مقایسه‌ی شکل سوراخ در ستون دایره‌ای بدون پوشش با نسبت ۳۷٪

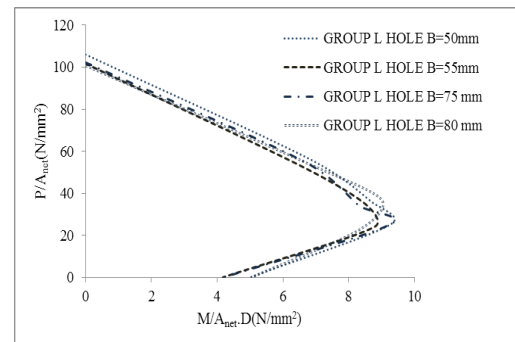
با وجود اینکه میزان افزایش مقاومت با یک و سه لایه نزدیک به هم است، اما در بارگذاری محوری افزایش مقاومت با یک لایه ۸٪ و سه لایه ۳۵٪ است. در خروج از مرکزیت‌های کم تأثیر سه لایه بیشتر از یک لایه است. در حالت محصورشده با پنج لایه نیز نسبت افزایش مقاومت در حالت خمشی در مقایسه با بارگذاری محوری بیشتر است. مطابق انتظار افزایش تعداد لایه‌ها به بیشتر از پنج لایه باعث افزایش مقاومت چشمگیری نمی‌شود. نه لایه نسبت به هفت لایه و هفت لایه نسبت به پنج لایه مقاومت ستون را در بارگذاری محوری ۲٪ افزایش می‌دهد.

افزایش مقاومت از بارگذاری محوری تا خمش خالص تقریباً یکسان است. در حالت بارگذاری محوری با افزایش ابعاد سوراخ مقاومت نهایی کاهش می‌یابد. اما در خمش خالص این روند متفاوت است، به طوری که مقاومت خمشی ستون دایره‌ای با سوراخ مربعی به طول ۸۰ mm از سوراخ‌های ۵۵ mm و ۷۵ mm بیشتر است. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) عملکرد دو ستون با سوراخ مربعی و دایره‌ای مقایسه شده است. نمودارها نشان می‌دهند ستون دایره‌ای با سوراخ دایره‌ای رفتار بهتری نسبت به ستون دایره‌ای با سوراخ مربعی دارد. شکل (۱۳) نشان می‌دهد که تفاوت ظرفیت باربری در حالت خمشی نسبت به بارگذاری محوری چشمگیرتر است و در خروج از مرکزیت‌های کم نوع سوراخ در میزان مقاومت ستون تأثیر کمی دارد. در خمش خالص ستون با سوراخ دایره‌ای ۵۰٪ بیشتر از ستون دایره با سوراخ مربعی مقاومت دارد.



شکل ۱۰: مقایسه‌ی ابعاد سوراخ مربعی در ستون دایره‌ای بدون پوشش

بر اساس شکل‌های (۱۴) و (۱۵) می‌توان به این نتیجه رسید که شکل سوراخ بیشتر در ظرفیت خمشی ستون مؤثر است. اما در بارگذاری محوری و خروج از مرکزیت‌های کوچک تفاوت زیادی در میزان مقاومت نهایی ایجاد نمی‌کند.



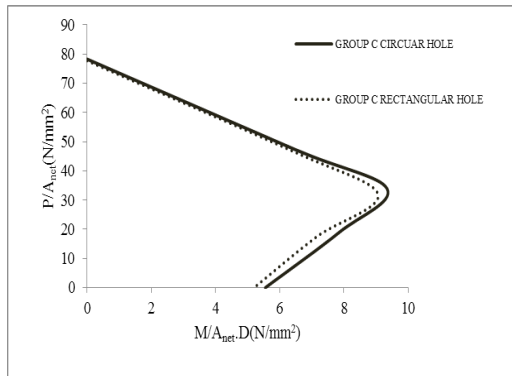
شکل ۱۱: مقایسه‌ی ابعاد سوراخ مربعی در ستون دایره‌ای با سه لایه پوشش

#### ۴-۲- ستون مربعی با سوراخ دایره‌ای

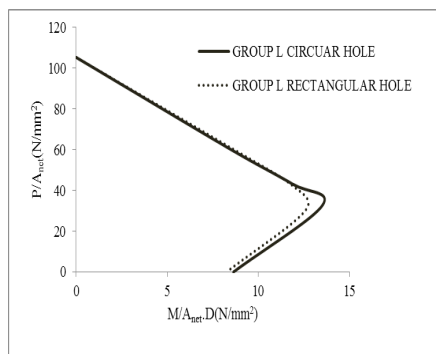
یک ستون مربعی به ابعاد ۱۸۲ mm طراحی شد که مساحتی معادل با ستون دایره‌ای دارد. آرایش میلگردها به گونه‌ای است که سطح مقطع فولادهای ستون مربعی و دایره‌ای برابر هستند. این ستون با سوراخ دایره‌ای بدون پوشش، با یک، سه، پنج، هفت و نه لایه پوشش FRP کربنی تحلیل شد.



در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) تأثیر شکل سوراخ در منحنی اندرکنش ستون مربعی نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود در بارگذاری محوری و خروج از مرکزیت کم شکل سوراخ تأثیر چندانی در مقاومت نهایی ندارد، اما در شرایط نزدیک به خمش ستون مربعی با سوراخ دایره‌ای عملکرد بهتری دارد.



شکل ۱۸: مقایسه‌ی تأثیر شکل سوراخ در مقاومت ستون مربعی بدون پوشش

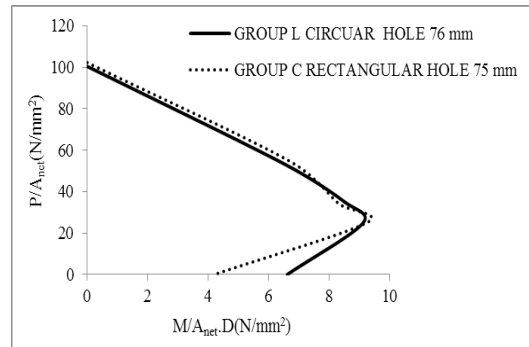


شکل ۱۹: مقایسه‌ی تأثیر شکل سوراخ در مقاومت ستون مربعی با سه لایه پوشش

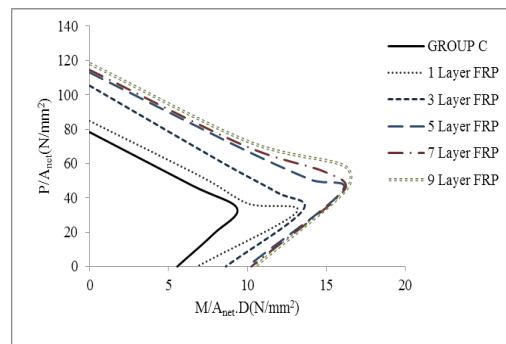
### ۵- نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل‌ها در این مطالعه نشان‌داد دورپیچی ستون‌های توخالی (دایره‌ای و مربعی) با FRP باعث افزایش ظرفیت باربری آن‌ها می‌شود. با افزایش تعداد لایه‌های FRP مقاومت ستون‌های توخالی افزایش می‌یابد. اما افزایش مقاومت متناسب با افزایش تعداد لایه‌ها نیست، یک لایه دورپیچی مقاومت را خیلی کم افزایش می‌دهد. با سه و پنج لایه پوشش، افزایش مقاومت قابل توجه است. افزایش تعداد لایه‌ها به بیش از پنج، تأثیر چشمگیری در روند افزایش مقاومت ندارد. یک لایه پوشش مقاومت محوری ستون‌ها را بین ۸٪ تا ۱۰٪، سه لایه بین ۳۰٪ تا ۴۰٪، پنج لایه بین ۴۰٪ تا ۵۳٪، هفت لایه بین ۴۳٪ تا ۵۷٪، نه لایه بین ۵۱٪ تا ۶۴٪ افزایش می‌دهد.

متغیر دیگری که در این مطالعه بررسی شد ابعاد سوراخ در ستون دایره‌ای بود. نتایج حاصل از تحلیل نشان داد با افزایش ابعاد سوراخ، مقاومت روند کاهشی دارد. اگر به جای سوراخ دایره‌ای در ستون، سوراخ مربعی تعبیه شود با افزایش ابعاد مربع انتظار می‌رود ظرفیت نهایی ستون‌ها



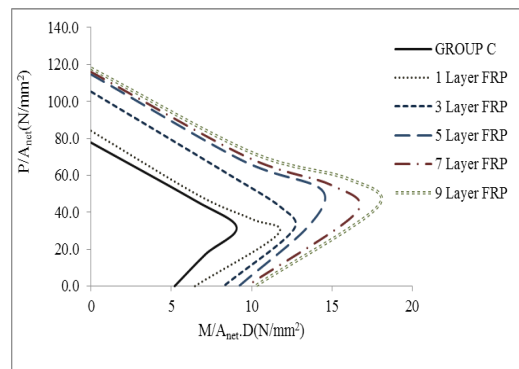
شکل ۱۵: مقایسه‌ی شکل سوراخ در ستون دایره‌ای با سه لایه پوشش FRP با نسبت ۳۷٪



شکل ۱۶: مقایسه‌ی تأثیر تعداد لایه‌های FRP در افزایش مقاومت در ستون مربعی با سوراخ دایره‌ای ( $R_f/R_c=30\%$ )

### ۴-۳- ستون مربعی با سوراخ مربعی

ستون مربعی در این مرحله با سوراخ مربعی مدل شد و با یک، سه، پنج، هفت و نه لایه پوشش FRP تحلیل شد که نتایج آن در شکل (۱۷) آمده‌است. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش مقاومت در خروج از مرکزیت‌های زیاد و خمش با یک و پنج لایه FRP به سه لایه نزدیک است. افزایش ظرفیت باربری محوری در یک و پنج لایه نسبت به وضعیت خمشی کمتر است. سه لایه FRP در تمامی وضعیت‌ها از بارگذاری محوری تا خمش افزایش مقاومت یکسانی دارند. هفت و نه لایه FRP در حالت محوری، خروج از مرکزیت کم و خمش خالص نتایجی نزدیک به پنج لایه دارند، ولی در خروج از مرکزیت‌های بیشتر تأثیر چشمگیرتری دارند.



شکل ۱۷: مقایسه‌ی تأثیر تعداد لایه‌های FRP در افزایش مقاومت در ستون مربعی با سوراخ مربعی با نسبت ( $R_f/R_c=30\%$ )

- [8] Spoelstra, M.R.; Monti, G.; "FRP-confined concrete model", J Compos, Constr, 33, pp: 143 – 150, 1999.
- [9] Toutanji, H.A.; Balaguru, P.; "Effects of freeze-thaw exposure on performance of concrete columns strengthened with advanced composites", ACI Mater J, 96(6), pp: 605 – 10, 1999.
- [10] Nanni, A.; Bradford, N.M.; "FRP jacketed concrete under uniaxial compression", Constr. Build, Mater, 92, pp: 115 – 124, 1995.
- [11] Mirmiran, A.; Shahawy, M.; "Behavior of concrete confined by fiber composites", J, Struct, Eng, 123 (5), pp: 583 – 590, 1997.
- [12] Fam, A.Z.; Rizkalla, S.H.; "Behavior of axially loaded concrete-filled fiber reinforced polymer tubes", ACI Struct, J, 9 (83), pp: 280 – 289, 2001.
- [13] Lignola, G.P.; Prota, A.; Manfredi, G.; Cosenza, E.; "Experimental Performance of RC Hollow Columns Confined with CFRP", J Compos Constr, 11(1), pp: 42 – 9, 2007.
- [14] Hadi, M.N.S.; "The behavior of FRP wrapped HSC columns under different eccentric loads", J Compos Struct, 78(4), pp: 560 – 566, 2007.
- [15] Xiao Y, Wu H. 2003. Compressive behavior of concrete confined by various types of FRP composites jackets. J Reinf Plast Compos; 22(13), pp: 1187 – 202.
- [16] Richart, F.E.; Brandtzaeg, A.; Prown, R.L.; "A study of the failure of concrete under combined compressive stress". Bulletin No 190, Engineering Experiment Station, University of Illinois, Urbana 1928; April, 73, 1928.
- [17] Karbhari, V.M.; Gao, Y.; "Composite jacketed concrete under uniaxial compression – verification of simple design equations". J Mater Civil Eng, 9(4), pp: 185 – 93, 1997.
- [18] ACI318, "Building code requirements for structural concrete", American Concrete Institute, USA, 2002.
- [19] "Australian Standards 3600, Concrete structures", Australian Standard, Australia 2001.
- [20] Lam, L.; Teng, J.G.; "Strength models for fiber-reinforced plastic-confined concrete". J Struct Eng, 128(5), pp: 612 – 22, 2002.
- [21] Kusumawardaningsih, Y.; Hadi, M.N.S.; "Comparative behavior of hollow columns confined with FRP composites", Compos Struct, doi, 10.1016, 2010.
- [22] Zahn, F.A.; Park, R.; and Priestley, M.J.N.; "Flexural

کاهش یابد. به جز در حالت بارگذاری با خروج از مرکزیت ۷۵ mm (که بار نهایی ستون با سوراخ مربعی به طول ضلع ۸۰ mm نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر است) نتایج حاصل، از روند مورد انتظار تبعیت می‌کند. در ستون‌های مربعی نیز مانند ستون‌های دایره‌ای با پوشش خارجی FRP عملکرد ستون بهبودی یابد. با افزایش تعداد لایه‌ها نیز مقاومت بیشتر می‌شود. در ستون‌های مربعی یک لایه دورپیچی برای خروج از مرکزیت ۷۵ mm نتایجی نزدیک به سه لایه دارد. سه و پنج لایه بهبود مقاومت منطقی داشته و افزایش مقاومت با حضور هفت و نه لایه چشمگیر نیست. افزایش مقاومت با هفت و نه لایه حدود ۵% بیشتر از پنج لایه است. در مقایسه‌ی شکل سوراخ نتایج حاصل نشان می‌دهد که ستون مربعی توخالی با سوراخ دایره‌ای خصوصاً در وضعیت خمشی رفتار بهتری دارد. می‌توان در کل به این نتیجه رسید ستون‌های توخالی با سوراخ دایره‌ای از لحاظ عملکرد مناسب‌تر هستند. با توجه به روابط ارائه شده که اثر تاثیرات محصورشدگی را نشان می‌دهد می‌توان گفت محصورشدن بتن، مقاومت فشاری آن را افزایش می‌دهد و افزایش مقاومت فشاری از حدی نمی‌تواند بالاتر برود که همان اثر تعداد لایه‌هاست.

## ۶- مراجع

- [۱] سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، نشریه شماره ۳۴۵، راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمان‌های بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP.
- [2] Hadi, M.N.S.; "Behavior of FRP wrapped normal strength concrete columns under eccentric loading", Composite Structures, 72, pp: 503-511, 2006.
- [3] Yazici, V.; Hadi, M.N.S.; "Axial Load-Bending Moment Diagrams of Carbon FRP Wrapped Hollow Core Reinforced Concrete Columns", JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION © ASCE / JULY/AUGUST, 2009.
- [4] Hsu, H.L.; Liang, L.L.; "Performance of hollow composite members subjected to cyclic eccentric loading", Earthq Eng Struct Dyn, 32, pp: 443 – 61, 2003.
- [5] Lignola, GP.; Prota, A.; Manfredi, G.; Cosenza, E.; "Deformability of reinforced concrete hollow columns confined with CFRP", ACI Struct J, 104(5), pp: 629 – 37, 2007.
- [6] Teng, J.G.; Chen, J.F.; Smith, S.T.; and Lam, L.; "FRP - strengthened RC structures", Wiley, West Sussex, U.K, 2002.
- [7] Samaan, M.; Mirmiran, A.; Shahawy, M.; "Model of concrete confined by fibre composite", J Struct Eng, 124 (9), pp: 1025 – 31, 1998.

- [27] Yuan, X.F.; Lam, L.; Teng, J.G.; Smith, S.T.; “FRP-confined RC columns under combined bending and compression: a comparative study of concrete stress – strain models”, FRP Composites in Civil Engineering; I, pp: 749 – 58, 2001.
- [28] Ozbakkaloglu, T.; Saatcioglu, M.; “Seismic Performance of Square High-Strength Concrete Columns in FRP Stay - in - Place Formwork”, Journal of Structural Engineering © ASCE, 2007.
- [29] Lignola, G.P.; Prota, A.; Manfredi, G.; Cosenza, E.; “Experimental Performance of RC Hollow Columns Confined with CFRP”, J Compos Constr, 11(1), pp: 42 – 9, 2007.
- [30] Jankowiak, T.; Lodygowski, T.; “Identification of Parameters of Concrete Damage Plasticity Constitutive model” oзнzn University of Technology, Poznan 2005, ISSN 1642 - 9303.
- strength and ductility of circular hollow reinforced concrete columns without confinement on inside face”, ACI Struct, J, 8(72), pp: 156 – 166, 1990.
- [23] William, K.J.; Warnke, E.P.; “Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. IABSE Proc”, Int, Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, 1975.
- [24] Mander, J.B.; Priestley, M.J.N.; and Park, R.; “Theoretical stress-strain model for confined concrete”, J, Struct, Eng, 114 (8), pp: 1804 –1826, 1988.
- [25] Darwin, D.; Pecknold, D.A.; “Analysis of cyclic loading of plane reinforced concrete structures”. Comput. Struct, 71, pp: 137 – 147, 1977.
- [26] Popovics, S.; “A numerical approach to the complete stress-strain curves of concrete”, Cem, Concr, Res, 35, pp: 583 – 599, 1973.