

## تأثیر محصورشدگی با FRP بر منحنی اندرکنش نیروی محوری - لنگر خمشی ستون‌های بتن مسلح - کد B

محمدحسین قدیری‌راد<sup>۱</sup>، حمیدرضا کاظمی<sup>۲</sup>، محمدرضا توکلی‌زاده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد زلزله، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

## چکیده

امروزه یکی از متداول‌ترین روش‌های تقویت ستون‌های بتن مسلح به منظور به‌سازی عملکرد سازه‌ای آن، محصور نمودن خارجی ستون توسط پلیمرهای مسلح با الیاف (FRP) می‌باشد. بتن تحت فشار تمایل به اتساع جانبی پیدا می‌کند و دورپیچ FRP با ایجاد تنش محصورشدگی، ظرفیت فشاری و شکل‌پذیری ستون را افزایش می‌دهد. مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی بتن محصورشده با دورپیچ‌های FRP پیشنهاد شده است که بسیاری از آن‌ها امروزه در آیین‌نامه‌های طراحی به کار رفته‌اند.

در این مقاله ضمن مرور این مدل‌ها، تأثیر محصورشدگی با دورپیچ FRP بر منحنی اندرکنش نیروی محوری - لنگر خمشی ستون بتن مسلح مورد بررسی قرار می‌گیرد. نخست، مدل‌سازی عددی اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی موجود و سپس با مدل‌های مختلف مقایسه شده و مناسب‌ترین مدل گزیده می‌شود. با توجه به نمودارهای اندرکنش بار محوری - لنگر خمشی ستون‌های دورپیچ شده و بررسی دقیق مدل برتر می‌توان دریافت که ظرفیت در نسبت‌های کم خروج از محوریت، کم‌تر از مقادیر آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌شوند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش نسبت خروج از محوریت، ظرفیت باربری نهایی ستون‌های محصور شده با دورپیچ‌های FRP را به میزان بیشتری نسبت به ستون‌های دورپیچ نشده کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: محصورشدگی، ستون بتن مسلح، نمودار اندرکنش، دورپیچ FRP، تحلیل عددی

## ۱- پیشگفتار

تحقیقات فراوانی در سه دهه‌ی اخیر نشان داده‌است تقویت و به‌سازی ستون‌های بتنی موجود با غلاف‌های FRP، می‌تواند ظرفیت باربری ستون را افزایش دهد. بیشتر آزمایش‌های انجام گرفته روی ستون‌های بتنی محصورشده با FRP مربوط به ستون‌های غیرمسلح، استوانه‌ای، کوتاه، تحت بار یکنواخت بدون خروج از محوری و در مقیاس کوچک می‌باشد. قابلیت ستون‌های بتن آرمه (RC) محصورشده با دورپیچ FRP با الیاف در جهت مماسی برای مقاومت در برابر بارهای با خروج از محوری در چندین پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌است. با این وجود سازوکار محصورشدگی در حضور یک گرادیان کرنشی، تأثیرات لاغری ستون و تغییر شکل‌های مرتبه دوم کمتر شناخته شده‌است و نیاز به مطالعه‌ی بیشتری دارد [۱].

پروین و وانگ در سال ۲۰۰۱ رفتار اعضای بتنی غیرمسلح منشوری تحت بار دارای خروج از محوری را مورد بررسی قرار دادند [۲]. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که گرادیان کرنشی ناشی از خروج از محوری تا ۰/۱۵ عرض ستون می‌تواند تأثیر محصورشدگی با دورپیچ FRP را به میزان ۲۰٪ کاهش دهد.

مادوی در سال ۲۰۰۸ قابلیت استفاده از FRP در بهبود رفتار ستون‌های RC آسیب دیده در اثر خوردگی کوتاه‌مدت تحت بار دارای خروج از محوری را به دو صورت مقطعی و کاملاً پیچیده شده مورد بررسی قرار داد [۳].

پژوهش‌گران دیگری روش‌هایی برای دست‌یابی به دیاگرام تداخلی و طراحی ستون‌های محصورشده ارائه داده‌اند. این روش‌ها عموماً با استفاده از یک تحلیل مقطعی ساده و با فرض این‌که پاسخ تنش - کرنش بتن محصورشده همان مدل‌های تنش - کرنش تجربی به‌دست آمده از تست‌های سیلندر محصور شده با FRP باشد، صورت می‌پذیرد [۴]. جیانگ در سال ۲۰۰۸ در

یک گردآوری جامع از تحقیقات انجام گرفته پیشنهاد می‌کند آزمایشات بیشتری برای تعیین نحوه توزیع تنش‌ها در مقطع ستون، فشار محصورشدگی در پیرامون مقطع و اثر محصورشدگی بر ظرفیت کمانشی میلگردهای طولی برای تأیید این مدل‌ها مورد نیاز است [۵].

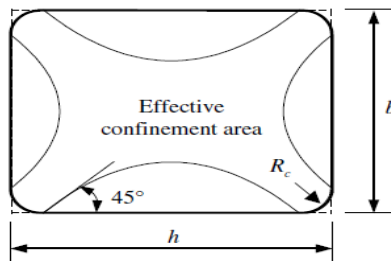
## ۲- روش‌های مختلف مدل‌سازی بتن محصورشده

در یک مقطع دایره‌ای شکل، فشار محصورشدگی در محیط دایره ثابت فرض می‌گردد. بیشینه‌ی فشار محصورشدگی زمانی روی می‌دهد که دورپیچ FRP گسیخته گردد. بر پایه‌ی این فرضیات و با توجه به شکل (۱- الف) بیشینه فشار محصورشدگی قابل محاسبه است.

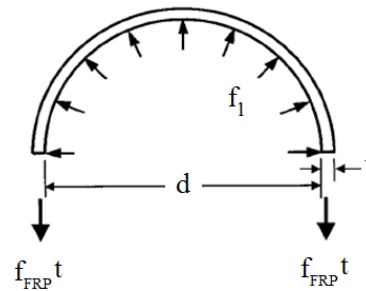
$$f_l = \frac{2\sigma_j t}{d} = \frac{2E_{FRP}\sigma_j t}{d} \quad (1)$$

نکته‌ی قابل توجه این است که کرنش در لحظه گسیختگی FRP عموماً به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از کرنش بدست آمده از آزمایش نمونه کشش مستقیم است. برای بهبود مدل محصورشدگی پسیکی و همکاران پیشنهاد دادند که باید  $\varepsilon_j$  برابر با کرنش گسیختگی حقیقی FRP در نظر گرفته شود.

$$\varepsilon_j = \varepsilon_{h,rupt} = k_\varepsilon \varepsilon_{FRP} \quad (2)$$



ب: ناحیه محصورشدگی مؤثر در مقاطع مستطیلی



الف: تنش محصورشدگی در مقاطع دایره‌ای

شکل ۱- محصورشدگی در مقاطع مستطیلی و دایره‌ای شکل

مقدار  $k_\varepsilon$  بر حسب نوع FRP متفاوت است. تنگ و لام بر اساس تحلیل تعداد زیادی داده‌های آزمایشگاهی مقدار میانگین  $k_\varepsilon = 0.586$  را برای CFRP پیشنهاد دادند [۶].

در مقاطع مستطیلی چون در گوشه‌ها تمرکز تنش ایجاد می‌گردد، تنش محصورشدگی غیریکنواخت خواهد بود. مطالعات انجام گرفته روی بتن محصور شده به این پیشنهاد منجر شده است که تنها بتن محدود به چهار سهمی (شکل ۱- ب) کاملاً محصورشده است و محصورشدگی خارج از این ناحیه قابل چشم‌پوشی می‌باشد و این اصل با استفاده از تحلیل اجزای محدود ثابت شده است [۷]. مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن محصورشده با دورپیچ FRP در ستون‌های مستطیلی با گوشه‌های گرد شده وجود دارد. در این مقاله چهار مدل میرمیران و همکاران، مدل کمیته ۴۴۰ انجمن بتن آمریکا (440 ACI)، مدل میراجیلا - کمیونی، مدل رستریپول-دوینو و مدل تنگ - لام مورد بررسی قرار می‌گیرد [۶]. در این مدل‌ها با تعریف ستون دایره‌ای معادل و اعمال ضرایب مختلف، از همان روابط ستون‌های دایره‌ای شکل برای ستون‌های مستطیلی بهره جویی می‌شود.

برای مقاطع مستطیل شکل فشار محصورشدگی مؤثر ( $f'_l$ ) با استفاده از رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$f'_l = k_s f_l \quad (۳)$$

در این رابطه  $k_s$  ضریب شکل است که اثر محصورشدگی غیریکنواخت را وارد تحلیل می‌کند. همچنین اگر مقاومت فشاری بتن محصورنشده  $f'_{c0}$  باشد، نسبت محصورشدگی مؤثر بتن توسط FRP به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MCR = \frac{f'_l}{f'_{c0}} \quad (۴)$$

## ۲-۱- مدل میرمیران و همکاران

در این مدل، ضریب شکل ( $k_s$ ) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k_s = \frac{2R_c}{D} \quad (۵)$$

در این رابطه  $R_c$  شعاع انحنای گوشه‌های مقطع و  $D$  قطر ستون دایره‌ای معادل است که در این مدل برابر با طول ضلع بزرگ مقطع مستطیلی در نظر گرفته می‌شود. آنها همچنین تنش اسمی گسیختگی FRP در جهت محیطی ( $\sigma_j$ ) را برابر با مقاومت کششی نهایی ( $f_{FRP}$ ) در نظر گرفتند. بر اساس این مدل، برای نسبت‌های محصورشدگی مؤثر بزرگتر از ۰/۱۵، مدل سامان و همکاران برای بتن محصور شده یکنواخت را می‌توان برای پیش‌بینی پاسخ تنش- کرنش ستون‌های مستطیلی محصورشده به کار برد با این تفاوت که تنش محصورشدگی با تنش محصورشدگی مؤثر جایگزین گردد [۸]:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + k_1 \frac{f'_l}{f'_{c0}}, \quad k_1 = 6 f'_l^{-0.3} \quad (۶)$$

## ۲-۲- مدل کمیته ۴۴۰ انجمن بتن امریکا (ACI)

در مدل پیشنهادی ACI ضریب شکل به صورت نسبت ناحیه‌ی محصورشدگی مؤثر به کل سطح مقطع بتن تعریف می‌گردد. بر پایه‌ی این تعریف و با توجه به شکل (۱) ضریب شکل از رابطه‌ی (۷) قابل محاسبه است:

$$k_s = \frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - [(b - 2R_c)^2 + (h - 2R_c)^2 / 3A_g] - \rho_{sc}}{1 - \rho_{sc}} \quad (۷)$$

که در آن  $A_g$  مساحت کل مقطع با گوشه‌های گردشده و  $\rho_{sc}$  نسبت فولادهای طولی در مقطع ستون می‌باشد. ستون دایره‌ای معادل نیز به نحوی تعریف می‌شود که نسبت حجمی FRP مقطع (نسبت مساحت به محیط) در مقطع مستطیلی و دایره‌ای معادل یکسان باشد.

$$D = \frac{2bh}{b + h} \quad (۸)$$

در این روش کرنش گسیختگی اسمی FRP در جهت محیطی ( $\epsilon_j$ )، برابر با کرنش مؤثر ( $\epsilon_{fe}$ ) (کرنش نهایی عضوی که تحت فشار و برش همزمان قرار دارد)، فرض می‌گردد:

$$\varepsilon_j = \varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75\varepsilon_{FRP} \quad (9)$$

با در نظر گرفتن این فرضیات، مقاومت فشاری بتن محصور شده با استفاده از رابطه مندر و همکاران که در اصل برای بتن محصور شده با فولاد پیشنهاد شده است، به دست می‌آید [۷]:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f'_l}{f'_{c0}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{c0}}} - 1.254 \quad (10)$$

ACI همچنین رابطه‌ای برای پیش بینی کرنش محوری بتن ( $\varepsilon_{cu}$ )، به صورت زیر پیشنهاد داده است:

$$\varepsilon_{cu} = \frac{1.71(5f'_{cc} - 4f'_{c0})}{E_c} \quad (11)$$

### ۲-۳- مدل میراجیلا - کمیونی

این مدل تنها برای ستون‌های با مقطع مربعی کاربرد دارد. فاکتور شکل مطابق رابطه‌ی (۷) و قطر ستون دایره‌ای معادل برابر با طول ضلع مربع فرض می‌گردد. این پژوهشگران رابطه‌ی (۱۲) را برای رابطه‌ی تنش گسیختگی اسمی محیطی با مقاومت کششی ماده FRP پیشنهاد دادند:

$$\sigma_j = f_{FRP} \left[ \left( 1 - \frac{\sqrt{2}}{2} k_i \right) \frac{2R_c}{b} + k_i \frac{\sqrt{2}}{2} \right] \quad (12)$$

در این رابطه  $k_i$  ضریب کاهش تنش تخمینی آزمایشگاهی است و برابر با ۰/۲۱۲۱ پیشنهاد شده است. در این صورت مقاومت فشاری و کرنش محوری نهایی بتن محصورشده با FRP (بر اساس روش تعادل انرژی مندر) از روابط زیر حاصل می‌گردد:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + k_1 \frac{f'_l}{f'_{c0}}, \quad k_1 = 2 \quad (13)$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + \rho_{FRP} \frac{1}{\varepsilon_{c0} E_{FRP} f'_{c0} + f'_l}, \quad \rho_{FRP} = \frac{2[2(b - 2R_c) + \pi R_c]t}{b^2 - (4 - \pi)R_c^2} \quad (14)$$

که در آن  $\rho_{FRP}$  نسبت حجمی FRP برای مقطع مربعی است.

### ۲-۴- مدل رسترپول - دوینو

اساس این مدل بر پایه‌ی روش مندر و همکاران برای ستون‌های مستطیلی محصورشده با فولاد می‌باشد [۷]. در این مدل بر خلاف سایر مدل‌ها، مقاومت فشاری بتن در داخل و خارج ناحیه‌ی محصورشدگی مؤثر به طور مجزا محاسبه و در نهایت میانگین مقاومت فشاری بتن از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + k_s(k_c - 1) \quad (۱۵)$$

در این رابطه  $k_s$  همان ضریب شکل رابطه (۷) می‌باشد و  $k_c$  برابر است با:

$$k_c = \alpha_1 \alpha_2 \quad (۱-۱۶)$$

$$\alpha_1 = 1.25 \left( 1.8 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_{l,x}}{f'_{c0}}} - 1.6 \frac{f_{l,x}}{f'_{c0}} - 1 \right) \quad (۲-۱۶)$$

$$\alpha_2 = \left( 1.4 \frac{f_{l,y}}{f_{l,x}} - 0.6 \left( \frac{f_{l,y}}{f_{l,x}} \right)^2 - 0.8 \right) \sqrt{\frac{f_{l,x}}{f'_{c0}}} + 1 \quad (۳-۱۶)$$

در این روابط  $f_{l,y}$  و  $f_{l,x}$  به عنوان فشارهای محصور شدگی جانبی در دو جهت متعامد  $x$  و  $y$  می‌باشد و می‌توان آن را به صورت فشار محصورشدگی در ستون‌های دایره‌ای معادل با قطرهایی برابر با عرض ( $b$ ) و عمق مستطیل ( $h$ ) تعریف نمود:

$$f_{l,x} = 2 \frac{t}{b} E_{FRP} \varepsilon_j, \quad f_{l,y} = 2 \frac{t}{h} E_{FRP} \varepsilon_j, \quad \varepsilon_j = 0.5 \varepsilon_{cc} \quad (۱۷)$$

در رابطه بالا،  $\varepsilon_{cc}$  کرنش محوری بتن محصورشده در حد نهایی مقاومت است.

## ۲-۵- مدل تنگ - لام

تنگ و لام با انجام آزمایش‌های بسیاری و با استفاده از نتایج آزمایش‌های دیگر پژوهشگران مدل جدیدی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری، کرنش محوری نهایی و منحنی تنش-کرنش بتن محصورشده با دورپیچ FRP ارائه کردند. در این مدل از همان روابط مربوط به بتن محصورشده یکنواخت با اصلاحاتی در روابط مقاومت فشاری و کرنش محوری نهایی استفاده می‌گردد. بر این پایه، مقاومت فشاری و کرنش نهایی محوری بتن محصور شده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + k_1 k_{s1} \frac{f_l}{f'_{c0}} \quad (۱۸)$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{c0}} = 1.75 + k_2 k_{s2} \frac{f_l}{f'_{c0}} \left( \frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{c0}} \right)^{0.45} \quad (۱۹)$$

در این روابط  $f_l$  فشار محصورشدگی در ستون دایره‌ای معادل و  $k_{s1}$  و  $k_{s2}$  ضرایب شکل می‌باشند. قطر ستون دایره‌ای معادل برابر با قطر ستون مستطیلی در نظر گرفته می‌شود.

$$D = \sqrt{h^2 + b^2} \quad (۲۰)$$

نسبت محصورشدگی با تغییر نسبت ابعاد، تغییر می‌کند اما اثر نسبت ابعاد تنها با تعریف ضریب شکل به طور کامل در روابط بازتاب نمی‌گردد. نتایج آزمایشگاهی این نکته را اثبات می‌کند که با افزایش نسبت ابعاد ( $b/h$ )، مقاومت فشاری کاهش، اما

کرنش نهایی افزایش می‌یابد. در این مدل دو ضریب شکل  $k_{s1}$  و  $k_{s2}$  یکی برای کاهش مقاومت و دیگری برای افزایش کرنش محوری به ازای افزایش نسبت ابعاد، به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$k_{s1} = \left(\frac{b}{h}\right)^\alpha \frac{A_e}{A_c}, \quad k_{s2} = \left(\frac{h}{b}\right)^\beta \frac{A_e}{A_c} \quad (21)$$

آنها با بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش دریافتند که با فرض  $\alpha = 2, \beta = 0.5$  و  $k_1 = 3.3$  و  $k_2 = 12$  نتایج نسبتاً دقیقی به دست می‌آید.

در جدول (۱) پنج روش مختلف پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن محصور شده به صورت خلاصه ارائه شده است. با مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌های مختلف که بوسیله پژوهشگران مختلف انجام شده ملاحظه می‌گردد که مدل پیشنهادی تنگ - لام بیشترین همخوانی را با نتایج آزمایشگاهی دارد.

جدول ۱- مقایسه روش‌های مختلف تخمین مقاومت فشاری بتن محصور شده

مدل	$k_s$	$D$	$\sigma_j$ یا $\varepsilon_j$	$f'_{cc}/f'_{c0}$	$\varepsilon_{cu}/\varepsilon_{c0}$
میرمیران	$\frac{2R_c}{D}$	$h$	$\sigma_j = f_{FRP}$	$1 + k_1 \frac{f'_l}{f'_{c0}}$	---
کمیته ۴۴۰	$\frac{A_e}{A_c}$	$\frac{2bh}{b+h}$	$\varepsilon_j = 0.004 \leq 0.75\varepsilon_{FRP}$	$2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f'_l}{f'_{c0}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{c0}} - 1.254$	$\frac{1.71(5f'_{cc} - 4f'_{c0})}{E_c \varepsilon_{c0}}$
میراجبلا - کمپیونی	$\frac{A_e}{A_c}$	$b$	$\sigma_j = f_{FRP} \left[ \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} k_i\right) \frac{2R_c}{b} + k_i \frac{\sqrt{2}}{2} \right]$	$1 + k_1 \frac{f'_l}{f'_{c0}}$	$1 + \rho_{FRP} \frac{1}{\varepsilon_{c0}} \frac{\sigma_j^2}{E_{FRP} f'_{c0} + f'_l}$
رستریپول - دوینو	$\frac{A_e}{A_c}$	$h, b$	$\varepsilon_j = 0.5\varepsilon_{cc}$	$1 + k_s(k_c - 1)$	---
تنگ - لام	$\frac{A_e}{A_c}$	$\sqrt{h^2 + b^2}$	$\varepsilon_j = \varepsilon_{h,rup}$	$1 + k_1 k_{s1} \frac{f_l}{f'_{c0}}$	$1.75 + k_2 k_{s2} \frac{f_l}{f'_{c0}} \left(\frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{c0}}\right)^{0.45}$

### ۳- نمودار تنش - کرنش بتن محصور شده با دورپیچ FRP

تنگ و لام بر اساس تفسیر تعداد زیادی داده آزمایشگاهی و براساس فرضیات زیر یک مدل طراحی برای منحنی تنش - کرنش بتن محصور شده ارائه دادند.

(۱) منحنی تنش - کرنش از یک قسمت سهمی و یک قسمت خطی مطابق شکل (۳) تشکیل شده است.

(۲) شیب ابتدای منحنی سهمی شکل همان مدول الاستیسیته بتن محصور نشده ( $E_c$ ) می‌باشد.

(۳) قسمت سهمی به صورت نرم به بخش خطی اتصال پیدا می‌کند (شیب سهمی و خط در نقطه برخورد یکی است).

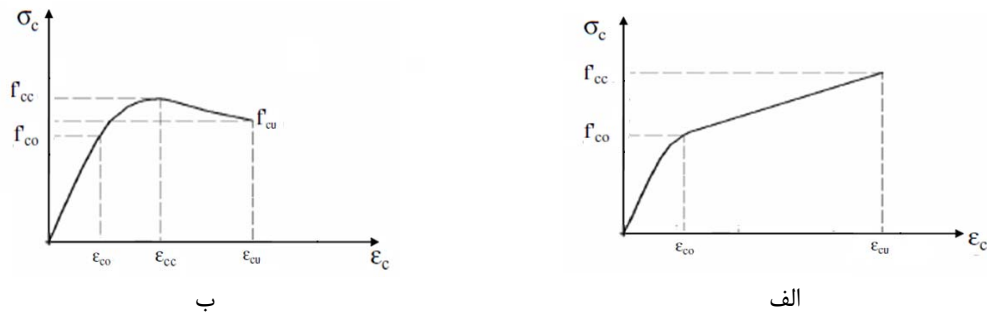
(۴) بخش دوم (خطی) در نقطه‌ای که بتن به حد نهایی مقاومت برسد، پایان می‌یابد.

(۵) کرنش محوری نهایی در حد نهایی مقاومت اتفاق می‌افتد.

(۶) در نسبت‌های محصورشدگی مؤثر کمتر از ۰/۰۷ نباید افزایش مقاومت فشاری قابل ملاحظه‌ای را انتظار داشت. مطابق شکل

(۲) محصور شدگی بالاتر از این میزان افزایش یکنواخت منحنی تنش - کرنش (بدون شاخه کاهشی) را تضمین می‌کند.

(۷) برای سادگی کار نقطه تقاطع بخش خطی منحنی با محور تنش‌ها ( $f_0$ ) برابر با مقاومت فشاری بتن محصور نشده ( $f'_{c0}$ ) در نظر گرفته می‌شود.



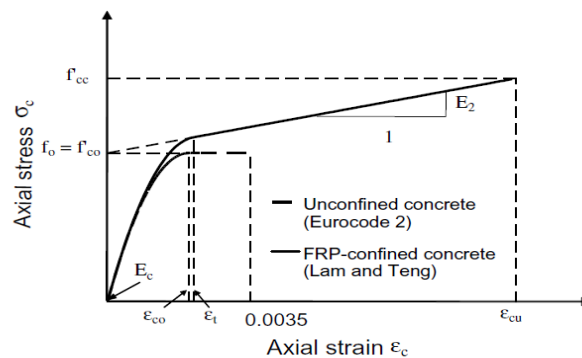
شکل ۲- منحنی تنش - کرنش در حالت محصور شدگی (الف) مناسب و (ب) نامناسب

بر این پایه رابطه تنش - کرنش بتن محصور شده با FRP به صورت زیر خواهد بود:

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_{c0}} \varepsilon_c^2 & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t \\ f'_{c0} + E_2 \varepsilon_c & \varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (22)$$

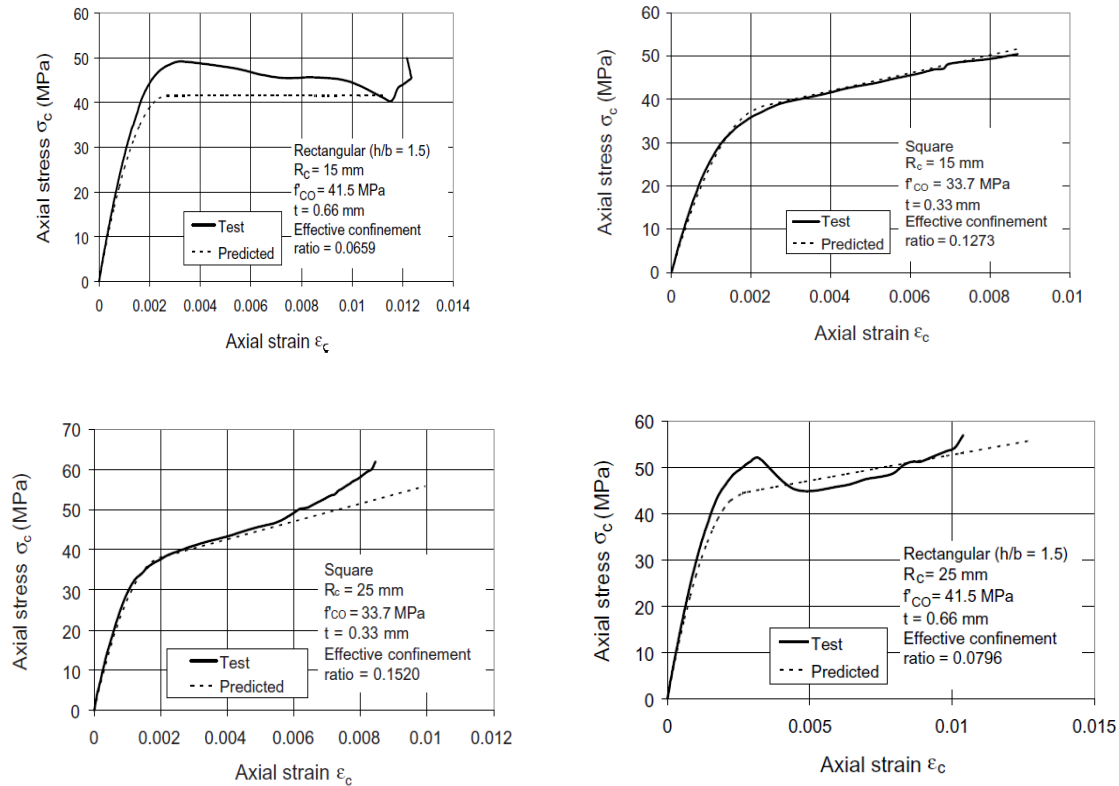
در این رابطه کرنش محوری و شیب قسمت خطی منحنی است که از روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_{c0}}{\varepsilon_{cu}} \quad , \quad \varepsilon_t = \frac{2f'_{c0}}{E_c - E_2} \quad (23)$$



شکل ۳- مدل تنگ - لام برای منحنی تنش - کرنش بتن محصورشده [۶]

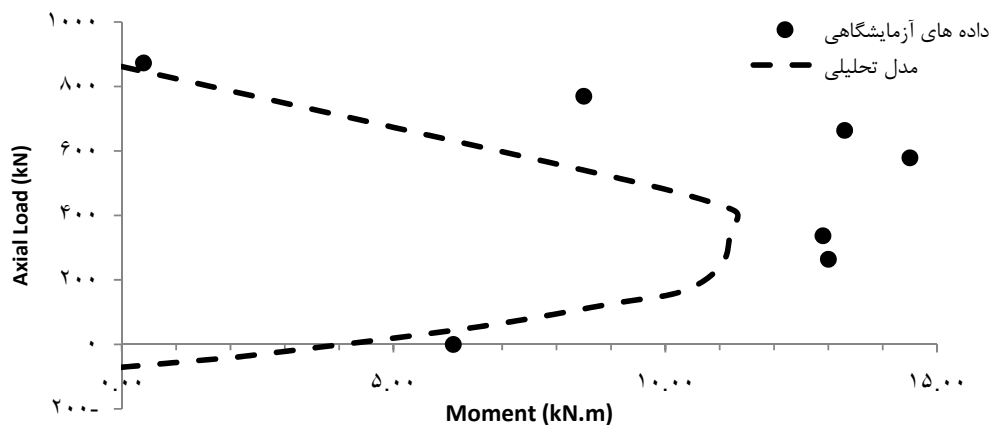
در شکل (۴) برای چهار ستون مستطیل و مربع شکل مقایسه بین منحنی‌های تنش - کرنش بین نتایج آزمایشگاهی و پیش‌بینی انجام گرفته با مدل پیشنهادی تنگ - لام صورت گرفته است. در نمونه‌هایی که نسبت محصورشدگی آن‌ها کمتر از ۰/۰۷ است بخش دوم منحنی تنش - کرنش به صورت یک خط افقی و بدون هیچ‌گونه افزایش مقاومتی فرض شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌گردد مدل پیشنهادی تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۴- مقایسه نتایج تئوری و آزمایشگاهی منحنی تنش - کرنش بتن محصورشده [۶]

## ۴- دیاگرام اندرکنش نیرو - لنگر (P-M)

در این مقاله تحلیل مقطع ستون بر اساس مدل پیشنهادی تنگ - لام و با استفاده از نرم افزار SAP2000 انجام می‌گیرد. برای بررسی صحت مدل تحلیلی، نتایج آزمایشگاهی ۱۴ نمونه که توسط بی‌زی و رنجر گزارش شده است (با نسبت به مرکز و با خروج از محوریت‌های متفاوت) مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج با مقادیر تحلیلی مقایسه می‌گردد [۹]. نمونه‌ای از نتایج در شکل (۷) آورده شده است.



شکل ۵- مقایسه نتایج تئوری و آزمایشگاهی دیاگرام داخلی بتن محصورشده



با توجه به این شکل ملاحظه می‌گردد نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی با هم اختلاف دارند. برخی از دلایلی که برای توجیه این اختلافها می‌توان ذکر کرد عبارتست از:

- (۱) رابطه بین کرنش مماسی و محوری در حضور گرا دیان کرنش تغییر می‌کند و استفاده از دیاگرام تنش - کرنش استوانه‌های تحت بار محوری خالص برای ستون‌های دارای خروج از محوری صحیح نیست.
- (۲) در ستون‌های تحت بار دارای خروج از محوریت، به علت تنش‌های دومحوره ایجاد شده در FRP از اثر محصور شدگی کاسته می‌شود.
- (۳) در ستون‌های با بار خارج از محوراتساع جانبی در مقطع بتن غیر یکنواخت است و توزیع تنش در FRP به صورت غیر یکنواخت می‌باشد.
- (۴) بتن محصورشده می‌تواند یک محصورشدگی گسترده جانبی برای فولادهای طولی ایجاد کرده و ظرفیت باربری آن را افزایش می‌دهد که این نکته در مدل‌ها در نظر گرفته نمی‌شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری:

در این پژوهش، نخست مدل‌های مختلف مقاومت فشاری و کرنش محوری نهایی بتن محصورشده با FRP در مقاطع مستطیلی مورد بررسی قرار گرفت. تمامی مدل‌های پیشنهادی نیاز به تعریف ستون دایره‌ای معادل، کرنش یا تنش گسیختگی اسمی مصالح FRP و ضرایب شکل دارند، اگرچه جزئیات آنها بام تفاوت است. با مقایسه این مدل‌ها با مقادیر آزمایشگاهی ملاحظه می‌گردد که مدل تنگ - لام بیشترین همخوانی را با نتایج آزمایشگاهی دارد. سپس به مقایسه نتایج مدل پیشنهادی تنگ - لام برای پیش‌بینی منحنی تنش - کرنش بتن محصور شده با نتایج آزمایشگاهی پرداخته شد. این مقایسه نشان داد پیش‌بینی‌ها با نتایج آزمایشگاهی مطابقت مناسبی دارد. در پایان، نتایج آزمایش‌های بیزی و رنجر برای ستون‌های دایره‌ای شکل مورد بررسی قرار گرفت و نمودار اندرکنش به دست آمده از آنالیز مقطع ستون به روش تنگ - لام و با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و دقت آنها مناسب ارزیابی گردید. همچنین بر پایه این نمودارها مشخص شد مزیت محصورشدگی با دورپیچ FRP به سرعت برای نمونه‌های تحت بارگذاری برون محوری کاهش می‌یابد. در نتیجه این موضوع که دیاگرام اندرکنشی پیشنهادی کمیته ۴۴۰ ACI تنها نقاط بالای نقطه تعادلی را می‌پذیرد، منطقی به نظر می‌رسد.

#### ۶- مراجع:

- [1] Fitzwilliam J. and Bisby L., 2006 "Slenderness effects on circular FRP wrapped reinforced concrete columns." International Conference on FRP Composite in Civil Engineering, Miami, FL.
- [2] Parvin A. and Wang W., 2001 "Behavior of FRP jacketed concrete columns under eccentric loading." ASCE, Journal of Composite for Construction, Vol. 5, No. 3, pp. 146-152.
- [3] Maaddawy T.E., 2008 "Behavior of corrosion-damaged RC columns wrapped with FRP under combined flexural and axial loading." Cement & Concrete Composites, Vol. 30, pp. 524-534.
- [4] Ghali K., Rizkalla S., Kassem M., Fawzy T. and Mahmoud M., 2003 "FRP confined circular columns under small eccentric loading". 5<sup>th</sup> International Conference on Structural and Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt.
- [5] Jiang T., 2008 "FRP confined RC columns: analysis, behavior and design." Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Structural Engineering. Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.

- [6] Lam L. and Teng J.G., 2003 "*Design-oriented Stress-Strain Model for FRP-confined Concrete in Rectangular Columns.*" Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 22, No. 13, pp. 1149-1186.
- [7] Mander J.B., Priestly M.J.N. and Park R., "*Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete.*" ASCE, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
- [8] Samman M., Mirmiran A. and Shahawy M., 1998 "*Model of Concrete Confined by Fiber Composites.*" ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No. 9, pp. 1025-1031.
- [9] Bisby L. and Ranger M., 2010 "*Axial-flexural interaction in circular FRP-confined reinforced concrete columns.*" Journal of Construction and Building Materials, Vol. 24, pp. 1672-1681.