

توسعه مدل رفتار محوری تنش - کرنش بتن محصور شده با آرماتورهای فولادی به بتن محصور شده با کامپوزیت FRP براساس تئوری پلاستیسیته

حمزه حاجیلو^۱، عبدا..حسینی^۲
گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران
Hamzehaji@ut.ac.ir

خلاصه

در ستون های بتنی مسلح با آرماتورهای فولادی که برای مناطق با لرزه خیزی کم و متوسط طراحی شده اند و همچنین برای سازه های قدیمی، فواصل زیاد آرماتورهای عرضی و تنگ ها باعث کمانه کردن آرماتورهای طولی و فروپاشی زودرس بتن می شود. روش های مختلفی برای مقاوم سازی این ستون ها ارائه شده است که از جمله آنها می توان به استفاده از FRP در دور ستون اشاره کرد. مدل های ارائه شده برای رفتار تنش - کرنش بتن محصور شده با آرماتورهای فولادی در مورد بتن محصور شده با FRP بر پایه تئوری پلاستیسیته توسعه داده شده است و نتایج بدست آمده مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: آرماتورهای فولادی، دورگیری، کامپوزیت FRP، تئوری پلاستیسیته

مقدمه

در مناطق با لرزه خیزی شدید برای ستون های بتنی مسلح، آرماتورهای عرضی در حجم نسبتا بالا بکار رفته است تا کرنش های جانبی و بازشدگی بتن را محدود کرده و در مقابل نیروهای فشاری و تنش های برشی مقاومت مناسب به همراه کرنش پذیری بیشتر ایجاد کنند. با کمک این تنگ ها و دورگیری حاصل از آنها شکست ستون به تاخیر افتاده و رفتار ستون تحت بارهای لرزه ای شکل پذیرتر می شود. بر خلاف حالت ذکر شده، زمانی که ستون ها فقط برای تحمل بارهای قائم طراحی شده باشند تنگ های فولادی در فواصل زیاد آرایش یافته اند که در نتیجه آن مقاومت کمی در برابر انبساط جانبی بتن و تنش های برشی از خود نشان می دهد. برای اهداف مقاوم سازی ستون های بتنی، کامپوزیت FRP علاوه بر موارد فوق، ظرفیت برشی اضافی برای جلوگیری از گسیختگی برشی قطری ستون ایجاد می کند. همچنین این الیاف در ناحیه مفاصل خمشی دورگیری بیشتری برای جلوگیری از خرابی بتن ایجاد می کند و ضعف ستون ها در محل وصله های آرماتورهای فولادی را بهبود می بخشد. در سال های اخیر و با توجه به حملات تروریستی استفاده از پوشش FRP روی ستون ها برای جلوگیری از فروپاشی ناگهانی بتن مورد توجه قرار گرفته است. هدف کلی استفاده از پوشش های FRP، افزایش ظرفیت جابجایی جانبی ستون تحت بارهای جانبی می باشد که با افزایش ظرفیت چرخشی ستون در ناحیه مفاصل پلاستیک تامین می شود. در مواردی پوشش های FRP برای افزایش ظرفیت باربری ثقلی ستون استفاده می شوند. مطالعات زیادی روی رفتار ستون های دایروی محصور شده با FRP توسط محققین مختلف انجام شده است. ستون های دایروی رفتار ساده و مشخصی از خود نشان می دهند که این باعث توسعه قابل توجه کامپوزیت FRP در مقاوم سازی سازه ها شده است. در ستون های مستطیلی به علت وجود شکل مقطع متفاوت با حالت دایروی و وجود نقاط تمرکز تنش در گوشه ها و نبود دورگیری کامل، استفاده از FRP با مشکل مواجه بوده است و تاثیر کمتری در مقایسه با ستون های دایروی قابل حصول می باشد.

الیاف کامپوزیت FRP

امروزه کامپوزیت FRP در شکل های متنوعی و برای کاربردهای گوناگونی استفاده می شوند. از جمله مزیت های کامپوزیت FRP می توان به وزن کم، مقاومت کششی بالا و مقاومت بالای آنها در برابر خوردگی اشاره کرد. انواع رایج کامپوزیت FRP که برای دورگیری ستونها استفاده می شوند عبارتند از: الیاف کربن CFRP، الیاف شیشه GFRP و آرامید AFRP. به طور معمول CFRP مقاومت کششی بالایی نسبت به انواع دیگر دارد و مقاومت آن در دامنه ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ مگاپاسکال می باشد. CFRP ها رنگ سیاه و دانسیته حجمی حدود (1440 Kg/M^3) دارند. GFRP ها سفید هستند و چگالی (1700 Kg/M^3) دارند. آرامیدها در رنگ های طلایی و دانسیته (1300 Kg/M^3) موجود می باشند. الیاف کربن به علت مقاومت کششی بالای آنها کاربرد زیادتری نسبت به سایر کامپوزیت FRP دارند. الیاف GFRP به علت قیمت پایین آنها در ایران کاربرد زیادتری داشته اند.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه تهران
^۲ استادیار دانشکده فنی دانشگاه تهران

انواع شکل‌های مختلف اجرای دورگیرهای کامپوزیت FRP

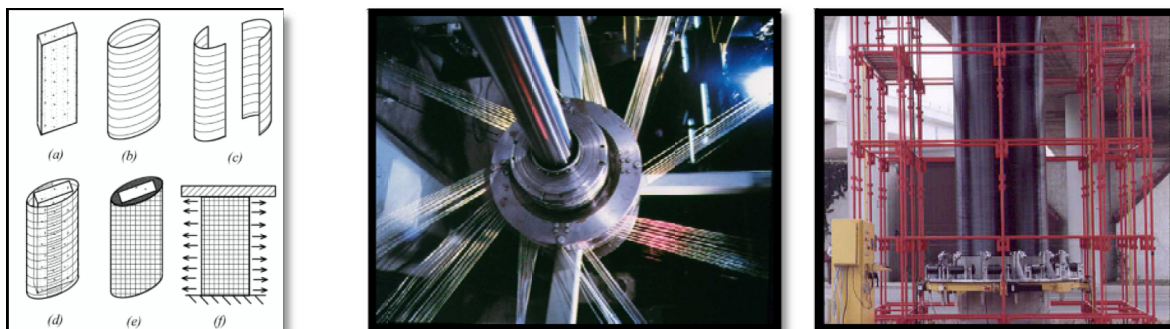
سه روش کلی برای دورپیچ کردن ستون وجود دارد [۱]:

- (۱) Wrapping، پیچیدن کامپوزیت FRP به صورت صفحه یا نوار دور ستون
- (۲) Filament Winding، دورپیچ کردن بوسیله رشته های FRP
- (۳) Prefabricated Shells، پوسته های پیش ساخته کامپوزیت FRP

روش اول که در بین سایر روش ها معمول تر است اغلب بصورت Wet-Layup انجام می شود که در آن سطح ستون صاف شده و سپس گرد و غبار از سطوح زدوده می شود. در مرحله بعد بوسیله رزین های اپوکسی صفحات کامپوزیت FRP به ستون چسبانده می شود این روش چون به راحتی توسط مراحل دستی انجام می شود قابلیت استفاده بیشتری دارد.

روش دوم: اساس این روش مانند روش اول است با این تفاوت که به جای استفاده از صفحه و نوارهای کامپوزیت از رشته های FRP استفاده می شود که بصورت ممتد دور ستون چرخانده می شود برای انجام این کار به دستگاه مخصوص این کار نیاز است و می توان زاویه چرخش الیاف و ضخامت لایه را کنترل کرد.

در روش سوم پوسته های آماده کامپوزیت FRP به شکل نیم دایره تهیه می شود و در محل دور ستون قرار داده میشود و سپس در محل درز، یک نوار بصورت عمودی اجرا می شود ولی جهت فیبر ها در جهت افقی می باشد. همچنین می توان از پوسته های یک تکه انعطاف پذیر استفاده کرد که به علت انعطاف پذیری آنها امکان بازکردن پوسته و جادادن دور ستون وجود دارد. سپس فاصله این ستون و پوسته FRP بوسیله یک دوغاب منبسط شونده تزریق می شود تا یک مقدار پیش تنیدگی در الیاف ایجاد شود. مقدار این پیش تنیدگی به میزان انبساط دوغاب بستگی دارد که اگر این مقدار قابل توجه باشد سیستم دورگیری از حالت غیرفعال (Passive) به سیستم فعال (Active) تغییر می یابد. شکل ۱، انواع روشهای اجرای دورگیری FRP را نشان می دهد.



شکل ۱- اشکال مختلف اجرای دورگیرهای کامپوزیتی (الف) Wrapping (ب) Filament Winding (ج) Prefabricated Shells

مفهوم دورگیری در بتن

در سال ۱۹۸۸، Mander [۲] فرضیه دورگیری حاصل از آرماتورهای فولادی را تکمیل کرد و مدل پایه‌ای وی اساس محاسبات بسیاری از محققین در برآورد تنش های دورگیری حاصل از آرماتور های عرضی (تنگ ها و خاموتها) قرار گرفت. مدل‌های محاسباتی مقاومت محوری محصور شده و کرنش های محصور شدگی در ابتدا بر اساس فرضیه فشار فعال سیال هیدرو استاتیک شکل گرفت که توسط معادلات زیر بیان می شود.

$$f'_{cc} = f'_{c0} + k_1 \times f_1 \quad (1)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{c0} \times (1 + k_2 \times \frac{f_1}{f'_{c0}}) \quad (2)$$

که در آنها حداکثر تنش بتن محصور شده و ϵ_{cc} کرنش متناظر با آن است. f_1 فشار جانبی سیال است و f'_{c0} مقاومت بتن محصور نشده و ϵ_{c0} کرنش متناظر با آن است k_1 و k_2 ضرایب تاثیر محصور شدگی می باشند که تابعی از طرح اختلاط بتن و فشار جانبی است. Richart (۱۹۲۸) برای $k_1 = 4.1$ و $k_2 = 5k_1$ را پیشنهاد داد. Balmer (۱۹۴۹) مقدار k_1 را از $4/5$ تا 7 و بطور متوسط $5/6$ تعیین کرد [۳]. به نظر وی در فشار های جانبی کمتر مقدار k_1 بیشتر می‌باشد. به نظر Richart مقاومت فشاری بتن محصور شده به علت فشارهای جانبی فعال ناشی از فشار سیال مشابه حالت فشار های جانبی غیر فعال ناشی از تنگ های حلزونی و دایروی است که در فاصله‌ای نزدیک به هم قرار گرفته‌اند.

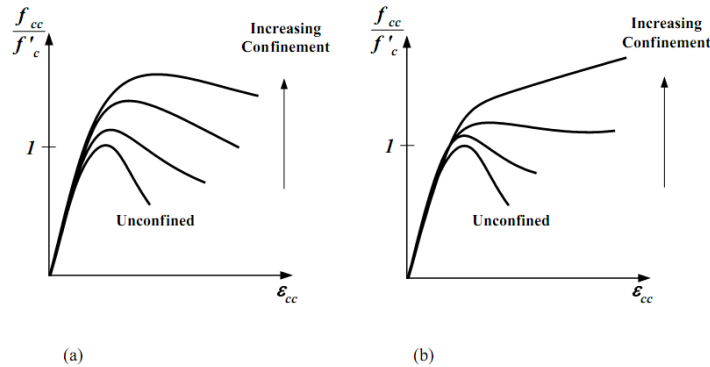
سطوح گسیختگی چند محوری پنج پارامتری که توسط Willam & Warnke (۱۹۷۵) ارائه شده است، نشان‌دهنده تطبیق خوبی با آزمایشات سه محوری بود. Mander برای حالتی که فشارهای جانبی ناشی از دورگیری آرماتورهای فولادی برابر باشد (مقاطع دایروی)، رابطه زیر را برای مقاومت فشاری محصور شده بتن ارائه کرد.

$$f'_{cc} = f'_{c0} (-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \times \frac{f_1}{f'_{c0}} - 2 \frac{f_1}{f'_{c0}}}) \quad (3)$$

طبق رابطه بالا برای $f_1 = 2.7 \text{ Mpa}$ ، مقاومت فشاری بتن محصور شده ۶۵٪ بیشتر از مقاومت بتن معمولی است.

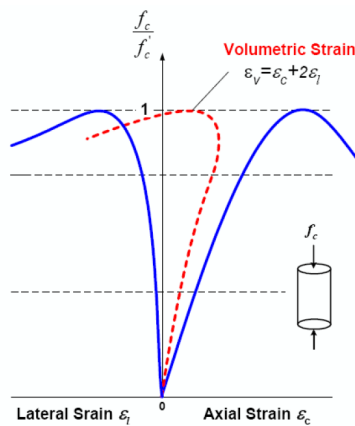
مدل محصور شدگی برای کامپوزیت FRP

بر خلاف آرماتورهای فولادی که پس از تسلیم یک تنش فشاری جانبی ثابتی را اعمال می کند دورگیرهای FRP دارای رفتار الاستیک هستند و فشار جانبی حاصل از آنها بصورت ممتد با افزایش بارهای وارده بر ستون افزایش می یابد. شکل ۲، تفاوت رفتاری تنش- کرنش ستون های محصور شده با آرماتورهای فولادی و دورگیرهای FRP را نشان می دهد. [۴]



شکل ۲-رفتار تنش-کرنش ستون های محصور شده با آرماتورهای فولادی و دورگیرهای FRP

این بیان کننده رفتار کرنش- پایه ستون های محصور شده با FRP است که در آن فشار جانبی FRP در ابتدا صفر است و حالت غیر فعال دارد. با اعمال نیروی محوری و افزایش کرنش های محوری تغییراتی در بتن اتفاق می افتد و کرنش های جانبی (ϵ_i) افزایش می یابد. این کرنش های جانبی، کامپوزیت FRP را فعال می کند و کشش های درون الیاف باعث ایجاد تنش های محصور کننده دور ستون می گردد. شکل ۳، رفتار بتن محصور نشده را نشان می دهد ϵ_1 ، ϵ_c ، ϵ_v بترتیب نشان دهنده کرنش جانبی، کرنش محوری و کرنش حجمی است. f_c نشان دهنده تنش های محوری است که با افزایش آن و رسیدن به f'_{c0} ، کرنش های حجمی به صفر نزدیک می شود و مجموع کرنشهای سطحی جانبی و محوری صفر می گردد. این نقطه بیانگر شروع رفتارهای غیر خطی در بتن می باشد که در محاسبات مربوط به کاهش مدول الاستیسیته بتن ظاهر می شود. [۵]



شکل ۳-رفتار تنش-کرنش محوری بتن محصور نشده

کرنش حجمی نمونه های بتنی بدون دورپیچ تا ۹۰٪ تنش ماکزیمم کاهش می یابد. اما بعد از این انبساط حجمی بتن شروع می شود. اخیراً Mirmiran میزان پاسخ حجمی نمونه های بتنی دورپیچ شده با FRP را در دو حالت بررسی کردند [۶]. نوع اول نمونه ها، بتن های ساده غیر مسلح بودند. نمونه های نوع دوم، بتن مسلح با آرماتورهای فولادی بودند. بر پایه نتایج آن بررسی، انبساط جانبی ناپایدار بتن (Unstable Dilatation) برای نمونه های مسلح شده با آرماتورهای فولادی، هنگام تسلیم آرماتورها اتفاق می افتد. اما برای FRP-Confined، در صورتی که مقدار کافی از الیاف تامین شود، مقدار انبساط جانبی بتن با تنشهای ناشی از کرنش حلقوی افزایش یافته FRP مهار می شود.

در مدل مبتنی بر کرنشهای انبساطی بتن برای بیان رابطه غیر خطی بین کرنش های جانبی و کرنش محوری از فرمول Pantazopoulou & Mills (۱۹۹۵) استفاده شده است.

$$\varepsilon_l = -0.2 \times \varepsilon_c - 0.3 \times \varepsilon_{c0} \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{clim}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{clim}} \right)^c \quad (۴)$$

ε_{clim} برابر کرنش محوری متناظر با شروع تشکیل اولین ترکها در بتن می باشد. ε_c برابر با کرنش محوری در هر مرحله بارگذاری است و ε_{c0} کرنش متناظر با f_{c0} است و معمولاً مقدار این کرنش 0.002 فرض می شود. نرخ انبساط جانبی بتن وابسته است و برای بتن با مقاومت پایین، ۲ می باشد. رابطه بالا حالت ساده شده مدل Pantazopoulou می باشد که با فرض $\varepsilon_{c0} = 0.002$ به صورت رابطه بالا ساده تر می گردد. ضعف مدل Mander برای محاسبه فشار جانبی حاصل از آرماتورهای فولادی عرضی از آنجا ناشی می شود که فشار جانبی محصور کننده از ابتدای بارگذاری ثابت فرض می شود و برابر حالتی است که در آن تنگ ها تسلیم شده اند، در صورتیکه در ابتدای بارگذاری کرنش های آرماتورهای عرضی در حد الاستیک هستند. بنابراین مقادیر بالاتری برای تنش جانبی در معادله ۳ اعمال می شود درحالیکه باید طی یک مرحله گام به گام و به ازاء هر مرحله بارگذاری کرنش های آرماتورها حساب شود و f_l متناظر بدست آید.

تنشهای فشاری جانبی ناشی از آرماتورهای عرضی از رابطه زیر حساب می شود که در آن A_s سطح مقطع آرماتورهای تنگ هاست، S فاصله قائم بین تنگ هاست و برای ستونهای با تنگهای حلزونی برابر گام تنگ است. d قطر مقطع ستون و f_y برابر تنش تسلیم آرماتورهاست.

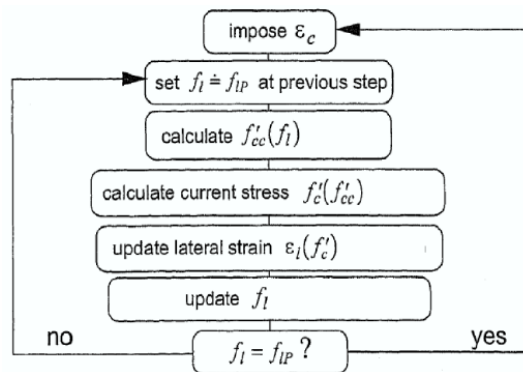
$$f_{ls} = \frac{A_s}{S \times d} \times f_y \quad (۵)$$

برای بتن محصور شده با FRP تنش های جانبی از رابطه زیر بدست می آید

$$f_l = \frac{2 \times E_j \times t_j \times \varepsilon_l}{d} \quad (۶)$$

t_j ضخامت لایه FRP و E_j مدول الاستیسیته FRP و ε_l کرنش جانبی بتن درطول بارگذاری است. d قطر مقطع می باشد.

Spolestra (۱۹۹۹) مقدار کرنش های الیاف را برابر کرنش های جانبی فرض کرد و با استفاده از روابط غیر خطی بتن که توسط Pantazopoulou ارائه شده، رفتار تنش-کرنش ستون دایروی محصور شده با FRP را مدل کرد که این مدل پایه ای برای کارهای بعدی قرار گرفت. شکل ۴، الگوریتم حل مسئله را بیان می کند و ساختار مدل کرنش- پایه را نشان می دهد. [۷]



شکل ۴- الگوریتم محاسبه رفتار تنش-کرنش بتن محصور شده با FRP

مسئله مهم دیگر محاسبه کرنش نهایی ستون است که بیانگر شکل پذیری ستون می باشد. ضریب شکل پذیری μ_l ، نسبت مساحت زیر نمودار تنش کرنش به مساحت ناحیه ای است که از امتداد دادن خط اول منحنی بدست می آید و این نسبت بیانگر عملکرد ستون دورپیچ شده است. برای محاسبه μ_l ، به مقدار کرنش نهایی ستون نیاز است. ε_{cu} برابر کرنش محوری است که در آن الیاف گسیخته می شوند.

Seible (۱۹۹۵) رابطه ای برای محاسبه کرنش محوری نهایی برای بتن محصور شده با آرماتورهای فولادی ارائه کرد.

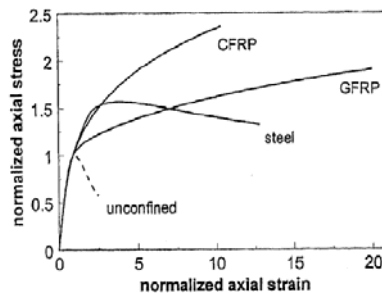
$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + 1.4 \frac{\rho_j \times f_j \times \varepsilon_{ju}}{f_{cc}} \quad (۷)$$

f_j و ε_{ju} بیانگر تنش تسلیم فولاد و کرنش تسلیم فولاد است و f_{cc0} نشان دهنده مقاومت بتن محصور شده می باشد که از معادله ۳ بدست می آید. برای بتن محصور شده با FRP، رابطه (۷) با جای گذاری $\varepsilon_{ju} = \varepsilon_l$ مقدار کرنش محوری نهایی را محاسبه می کند و در این حالت کرنش جانبی بتن ε_{cu} به کرنش نهایی گسیختگی FRP میرسد و پوسته کامپوزیت FRP بطور کامل گسیخته می شود (از گسیختگی پیش رونده صرف نظر می شود). همانطوریکه از شکل ۲، مشخص است برای حالتی که مقدار کافی از الیاف FRP دور ستون اجرا شده باشد نمودار تنش-کرنش صعودی خواهد بود در حالیکه برای حالت محصور شده با آرماتورهای فولادی بعد از رسیدن به f_{cc} ، شاخه نزولی منحنی تنش-کرنش شروع می شود. این شاخه نزولی باعث شکل پذیری خوبی تا رسیدن به گسیختگی آرماتور می شود. با توجه به مقدار کم کرنش نهایی گسیختگی FRP در مقایسه با کرنش نهایی فولاد انتظار می رود که کرنش محوری نهایی ستون برای نمونه های دورگیر شده با FRP کمتر از نمونه های فولادی باشد. در حالیکه نتایج بیانگر مطلب دیگری است. این مطلب را Mirmiran بدین شکل مطرح می کند که فرضیه Mander در باره متناسب بودن شکل پذیری بتن با انرژی ذخیره شده در سیستم محصور کننده (تنگ ها) به نمونه های محصور شده با FRP قابل تعمیم نمی باشد. بنابر این Seible رابطه ۷، را با تعویض ضریب $1/4$ به $2/8 - 2/5$ ،

اصلاح نمود. شکل ۵، نشان می دهد که برای حجم برابر از کامپوزیت ها (ρ_j های برابر) تغییر شکل های نمونه محصور شده با CFRP حدود دو برابر نمونه محصور شده با GFRP است. در حالیکه فشار محصور کننده نهایی نمونه محصور شده با CFRP، ۵۰٪ بیشتر از GFRP است. در بررسی های اخیر و براساس نتایج آزمایشات، این حقیقت در مورد رفتار گسیختگی FRP بدست آمده است که کرنش گسیختگی FRP در آزمایشات، کمتر از مقادیر بدست آمده در آزمایش کشش بوده است. دلایل متعددی برای این واقعیت مطرح شده است که می توان به دلایل زیر اشاره کرد:

- (۱) تمرکز تنشها و عدم توزیع یکنواخت به علت تغییر شکلهای موضعی و متمرکز در بتن ترک خورده
- (۲) وجود انحنای در ژاکت FRP که دور ستون دایروی و یا مستطیلی پیچانده می شود.

Shahawy پیشنهاد کرد برای حل این اختلاف کرنش های FRP، نتایج Ring Splitting Test به جای تست کوپن کشش در معادلات محاسبه کرنش نهایی بتن محصور شده با FRP استفاده شود.



شکل ۵- رفتار محوری نمونه های محصور شده با فولاد، CFRP، GFRP

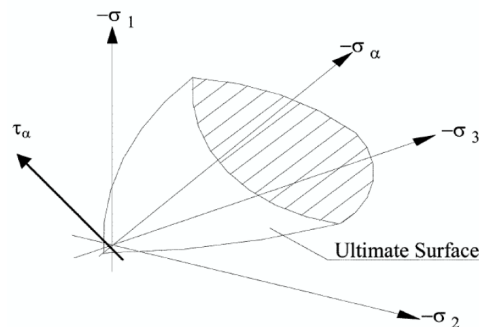
با تحلیل نتایج حاصل از ۶۰۰ نمونه آزمایش شده Spolestra (۱۹۹۹) رابطه زیر را برای مقاومت نهایی فشاری محصور شده بتن ارائه کرد.

$$f'_{cu} = f'_{co} (0.2 + 3 \times \sqrt{\frac{f_{lu}}{f'_{co}}}) \quad (A)$$

با بررسی معادله بالا این نتیجه حاصل می شود که برای $(f_{lu}/f'_{co}) < 0.07$ ، نسبت (f'_{cu}/f'_{co}) ، کوچکتر از ۱ خواهد بود و این بیانگر رفتار نرم شونده است. Mirmiran برای ستونهای دایروی توصیه کرد که نسبت (f_{lu}/f'_{co}) باید بزرگتر از 0.15 باشد. اما نتایج آزمایشات و بررسی ها نشان می دهد که معیار Spolestra به واقعیت نزدیکتر است.

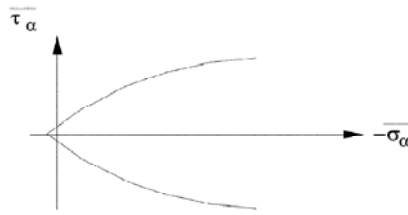
مدل رفتار تنش کرنش محصور شده با FRP بر اساس تئوری پلاستیسیته

مدل ارائه شده بر پایه مدل Willam & Warnke (۱۹۷۵) که در آن تئوری پلاستیسیته بر اساس پنج پارامتر ارائه شده است و کاهش مدول الاستیسیته بتن (E_c) بر پایه مدل Pantazopoulou محاسبه شده است. شکل ۶، صفحات گسیختگی را بر پایه تنش های سه محوره نشان می دهد. در این مدل $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ مولفه های تنش محوری هستند که برای نمونه محصور شده با FRP، σ_1 تنش فشاری محوری، σ_2 و σ_3 تنش های محصور کننده حاصل از FRP را در دو جهت عمود بر هم نشان می دهد. [۸]



شکل ۶- صفحات گسیختگی را بر پایه تنش های سه محوره

در شکل ۷، تنش های σ و τ به ترتیب بیان کننده تنش میانگین عمود بر صفحه و تنش برشی میانگین است. در تئوری پلاستیسیته تنش های فشاری با علامت های منفی نشان داده می شوند.



شکل ۷- رابطه بین $\bar{\sigma}$ و $\bar{\tau}_a$

معادلات زیر رابطه بین $\bar{\sigma}$ و $\bar{\tau}_a$ را بیان می کند.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_a}{f_{co}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3f_{co}} \quad (9)$$

$$\bar{\tau}_a = \frac{\tau_a}{f_{co}} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{15f_{co}} \quad (10)$$

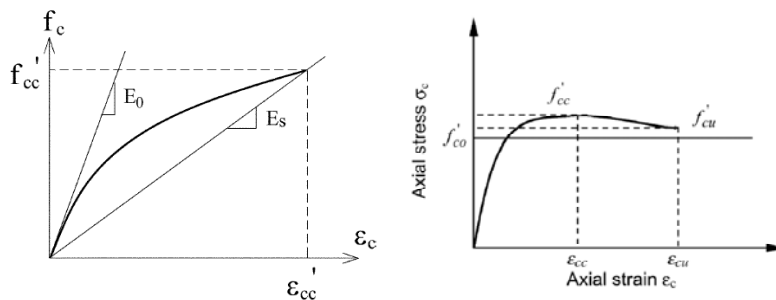
در شکل ۷، بر اساس یک رگرسیون معادله زیر برای بیان رابطه $\bar{\sigma}$ و $\bar{\tau}_a$ ارائه شده است.

$$\bar{\tau}_a = b_0 + b_1 \bar{\sigma} + b_2 \bar{\sigma}^2 \quad (11)$$

در حالیکه b_1 و b_2 و b_3 ثابت هایی هستند که از آزمایشات بدست می آیند [۹]. بر اساس نتایج تست های انجام شده روی نمونه های محصور شده با FRP مقادیر $b_0=0.0417$ ، $b_1=-0.795$ ، $b_3=-0.104$ ، $b_2=-0.795$ بدست می آید. برای نمونه های با رفتار سخت شونده f_{cc} زمانی بدست می آید که تنش جانبی محصور کننده به حداکثر مقدار خود f_{lu} میرسد. بنابراین با فرض $\sigma_1=f_{cc}$ و $\sigma_2=\sigma_3=f_{lu}$ رابطه زیر برای نمونه های با رفتار سخت شونده ارائه می شوند.

$$f'_{cc} = f'_{c0} (-4.322 + 4.721 \sqrt{1 + 4.193 \times \frac{f_{lu}}{f'_{c0}} - 2 \frac{f_{lu}}{f'_{c0}}}) \quad \frac{f_{lu}}{f'_{c0}} > 0.2 \quad (12)$$

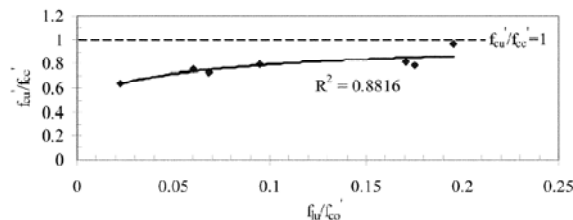
برای نمونه های با رفتار نرم شونده مقاومت فشاری نهایی بتن (f_{cu}) با حداکثر مقاومت فشاری محصور شده (f_{cc}) برابر نمی باشند. شکل ۸، این تفاوت را نشان می دهند.



شکل ۸- رفتار نرم شونده و سخت شونده بتن محصور شده با FRP

Yan (۲۰۰۶)، معادله زیر را برای بیان رابطه بین مقاومت فشاری نهایی بتن محصور شده و مقاومت فشاری حداکثر آن ارائه نمود.

$$\frac{f'_{cu}}{f'_{cc}} = 0.0768 \ln \left(\frac{f_{lu}}{f'_{c0}} \right) + 1.122 \quad (13)$$



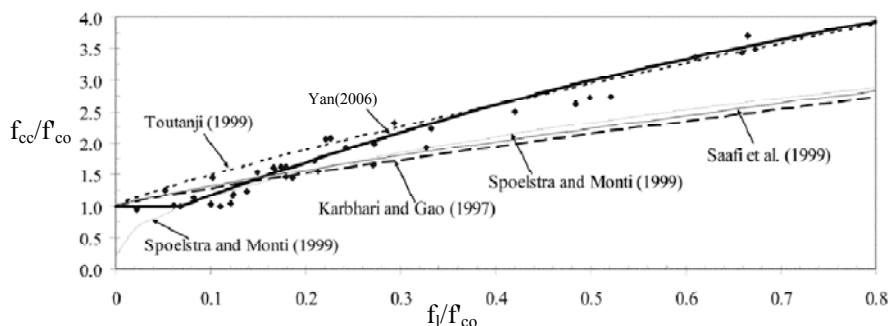
شکل ۹- رابطه بین ضریب نرم شوندگی (f'_{cu}/f'_{cc}) نسبت تنش محصورکننده موثر (f_{lu}/f'_{c0}) بتن محصور شده با FRP

براین اساس وبا استفاده از معادله (۱۲)، Yan (۲۰۰۶) رابطه زیر را برای بیان رفتار نمونه های با تنش محصورکننده پایین ارائه کرد. برای $(f_{lu}/f_{co}) < 0.2$

$$f'_{cc} = \frac{(-4.322 + 4.721 \sqrt{1 + 4.193 \times \frac{f_{lu}}{f_{co}} - 2 \frac{f_{lu}}{f_{co}}})}{0.0768 \ln(\frac{f_{lu}}{f_{co}}) + 1.122} f'_{co} \quad (14)$$

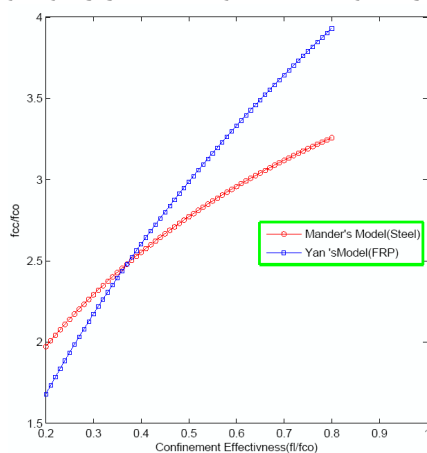
$$f'_{cc} = f'_{co} \quad (15)$$

از بین دو مقدار بالا، بیشترین مقدار به عنوان مقاومت فشاری حداکثر بتن محصور شده تعیین می شود. در معادله بالا مقدار (f'_{cu}) از معادله ۱۲، حساب می شود و در رابطه ۱۳، اعمال می شود. در شکل ۱۰، مقایسه ای بین نتایج حاصل از مدل های مختلف و مدل Yan (۲۰۰۶) انجام شده است. برای $(f_{lu}/f_{co}) < 0.35$ ، مدل حاضر و مدل های Spoolstra (۱۹۹۹)، Saafi (۱۹۹۹)، Karbhari & Gao (۱۹۹۷)، Spoolstra (۱۹۹۹)، Karbhari (۱۹۹۷) نتایج مدل های $(f_{lu}/f_{co}) > 0.35$ مقادیر $(f_{lu}/f_{co}) > 0.35$ نتایج مدل Yan (۲۰۰۶) با مدل (۱۹۹۹) Toutanji، تطبیق خوبی نشان می دهند. برای $0.35 < (f_{lu}/f_{co}) < 0.8$ ، نتایج مدل Yan (۲۰۰۶) با مدل (۱۹۹۹) Saafi، باهم اختلاف دارند.



شکل ۹-مقایسه بین نتایج حاصل از مدل های مختلف

در شکل ۱۰، مدل Mander، برای بتن محصور شده با تنگهای فولادی با مدل Yan (۲۰۰۶) مقایسه شده است. این مقایسه تفاوت رفتار بتن در دو حالت نشان می دهد. هر دو مدل بر اساس تئوری پلاستیسیته Willam & Warnke بدست آمده اند. با توجه به نمودار، بتن محصور شده با FRP حساسیت بیشتری نسبت به تنشهای دورگیری دارد و نمودار با شیب بیشتری نسبت به مدل Mander رشد می کند. در این نمودار نمونه های با رفتار سخت شونده در نظر گرفته شده است و در واقع معادله ۱۲، برای $(f_{lu}/f_{co}) > 0.2$ با مدل Mander مقایسه شده است. برای $(f_{cc}/f_{co}) = 0.2$ ، نسبت (f_{cc}/f_{co}) برای نمونه با FRP حدود ۲۵٪ بیشتر از نمونه فولادی است.



شکل ۱۰-مقایسه مدل Mander، با مدل Yan (۲۰۰۶)

نتیجه گیری

اغلب مدل‌های ارائه شده برای بتن محصور شده با FRP بر اساس آنالیز و رگرسیون نتایج تست‌ها می‌باشند و ساختاری شبیه معادله ۱، دارند که توسط Richart (۱۹۲۸) ارائه شد. در این بررسی اختلاف دورگیری حاصل از تنگ‌های فولادی در بتن با دورگیرهای FRP بررسی شده است و نشان داده شد که تئوری Mander برای محاسبه مقاومت فشاری نهایی قابل توسعه به FRP نیست. بر اساس مدل تئوری پلاستیسیته Willam & Warnke (۱۹۷۵) معادلاتی برای محاسبه مقاومت فشاری بتن محصور شده ارائه شده است که مهمترین آنها معادله Mander برای تنگ‌های فولادی و معادله Yan (۲۰۰۶) میباشد. ضرایب این معادلات از آنالیز نتایج تست‌ها بدست می‌آید. بر پایه مدل کرنش-پایه (Spolestra (۱۹۹۹) می‌توان یک روند گام به گام برای بدست آوردن منحنی تنش-کرنش بتن محصور شده با FRP ارائه کرد که در آن پارامترهای مقاومت فشاری براساس تئوری پلاستیسیته و نتایج تست‌ها قابل حصول است و پارامترهای کرنش بر پایه تئوری کاهش مدول الاستیسیته بتن بدست می‌آید که خرابی‌های داخلی بتن را به تراز فشارهای جانبی FRP مرتبط می‌سازد. بر طبق مقایسه انجام شده بین مدل Yan (۲۰۰۶) و سایر مدل‌های ارائه شده توسط محققین، این نتیجه حاصل می‌شود که برای تطبیق بهتر این مدل‌ها، به آزمایشات و آنالیزهای بیشتری نیاز است. مولفین این مقاله ارائه رابطه دقیق تری را به عنوان کار بعدی در نظر دارند.

مراجع

1. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L. (2002), *FRP-strengthened RC Structures*, John Wiley & Sons, West Sussex, England, 2002.
2. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R., (1998) "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, December 1998, pp. 1804-1826.
3. Matthys, S.; Toutanji, H.; Audenaert, K.; and Taerwe, L., 2005, "Axial Load Behavior of Large-Scale Columns Confined with Fiber-Reinforced Polymer Composites," *ACI Structural Journal*, V. 102, No. 2, Mar.-Apr., pp. 258-267.
4. Xiao, Y., and Wu, H., (2000) "Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 12, No. 2, May 2000, pp. 139-146.
5. Newman, K., and Newman, J. B. (1969) "Failure Theories and Design Criteria for Plain Concrete," *Proceedings, International Civil Engineering Materials Conference on Structural, Soil Mechanics and Engineering Design (Southampton, 1969), Part 2*, Wiley Interscience, New York, 1972, pp. 963-995.
6. Lam, L., and Teng, J. G. (2003) "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 17, No. 6-7, September-October 2003, pp. 471-489.
7. Spolestra, M. R., and Monti, G. (1999) "FRP Confined Concrete Model," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, V. 3, No. 3, pp. 146-150.
8. Willam, K. J., and Warnke, E. P. (1975) "Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete," *Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering*, V. 19, pp. 1-30.
9. Yan, Z.; Pantelides, C. P.; and Reaveley, L. D. (2006) "Fiber-Reinforced Polymer Jacketed and Shape Modified Compression Members: II—Model," *ACI Structural Journal*, V. 103, No. 6, Nov.-Dec., pp. 885-893.