

مدلسازی رفتار بتن در ستونهای تقویت شده با FRP

حسن مجیدی آرانی^۱، مجید شیخی نارانی^۲، جعفر اسکندری جم^۳

1- پژوهشیار، تهران-لويزان- دانشگاه صنعتی مالک اشتر

2- مربي، تهران-لويزان- دانشگاه صنعتی مالک اشتر

3- دانشیار، تهران-لويزان- دانشگاه صنعتی مالک اشتر

خلاصه

استفاده از مصالح کامپوزیتی در مقاوم سازی و بهسازی سازه ها یکی از جدیدترین مباحث علمی جهان می باشد و تا کنون تحقیقات گسترده ای در خصوص بکارگیری مواد مرکب به عنوان روکش ترمیم و تقویت انجام گرفته است. با بکارگیری تکنیک های مقاوم سازی می توان ظرفیت باربری، مقاومت و شکل پذیری سازه های بتنی را در برابر بارهای ثقلی و دینامیکی ناشی از نیروهای زلزله و غیره افزایش داد. در این مقاله به بررسی مدل‌های رفتاری موجود برای بتن محصور شده در حالت‌های اکتیو و پاسیو پرداخته شده است. که در حالت پاسیو مدل‌های رفتاری به دو دسته محصورشدگی با فولاد و FRP تقسیم بندی شده اند. بر اساس این مطالعه یک مدل دو خطی با ناحیه انتقالی غیر خطی می تواند مدل مناسبی برای محصور شدگی با FRP باشد.

کلمات کلیدی: مدلسازی، تنش و کرنش بتن محصور شده، بتن تقویت شده، FRP

1. مقدمه:

به طور کلی وقتی یک عنصر تحت فشار جانبی محدود کننده قرار می گیرد، مقاومت فشاری محوری آن افزایش می یابد. در سالهای اخیر نشان داده شده است که این فشار جانبی یا به عبارت دیگر فشار محصور شدگی بیشتر از آنکه باعث افزایش مقاومت شود باعث افزایش شکل پذیری می شود. در حالت ساده می توان نمونه ای استوانه ای از بتن را در نظر گرفت که به آن فشار جانبی و فشار محوری اضافی وارد می شود. به این حالت محصور شدگی اکتیو گفته شده است. در حالت عملی بتن هسته محصور شده با فولادهای عرضی تحت حالت دیگری از محصور شدگی قرار دارند، که در آن محصور شدگی زمانی بوجود می آید که فولادهای عرضی مانع کرنش جانبی بتن هسته طبق اثر پواسون شوند. در این حالت محصور شدگی حالت پاسیو داشته و تابعی از کرنش جانبی و در نتیجه تابعی از تنش محوری خواهد بود و زمانی فشار محصور شدگی به صورت مؤثر برانگیخته خواهد شد که بتن هسته از حالت خطی خارج شده و به حالت خرد شده تمایل پیدا کند. این حالت بطور عمده در ستونهای بتن مسلح و همچنین در ناحیه مفصل پلاستیک تیرهای بتن مسلح مطرح می گردد. با ایجاد فشار محصور شدگی مناسب می توان مقاومت و به خصوص شکل پذیری مقطع را افزایش داد. در تقویت سازه های موجود با ژاکتهای فولادی و FRP نیز همان حالت محصور شدگی پاسیو حاکم است. به عبارت دیگر دورگیری یک اثر نهفته است و اثر آن زمانی آشکار می شود که ماده محصور دچار افزایش کرنش و تغییر شکل جانبی شود.

2. محصور شدگی اکتیو

1- کارشناس ارشد مهندسی مواد مرکب، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
3- عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر
2- عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر

منظور از محصور شدگی اکتیو حالتی است که بتن تحت یک فشار جانبی همانند آزمایش سه محوری قرار دارد. کانسیدر (1903) اولین فردی بود که در این خصوص به مطالعه پرداخت و مدل زیر را ارائه نمود.[2]

$$f'_{cc} = k_1 f'_{co} + 4.8 f_r \quad \Rightarrow \quad \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = k_1 + 4.8 \left(\frac{f_r}{f'_{co}} \right) \quad (1)$$

در معادله فوق f'_{cc} مقاومت فشاری بتن محصور شده، f_r تنش محصور شدگی، f'_{co} مقاومت فشاری بتن محصور نشده و k_1 ضریب ثابتی بین 1 تا 1/5 است. همانطور که مشاهده می شود بر اساس این مدل اگر بتن تحت تنش محصور شدگی معادل 20 درصد مقاومت فشاری بتن محصور نشده (0.2 f'_{co}) قرار گیرد، آنگاه مقاومت فشاری بتن محصور شده به بیش از 2 برابر f'_{co} می رسد. بعدها محققان بر اساس مدل فوق، مدل‌های دیگری ارائه نمودند. آنها مشاهده نمودند که ضریب k_1 حدود حدود واحد می باشد اما ضریب f_r متفاوت است. مدل‌های ارائه شده بعدی به فرم زیر بوده است:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_c \left(\frac{f_r}{f'_{co}} \right) \quad (2)$$

در معادله (2) ضریب k_c که بیانگر اثر فشار محصور شدگی روی مقاومت محوری است به شرح زیر ارائه شده است:

$$k_c = 3.65 f_r^{-0.117} \quad (f_r \text{ in ksi}) \quad [13] \text{ (1928) همکاران}$$

$$k_c = 4.1 \quad \text{چین و زیمرمن (1965) [1]}$$

$$k_c = 3.7 \left(\frac{f_r}{f'_{co}} \right)^{-0.14} \quad \text{نیومان (1972) [11]}$$

$$k_c = 4.825 f_r^{-0.17} \quad (f_r \text{ in ksi}) \quad [14] \text{ (1992) رضوی و ساچوخلو}$$

3. محصور شدگی پسیو با فولاد

به طور کلی با اعمال تنش محوری به اجزای بتنی، این اجزا بواسطه اثر پواسون دچار کرنش جانبی می شوند و اگر جلوی کرنش جانبی بتن توسط عنصری همانند فولادهای عرضی (خاموت) یا ژاکت فولادی گرفته شود، در آن صورت یک فشار محصور شدگی به صورت پسیو به بتن اعمال خواهد شد. اولین مدل ریاضی برای محصور شدگی پسیو مقطع دایره ای با ژاکت فولادی توسط ریچارت و همکاران (1928) ارائه شده است. آنها در این مدل از همان مدل محصور شدگی اکتیو خود (رابطه 2) استفاده نموده اند و تنها تنش محصور شدگی را مطابق رابطه (3) بصورت تابعی از هندسه و مقاومت ژاکت فولادی بیان کرده اند. که در آن f_{sy} تنش تسلیم فولادهای عرضی، d_s ضخامت ژاکت فولادی و D قطر هسته بتنی است.

$$f_r = \frac{2 f_{sy} d_s}{D} \quad (3)$$

لاینگر و همکاران (1972) مدل فوق را برای محصور شدگی با فولادهای عرضی اصلاح نموده و فشار محصور شدگی را بصورت زیر بیان نمودند که در آن A_{sp} سطح مقطع فولاد دور پیچ و S_{sp} گام فولاد دور پیچ یا همان فاصله بین فولادهای عرضی می باشد. این رابطه با توجه به شکل 1 به شرح زیر بدست آمده است: [7]

$$f_r = \frac{2 A_{so} f_{sy}}{D S_{sp}} \quad (4)$$

$$2F = f_r DS_{sp}$$

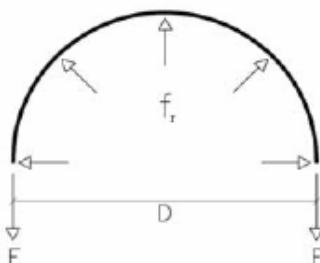
$$\Rightarrow f_r DS_{sp} = 2A_{sp} f_{sy} \Rightarrow f_r = \frac{2A_{sp} f_{sy}}{DS_{sp}} \quad (5)$$

$$F = A_{sp} f_{sy}$$

در رابطه (4) اگر قطر آرماتور دورپیچ 10 میلیمتر، گام آن 100 میلیمتر، تنش تسلیم آن 300 مگاپاسکال و قطر بتن هسته 300 میلیمتر باشد، مطابق رابطه (6) مقاومت بتن محصور شده بدست می آید. لذا اگر مقاومت بتن محصور نشده برابر 25 مگاپاسکال باشد، مقدار مقاومت بتن محصور شده با 26 درصد افزایش به 32 مگاپاسکال خواهد رسید.

$$f_r = \frac{2A_{sp} f_{sy}}{DS_{sp}} = \frac{2 \times 78.5 \times 300}{300 \times 100} = 1.57 MPa \quad (6)$$

$$f'_{cc} = f'_{co} + 4.1 f_r = f'_{co} + 4.1 \times 1.57 = f'_{co} + 6.4 MPa$$



شکل 1- رابطه فشار محصور شدگی و نیروی حلقوی شده با فولاد

احمد و شاه (1928) با استفاده از مطالعات قبلی مدل رابطه (7) را برای بتن محصور شده با فولاد ارائه نمودند. این مدل برای مقادیر بالای فشار محصور شدگی، اثر آن را در افزایش مقاومت فشاری کمتر گرفته است. این کار را سایرین با ارائه مدل‌های نمایی بصورت دیگری انجام داده اند. در مدل احمد و شاه اگر فشار محصور شدگی به 67/9 درصد مقاومت بتن محصور نشده برسد از هر دو رابطه مقدار مقاومت فشاری حدود 3/9 برابر خواهد شد. البته لازم به ذکر است که این فشار محصور شدگی مقدار بالایی است. اگر با پارامترهای مثال عددی قبل موضوع بررسی شود، مشاهده می شود که برای ایجاد آن لازم است که آرماتور دورپیچ 10 میلیمتر با گام 6 میلیمتر قرار داده شود. یعنی تقریباً یک دورپیچ پیوسته و بدون فضای خالی!

$$f'_{cc} = f'_{co} + 4.256 f_r \quad , \quad f_r \leq 0.679 f'_{co} \quad (7)$$

$$f'_{cc} = 1.776 + 3.117 f_r \quad , \quad f_r > 0.679 f'_{co}$$

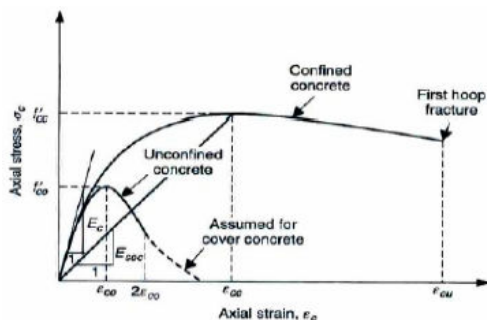
مدل ماندر و همکاران (1988) که بر پایه تعداد زیادی از مطالعات محققان قبلی بدست آمده است، یکی از کاملترین و مهمترین مدل‌های محصور شدگی پسیو با فولاد محسوب می شود. این مدل که به نام مدل ماندر معروف است، مقاومت بتن محصور شده (f'_{cc}) را بصورت یک رابطه غیر خطی بر حسب فشار محصور شدگی (f_r) بیان می کند. [8]

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \left(\frac{f_r}{f'_{co}} \right)} - 2 \left(\frac{f_r}{f'_{co}} \right) - 1.254 \quad (8)$$

در مدل ماندر بر خلاف سایر مدل‌های قبلی مطرح شده، رابطه بین کرنش نهایی بتن محصور شده و بتن محصور نشده نیز ارائه شده است. در رابطه کرنش ها (رابطه 9)، کرنش نهایی از طریق تعادل انرژی وارده و ذخیره شده در سیستم محصور کننده بدست آمده است که در آن ϵ_{co} کرنش نهایی بتن محصور نشده است.

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \quad (9)$$

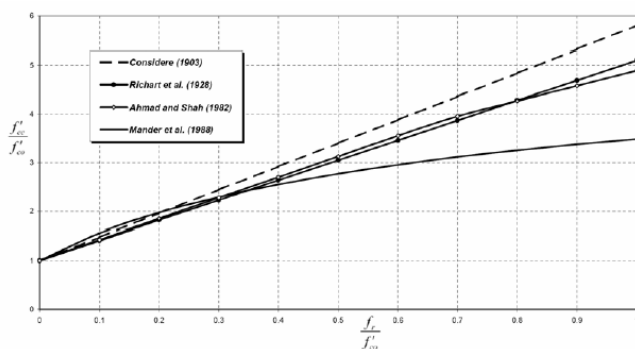
همانطور که مشاهده می شود، اگر مقاومت فشاری 50 درصد افزایش یابد، در آن صورت کرنش نهایی 250 درصد افزایش می یابد. بنابراین واضح است که با افزایش محصور شدگی، بیش از آنکه مقاومت و افزایش آن مطرح باشد، افزایش شکل پذیری مطرح است. بر اساس این مدل افزایش 50 درصدی مقاومت فشاری با اعمال فشار محصور شدگی 10٪. مقاومت فشاری بتن محصور نشده قابل انجام است. به عبارت دیگر با اعمال فشار محصور شدگی $0.1f'_{co}$ می توان ضریب شکل پذیری را $3/5$ برابر نمود. مطابق شکل 2 و روابط 10، معادله کلی تنش و کرنش محوری در مدل ماندر بر معادلات پوپویچ (1973) استوار است که در آن تنش محوری و ε_c کرنش محوری است.



شکل 2- مدل ماندر و همکاران برای بتن محصور شده با فولاد

$$f_c = \frac{f'_{cc} \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^r}{r - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^r} \quad r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (10)$$

در شکل 3 مدل های قبلی با مدل ماندر مقایسه شده اند. همانطور که مشاهده می شود مدل ماندر برای مقادیر بالای فشار محصور شدگی، افزایش مقاومت کمتری را بدست می دهد. در هر حال همه مدلها برای فشار محصور شدگی معادل 50 درصد مقاومت بتن محصور نشده، افزایش حدود 3 برابری مقاومت را نشان می دهند. لازم به ذکر است که مطابق مثال قبل، ایجاد فشار محصور شدگی بالا عملاً امکان ندارد.

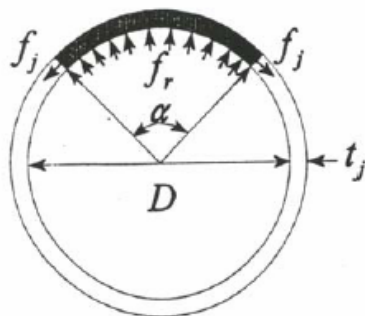


شکل 3- مقایسه مدل ماندر با سایر مدلها برای بتن محصور شده با فولاد

4. محصور شدگی پاسیو با FRP

رفتار الیاف FRP را نمی توان کاملاً مانند پوشش فولاد در نظر گرفت، زیرا فولاد یک ماده الاستوپلاستیک است در حالی که الیاف FRP کاملاً الاستیک می باشند. وقتی مقطع بتن آرمه ای که با ورقهای FRP تقویت شده است تحت فشار محوری قرار می گیرد، بتن به صورت جانبی منبسط می

شود (اثر پواسون) اما الیاف FRP باعث محدود کردن این تغییر شکل می شوند. با توجه به شکل 4، برای مقاطع دایروی، فشار محدود کننده بصورت یکنواخت به کل مقطع وارد می شود. مقدار این فشار، به قط هسته بتن، مقاومت کشش الیاف FRP بستگی دارد.



شکل 4- مکانیزم عمل دورگیری برای مقاطع بتنی دایره ای شکل

در خصوص محصور شدگی پاسیو با FRP، یکی از اولین مدلها توسط فردیس و خلیلی (1982) [4] بر اساس آزمایشات روی نمونه های استوانه ای ارائه شده است. ساختار این مدل همانند مدل ریچارت (1928) [13] است. با این تفاوت که برای کرنش نهایی نیز متناسب با ضخامت FRP، رابطه داده شده است که در آن f_{fu} (یا f_j) مقاومت کششی نهایی FRP، ضخامت FRP، E_f مدول الاستیسیته FRP و E_c مدول الاستیسیته بتن محصور نشده است.

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.001 \frac{E_f \cdot t}{D \cdot f'_{co}} \quad \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 4.1 \frac{f_r}{f'_{co}} \quad f_r = \frac{2 f_{fu} \cdot t}{D} \quad (11)$$

$$f_c = \frac{E_c \cdot \varepsilon_c}{1 + \varepsilon_c \left(\frac{E_c}{f'_{cc}} - \frac{1}{\varepsilon_{cc}} \right)} \quad (12)$$

کیسون و پاولتر (1995) با اصلاح مدل فردیس و خلیلی (1982) مدل زیر را ارائه نمودند. همانطور که مشاهده می شود محصور شدگی به صورت غیر خطی روی مقاومت و کرنش نهایی اثر دارد. [3]

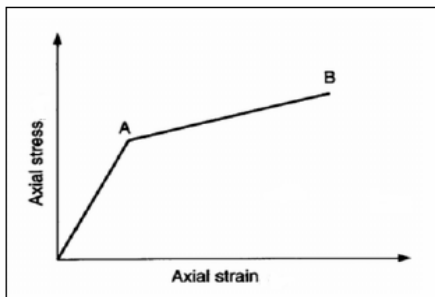
$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.1 \left(\frac{f_r}{f'_{co}} \right)^{0.7} \quad \varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.21 \left(\frac{f_r}{f'_{co}} \right)^{1.7} \quad f_r = \frac{2 f_u \cdot t}{D - 2t} \quad (13)$$

کارباهاری و گائو (1997) با اصلاح مدل قبلی، مدل دو خطی شکل 5 را ارائه نمودند که در این مدل نقطه A معادل تنش و کرنش بتن محصور نشده بوده و نقطه B مطابق روابط زیر است: [5]

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.1 \left(\frac{f_r}{f'_{co}} \right)^{0.87} \quad \varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 0.0005 \frac{E_f \cdot t}{D \cdot f'_{co}} \quad f_r = \frac{2 f_u \cdot t}{D} \quad (14)$$

میرمیران و شهاوی (1997) عقیده داشتند که بدلیل فقدان نتایج میدانی و آزمایشگاهی، هنوز مدل ریاضی مناسبی برای بیان رفتار ستونهای هیبریدی بدست نیامده است و روشهای طراحی سنتی بر اساس مدلهای ساده برگرفته از مدلهای محصور شدگی ستونهای بتن آرمه معمولی استوار هستند. مطالعات آنها نشان داده است که بعضی از مدلهای معمولی ارائه شده، برای ستونهای هیبریدی ممکن است محافظه کارانه نباشد. مطالعات سمعان و همکاران (1998) در ادامه مطالعات میرمیران و شهاوی، نشان می دهد که بطور کلی عملکرد یک ستون بتنی تحت بار محوری با ایجاد فشار جانبی بهبود می یابد اما عملکرد ستونهای بتنی با خواص مشابه بتن و فشار محصور شدگی، در مقابل مکانیزم های مختلف محصور شدگی با یکدیگر متفاوت

است. بنابراین بهتر است بتن را یک ماده حساس به قید در مقابل حساسیت به فشار دانست. این دیدگاه نه تنها تفاوت بتن محصورشده به صورت اکتیو و پاسیو را بیان می کند، بلکه نشان دهنده تفاوت بتن محصور شده با FRP و بتن محصور شده با فولاد نیز می باشد. علاوه بر این نشان می دهد که مهمترین عامل در ارائه یک مدل جامع برای محصورشدگی بتن، تمایل بتن به انبساط است. به بیان دیگر، مدلهایی همچون ماندر که شرط سازگاری کرنش را ارضاء نمی کنند باید با دیدگاه تعادل انرژی برای پیش گویی کرنش شکست دوباره بازنویسی شوند.[9]



شکل 5- مدل تنش و کرنش محوری بتن محصور شده با FRP (کارباهاری و گائو)

لازم به ذکر است که در دیدگاه متداول، انرژی کرنشی ذخیره شده در سیستم محصور کننده تا شکست آن برابر با تفاوت بین انرژی کرنشی محوری بتن محصور شده و بتن محصور نشده است. در این دیدگاه برای ساده سازی از انرژی کرنشی جانبی ذخیره شده در بتن صرف نظر شده است. لذا در پیشگویی رفتار بتن محصور شده با FRP خطایی قابل ملاحظه ایجاد می شود چون در رفتار بتن محصور شده با FRP، انرژی کرنشی جانبی ذخیره شده در بتن حدود 80٪ انرژی کل محاسبه شده است. برای روشن شدن بهتر موضوع در جدول 1 رفتار نمونه های استوانه ای با تیوب FRP و فولاد با یکدیگر مقایسه شده اند. در این جدول خواص نمونه با پوشش فولادی از نمونه CS آزمایشات اریتو و همکاران (1987) و خواص نمونه با پوشش FRP از نمونه DB12 آزمایشات میرمیران (1997) گرفته شده است. نسبت فشار محصورشدگی به مقاومت بتن محصور نشده برابر با نسبت محصور شدگی (f_c/f'_c) تعریف شده است. مشاهده می شود که در هر دو حالت نسبت محصورشدگی حدود 0/65 است. اما اثر محصورشدگی (f'_{cc}/f'_c) در حالت فولادی بیشتر است و نشان می دهد که پوشش فولادی در افزایش مقاومت مؤثرتر است اما کرنش نهایی پوشش فولادی کمتر می باشد.[2]

جدول 1- خواص نمونه های استوانه ای با تیوب FRP و فولاد

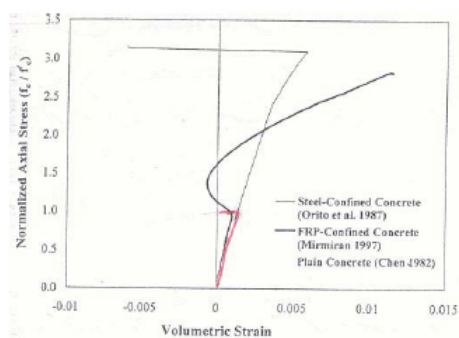
FRP	فولاد	خواص
145	114/3	قطر نمونه (D) mm
2/2	5/2	ضخامت تیوب (t) mm
26	52	مقاومت فشاری بتن محصور نشده (f'_c) MPa
75	172	مقاومت فشاری بتن محصور شده (f'_{cc}) MPa
2/8	3/3	اثر محصور شدگی (f'_{cc} / f'_c)
0/043	0/036	کرنش نهایی (ϵ_{cu})
579/2	376/7	مقاومت حلقوی تیوب (f_u) MPa
17/6	43/3	فشار محصورشدگی (f_r) MPa
0/66	0/65	نسبت محصورشدگی (f_r / f'_c)

در شکل 6 منحنی تنش و کرنش محوری دو نمونه با هم مقایسه شده اند. تنش محوری با f'_c نرمالایز شده است. در این شکل نمودار تنش و کرنش محوری یک نمونه بتن محصور نشده (چن 1982) نیز ترسیم شده است. مشاهده می شود که نمودار مربوط به پوشش فولادی، قبل از رسیدن به مقاومت ماکزیمم f'_{cc} دارای یک شیب نرم شونده ملایم است و مقاومت نهایی f'_{cu} پس از مقاومت ماکزیمم و با مقدار کمتر از آن رخ می دهد. مطالعات نشان می دهد که مقاومت ماکزیمم با فاصله کوتاهی پس از تسلیم پوشش فولادی رخ می دهد. از طرف دیگر در نمونه با پوشش FRP، یک رفتار دو خطی مشاهده می شود، که در آن ناحیه انتقالی بین دو خط در محدوده f'_c قرار داشته و پس از آن با یک نرخ ثابت، نرم شوندگی رخ می دهد تا به مقاومت ماکزیمم (مقاومت نهایی) برسد. مقایسه دو منحنی نشان می دهد که پوشش فولادی توانایی جذب انرژی بیشتری از پوشش FRP دارد. ذکر این نکته ارزشمند است که در دو حالت نسبت محصورشدگی (f_r / f'_c) یکسان است اما اثر محصورشدگی (f'_{cc} / f'_c) متفاوت می باشد. پوشش FRP یک فشار افزایشده با نرخ ثابت به هسته بتنی اعمال می کند تا اولین لایه FRP پاره شود در حالیکه این فشار در پوشش فولادی پس از تسلیم فولاد تحت کشش حلقوی تقریباً ثابت می ماند.

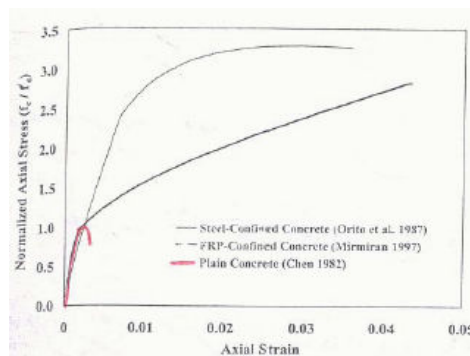
در شکل 7 کرنش حجمی نمونه ها بررسی شده است. در نمونه با پوشش فولادی، با افزایش تنش، کرنش حجمی افزایش می یابد و با تسلیم پوشش فولادی، کرنش حجمی ناپایدار می شود. در نمونه با پوشش FRP، پس از رسیدن تنش به f_c' ، انبساط جانبی توسط پوشش FRP محدود می شود و کرنش حجمی حتی منفی می شود. پس از اینکه جهت کرنش حجمی معکوس شد، هسته بتنی دچار خرد شدگی می شود. این تفاوت رفتاری، بیشتر ناشی از تفاوت انبساط دو نمونه است. نرخ انبساط مطابق با رابطه (15) بصورت نرخ تغییر کرنش جانبی (شعاعی) به نرخ تغییر کرنش محوری تعریف شده است (میرمیران و شهاوی 1997).

$$\mu = -\frac{d\varepsilon_r}{d\varepsilon_c} \quad (15)$$

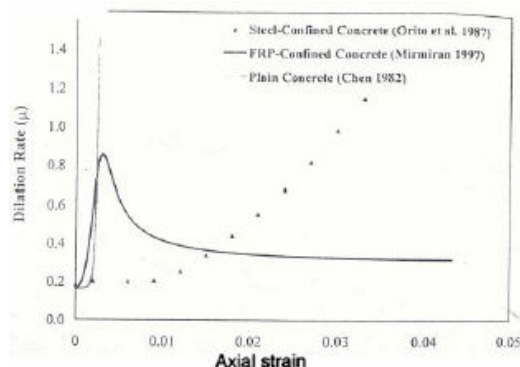
شکل 8 تغییرات نرخ انبساط را بر حسب کرنش محوری برای هر سه نمونه نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود هر سه نمودار از نرخ انبساط برابر با ضریب پواسون 0/2 شروع می شوند. در نمونه بتن محصور نشده، نرخ تغییرات با رشد ترکها شدید است و در حدود f_c' ، نرخ انبساط ناپایدار می شود. در نمونه با پوشش فولادی، نرخ انبساط تا تسلیم پوشش فولادی افزایش می یابد و پس از آن همانند نمونه بتن محصور نشده ناپایدار می شود. در نمونه با پوشش FRP، اساساً رفتار متفاوت است. وقتی پوشش FRP کاملاً فعال شد، نرخ انبساط کاهش می یابد و به یک مقدار ثابت مجانب می شود. این مقایسه نشان می دهد که مدلهایی برای بتن محصور شده با پوشش FRP مناسب هستند که در آن سختی پوشش FRP نیز لحاظ شده باشد به عبارت دیگر در ارائه هر مدل رفتاری باید تاثیر این مکانیزم محصورشدگی روی تمایل به انبساط هسته بتنی در نظر گرفته شده باشد.



شکل 7- مقایسه کرنش حجمی بتن محصور شده با FRP ، پوشش فولادی و بتن محصور نشده (سمعان و همکاران 1998)



شکل 6- مقایسه نمودار تنش و کرنش محوری بتن محصور شده با FRP ، پوشش فولادی و بتن محصور نشده (سمعان و همکاران 1998)



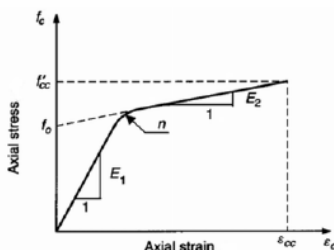
شکل 8- مقایسه نرخ انبساط بتن محصور شده با FRP ، پوشش فولادی و بتن محصور نشده (سمعان و همکاران 1998)

میرمیران و همکاران (1998) بر اساس مطالعات قبلی ذکر شده یک مدل دو خطی با ناحیه انتقالی غیر خطی مطابق شکل 9 ارائه نمودند. این مدل چهار پارامتری به صورت رابطه (16) می باشد. پارامترهای این مدل که برای بتن محصور شده با FRP کالیبره شده است، بر حسب MPa و به شرح روابط (17) می باشند. در این روابط f_c' و ε_c تنش و کرنش محوری بتن و E_1 و E_2 شیب اول و دوم منحنی تنش کرنش بتن می باشند. پارامتر f_0 تنشی است که از برخورد شیب دوم منحنی تنش کرنش با محور تنش ها بدست می آید و η پارامتر شکل می باشد که برای مقاطع دایره ای 1/5 در نظر گرفته می شود. کرنش نهایی بتن محصور شده نیز با ε_{cu} نشان داده شده است. [10]

$$f_c = \frac{(E_1 - E_2) \cdot \epsilon_c}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2) \cdot \epsilon_c}{f_0} \right)^n \right]^{1/n}} + E_2 \cdot \epsilon_c \quad (16)$$

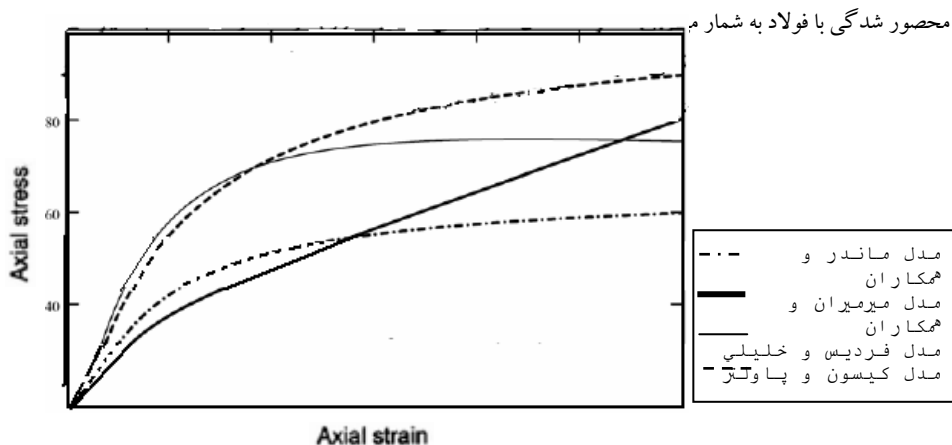
$$\begin{aligned} f_r &= \frac{2f_{fu} \cdot t}{D} & E_1 &= 3950 \sqrt{f'_{co}} \\ f'_{cc} &= f'_{co} + 6f_r^{0.7} & E_2 &= 245.61 f'_{co}{}^{0.2} + 1.3456 \frac{E_f \cdot t}{D} \\ \epsilon_{cc} &= \frac{f'_{cc} - f_o}{E_2} & f_o &= 0.872 f'_{co} + 0.371 f_r + 6.258 \\ & & n &= 1.5 \end{aligned} \quad (17)$$

در شکل 10 مدل‌های فوق‌الذکر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود در مدل ماندر که برای فولاد نوشته شده است پس از تسلیم فولاد (نقطه اوج مقاومت) به علت ایجاد فشار محصور شدگی ثابت مقاومت نیز تقریباً ثابت می‌ماند. اما در سایر مدل‌ها به دلیل آنکه پوشش FRP دارای مقاومت بالا و رفتار خطی است با افزایش بار محوری و تمایل به کرنش جانبی بیشتر، فشار محصور شدگی نیز افزایش می‌یابد.



شکل 9- منحنی تنش-کرنش بتن محصور شده با FRP (میرمیران و همکاران 1998)

مدل‌های فردیس و خلیلی (1998) و کیسون و پاولتر (1995) با در نظر گرفتن این موضوع نوشته شده‌اند. اما با بررسی نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که شیب ناحیه دوم در هر دو کمتر از مقدارهای واقعی گرفته شده است. در مدل میرمیران و همکاران (1998) شیب ناحیه دوم تقریباً ثابت است و بررسی‌ها نشان می‌دهد که با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. مدل دو خطی کاربهاراری و گائو (1995) نیز تقریباً با مدل میرمیران و همکاران (1998) هماهنگی دارد. لازم بذکر است که مدل‌های رفتاری دیگری نیز وجود دارد اما همانطور که ذکر شد یک مدل دو خطی با ناحیه انتقالی غیر خطی می‌تواند مدل مناسبی برای بتن محصور شده با FRP باشد. استاندارد ACI440 از مدل ماندر استفاده نموده است که از مهمترین مدل‌های



شکل 10- مقایسه مدل‌های تنش-کرنش بتن محصور شده با FRP

5. نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی مدل‌های رفتاری بتن مسلح محصور شده در حالت‌های اکتیو و پاسیو پرداخته شد. در حالت پاسیو مدل‌های رفتاری به دو دسته محصورشدگی با فولاد و FRP تقسیم بندی گردید. یکی از مهمترین مدل‌های محصورشدگی با فولاد مدل ماندراست. پاره ای از محققان از مدل‌های محصورشدگی با فولاد برای FRP استفاده نمودند. استاندارد ACI 440 نیز از مدل ماندراست استفاده نموده است. بررسی ها نشان می دهد که بعضی از مدل‌های مذکور برای حالت محصورشدگی با FRP ممکن است محافظه کارانه نباشد. مطالعات نشان می دهد که بهتر است بتن را یک ماده حساس به قید نامید تا آنکه آن را یک ماده حساس به فشار دانست. این دیدگاه نه تنها تفاوت بین بتن محصور شده به صورت اکتیو و پاسیو را بیان می کند بلکه نشان دهنده تفاوت بتن محصور شده با FRP و بتن محصور شده با فولاد نیز می باشد. علاوه بر این نشان می دهد که مهمترین عامل در ارائه یک مدل جامع برای محصورشدگی بتن، تمایل بتن به انبساط است. به بیان دیگر مدل‌هایی همچون مدل ماندراست که شرط سازگاری کرنش را ارضاء نمی کنند باید با دیدگاه تعادل انرژی برای پیشگویی کرنش شکست دوباره نویسی شوند. ضمن آنکه مدل‌هایی برای بتن محصور شده با FRP مناسب هستند که در آن سختی FRP نیز لحاظ شده باشد. به عبارت دیگر در ارائه هر مدل رفتاری باید تأثیر این مکانیزم محصورشدگی روی تمایل به انبساط هسته بتنی در نظر گرفته شده باشد. بر اساس مطالعات ذکر شده یک مدل دو خطی با ناحیه انتقالی غیر خطی می تواند مدل مناسبی برای بتن محصور شده با FRP باشد.

6. مراجع

- 1- Chinn, J., and Zimmerman, R.M. (1965). "Behavior of plain concrete under various triaxial compression loading conditions". Technical Report No. WLTR-64-163, Air Force Weapons Laboratory, NM.
- 2- Considere, A. (1903). "Experimental researches on reinforced concrete." L.S. Moisseiff, Translator, McGraw Hill, New York.
- 3- Cusson, D., and Paultre, P. (1995). "Stress-strain model for confined high-strength concrete." J. Struct. Eng., ASCE, 121(3), 468-477.
- 4- Fardis, M.N., and Khalili, H.H. (1982). "FRP-encased concrete as a structural material". Mag. of Concrete Research., 34 (121), 191-201.
- 5- Karbhari, V.M., and Gao, Y. (1997). "Composite jacketed concrete under uniaxial compression-verification of simple design equations." J. Mater. Eng., 9(4), 185-193.
- 6- Lam, L., and Teng, J.G. (2003). "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete." Construction and Building Materials, 17, 471-489.
- 7- Lyengar, K.T.S.R., Desayi, R., and Reddy, K.N. (1970). "Stress-strain characteristics of concrete confined in steel binders". Magazine of Concrete Research (London), 22 (72), 173-184.
- 8 Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R. (1988). "Theoretical stress-strain model for confined concrete" Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
- 9-Mirmiran, A., and Shahawy, M. (1997). "Behavior of concrete columns confined with fiber composites", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 123, pp. 583-590.
- 10-Mirmiran, a., Shahawh, M. , Samaan, Elechart, H., Mastrapa, J.C., Pico, O. (1998) . " Effect of column parameters on FRP-confined concrete," J. Comp. Construct, ASCE, 2(4) , 175-185.
- 11-Newman, R., and Newman, J.B. (1971). "Failure theories and design criteria for plain concrete". Proc. Int. Civil Engr. Mater. Conf. on Struct., Solid Mech. And Engr. Design, Wiley Inter science, New York, NY, 936, 936-995
- 12-Popovics, S. (1973). "Numerical approach to the complete stress-strain Curves for concrete." Cement and Concrete Research, 3(5), 583-599.
- 13-Richart, F.E., Brandtzaeg, A., Prown R.L. (1928). "A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stress. " Bulletin No. 190, Engineering Experiment Station, University of Illinois, Urbana, IL
- 14- Saatcioglu, M., Razvi, S. R. (1992). "Strength and ductility of confined concrete." Journal of Structural Engineering, 118(6), 1590-1607