

ارزیابی مدل‌های طراحی و تحلیلی موجود در بیان رفتار اعضاء بتنی فشاری محصور بازره FRP

امیرحسین ذکریائی، ایمان صفاریان

دانشجویان کارشناسی ارشد - گرایش مهندسی و مدیریت ساخت - دانشگاه علوم و تحقیقات اهواز

zakariaee@gmail.com

خلاصه

زره FRP یک روش مؤثر در تقویت اعضاء فشاری بتنی است. زره FRP از طریق محصور کردن عضو فشاری و ممانعت از انبساط جانبی ناشی از اثر پواسون باعث افزایش مقاومت فشاری میشود که اصطلاحاً محصورکنندگی خوانده میشود. یک ستون بتنی محصور به زره FRP دارای یک نمودار تنش- کرنش دوخطی است که شاخه اول آن منعکس کننده خصوصیات بتن و شاخه دوم بیانگر خصوصیات FRP است. محققین بسیاری تلاش کرده اند تا با ارائه مدلی، رفتار ستون بتنی مسلح به زره FRP را تشریح نمایند. این مدلها عمدتاً دارای گرایشهای طراحی یا تحلیلی هستند. مدل‌های طراحی براساس نتایج آزمایشگاهی و تصحیحات لازم بدست می‌آیند، در حالیکه مدل‌های تحلیلی مبتنی بر روشهای استنتاجی ریاضی هستند. مقاله حاضر معتبرترین مدل‌های طراحی و تحلیلی را مورد بررسی قرار میدهد و با مقایسه آنها با داده های آزمایشی صحت نتایج حاصله از آنها مورد ارزیابی قرار میگیرد.

واژگان کلیدی: زره FRP، محصورکنندگی، مدل‌های طراحی، مدل‌های تحلیلی

مقدمه

زره FRP یک روش نوین و موثر در المانهای خمشی و فشاری می‌باشد. عملکرد زره FRP در ستونها با تیرها و دالها تفاوت بنیادین دارد. در ستونها زره FRP مانع از انبساط جانبی هسته بتنی می‌گردد و نتیجتاً مقاومت فشاری بالاتری برای ستون حاصل می‌گردد. این شرایط، اصطلاحاً محصورکنندگی خوانده می‌شود و مقاومت ستون مستقیماً به میزان محصورکنندگی بتن ارتباط دارد. چنانچه خواهیم دید پاسخ تنش - کرنش در ستونهای محصور به زره FRP عملکردی دو خطی است که در شاخه اول بتن نقش اصلی را دارد و در شاخه دوم این FRP است که وارد عمل می‌گردد.

مکانیزم محصورکنندگی

هنگامی که دور یک ستون بتنی زره FRP پیچانده می‌شود، مقاومت فشاری ستون افزایش قابل توجهی می‌یابد. مکانیزم عملکرد FRP در اثر پدیده موسوم به محصورکنندگی منجر به افزایش مقاومت فشاری ستون می‌گردد.

میدانیم هسته بتنی با افزایش تنش فشاری شروع به انبساط جانبی می‌نماید. هرگاه تنش فشاری محوری نسبت به مقاومت فشاری بتن محصور نشده کم باشد، انبساط عرضی هسته بتنی ناچیز می‌باشد، با افزایش تنش محوری انبساط جانبی هسته بتنی قابل توجه می‌گردد. به محض اینکه تنش محوری از مقاومت نهائی بتن محصور نشده فراتر رود، یک افزایش خطی در نسبت پواسون تا لحظه گسیختگی شاهد هستیم و کرنش عرضی بسیار سریعتر از کرنش محوری افزایش می‌یابد. این پدیده می‌تواند منجر به ترک خوردگیهای رو به گسترش در هسته بتنی گردد. [1] پیش از آنکه بتن به مقاومت محصور نشده خود برسد، نسبت پواسون آن برابر 18% می‌باشد، هنگامیکه بتن به مقاومت محصور نشده خود می‌رسد، ترکهای میکروسکوپی عرضی در هسته بتنی روی می‌دهد و هسته بتنی به طور جانبی انبساط می‌یابد که این اتفاق همراه با افزایش معنی‌دار ضریب پواسون می‌باشد. [3]

روشن است که ورق FRP مانع از انبساط جانبی بتن می‌گردد. در این شرایط بتن تحت تنش فشاری جانبی قرار می‌گیرد، لذا در این شرایط بتن تحت تنش سه محوره قرار می‌گیرد. حالت بتن محصور نشده و بتن محصور شده را می‌توان با آزمایشهای تک محوری و سه محوری در مکانیک خاک مقایسه کرد.

نمودار دو خطی تنش - کرنش بتن محصور شده توسط ورقهای FRP تحت بار تک محوره مشتمل بر دو شاخه با خصوصیات متفاوت است. در شاخه اول به جهت ناچیز بودن انبساط جانبی هسته بتنی، نیروی قابل توجهی به ورق FRP وارد نمی‌شود و لذا در این شرایط عملاً وجود یا عدم وجود ورق FRP تاثیری در مقاومت هسته بتنی ندارد. در این شاخه عملکرد بتن محصور شده مشابه بتن محصور نشده است.

در شاخه دوم تنش فشاری بتن عملاً از مقاومت فشاری فراتر رفته است. در این شرایط بتن تمایل به انبساط جانبی دارد و از آنجائیکه شرایط برای این انبساط جانبی مهیا نمی‌باشد، با در نظر گرفتن اثر همسازی هسته بتنی و ورق FRP، هسته بتنی تحت تنش سه محوره قرار می‌گیرد. در این شرایط زره FRP کاملاً وارد عمل می‌گردد و بتن محصور شده هنگامی گسیخته می‌گردد که فشار وارد از سوی هسته بتنی ناشی از محصور شدگی بیش از مقاومت کششی شعاعی زره FRP گردد.

مقاومت نهائی و کرنش نهائی

هنگامیکه بتن محصور شده به مقاومت فشاری خود می‌رسد، لفافه‌های FRP (Wraps) که دور آن پیچیده شده‌اند، انبساط هسته بتنی را محصور می‌نمایند و هسته بتنی را به حالت تنش فشاری سه بعدی انتقال می‌دهند. در این حالت مقاومت فشاری و شکل‌پذیری (Ductility) ستونهای زره دار افزایش می‌یابد. به هر حال، محصور کنندگی به فشار حلقوی وارده به هسته بتنی از طرف زره FRP بستگی دارد و اگر فشاری که توسط زره FRP وارد می‌شود به اندازه کافی نباشد که ممکن است در اثر مقاومت کششی پائین یا ضخامت کم زره باشد، محصور کنندگی مطلوب بدست نمی‌آید و مقاومت فشاری به صورت قابل توجهی افزایش نمی‌یابد. [2]

در واقع کیفیت و کمیت زره کامپوزیتی تاثیر مهمی روی رفتار نمونه آزمایشی دارد. در حقیقت نتایج نشان می‌دهند که شیب شاخه دوم که «شاخه شبه الاستیک» نامیده می‌شود با تعداد و سختی و جهت لایه‌های کامپوزیت نسبت مستقیم دارد. گسیختگی استوانه‌های فشاری محصور، ناگهان اتفاق می‌افتد و متناظر با آن گسیختگی کششی زره کامپوزیتی هم اتفاق می‌افتد که هنگامی شاهد این گسیختگی هستیم که کرنش جانبی هسته بتنی به کرنش نهائی زره کامپوزیتی رسیده باشد. [1]

Hamelin, Ferrier, Berltnet یک تغییر قابل ملاحظه روی رفتار بتن هنگامیکه محصور می‌گردد را آشکار ساخته‌اند. بتن تحت تنش فشاری تک محوره مانند مواد ترد تسلیم می‌گردد، در حالیکه هنگامیکه تحت تنش فشاری سه محوره قرار می‌گیرد شکل پذیر می‌گردد. در حقیقت، این شکل پذیری کاذب است، زیرا متناظر با پدیده‌های سازه‌ای است. [1]

در حقیقت نه تنها مقاومت نهائی بتن محصور که کرنش محوری آن نیز، در مقایسه با بتن نامحصور به نحو چشمگیری افزایش می‌یابد. این افزایش کرنش نهائی باعث ایجاد رفتار شکل پذیرتر در بتن محصور می‌گردد.

در رابطه با ظرفیت کرنشی نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که کرنش محوری نسبت مستقیمی با میزان محصور کنندگی دارد و تقریباً به صورت خطی با عاملی به نام «نسبت محصور کنندگی» متناسب است. با این وجود مشاهده می‌گردد که در میزان محصور کنندگی بالا، بدلیل مقاومت زیاد ورق FRP در برابر گسیختگی، تخریب هسته بتنی افزایش می‌یابد و هسته بتنی تراکم بیشتری می‌یابد. در حقیقت افزایش کرنش، نمایش در مقیاس بزرگ ترکه‌های رو به گسترش است که منجر به تراکم هسته بتنی می‌گردد که به صورت قفل شدن سوراخهای ریز موئی و فرو ریزش ریزسازه‌ها و فصل مشترک دانه‌ها و شبکه توضیح داده می‌شود. بنابراین، ظرفیت کرنش بدلیل بسته شدن سوراخهای ریز مویی محدود می‌گردد و ریز سازه‌ها کمتر و کمتر قابل فشار می‌گردند. قابلیت فشار پذیری در بتن و نتیجتاً ظرفیت کرنشی به حجم سوراخهای ریز و نسبت حجمی توده خمیر و ساختار خمیر هیدراته بستگی دارد. [1]

در این بخش مکانیزم عملکرد FRP در افزایش مقاومت فشاری و ظرفیت کرنش محوری و جانبی به تفصیل توضیح داده شده. اما هنوز یک معیار مناسب برای بررسی دقیق واکنش ارائه نگردیده است.

این موضوع ما را به ضرورت ارائه مدل مناسب از رفتار هسته بتنی و زره FRP و اندر کنش آنها آگاه می‌سازد. در بخشهای بعدی به تشریح مدل‌های موجود می‌پردازیم.

مدلهای محصور سازی

برای درک رفتار استوانه‌های بتنی محصور به زره FRP لازم است که یک مدل جهت پیش‌بینی مقاومت و کرنش نهائی و حالت گسیختگی استفاده گردد. این مدل همچنین باید پاسخ تنش محوری- کرنش محوری و کرنش جانبی را پیش‌بینی نماید. در حال حاضر مدل‌های موجود را در دو گروه دسته‌بندی می‌نمایند.

1- مدل‌های با گرایش طراحی (Design-oriented models) یا مدل‌های عملی: این مدل‌ها مستقیماً بر اساس نتایج آزمایشگاهی و تصحیحات بر روی منحنی‌های حاصل از آنها بنا شده‌اند. از ویژگیهای این مدل‌ها ساده، قابل فهم و رایج بودن آنها است.

2- مدل‌های با گرایش تحلیلی (Analysis-oriented models) یا مدل‌های نظری: این مدل‌ها براساس روندهای عددی از طریق محاسبه صریح یا ضمنی تعادل و شعاع تغییر مکان همسازی بنا نهاده شده‌اند. از ویژگیهای این مدل‌ها فرض رفتار جداگانه بتن و FRP است. مدل‌های با گرایش تحلیلی عموماً دقیق‌تر و تطبیق پذیرتر هستند و گزینه ترجیح داده شده برای استفاده، اغلب از شمول بیشتری نسبت به مدل‌های بر پایه طراحی برخوردار است و کاربردی‌تر و قابل گسترش برای موادی غیر از FRP برای محصور کردن بتن نیز می‌باشند. آنها همچنین می‌توانند برای تولید نتایج عددی برای گسترش مدل‌های با گرایش طراحی نیز به کار روند. [3و4]

با این همه مدل‌های با گرایش تحلیلی پیچیده بوده و تطبیق آنها با نتایج آزمایشگاهی همیشه ممکن نیست.

نتایج حاصل از مدل‌های با گرایش طراحی و تحلیلی معمولاً بر یکدیگر منطبق نیستند همچنین مدل‌های با گرایش طراحی موجود نیز علیرغم شباهتهایی که دارند در پیش‌بینی‌ها معمولاً بسیار متفاوت عمل می‌کنند. این مشکل در مدل‌های با گرایش تحلیلی بیشتر به چشم می‌خورد. به ویژه اینکه مبانی نظری این مدل‌ها با یکدیگر متفاوت است. همچنین مفروضاتی که جهت ساده سازی این مدل‌ها بکار می‌روند در بسیاری از موارد هنوز در ابهام قرار دارند.

مدل‌های طراحی

مدل‌های طراحی در حالت کلی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = [1 + k \left(\frac{f_r}{f'_{co}}\right)^m] \quad (1)$$

که در این رابطه f'_{cc} مقاومت فشاری بتن محصور شده و f'_{co} مقاومت فشاری بتن محصور نشده است. f_r فشار جانبی محصور کننده است و $\left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}}\right)$ «ضریب تاثیر محصور کنندگی» و $\left(\frac{f_r}{f'_{co}}\right)$ «نسبت محصور کنندگی» نامیده می‌شوند و k «ضریب تاثیر» و m «توان نسبت محصور کنندگی» نامیده می‌شوند.

f_r می‌تواند از رابطه زیر به دست آید:

$$f_r = \frac{2 f_{FRP} t}{D} \quad (2)$$

که در این رابطه f_{FRP} به ترتیب مقاومت کششی FRP و ضخامت لاف FRP و قطر هسته بتنی می‌باشند [1 و 2]

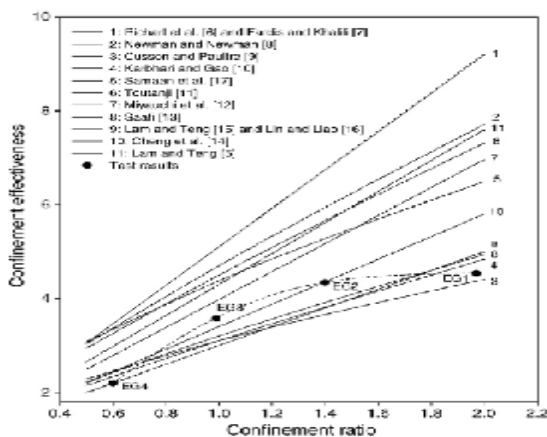
مدل‌های طراحی معتبر [3و2]

مدل‌های طراحی در جدول 1 خلاصه شده است.

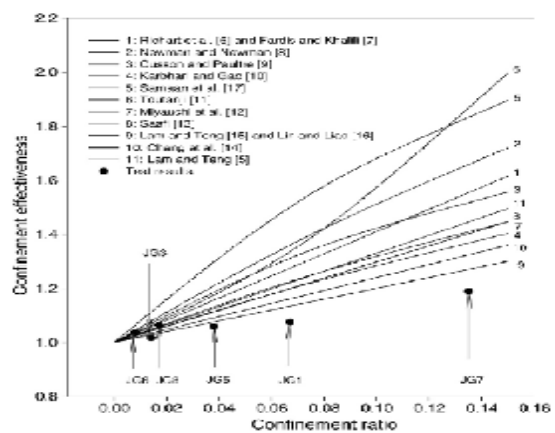
جدول 1- مدل‌های طراحی

نام مدل	Richard et al.	Fardis&Khalili	Newman&Newman	Cusson&paultre	Karbhari&Gao	Saaman et al.	Toutanji	Miyauchi et al.	Saafi	Cheng et al.	Lam&Teng	Lam&Teng	Lin&liao
M	1.00	1.00	0.86	0.70	0.87	0.70	0.85	1.00	0.84	1.00	1.00	1.00	1.00
K	4.10	4.10	3.70	2.10	2.10	3.38	3.50	2.98	2.20	2.40	3.30	3.30	2.00

Guoqiang Li در دو مقاله جداگانه [3و2] به مقایسه نتایج حاصله از این مدل‌ها پرداخته است. L_i ورق‌های FRP مختلف با زوایای الیاف مختلف را بکار برده است. اما نتایج مقایسه وی در ارزیابی مدل‌های مختلف و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی که وی بدست آورده است در خور توجه است: شکل‌های 1 و 2 نتایج آزمایشات L_i را با مدل‌های موجود به ترتیب در مورد ورق‌های FRP و لوله‌های FRP نشان می‌دهد. در این شکل‌ها نتایج آزمایشات L_i به صورت نقاط توپر نشان داده شده است.



شکل 2- مقایسه نتایج آزمایش L_i با مدل‌های طراحی برای استوانه‌های بتنی پوشش داده شده با لوله FRP



شکل 1- مقایسه نتایج آزمایش L_i با مدل‌های طراحی برای استوانه‌های بتنی مسلح به زره FRP

در مقایسه نتایج آزمایشات این مطالعه دیده می‌شود که بسیاری از مدلها تاثیر محصور کنندگی را بیش از میزان واقعی بر آورد می‌نمایند. این ممکن است ناشی از این واقعیت باشد که نمونه‌های این آزمایش به صورت ناکافی محصور شده‌اند و در لوله‌های FRP هم از بتن با مقاومت بالاتری استفاده شده است. [3] برای نمونه‌های استوانه‌ای مسلح به زره FRP مدل Lam&Teng و Lin&Liao نزدیکترین پیش‌بینی است. قابل ذکر است که مدل Lam&Teng و Lin&Liao تقریباً بهترین مدل برای هر دو مورد است. بنابراین حداقل برای داده‌های آزمایش این مطالعه، که هم نمونه‌های استوانه‌ای مسلح به زره FRP و هم نمونه‌های استوانه‌ای دارای پوشش لوله FRP را پوشش می‌دهد و شامل زوایای الیاف و ضخامت دیواره لوله FRP متفاوت می‌باشند و دارای بتن دارای مقاومت گوناگون نیز هستند، مدل فوق مدلی قابل پذیرش است، زیرا که با داده‌های بیشتری انطباق دارد. [3]

مدلهای تحلیلی

مدل Mirmiran&Shahawy [4]

این مدل که قدیمی‌ترین مدل تحلیلی در این زمینه است در سال 1996 ارائه گردید و راهنمای بسیاری از محققین دیگر جهت ارائه مدل‌های دیگر بود. اولین بار Mirmiran&Shahawy براساس مدل Madas&Elnehai که برای بتن محصور به زره فولادی ارائه شده بود و با گسترش آن برای زره FRP مدل خود را بدست آوردند. گرچه این مدل در بیان بعضی از متغیرها مبهم عمل می‌نماید، اما به هر حال بعنوان اولین مدل از اهمیت خاصی برخوردار است.

تنش محوری حداکثر: تنش محوری حداکثر روی نمودار تنش - کرنش محصور فعال، مقاومت فشاری بتن است و معادله تنش حداکثر بیانگر شکست این بتن است. مدل Mirmiran&Shahawy مستقیماً از سطح شکست پنج متغیره ارائه شده توسط William&Warnke برای بیان تنش محوری حداکثر استفاده کردند. این رابطه به صورت زیر است:

$$f'_{cc} = f'_{co} (2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f_{co}} - 1.254) \quad (1)$$

که در آن f'_{cc} تنش محوری حداکثر بتن تحت فشار محصور کنندگی ثابت ویژه f_l است.

کرنش محوری در تنش محوری حداکثر: Mirmiran&Shahawy معادله زیر را که اولین بار توسط Richart et al. پیشنهاد گردید را برای کرنش محوری در تنش محوری حداکثر بکار برده‌اند:

$$e_{cc}^* = e_{co} [1 + 5(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1)] \quad (2)$$

که در آن e_{cc}^* ، e_{co} به ترتیب کرنش محوری در f'_{cc} ، f'_{co} هستند.

معادله تنش - کرنش: این مدل رابطه زیر را که برای اولین بار توسط Popvics ارائه گردیده و توسط Mander et al. برای بتن محصور در فولاد پذیرفته شد را بکار برده است:

$$\frac{s_c}{f_{cc}} = \frac{(e_c / e_{cc}^*) r}{r - 1 + (e_c / e_{cc}^*) r} \quad (3)$$

که ثابت r برابر است با:

$$r = \frac{E_c}{E_c - f_{cc}^* / e_{cc}^*} \quad (4)$$

که E_c مدول الاستیسیته بتن است.

رابطه کرنش محوری و جانبی: رابطه بین کرنش محوری و جانبی که در مدل محصور کردن فعال موجود نیست، یک ارتباط ضروری بین پاسخ هسته بتنی و پاسخ زره FRP در مدل محصور کردن غیر فعال است.

Mirmiran&Shahawy رابطه‌ای صریح بین کرنش محوری و جانبی در مدل خود بکار بردند. آنها نسبت انبساط تانژانت (Tangant Dilatation ratio) که با نماد m_f نشان داده می‌شود را برای برقراری ارتباط بین کرنش جانبی و کرنش محوری استفاده کردند. نسبت انبساط تانژانت قدر

مطلق مقدار تانژانت شیب نمودار کرنش محوری به کرنش جانبی بتن محصور به FRP است یا به عبارت ریاضی $m_f = |de_l / de_c|$ یک تابع

کسری توسط این مولفین برای بیان نسبت تانژانت براساس نتایج آزمایشات خودشان روی بتن محصور به FRP معرفی گردید.

مدل Spoelstra&Monti [4]

این مدل در سال 1999 ارائه گردید.

تنش محوری حداکثر: Spoelstra & Monti هم از رابطه (1) برای بیان تنش محوری حداکثر استفاده کردند.

کرنش محوری در تنش محوری حداکثر: این مدل هم رابطه (2) را برای کرنش محوری در تنش حداکثر به کار برد. معادله تنش - کرنش: این مدل هم روابط (3) و (4) را برای معادله تنش - کرنش بکار برد. رابطه کرنش محوری و جانبی: Spoelstra & Monti یک رابطه ضمنی برای کرنش محوری - جانبی ارائه کردند. آنها مدل ترکیبی ساده ارائه شده توسط Pantazopoulou & Mills که کاهش مدول سکانت بتن با افزایش کرنش سطحی را بیان می‌دارد را برای تعیین کرنش جانبی پذیرفته‌اند.

مدل Fam & Rizkalla [4]

این مدل در سال 2000 ارائه گردید. تنش محوری حداکثر: در این مدل از رابطه (1) برای تنش محوری حداکثر بهره برده شده است. کرنش محوری در تنش محوری حداکثر: در این مدل هم از رابطه (2) برای کرنش محوری در تنش محوری حداکثر استفاده شده است. معادله تنش - کرنش: این مدل هم از روابط (3) و (4) استفاده نموده است. رابطه کرنش محوری و جانبی: در این مدل، معادله ارائه شده برای تغییرات نسبت انبساط سکانت (Secant dilatation ratio) با فشار محصور کنندگی براساس نتایج بدست آمده توسط Gardner از آزمایشات فشاری سه محوری بتن برای تعیین کرنش جانبی بسط داده شد. تعریف نسبت انبساط سکانت در بخشهای بعدی آمده است.

مدل Chun & Park [4]

این مدل در سال 2002 بیان گردیده است. تنش محوری حداکثر: این مدل هم از رابطه (1) برای تنش محوری حداکثر بهره برده است. کرنش محوری در تنش محوری حداکثر: در این مدل هم از رابطه (2) استفاده شده است. معادله تنش - کرنش: در این مدل هم از روابط (3) و (4) استفاده شده است. رابطه کرنش محوری و جانبی: در این مدل یک معادله چند جمله‌ای درجه 3 که توسط Elwi & Murray براساس نتایج بدست آمده توسط Kupfer et al از نتایج آزمایش فشار تک محوری بتن بسط داده شد بکار رفت.

مدل Harris & Kharel [4]

این مدل هم در سال 2002 ارائه شده است. بر خلاف 3 مدل قبلی که شباهتهای زیادی به مدل Mirmiran & Shahawy داشتند، این مدل با مدلهای پیش گفته تفاوتهای زیادی دارد.

تنش محوری حداکثر: Harris & Kharel معادله زیر را که توسط Mirmiran & Shahawy ارائه شده پذیرفته‌اند:

$$f_{cc}^* = f_{cc}' + 4.269 f_t^{0.587} \quad (5)$$

کرنش محوری در تنش محوری حداکثر: این مدل نیز برای کرنش محوری در تنش محوری حداکثر رابطه (2) را پذیرفته است. معادله تنش - کرنش: در مدل Harris & Kharel معادله تنش - کرنش بتن محصور فعال که با معادله (3) بیان شده است، با ضریبی که برای کنترل شاخه نزولی معرفی شده است اصلاح گردیده است.

رابطه کرنش محوری و جانبی: Harris & kharel از نسبت انبساط سکانت (Secant dilatation ratio) که با نماد m_s نشان داده می‌شود استفاده کردند. نسبت انبساط سکانت قدر مطلق مقدار سکانت شیب نمودار کرنش محوری - جانبی بتن محصور به FRP یا به زبان ریاضی $m_s = |e_t / e_c|$ می‌باشد. این محققین براساس نتایج آزمایشات خودشان کرنش محوری را به کرنش جانبی مربوط کردند. یک معادله سه خطی ساده شده برای بیان تغییرات نسبت انبساط سکانت مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که در این مدل از معادلات متفاوتی برای پیش‌بینی کرنش جانبی بتن محصور به CFRP و GFRP استفاده می‌گردد.

مدل Marques et al [4]

این مدل در سال 2004 ارائه گردیده است. این مدل هم مانند مدل قبل تفاوتهای زیادی با مدلهای دیگر دارد. تنش محوری حداکثر: Marques et al. رابطه زیر را که توسط Razvi & Saatcioglu ارائه شده پذیرفته‌اند.

$$f_{cc}' = f_{co}' + 6.7 f_t^{0.83} \quad (6)$$

کرنش محوری در تنش محوری حداکثر: این مدل گرچه مانند دیگر مدلهای برای کرنش محوری در تنش محوری حداکثر معادله (2) را پذیرفته است، ولی این معادله را تنها برای بتن با مقاومت $f_{co}' \leq 40 \text{ Mpa}$ به کار می‌برد و برای بتنهای با مقاومت بالاتر معادله (2) را با ضریبی که توسط Razvi & Saatcioglu معرفی شده اصلاح نموده است تا مقدار اثر کاهشدهنده در بهبود کرنش محوری بتن مقاومت بالا بدست آید. معادله تنش - کرنش: این مدل معادلات (3) و (4) را برای معادله تنش - کرنش پذیرفته است.

رابطه کرنش محوری و جانبی: Marques et al. در این مورد از یک مدل ترکیبی مشابه مدل Spoelstra&Monti استفاده کردند، ولی آنها استدلال کردند که بعضی از مواردی که توسط Spoelstra&Monti بکار رفته‌اند، قطعیت ندارد. لذا برای جبران این ضعف ضرایبی را پیشنهاد دادند.

مدل Binici [4]

این مدل در سال 2005 ارائه گردید.

تنش محوری حداکثر: مدل Binici برای تعیین تنش محوری حداکثر معیار Leon-Pramono را به کار برده که با فرض اینکه مقاومت کششی بتن غیر محصور ده درصد مقاومت فشاری آن باشد به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

$$f_{cc}' = f_{co}' \left(\sqrt{1 + 9.9 \frac{f_l'}{f_{co}'} + \frac{f_l'}{f_{co}'}} \right) \quad (7)$$

کرنش محوری در تنش محوری حداکثر: مدل Binici نیز مانند اکثر مدلها رابطه (2) را برای کرنش محوری در تنش محوری حداکثر پذیرفته است. معادله تنش - کرنش: این مدل سه عبارت جداگانه را برای بیان منحنی تنش - کرنش بکار برد. در شاخه صعودی Binici رابطه خطی تنش - کرنش را پیشنهاد کرد و بعد از محدوده الاستیک، در ناحیه شبه پلاستیک معادله (3) را بکار برد. Binici حتی برای ناحیه نزولی نیز رابطه نمائی ارائه داد. رابطه کرنش محوری و جانبی: برای رابطه بین کرنش محوری و جانبی Binici از نسبت انبساط سکانت استفاده کرد. وی نسبت انبساط سکانت را در ناحیه الاستیک ثابت فرض کرد و در نواحی غیر الاستیک آن را تابعی از فشار محصور کنندگی قلمداد کرد.

مدل Teng et al. [4]

این مدل در سال 2007 ارائه گردید و چند ماه بعد در همان سال اصلاحاتی نیز در آن صورت گرفت. در این قسمت هم به مدل اولیه و هم به اصلاحات به عمل آمده اشاره خواهیم کرد.

تنش محوری حداکثر: Teng et al. تابع خطی زیر را برای حداکثر تنش محوری پیشنهاد دادند:

$$f_{cc}^* = f_{co}' + 3.5 f_l' \quad (8)$$

در مدل اصلاحی ضریب 3/5 به 4/1 تبدیل گردید و رابطه به صورت زیر در می‌آید:

$$f_{cc}^* = f_{co}' + k_1 f_l' \quad (9)$$

که $k_1=4/1$ می‌باشد.

کرنش در تنش محوری حداکثر: این مدل هم رابطه (2) را برای این منظور بکار برده با توجه به رابطه (8) رابطه (2) به صورت زیر تبدیل می‌گردد:

$$\frac{e_{cc}^*}{e_{co}'} = 1 + 5k_1 \frac{f_l'}{f_{co}'} \quad (10)$$

اما پس از اصلاحات رابطه (10) به صورت زیر بازنویسی گردید.

$$\frac{e_{cc}^*}{e_{co}'} = 1 + 17.5 \left(\frac{S_l'}{f_{co}'} \right)^{1.2} \quad (11)$$

معادله تنش - کرنش: این مدل هم روابط (3) و (4) را برای معادله تنش - کرنش بکار برده است.

رابطه کرنش محوری و جانبی: Teng et al. معادله کرنش محوری - جانبی زیر را ارائه دادند که برای بتن غیر محصور، محصور شده فعال و محصور با FRP قابل استفاده است:

$$\frac{e_c}{e_{co}'} = 0.85 \left(1 + \frac{8S_l'}{f_{co}'} \right) \times \left\{ \left[1 + 0.75 \left(\frac{-e_l'}{e_{co}'} \right)^{0.7} \right] - \exp \left[-7 \left(\frac{-e_l'}{e_{co}'} \right) \right] \right\} \quad (12)$$

که S_l' فشار محصور کنندگی است. در بتن محصور فعال، بتن تحت فشار محصور کنندگی ثابت، S_l' از طریق روند بارگذاری بدست می‌آید، ولی در بتن محصور شده توسط FRP فشار جانبی محصور کنندگی غیر فعال بستگی به سختگی FRP دارد و پیوسته با کرنش حلقوی e_{fh} مربوط به FRP افزایش می‌یابد. برای کرنش جانبی حلقوی معلوم، فشار محصور کنندگی وارده از طرف زره FRP برابر است با:

$$s_l' = \frac{E_{frp} t e_{fh}}{R} = - \frac{E_{frp} t e_l}{R} \quad (13)$$

شایان ذکر است در بخش ارزیابی از مدل Teng et al. اولیه استفاده شده است.

ارزیابی مدل‌های موجود [4]

این موضوع به طور گسترده‌ای پذیرفته شده است که تحت فشار محوری، بتن غیر محصور تا 90 درصد حداکثر تنش، تراکم حجمی را تجربه می‌کند. بنابراین بتن انبساط حجمی نامتعادلی را ناشی از افزایش سریع نسبت کرنش محوری به کرنش جانبی تحمل می‌کند. به هر حال این انبساط جانبی می‌تواند به طرز موثری با زره FRP مقید می‌گردد. در بتن محصور به FRP نتایج این انبساط ظاهری در افزایش مداوم فشار محصور کنندگی جانبی

ایجاد شده توسط زره FRP دیده می‌شود. ویژگیهای انبساط بتن محصور به FRP در رابطه کرنش محوری - کرنش جانبی منعکس می‌گردد. بی‌واسطه‌ترین راه تحقیق درباره ویژگیهای انبساط بتن محصور به FRP تعیین نسبت انبساط تانژانت و نسبت انبساط سکانت است.

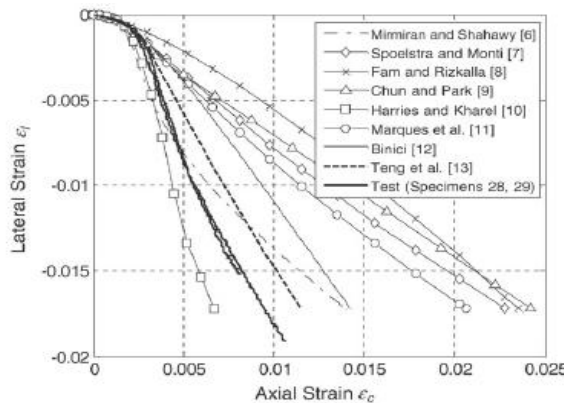
اشکال 3 تا 5 تغییرات آزمایشی کرنش جانبی، نسبت انبساط تانژانت، نسبت انبساط سکانت و تنش محوری را در برابر کرنش محوری و همچنین نتایج حاصل از مدل‌های مورد بحث را نمایش می‌دهد.

این داده‌های آزمایشی مشاهدات زیر را بدست می‌دهند.

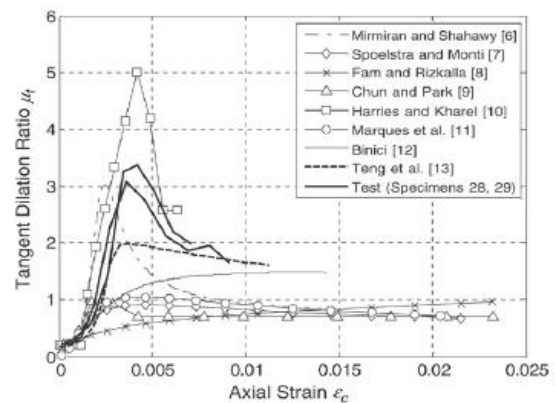
1- در قسمت ابتدای تغییر شکل، نسبت انبساط تانژانت و نسبت انبساط سکانت تقریباً ثابت بوده و به نسبت انبساط تانژانت و سکانت بتن غیر محصور بسیار نزدیک است.

2- در مرحله بعد نسبت انبساط تانژانت و نسبت انبساط سکانت به تدریج افزایش می‌یابد و زره FRP بیشتر و بیشتر بتن را محصور می‌نماید.

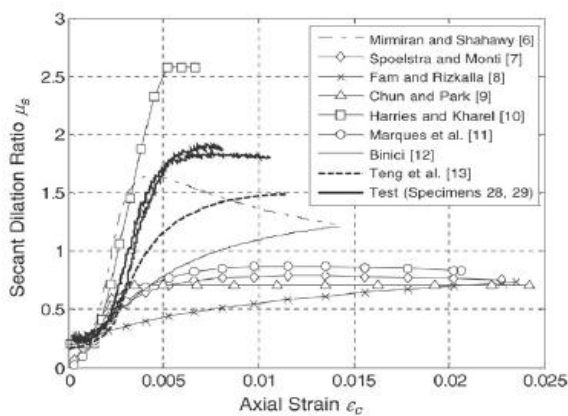
3- یک منحنی کرنش محوری - جانبی نمونه بتن محصور به FRP یک نقطه عطف متناظر با حداکثر مقدار نسبت انبساط تانژانت از خود نشان می‌دهد. سه مجموعه مقایسه برای بتنهای ضعیف محصور شده، متوسط محصور شده و قوی محصور شده به ترتیب در شکل‌های 3 تا 5 صورت گرفته



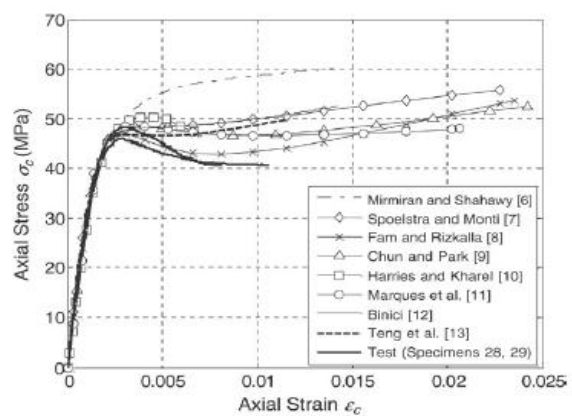
(a) Lateral-to-axial strain curves.



(b) Tangent dilatation ratio.



(c) Secant dilatation ratio.



(d) Stress-strain curves.

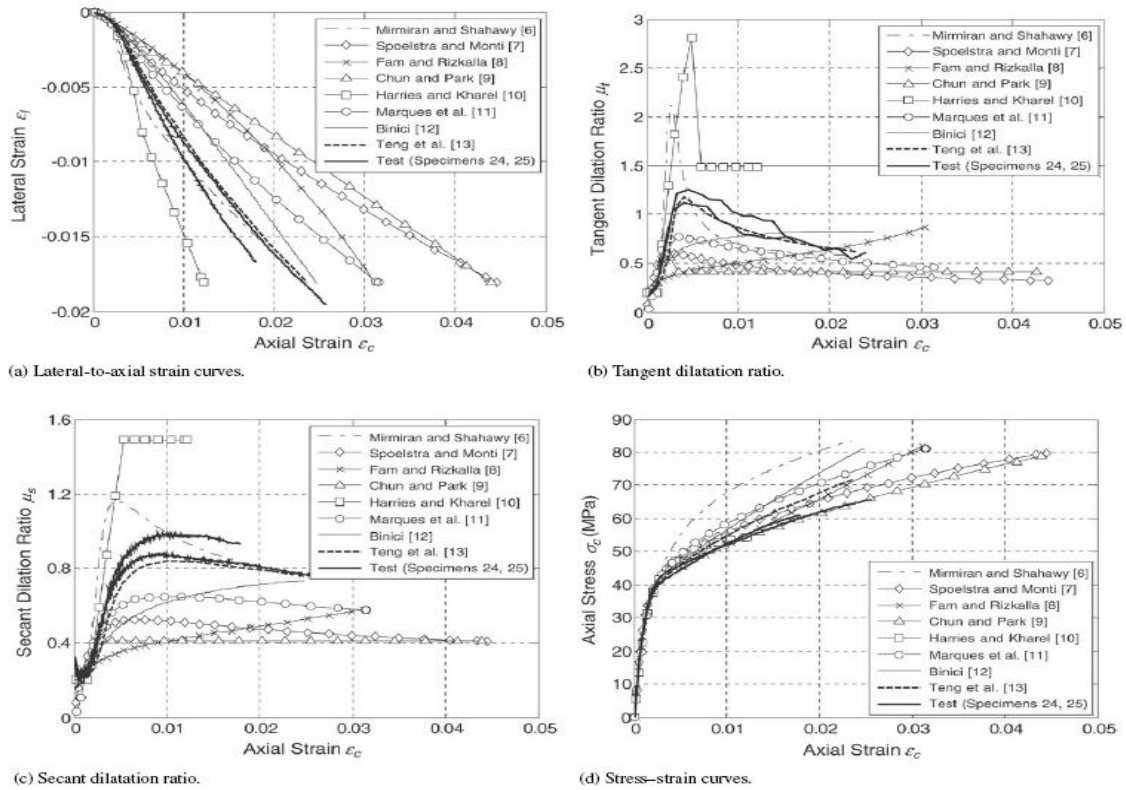
شکل 3- بتنهای ضعیف محصور شده

است. هر مجموعه شامل 4 منحنی کرنش محوری - جانبی، منحنی نسبت انبساط تانژانت، منحنی نسبت انبساط سکانت و منحنی تنش - کرنش می‌باشد. تمام منحنی‌ها در نقطه‌ای که میانگین کرنش گسیختگی حلقوی FRP متناظر با جفت نمونه آزمایشی، به آن رسیده پایان یافته‌اند.

از مقایسه دیده می‌شود که مدل‌های موجود پیش‌بینی‌های متفاوتی را ارائه کرده‌اند. مدل‌های Fam&Rizkalla و Binici نقطه عطف در نمودار کرنش محوری - کرنش جانبی پیش‌بینی نکرده‌اند. (یعنی از نظر این مدل‌ها نسبت انبساط تانژانت یا سکانت پیوسته با کرنش محوری افزایش می‌یابند). دیگر مدل‌ها، اگر چه قادر به پیش‌بینی نقطه عطف بوده‌اند، مقدار نهائی کرنش محوری و حداکثر مقدار نسبت انبساط تانژانت و سکانت را در اغلب موارد ضعیف

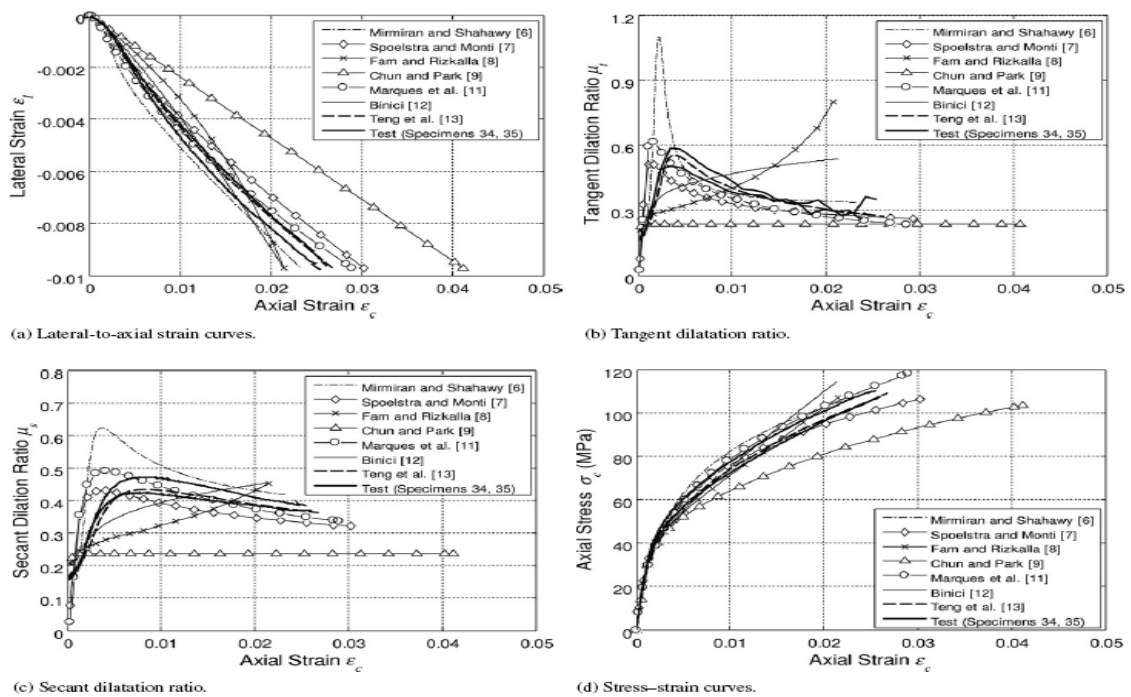
پیش‌بینی کرده‌اند. Mirmiran&Shahawy نشان دادند که مقدار حداکثر نسبت انبساط تانژانت هنگامی رخ می‌دهد که کرنش محوری به e_{co} برسد، اما نتایج این آزمایش درستی این مطلب را با تردید مواجه می‌سازد. این نقطه در عوض در کرنش محوری حدوداً $2e_{co}$ رخ می‌دهد. علاوه نسبت انبساط تانژانت پیش‌بینی شده توسط این مدل در محصور کنندگی قوی می‌تواند منفی شود. پیش‌بینی مدل Spoelstra&Monti و Teng et al. شباهتهایی در شکل و پیش‌بینی مقادیر اولیه نسبت انبساط تانژانت و سکانت دارند، ولی مقادیر را بسیار پائین‌تر از نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند.

مدل Harris&Kharel در شکل 5 حذف گردیده است، زیرا که مقادیر پیش‌بینی نسبت انبساط تانژانت و سکانت به طور غیر منطقی کوچک بود. این کوچک بودن ناشی از معادله لگاریتمی نسبت انبساط سکانت نهائی است که مقادیر منفی در محصور کنندگی قوی بدست می‌دهد. ضمناً تعریف آنها از



شکل 4- بتن های متوسط محصور شده

نسبت انبساط سکانت نهائی با تردید مواجه است، زیرا تنها اثر سختی FRP را لحاظ می‌کند و اثر اندازه نمونه و مقاومت فشاری بتن محصور نشده را در نظر نمی‌گیرد. مدل Chun&Park نیز دچار همان اشکال است. محققین این مدل همچنین یک مدل لگاریتمی را برای تعیین نسبت انبساط سکانت



شکل 5- بتنهای قوی محصور شده

نهایی بکار برده‌اند که ممکن است مقادیر منفی پیش‌بینی کند. مدل Teng et al. به نظر دقیق‌ترین می‌رسد. این مدل دقیق‌ترین پیش‌بینی را از کرنش محوری نهایی در هر سه حالت بدست می‌دهد در بخشی از نمونه‌های بتنی ضعیف محصور شده نسبت انبساط تانژانت و سکانت این مدل پیش‌بینی دقیقی ارائه می‌دهد.

قابل ذکر است اگر چه بعضی از مدل‌های کرنش محور نهایی را دقیق پیش‌بینی می‌کنند، شکل نمودار کرنش محوری – جانبی آنها صحیح نیست. در حالت ایده‌آل باید هم شکل منحنی و هم نقطه نهایی نمودار کرنش محوری – جانبی دقیق پیش‌بینی گردد. بهرحال، می‌توان دریافت که برای یک نقطه نهایی معلوم، نمودار تنش - کرنش می‌تواند نزدیک پیش‌بینی گردد.

نتیجه گیری

- عموم مدل‌های طراحی و تحلیلی دارای خطای نسبتاً زیادی می‌باشند و هیچ یک از مدل‌ها تخمین دقیقی از رفتار ستون بتنی محصور به FRP ارائه نمی‌دهند.

-مدل‌های طراحی در عین تبعیت از یک رابطه کلی تفاوت‌های زیادی با هم دارند.

-در بین مدل‌های طراحی مدل Lam&Teng و Lin&Liao بهترین پیش‌بینی را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دارند.

-معیارهای ارزیابی مدل‌های تحلیلی تنش محوری حداکثر، کرنش محوری در تنش محوری حداکثر، معادله تنش - کرنش و رابطه کرنش محوری و جانبی می‌باشند.

-بر مبنای معیار های فوق و با مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بهترین پیش‌بینی را مدل Teng et al. ارائه داده است.

مراجع:

1-J.F.Berthet ,E.Ferrier, P.Hamelin."*Compressive behavior of concrete externally confined by composite Jachets.part A: Experimental Study".***Construction and Building Materials 19(2005) 223-232.**

2-Guoqiang Li, Dinesh Maricherla, Kumar Singh, Su-Seng Pang, Manu John."*Effect of fiber orientation on the structural behavior of FRP wrapped concrete cylenders".***Composite Structures 74(2006)475-483.**

3- Guoqiang Li."*Experimental study of FRP confined concrete cylinders".* **Engineering Structures 28(2006) 1001-1008.**

4-T.Jiang,J.G.Teng."*Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete".***Engineering Structures 29(2007) 2968-2986.**