

پیشنهاد رابطه محاسبه مقاومت بتن محصور شده در ستونهای پل های بتن آرمه

تقویت شده به کمک FRP

علی خیرالدین، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
حسین نادرپور، دانشجوی دکتری سازه، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
سید روح الله حسینی واعظ، دانشجوی دکتری سازه، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
Email: akheirodin@semnan.ac.ir

چکیده

پل‌ها به لحاظ رفتار و پاسخ سازه‌ای در مقایسه با سازه‌های معمولی در موقعیت ویژه‌ای قرار دارند. با توجه به آنکه درجه نامعینی پل‌ها به نسبت ساختمان‌ها بسیار کمتر می‌باشد، شکست یک ستون می‌تواند منجر به خرابی کل سیستم سازه گردد. با توجه به آنکه پل به عنوان یک شریان حیاتی در صنعت حمل‌ونقل مطرح می‌باشد، فراهم آوردن امنیت لرزه‌ای کافی برای آن از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. ستون بتن آرمه پل در اثر بارهای لرزه‌ای سه مد اصلی شکست شامل: شکست برشی، شکست خمشی و شکست وصله اتصال را تجربه می‌نماید. استفاده از کامپوزیت‌های FRP¹ به صورت دورپیچ به عنوان یکی از تکنیک‌های مقاوم سازی ستون‌های بتن آرمه پل‌ها در سالیان اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. سختی و مقاومت مشخصه بالا، عمر مفید زیاد، مقاومت زیاد در برابر خوردگی و خصوصیات حرارتی قابل کنترل از امتیازات مهم کامپوزیت‌های FRP بر مصالح معمول می‌باشد. در این مقاله یک مدل مقاومت فشاری برای بتن محصور شده و دورپیچ شده توسط FRP معرفی شده که در واقع توسعه‌ای از تئوری مقاومت موهر می‌باشد؛ این مدل، تنش فشاری محصور شده (f'_{cc}) را به تنش محصور کنندگی (f'_l) مربوط می‌نماید. در فرم کلی این مدل نیازمند اطلاعاتی درباره مقاومت فشاری تک محوری (f'_c) ، مقاومت کششی تک محوره (f'_t) و یک عدد n مرتبط با شکل پوش موهر حالات مقاومت نهایی می‌باشد. یک مدل سهمی درجه دو که به صورت عددی بسط داده شده برای استفاده در بتن محصور شده با FRP توسط نویسندگان پیشنهاد شده است. صحت معادله پیشنهادی با استفاده از آزمایشات موجود نمونه‌های بتنی محصور شده به کمک دورپیچ FRP مورد تایید قرار گرفته است. در انتها، یک مثال کاربردی برای تقویت ستون بتن آرمه پل نیز آورده شده است.

واژه‌های کلیدی: پل بتن آرمه، دورپیچ FRP، محصور شدگی، پوش مقاومت نهایی موهر، تقویت

۱. مقدمه

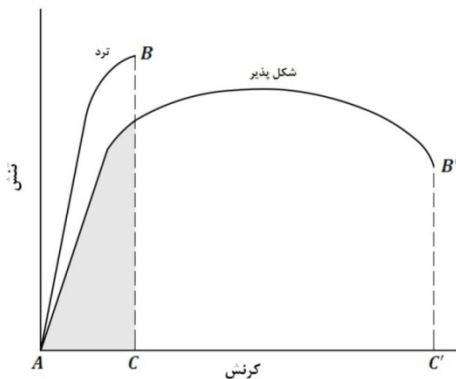
که پل، یک مولفه حیاتی در سیستم حمل‌ونقل می‌باشد، می‌بایست امنیت لرزه‌ای کافی در طول یک زلزله را برای آن فراهم آورد. از زمان زلزله سن فرناندو^۲ در سال ۱۹۷۱، در تمامی آیین‌نامه‌های معتبر، طراحی ستون‌های بتن آرمه پل‌ها به علت ضعف آرماتورهای عرضی و یا ناکافی بودن جزئیات اجرایی لرزه‌ای دچار تغییر اساسی گردید. بنابراین بسیاری از

در پاسخ سازه‌ای، پل‌ها نسبت به دیگر سازه‌ها منحصر به فرد هستند. درجه نامعینی استاتیکی در پل‌ها عموماً در مقایسه با ساختمانها بسیار کمتر است؛ بنابراین شکست یک ستون و یا یک فونداسیون می‌تواند باعث خرابی کل سیستم پل گردد. به علاوه، تأثیر اندرکنش خاک-سازه و تغییر مکان ناشی از حرکت زلزله نیز در پل‌ها بسیار محسوس‌تر از ساختمانهاست. از آنجایی

بسیار کاربردی باشد. با توجه به مطالب ذکر شده، رابطه‌ای برای پیش‌بینی مقاومت بتن محصور شده به کمک FRP پیشنهاد شده است.

۲. مکانیزم اصلی شکست ستونهای بتن آرمه پل‌ها

در طول یک زلزله، یک ستون بتن آرمه در اثر بارهای محوری و جانبی رفت و برگشتی سه مد اصلی شکست را تجربه می‌کند که عبارتند از: شکست برشی، شکست خمشی مفصل پلاستیک و شکست وصله اتصال. تا قبل از سال ۱۹۷۱، ستون‌های پل‌های بتنی با استفاده از میلگردهای فولادی بلند به منظور افزایش مقاومت خمشی ساخته می‌شدند که این میلگردها به صورت طولی در ستون قرار می‌گرفتند. با این حال به ندرت از آرماتور عرضی استفاده می‌گردید. به علت آنکه فعالیت لرزه‌ای باعث جابجایی محوری و جانبی می‌گردد، استفاده از آرماتور تنها در راستای طولی نمی‌تواند برای جلوگیری از شکست برشی ستون، کافی باشد. شکست برشی یکی از مهمترین مدهای شکست نامطلوب است زیرا بسیار ترد می‌باشد؛ این بدان معنی است که ستون بتن آرمه در چنین شرایطی تغییر شکل پلاستیک بسیار کوچکی را تجربه می‌کند. یک منحنی تنش- کرنش برای مصالح ترد در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. منحنی‌های تنش- کرنش برای مصالح ترد و شکل پذیر بارگذاری شده تا حد شکست [۳]

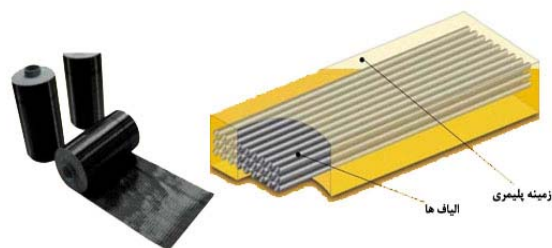
همان طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، تغییر شکل پلاستیک حداقل قبل از شکست رخ می‌دهد. سطح زیر منحنی تنش- کرنش نیز بسیار کوچک است؛ این از خصوصیات ماده‌ای است که دارای طاقت کمی در مقابل شکست می‌باشد. به منظور افزایش طاقت شکست یک ماده، باید مقاومت کششی نهایی

ستون‌های بتن آرمه پل‌ها که قبل از تاریخ فوق ساخته شده بودند، ضوابط آیین‌نامه‌های جدید طراحی را ارضاء نمی‌نمودند [۱]. در زلزله نورتریج^۳ در سال ۱۹۹۴ در حدود چهل هزار سازه دچار خرابی گردیدند که در این میان، خرابی ۷ پل آزاد راه اصلی جلب نظر می‌نمود. هر ۷ پل با ضوابط آیین‌نامه‌های قدیمی ساخته شده و چنانچه به طرز مناسبی مقاومت‌سازی شده بودند، به احتمال فراوان در مقابل بارهای لرزه‌ای، مقاومت کافی از خود نشان می‌دادند [۲]. با این تفاسیر، ستون‌های بتن آرمه موجود می‌بایست به کمک تکنیک‌های بهسازی لرزه‌ای به منظور اجتناب از خرابی‌های شدید در طول زلزله مقاومت‌سازی شوند. در حالت کلی مقاومت‌سازی به کمک فولاد به منظور بهبود مقاومت خمشی و برشی یک ستون بتن آرمه استفاده می‌شود؛ با این حال آرماتورهای فولادی در طول زمان دچار خوردگی شده و نیازمند نگهداری مستمر می‌باشند. با آنکه هزینه خرید مصالح فولادی تا حدی کم می‌باشد؛ اما نصب و نگهداری منظم آنها نیازمند استفاده از نیروی انسانی بوده و بنابراین گران تمام می‌شود. به عنوان مثال مقاومت‌سازی یک ستون بتن آرمه با مقطع دایره به قطر 120 cm و ارتفاع 660 cm با استفاده از فولاد در حدود دو روز و نیم به طول می‌انجامد. راه حل بهتر برای مقاومت‌سازی این ستون‌ها، استفاده از کامپوزیت‌های FRP می‌باشد. کامپوزیت‌های FRP عموماً دارای مقاومتی در حدود دو برابر فولاد بوده و وزن آنها در مقایسه با فولاد، ۲۰ درصد کمتر می‌باشد. همچنین می‌توان با تغییر راستای الیاف آنها، سازه را در راستای معین به منظور ارضای ضوابط مورد نظر تقویت نمود [۳].

در این مقاله مدلی تحلیلی به منظور توضیح یک فرم کلی از پوش تنش فشاری سه محوری نهایی بتن ($\sigma_1 > \sigma_2, \sigma_2 = \sigma_3$) ارائه و بسط داده شده است. معادله مزبور به خوبی وابستگی معادله کلی پوش را به خصوصیات مستقل مصالح نشان می‌دهد. تمام مدل‌های پیشنهاد شده توسط محققین با استفاده از آنالیز رگرسیون به صورت تجربی تعیین شدند. با توجه به آنکه بسیاری از روابط موجود در زمینه پیش‌بینی مقاومت محصورشدگی اعضای مرکب شده توسط کامپوزیتهای FRP دارای خطای نسبتاً محسوس بوده و یا اغلب غیر محافظه کارانه و در نتیجه غیر ایمن می‌باشند، ارائه مدلی که بتواند با دقتی مناسب، مقاومت محصور شدگی را تقریب بزند، می‌تواند

۳. کامپوزیت های FRP

کامپوزیت های FRP می توانند به منظور مقاوم سازی ستون های بتن آرمه در مقابل مدهای اصلی شکست در طول یک زلزله مورد استفاده قرار گیرند. یک کامپوزیت FRP شامل دو عضو تشکیل دهنده می باشد (شکل ۳): یک عامل مسلح کننده (معمولا الیاف) و یک زمینه پلیمری (چسبی که الیاف ها را در کنار هم نگه می دارد). الیاف ها معمولا از موادی با مقاومت بالا نظیر کربن یا شیشه هستند. این الیاف ها دارای مقاومت خمشی بالایی هستند زیرا در آنها از جابجایی نامناسب الیاف جلوگیری شده و این باعث محدود شدن جریان پلاستیک می گردد. در نتیجه الیاف دارای مقاومت بیشتری بوده اما در عین حال ترد نیز می باشند. [۸ و ۹].



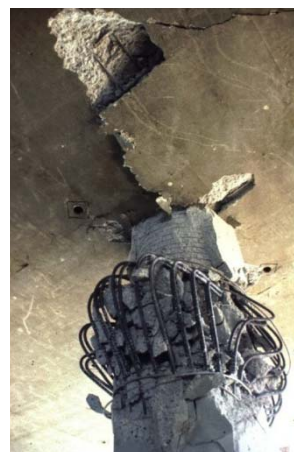
شکل ۳. اجزای اصلی تشکیل دهنده مصالح الیافی پلیمری (FRP) [۸]

مقاومت کامپوزیت بستگی به راستای الیاف دارد؛ چنانچه الیاف تماما در راستای صفر درجه باشند، مقاومت کامپوزیت دارای خواص مکانیکی بسیار خوب در آن جهت بوده و خواص مکانیکی بسیار ضعیفی در راستای ۹۰ درجه از خود بروز می دهد. این به علت آن است که در راستای ۹۰ درجه زمینه پلیمری (و نه الیاف)، بار را تحمل می کند. کامپوزیت های FRP به آسانی به منظور ارضای ملاحظات طراحی در راستاهای معین، طرح می شوند.

در هنگام ساخت یک کامپوزیت FRP به منظور ارضای نیازهای کاربردی معین، سه خصوصیت مکانیکی شامل مقاومت، مدول یانگ و دوام مورد استفاده قرار می گیرد. در ابتدا مهم است که مدول و مقاومت الیاف و زمینه پلیمری را بدانیم تا بتوان محاسبه کرد که این خصوصیات برای کل کامپوزیت چه مقداری باید در نظر گرفته شوند. نخست چنانچه فرض شود از الیاف پیوسته با نسبت حجمی بحرانی استفاده می شود، می توان مقاومت

بسیار بالا بوده و یا ماده باید قادر باشد در محدوده گسترده ای از مقادیر کرنش، تغییر شکل پلاستیک دهد.

یک حالت مد شکست معمول ستون های بتن آرمه، شکست خمشی مفصل پلاستیک می باشد. شکست خمشی مفصل پلاستیک، یک شکست شکل پذیر است که در طی آن تغییر شکل پلاستیک قبل از رسیدن به نقطه شکست بسیار زیاد می باشد؛ با این تعریف، یک شکست شکل پذیر فاجعه آمیز نبوده و نسبت به شکست برشی بسیار بهتر است. شکست مفصل پلاستیک یا در محل اتصال تلاقی ستون و عرشه و یا در محل اتصال ستون به زمین مشاهده می شود. مشخصه های این شکست، پکیدن بتن در دو انتهای ستون و نیز کماتش آرماتورهای طولی به علت تکرار خمش در طول یک زلزله می باشد. شکل ۲ محل اتصال ستون به پل را نشان می دهد که در آن بتن دچار پکیدگی گردیده و آرماتورها تماما کماتش کرده و از ستون جدا شده اند.



شکل ۲. شکست خمشی مفصل پلاستیک در محل تلاقی ستون و

عرشه پل (زلزله نورتریج ۱۹۹۴) [۷]

در نهایت، سومین حالت شکست، شکست در وصله اتصال می باشد. این نوع از شکست به چگونگی چیدمان آرماتورها در راستاهای طولی و عرضی بستگی دارد. چنانچه طول وصله بسیار کوچک باشد، در طول بارگذاری رفت و برگشتی، آرماتورها جدا خواهند شد. چنانچه چنین گره ضعیفی در طول فعالیت لرزه ای دچار شکست شود، آرماتورها انسجام سازه ای خود را از دست داده و مقاومت خمشی ستون ها به شدت کاهش می یابد. از آن پس، مقاومت خمشی ستون های بتن آرمه فقط بر مبنای مقاومت کششی اندک بتن خواهد بود [۷، ۶، ۵].

دورپیچ شامل لایه‌های الیاف آغشته به رزین می‌باشد. هر لایه دارای الیاف‌هایی در راستاهای مختلف به منظور محافظت از ستون در مقابل بارهای رفت و برگشتی ناشی از زلزله می‌باشد. برای نیل به این هدف، الیاف‌ها می‌توانند در راستای صفر درجه در لایه اول، ۶۰ درجه در لایه دوم و ۱۲۰ درجه در لایه سوم قرار گیرند. این الگوی 0/60/120 می‌تواند تا رسیدن به ضخامت مورد نظر تکرار شود [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴].

۴. پوش مقاومت نهایی با استفاده از منحنی

مشخصه موهر

با استفاده از تئوری موهر، فرض بر آن است که مصالح بصورت همگن رفتار کرده و در نقطه شکست رابطه‌ای بین تنش نرمال و تنش برشی در صفحه گسیختگی وجود دارد که در امتداد این صفحه تا نقطه شکست بر مقاومت حاکم است [۱۵ و ۱۶]. مقادیر حدی تنش نرمال و برشی، مستقل هستند؛ بدان معنی که مقدار حدی تنش برشی که در بالاتر از آن شکست رخ می‌دهد باید تابعی از مقدار همزمان تنش نرمال در همان صفحه باشد. به عبارت دیگر داریم:

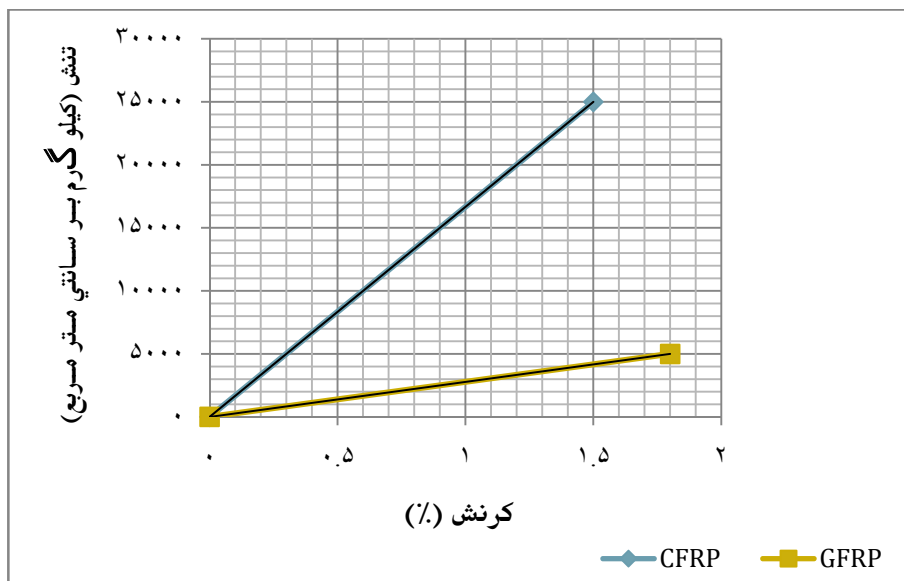
$$|\tau| = f(\sigma) \quad (2)$$

که در آن τ تنش برشی و σ تنش وارده، عمود بر صفحه برش می‌باشد.

شکست کامپوزیت (σ_c) را با استفاده از قانون مواد مرکب به شرح زیر بدست آورد:

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (1)$$

در رابطه بالا V_f نسبت حجمی الیاف، σ_f مقاومت کششی الیاف و σ_m تنش کششی در زمینه پلیمری است. از آنجایی که مقاومت کششی الیاف، بسیار بیشتر از مقاومت کششی زمینه پلیمری ($\sigma_f \gg \sigma_m$) می‌باشد، هرچه حجم الیاف بیشتر باشد مقاومت شکست بالاتری برای کامپوزیت بدست خواهد آمد. سپس مدول کامپوزیت با ضرب مقاومت شکست کامپوزیت در کرنش حد تسلیم آن حاصل می‌شود. دوام نیز یک خصوصیت مهم در انتخاب نوع کامپوزیت به منظور پایداری در برابر بارهای لرزه‌ای می‌باشد. دوام بصورت کار مورد نیاز برای شکست در واحد حجم تعریف می‌شود. این خصوصیت ممکن است با محاسبه سطح زیر منحنی تنش-کرنش تعیین گردد. منحنی‌های تنش-کرنش‌های معمول در شکل ۴ برای CFRP، GFRP نشان داده شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که CFRP دارای بیشترین پایایی می‌باشد زیرا سطح زیر منحنی بیشتری را بدست می‌دهد. در نتیجه CFRP‌ها در زمینه مقاوم‌سازی ستونهای بتن آرمه در مقوله پایایی، بهترین گزینه هستند. اتصال FRP به ستون بتن آرمه به منظور بهبود مقاومت خمشی و برشی آن به طرق چندان متنوعی انجام نمی‌شود. با این حال موثرترین اتصال مورد استفاده در مقاوم‌سازی‌های لرزه‌ای را می‌توان دورپیچ کردن دانست.



شکل ۴. منحنی‌های تنش-کرنش کامپوزیت‌های FRP [۸]

۵. مقاومت محصور شدگی بتن

به منظور دستیابی به یک تئوری مناسب مقاومت می‌توان با استفاده از یک شکل کلی پوش مقاومت نهایی موهر وارد عمل شد؛ که در واقع یک منحنی درجه n می‌باشد که در شکل ۵ نمایش داده شده است. معادله نرمالیزه شده این منحنی درجه n توسط رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\left(\frac{\tau}{f_c'}\right)^n = a \frac{\sigma}{f_c'} + b \quad (3)$$

که در آن $a = g(f_c'/f_t')$ و $b = h(f_c'/f_t')$ می‌باشد. این منحنی مماس بر دایره کشش تک محوری بوده و محور a/f_c' را در نقطه $[-(f_t'/f_c'), 0]$ قطع می‌نماید. (تنش‌های کششی به صورت منفی و تنش‌های فشاری، مثبت در نظر گرفته می‌شود). با جایگزینی $\tau/f_c' = 0$ و $\sigma/f_c' = -(f_t'/f_c')$ در معادله ۳ می‌توان بدست آورد:

$$b = a \frac{f_t'}{f_c'} \quad (4)$$

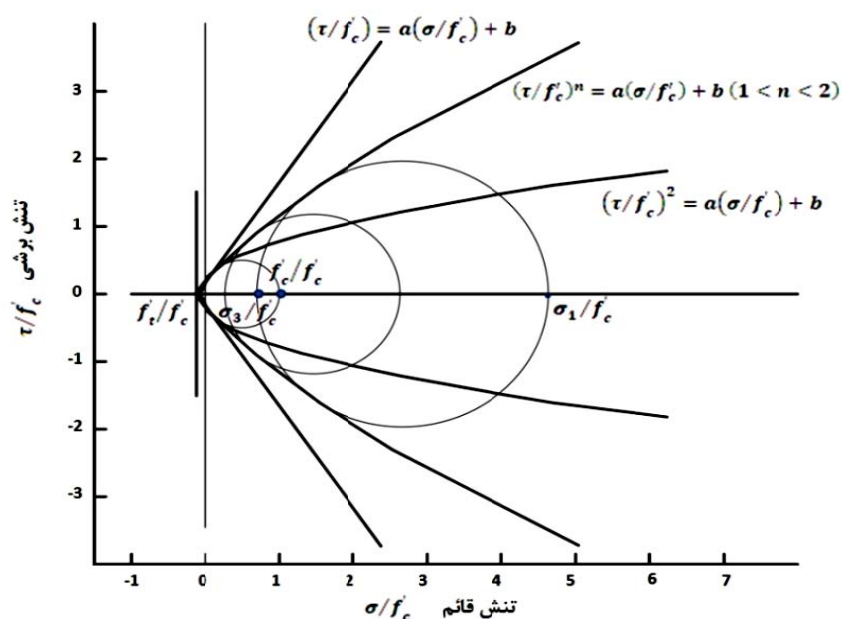
با جایگزینی معادله ۴ در معادله ۳، معادله ۵ حاصل می‌گردد:

$$\left(\frac{\tau}{f_c'}\right)^n = \frac{\sigma}{f_c'} (\sigma + f_t') \quad (5)$$

معادله دایره موهر برای $\sigma_3 = 0$ یا C_1 که در شکل ۶ نمایش داده شده به صورت زیر می‌باشد:

$$\left(\frac{\sigma}{f_c'} - \frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{f_c'}\right)^2 = \frac{1}{4} \quad (6)$$

در این راستا دیاگرام شناخته شده دایره موهر، حالت تنش در هر نقطه را به خوبی مشخص می‌کند. با استفاده از دیاگرام موهر حالت سه محوری تنش در یک نقطه $(\sigma_1 > \sigma_2, \sigma_2 = \sigma_3)$ به کمک یک دایره که در آن محور افقی تنش نرمال، σ ، بوده و محور قائم تنش برشی، τ ، می‌باشد، بیان می‌گردد. پوش دایره‌های مقاومت نهایی موهر را می‌توان به منظور پیش بینی تنش اصلی حداکثر نهایی (به عنوان مثال σ_1) بتن تحت تنش‌های سه محوری استفاده نمود (زیرا بتن ماده‌ای است که مقاومت فشاری نهایی آن بستگی به تنش جانبی (به عنوان مثال σ_3) دارد). برای آزمایش‌های تنش سه محوری (محصور شدگی فعال)، پوش مقاومت نهایی خطی موهر-کولمب تنش اصلی حداکثر را با افزایش فشار محصور شدگی به صورت دست بالا تخمین می‌زند [۱۷]. یک پوش مقاومت نهایی موهر که در گذشته استفاده شده یک سهمی درجه دو می‌باشد. با این حال تحت محصور شدگی فعال، سهمی درجه دو مقدار تنش اصلی حداکثر را به صورت دست پایین تخمین می‌زند؛ مخصوصاً در مقادیر بزرگتر تنش‌های جانبی با استفاده از شکل ۵ می‌توان گفت که در حالت تنش‌های سه محوره (محصور شدگی فعال)، پوش واقعی مقاومت نهایی موهر شکلی مابین حالت خطی (کران بالایی) و سهمی درجه دو (کران پایینی تمام پوش‌های مقاومت نهایی ممکن) بدست می‌دهد.



شکل ۵. پوش‌های مقاومت موهر برای بتن محصور شده

در نهایت با جایگزینی مقدار $\frac{\sigma_p}{f_c}$ از رابطه ۱۰ در رابطه ۱۱ فرم کلی پوش مقاومت نهایی موهر برای بتن محصور شده به صورت زیر بدست می‌آید:

$$(12) \quad \frac{\tau}{f_c} = \left[\frac{(2n^2-4n)-8n^2\frac{f'_t}{f_c}\left(1+\frac{f'_t}{f_c}\right)+(2n+4n\frac{f'_t}{f_c})\sqrt{(4-4n+n^2)+4n^2\left[\frac{f'_t}{f_c}\left(1+\frac{f'_t}{f_c}\right)\right]}}{(4n-4)^2} \right]^{(n-2)/2} \times \left(\frac{n^2+2n^2\frac{f'_t}{f_c}-n\sqrt{(4-4n+n^2)+4n^2\left[\frac{f'_t}{f_c}\left(1+\frac{f'_t}{f_c}\right)\right]}}{4n-4} \right) \left(\frac{\sigma}{f_c} + \frac{f'_t}{f_c} \right)^{1/n}$$

معادله ۱۲ یک فرم کلی از پوش مقاومت نهایی برای بتن تحت تنش‌های سه محوره می‌باشد که یک معادله سه پارامتری است و اطلاعاتی در ارتباط با f'_t, f'_c, n بدست می‌دهد. دو پارامتر اول، ثابت‌های بتن بوده و توسط آزمایش‌های مبنا تعیین می‌گردند. درحالیکه پارامتر آخر، n ، شکل پوش را تحت تأثیر قرار داده و بصورت تجربی با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی بدست می‌آید. معادله ۱۲ یک معادله بسیار مهم می‌باشد زیرا آشکارا نشان می‌دهد که تعداد حداقل پارامترهای مورد نیاز برای تعریف پوش مقاومت نهایی موهر برای بتن محصور شده سه عدد می‌باشند. آیین نامه بتن آمریکا *ACI 318* مقدار $f'_t = 1.03\sqrt{f'_c}$ را پیشنهاد می‌کند [۱۸].

با در نظر گرفتن معادلات ۵ و ۶ و لحاظ کردن این موضوع که شیب منحنی در نقطه p دارای مقدار ثابتی می‌باشد، می‌توان مقدار a را به شرح زیر بدست آورد:

$$(7) \quad a = 0.5n \left(\frac{\tau_p}{f_c} \right)^{(n-2)} \left(1 - 2 \frac{\sigma_p}{f_c} \right)$$

با استفاده از معادلات ۶ و ۵ داریم:

$$(8) \quad \frac{\tau_p}{f_c} = \left[\frac{\sigma_p}{f_c} - \left(\frac{\sigma_p}{f_c} \right)^2 \right]^{0.5}$$

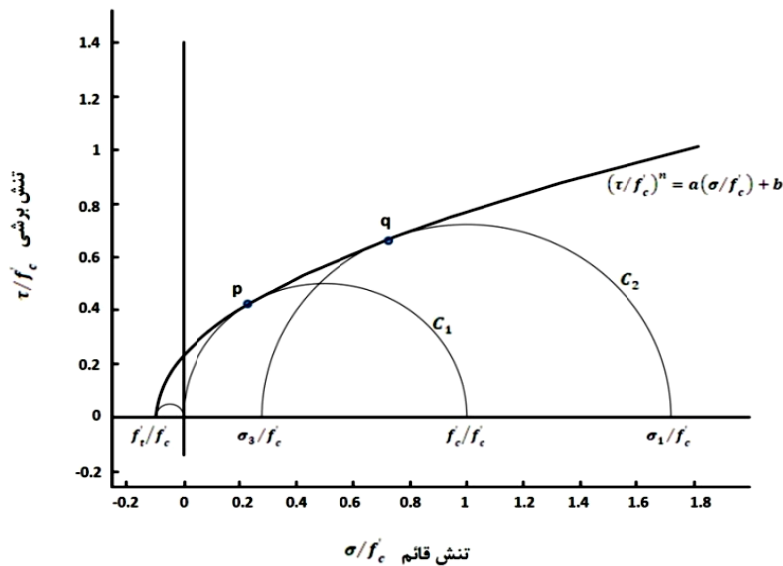
$$(9) \quad \left(\frac{\tau_p}{f_c} \right)^n - a \left(\frac{\sigma_p}{f_c} + \frac{f'_t}{f_c} \right) = 0$$

با جایگزینی معادلات ۷ و ۸ در معادله ۹ و حل آن برای σ_p می‌توان بدست آورد:

$$(10) \quad \frac{\sigma_p}{f_c} = \frac{(n-2)-2n\frac{f'_t}{f_c} + \sqrt{(4-4n+n^2)+4n^2\left[\frac{f'_t}{f_c}\left(1+\frac{f'_t}{f_c}\right)\right]}}{4n-4}$$

و با جایگزینی معادله ۷ و ۸ در معادله ۵، حاصل می‌شود:

$$(11) \quad \frac{\tau}{f_c} = \left\{ 0.5n \left[\frac{\sigma_p}{f_c} - \left(\frac{\sigma_p}{f_c} \right)^2 \right]^{(n-2)/2} \left(1 - 2 \frac{\sigma_p}{f_c} \right) \left(\frac{\sigma}{f_c} + \frac{f'_t}{f_c} \right) \right\}^{1/n}$$



شکل ۶. شکل کلی پوش مقاومت نهایی موهر برای بتن محصور شده

و $\sigma_3 = f'_l$ در معادله ۱۵ بدست می‌آید:

(۱۶)

$$\left(\frac{\sigma}{f'_c} - \frac{f'_{cc} + f'_l}{2f'_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{f'_c}\right)^2 = \left(\frac{f'_{cc} - f'_l}{2f'_c}\right)^2$$

با در نظر گرفتن معادلات ۱۳ و ۱۶ مقادیر تانژانت در نقطه q در شکل ۶ بدست آمده و پس از حل برای f'_{cc}/f'_c حاصل می‌شود:

(۱۷)

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = \left[1 + 2\frac{f'_l}{f'_c} - 2\sqrt{\frac{f'_l}{f'_c}\left(1 + \frac{f'_l}{f'_c}\right)}\right] + \frac{\sigma_3}{f'_c} + 2\left[1 + 2\frac{f'_l}{f'_c} - 2\sqrt{\frac{f'_l}{f'_c}\left(1 + \frac{f'_l}{f'_c}\right)}\right]\left(\frac{f'_l}{f'_c} + \frac{f'_l}{f'_c}\right)$$

به منظور ساده‌سازی معادله ۱۷، مقدار $f'_l \cong 0.058f'_c$ در نظر گرفته می‌شود که میانگین مقدار $f'_l = 1.03\sqrt{f'_c}$ می‌باشد (جدول ۱) که توسط آیین‌نامه بتن آمریکا (ACI 318) برای بتن با مقاومت $200 \text{ kg/cm}^2 \leq f'_c \leq 540 \text{ kg/cm}^2$ پیشنهاد شده است. بنابراین معادله پیشنهادی به صورت زیر در می‌آید:

(۱۸)

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 0.622 + \frac{f'_l}{f'_c} + 1.577\sqrt{\left(\frac{f'_l}{f'_c} + 0.058\right)}$$

در معادله اخیر $f'_l = \frac{2ntfffe}{D}$ می‌باشد که در آن t_f ضخامت و f_{fe} مقاومت موثر صفحه FRP بوده و D قطر ستون دایره‌ای می‌باشد. معادله ۱۸ مدل مقاومت عددی پیشنهادی برای بتن محصور شده به کمک FRP می‌باشد. تئوری مقاومت موهر اثر تنش میانی (به عنوان مثال σ_2) را لحاظ نمی‌کند. با این حال در مورد بتن محصور شده تنش اصلی میانی برابر با تنش اصلی حداقل است (به عنوان مثال $\sigma_3 = \sigma_2$) را و تنش‌های اصلی میانی مستقل وجود ندارند.

جدول ۱. محدوده تقریبی مقاومت‌های کششی بتن [۱۹]

بتن سبک (kg/cm^2)	بتن معمولی (kg/cm^2)	
$0.52 \sim 0.78 \sqrt{f'_c}$	$0.78 \sim 1.3 \sqrt{f'_c}$	مقاومت کششی مستقیم f'_t
$1.04 \sim 1.56 \sqrt{f'_c}$	$1.56 \sim 2.08 \sqrt{f'_c}$	مقاومت شکافت نمونه استوانه‌ای f_{ct}
$1.56 \sim 2.08 \sqrt{f'_c}$	$2.08 \sim 3.12 \sqrt{f'_c}$	مدول گسیختگی f_r

۶. ارایه مدلی برای بتن محصور شده به کمک

FRP

می‌توان نشان داد که برای حالت‌های تنش سه محوره (محصورشده‌گی فعال)، مرتبه n در پوش نهایی موهر بین ۱ و ۲ می‌باشد (شکل ۷). مطالعات نشان می‌دهد که برای بتن به همراه FRP (محصورشده‌گی غیر فعال)، مرتبه پوش مقاومت نهایی موهر در حدود ۲ می‌باشد (شکل ۸). با فرض آنکه دوایر مقاومت نهایی پوش موهر به صورت یک منحنی می‌باشد که به صورت سهمی درجه ۲ در اشکال ۵ و ۶ نشان داده شده و یک مدل مقاومت به صورت عددی پیشنهاد شده است. پوش مقاومت نهایی موهر به صورت درجه ۲ یا سهمی با لحاظ کردن مقدار $n = 2$ در معادله ۱۲ بدست می‌آید. با انجام این عمل بخش اول معادله ۱۲ برابر یک گردیده و معادله حاصل بسیار ساده تر خواهد شد و به صورت زیر در می‌آید:

(۱۳)

$$\left(\frac{\tau}{f'_c}\right)^2 = \left[1 + 2\frac{f'_l}{f'_c} - 2\sqrt{\frac{f'_l}{f'_c}\left(1 + \frac{f'_l}{f'_c}\right)}\right]\left(\frac{\sigma + f'_l}{f'_c}\right)$$

و یا مقادیر a و b در معادله ۳ به ترتیب به صورت زیر خواهد بود:

$$a = \left[1 + 2\frac{f'_l}{f'_c} - 2\sqrt{\frac{f'_l}{f'_c}\left(1 + \frac{f'_l}{f'_c}\right)}\right] \quad (۱۴-الف)$$

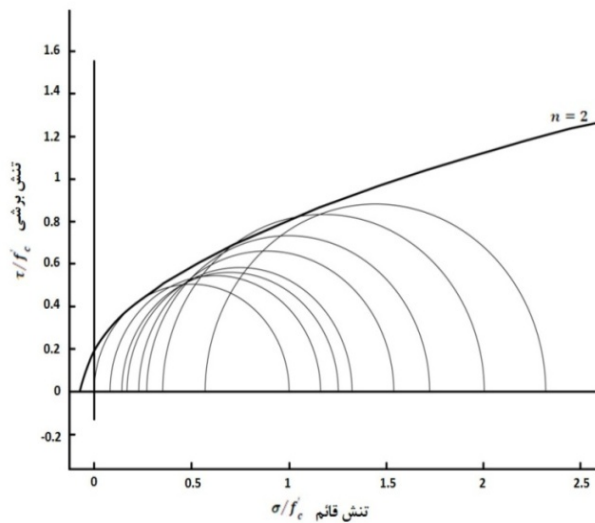
$$b = \left[1 + 2\frac{f'_l}{f'_c} - 2\sqrt{\frac{f'_l}{f'_c}\left(1 + \frac{f'_l}{f'_c}\right)}\right]\left(\frac{f'_l}{f'_c}\right) \quad (۱۴-ب)$$

معادله دایره موهر (C_2) نشان داده شده در شکل ۶ خواهد بود:

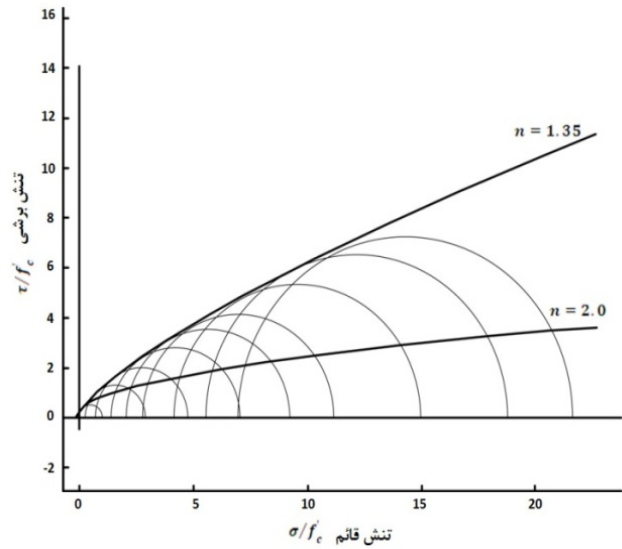
(۱۵)

$$\left(\frac{\sigma}{f'_c} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2f'_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{f'_c}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2f'_c}\right)^2$$

برای بتن محصور شده با FRP با جایگزینی مقادیر $\sigma_1 = f'_{cc}$



شکل ۸. پوش نهایی موهر برای بتن محصور شده



شکل ۷. پوش نهایی موهر برای بتن محصور شده

۷. بررسی صحت معادله پیشنهادی با استفاده از

نتایج تجربی موجود

آزمایش‌های بسیاری بر روی بتن محصور شده انجام شده است. مطالعاتی توسط *Carey* و *Harries* همچنین توسط *Matthys Mandal* و نیز توسط *Bisby* در سال ۲۰۰۵ انجام گرفته است [۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳]. تمام فرمول‌های ارائه شده برای بتن محصور شده به کمک *FRP* با استفاده از آنالیز رگرسیون ویا به کمک تئوری پلاستیسیته به صورت تجربی بسط داده شده و در جدول ۲ آورده شده است. مدل پیشنهادی به صورت عددی بر مبنای پوش سهمی شکل مقاومت نهایی موهر (معادله ۱۲) بسط داده شده است. مقدار f'_c استفاده شده، میانگین مقدار محاسبه شده با استفاده از فرمول پیشنهادی توسط *ACI* برای مقاومت بتن در محدوده $200 \text{ kg/cm}^2 \leq f'_c \leq 540 \text{ kg/cm}^2$ مدلی با استفاده از اطلاعات ۱۱۰ نقطه از آزمایش‌های موجود بر روی بتن محصور شده با *FRP* با استفاده از آنالیز رگرسیون تایید شده است. اطلاعات مربوط به آزمایش‌ها و نتایج محاسبه شده برای مقاومت بتن محصور شده به کمک *FRP* با استفاده از مدل عددی پیشنهادی در جدول ۳ آورده شده است.

شکل ۹ نموداری از مقادیر f'_{cc}/f'_c تعیین شده بر اساس مدل‌های

مختلف برحسب مقادیر اندازه‌گیری شده f'_{cc}/f'_c برای مقاومت بتن‌های محصور شده به کمک *FRP* ارائه می‌دهد. با بررسی شکل ۹ می‌توان بیان داشت که نتایج بدست آمده از مدل *Mander* برای مقادیر نسبتاً کوچک f'_i/f'_c محافظه کارانه نمی‌باشد [۲۴]. نمودار مقاومت محصور شده بدست آمده توسط مدل‌های مختلف به همراه مدل پیشنهادی برحسب تنش محصور شدگی در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. با استفاده از شکل ۱۰ می‌توان گفت که مدل اصلاح شده *Toutanji* بسیار نزدیک به مدل پیشنهادی در مقادیر کوچک f'_i/f'_c می‌باشد اما برای مقادیر بزرگتر تنش محصور شدگی این مدل محافظه کارانه بودن خود را تا حدی از دست می‌دهد. شکل ۱۱ در واقع همان شکل ۱۰ می‌باشد که در آن محدوده گسترده تری از مقادیر f'_i/f'_c به منظور نشان دادن رفتار چهار مدل در مقادیر بزرگ f'_i/f'_c آورده شده است. با استفاده از اشکال ۱۰ و ۱۱ بدیهی است که مدل *Mander* به خوبی اطلاعات مورد استفاده را ارضاء نمی‌کند و بر مبنای آنالیز نمی‌تواند برای تنش‌های محصور شدگی بزرگ کاربرد داشته باشد. همچنین مدل خطی *Fardis & Khalili* در مقادیر بزرگ تنش محصور شدگی، غیر محافظه کارانه می‌شود [۲۵].

جدول ۲. مدل‌های مقاومتی مختلف برای بتن محصور شده با FRP

نوع رابطه	رابطه	سال	مرجع	مؤلف
درجه دو	$f'_{cc}/f'_c = 0.622 + f'_l/f'_c + 1.577\sqrt{(f'_l/f'_c + 0.058)}$	۲۰۰۷	---	Proposed analytical by the authors
غیر خطی	$f'_{cc}/f'_c = 1 + 2.3(f'_l/f'_c)^{0.85}$	۲۰۰۵	[۲۳]	Toutanji Matthys et al.
خطی	$f'_{cc}/f'_c = 1 + 2.98(f'_l/f'_c)$	۱۹۹۹	[۲۶]	Miyauchi et al.
غیر خطی	$f'_{cc}/f'_c = 1 + 2.2(f'_l/f'_c)^{0.84}$	۱۹۹۹	[۲۷]	Saafi et al.
درجه دو	$f'_{cc}/f'_c = 0.2 + 3\sqrt{(f'_l/f'_c)}$	۱۹۹۹	[۲۸]	Monti
غیر خطی	$f'_{cc}/f'_c = 1 + 6(f'_l^{0.7}/f'_c)$	۱۹۹۸	[۲۹]	Samaan et al.
درجه دو	$f'_{cc}/f'_c = \frac{-1.25 - 2(f'_l/f'_c) + 2.25\sqrt{(1 + 7.94 f'_l/f'_c)}}{1}$	۱۹۸۸	[۲۴]	Mander et al.
خطی	$f'_{cc}/f'_c = 1 + 2.05(f'_l/f'_c)$	۱۹۸۱	[۲۵]	Fardis and khalili

جدول ۳. مقایسه اطلاعات آزمایشگاهی و نتایج حاصل از معادلات تئوری برای بتن محصور شده با بتن

محققین	نتایج حاصل از آزمایشات محققین			نتایج حاصل از معادلات تئوری برای بتن محصور شده با بتن (f'_{cc}/f'_c)				
	f'_c (kg/cm ²)	(f'_l/f'_c)	(f'_{cc}/f'_c)	معادله پیشنهادی	Toutanji	Samaan	Mander	Fardis & Khalili
Matthys et al. 2005	380	0.06	1.14	1.22	1.22	1.29	1.38	1.12
	380	0.08	1.33	1.29	1.26	1.33	1.45	1.16
	380	0.13	1.6	1.44	1.41	1.49	1.71	1.27
	380	0.18	1.59	1.57	1.55	1.62	1.92	1.37
	380	0.19	1.62	1.60	1.56	1.63	1.93	1.39
Labossière 2000	438	0.09	1.1	1.32	1.3	1.36	1.52	1.18
	438	0.18	1.37	1.57	1.54	1.58	1.9	1.37
	438	0.28	1.65	1.82	1.78	1.8	2.23	1.57
	438	0.37	1.73	2.02	1.99	1.97	2.48	1.76
	446	0.18	1.25	1.57	1.54	1.58	1.9	1.37
	446	0.18	1.19	1.57	1.54	1.58	1.9	1.37
	446	0.18	1.11	1.57	1.54	1.58	1.9	1.37
	344	0.23	1.42	1.70	1.67	1.76	2.09	1.47
	344	0.23	1.47	1.70	1.67	1.76	2.09	1.47
	344	0.23	1.47	1.70	1.67	1.76	2.09	1.47
446	0.36	1.92	2.00	1.97	1.94	2.45	1.74	

جدول ۳. مقایسه اطلاعات آزمایشگاهی و نتایج حاصل از معادلات تنوری برای بتن محصور شده با بتن (ادامه)

محققین	نتایج حاصل از آزمایشات محققین			نتایج حاصل از معادلات تنوری برای بتن محصور شده با بتن (f'_{cc}/f'_c)				
	f'_c (kg/cm ²)	(f'_t/f'_c)	(f'_{cc}/f'_c)	معادله پیشنهادی	Toutanji	Samaan	Mander	Fardis & Khalili
	446	0.36	1.81	2.00	1.97	1.94	2.45	1.74
	446	0.36	1.94	2.00	1.97	1.94	2.45	1.74
	344	0.47	1.92	2.24	2.21	2.23	2.7	1.96
	344	0.47	2.23	2.24	2.21	2.23	2.7	1.96
	344	0.47	2.13	2.24	2.21	2.23	2.7	1.96
	446	0.54	2.2	2.38	2.36	2.25	2.85	2.11
	446	0.54	2.11	2.38	2.36	2.25	2.85	2.11
	446	0.54	2.15	2.38	2.36	2.25	2.85	2.11
	344	0.7	2.46	2.69	2.7	2.63	3.12	2.44
	344	0.7	2.56	2.69	2.7	2.63	3.12	2.44
	344	0.7	2.83	2.69	2.7	2.63	3.12	2.44
Saafi et al. 1999	357	0.14	1.51	1.46	1.42	1.51	1.72	1.29
	357	0.14	1.57	1.46	1.42	1.51	1.73	1.29
	357	0.3	1.89	1.87	1.84	1.9	2.3	1.62
	357	0.31	1.94	1.89	1.84	1.9	2.31	1.64
	357	0.51	2.37	2.32	2.29	2.28	2.78	2.05
	357	0.77	2.77	2.83	2.83	2.71	3.21	2.58
Harries et al. 1998	267	0.17	1.28	1.55	1.51	1.65	1.86	1.35
	267	0.19	1.47	1.60	1.56	1.7	1.94	1.39
	267	0.29	1.93	1.84	1.8	1.95	2.26	1.59
	267	0.33	1.7	1.93	1.9	2.04	2.37	1.68
	267	0.38	2	2.05	2.01	2.14	2.5	1.78
	267	0.58	2.44	2.46	2.45	2.54	2.92	2.19
Mirmiran et al. 1998	315	0.32	1.74	1.91	1.87	1.97	2.35	1.66
	315	0.32	1.83	1.91	1.87	1.97	2.35	1.66
	315	0.34	1.87	1.96	1.92	2.01	2.4	1.70
	315	0.34	2.03	1.96	1.92	2.01	2.4	1.70
	315	0.34	2.27	1.96	1.92	2.01	2.4	1.70
	315	0.37	1.68	2.02	1.99	2.07	2.48	1.76
	315	0.37	1.86	2.02	1.99	2.07	2.48	1.76
	302	0.52	2.41	2.34	2.32	2.37	2.81	2.07
	302	0.52	2.42	2.34	2.32	2.37	2.81	2.07
	302	0.54	2.13	2.38	2.36	2.41	2.85	2.11
	302	0.54	2.36	2.38	2.36	2.41	2.85	2.11
	302	0.54	2.52	2.38	2.36	2.41	2.85	2.11

جدول ۳. مقایسه اطلاعات آزمایشگاهی و نتایج حاصل از معادلات تئوری برای بتن محصور شده با بتن (ادامه)

محققین	نتایج حاصل از آزمایشات محققین			نتایج حاصل از معادلات تئوری برای بتن محصور شده با بتن (f'_{cc}/f'_c)				
	f'_c (kg/cm ²)	(f'_i/f'_c)	(f'_{cc}/f'_c)	معادله پیشنهادی	Toutanji	Samaan	Mander	Fardis & Khalili
	302	0.57	2.42	2.44	2.43	2.47	2.9	2.17
	326	0.57	2.52	2.44	2.43	2.43	2.9	2.17
	326	0.57	3.14	2.44	2.43	2.43	2.9	2.17
	326	0.73	2.85	2.75	2.76	2.7	3.16	2.50
	326	0.73	2.95	2.75	2.76	2.7	3.16	2.50
	326	0.78	2.62	2.85	2.86	2.78	3.23	2.60
	326	0.78	2.69	2.85	2.86	2.78	3.23	2.60
	457	0.81	2.77	2.90	2.92	2.65	3.27	2.66
	457	0.81	2.81	2.90	2.92	2.65	3.27	2.66
	457	0.84	2.91	2.96	2.98	2.7	3.31	2.72
	457	0.84	2.95	2.96	2.98	2.7	3.31	2.72
	457	0.84	3.87	2.96	2.98	2.7	3.31	2.72
Samaan et al. 1998	326	0.31	1.87	1.89	1.85	1.94	2.32	1.64
	315	0.32	1.78	1.91	1.88	1.97	2.35	1.66
	302	0.33	2.05	1.93	1.91	2.01	2.39	1.68
	326	0.52	2.42	2.34	2.33	2.35	2.82	2.07
	315	0.54	2.34	2.38	2.37	2.4	2.86	2.11
	302	0.57	2.69	2.44	2.42	2.46	2.9	2.17
	326	0.78	2.66	2.85	2.87	2.79	3.24	2.60
	315	0.81	2.79	2.90	2.93	2.85	3.27	2.66
	302	0.85	3.24	2.97	2.99	2.93	3.31	2.74
Karbhari and Gao 1997	391	0.09	1.17	1.32	1.3	1.37	1.52	1.18
	391	0.24	1.55	1.72	1.67	1.73	2.1	1.49
	391	0.37	2.02	2.02	2	2.01	2.49	1.76
	391	0.61	2.33	2.52	2.51	2.42	2.97	2.25
	184	1.53	4.57	4.14	4.3	4.39	3.86	4.14
	184	1.69	3.92	4.40	4.59	4.64	3.92	4.46
	184	1.98	4.57	4.85	5.12	5.07	4	5.06
	184	1.61	4.41	4.27	4.45	4.52	3.89	4.30
Watanabe et al. 1997	308	0.15	1.38	1.49	1.46	1.57	1.78	1.31
	308	0.25	1.29	1.75	1.71	1.82	2.14	1.51
	308	0.3	1.54	1.87	1.83	1.93	2.29	1.62
	308	0.34	1.85	1.96	1.92	2.01	2.4	1.70
	308	0.36	2.1	2.00	1.97	2.06	2.45	1.74
	308	0.52	2.27	2.34	2.32	2.37	2.81	2.07

جدول ۳. مقایسه اطلاعات آزمایشگاهی و نتایج حاصل از معادلات تنوری برای بتن محصور شده با بتن (ادامه)

محققین	نتایج حاصل از آزمایشات محققین			نتایج حاصل از معادلات تنوری برای بتن محصور شده با بتن (f'_c/f'_c)				
	f'_c (kg/cm ²)	(f'_t/f'_c)	(f'_{cc}/f'_c)	معادله پیشنهادی	Toutanji	Samaan	Mander	Fardis & Khalili
	308	0.76	3.05	2.81	2.82	2.78	3.2	2.56
	308	0.95	2.89	3.16	3.2	3.08	3.43	2.95
	308	1.18	3.46	3.56	3.65	3.42	3.64	3.42
Howie and Karbhari 1994	393	0.08	1.08	1.29	1.27	1.34	1.47	1.16
	393	0.08	1.18	1.29	1.27	1.34	1.47	1.16
	393	0.08	1.22	1.29	1.27	1.34	1.47	1.16
	393	0.14	1.22	1.46	1.43	1.51	1.74	1.29
	393	0.14	1.24	1.46	1.43	1.51	1.74	1.29
	393	0.14	1.3	1.46	1.43	1.51	1.74	1.29
	393	0.16	1.28	1.52	1.48	1.56	1.82	1.33
	393	0.16	1.36	1.52	1.48	1.56	1.82	1.33
	393	0.16	1.36	1.52	1.48	1.56	1.82	1.33
	393	0.22	1.46	1.67	1.64	1.69	2.04	1.45
	393	0.22	1.57	1.67	1.64	1.69	2.04	1.45
	393	0.22	1.6	1.67	1.64	1.69	2.04	1.45
	393	0.26	1.77	1.77	1.73	1.78	2.17	1.53
	393	0.26	1.68	1.77	1.73	1.78	2.17	1.53
	393	0.26	1.74	1.77	1.73	1.78	2.17	1.53
	393	0.34	1.96	1.96	1.92	1.94	2.4	1.70
	393	0.34	1.98	1.96	1.92	1.94	2.4	1.70
	393	0.34	2.1	1.96	1.92	1.94	2.4	1.70
393	0.56	2.31	2.42	2.41	2.34	2.89	2.15	
393	0.56	2.32	2.42	2.41	2.34	2.89	2.15	
393	0.56	2.33	2.42	2.41	2.34	2.89	2.15	

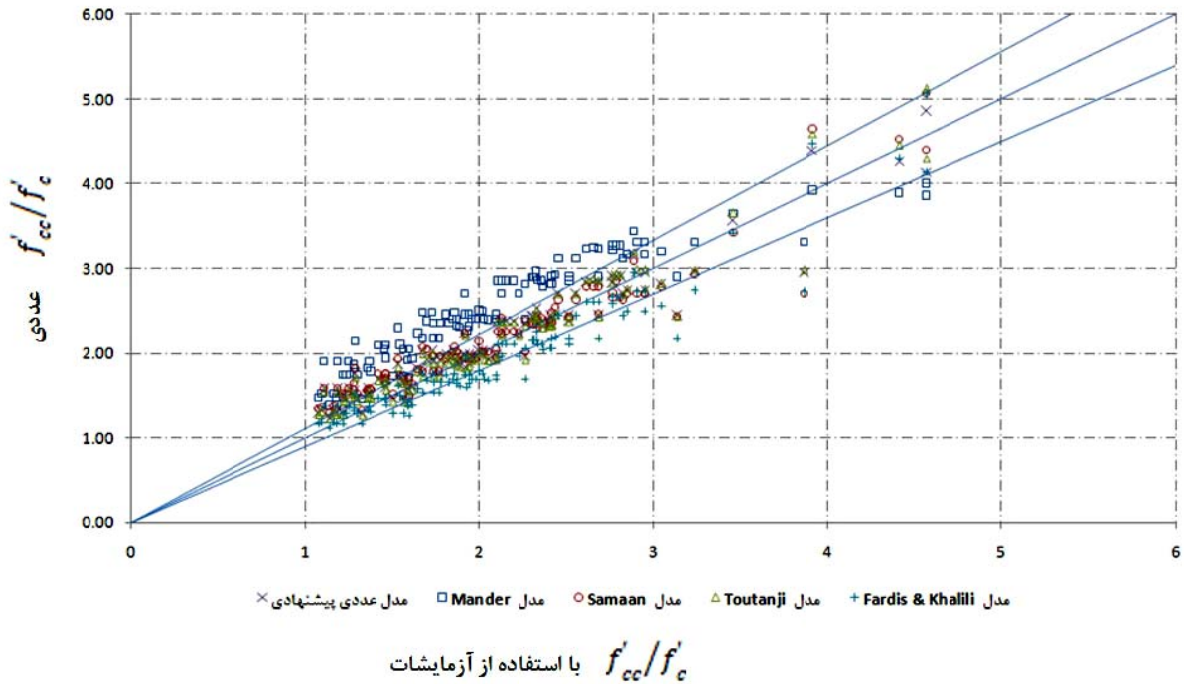
۸. تأثیر مقاومت کششی بتن (f'_t) بر مقاومت

بتن محصور شده به کمک FRP

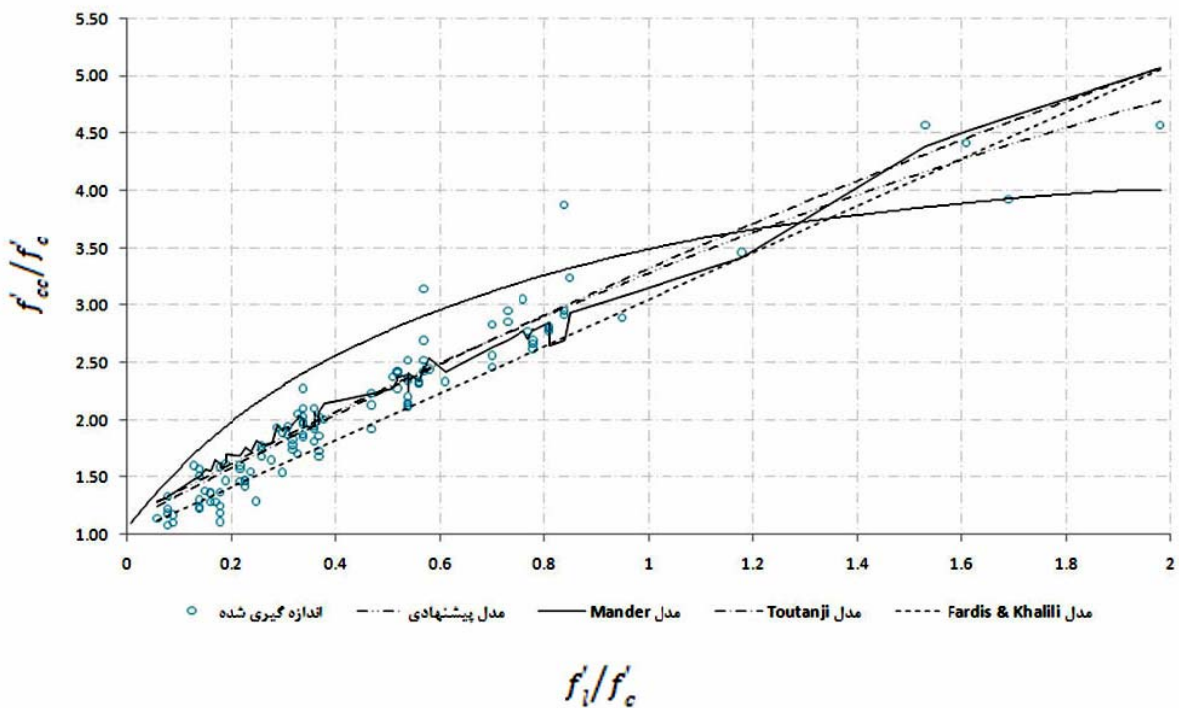
مقاومت کششی تک محوری برابر با صفر در نظر گرفته شده است؛ بنابراین مقادیر f'_t/f'_c عبارتند از: 0، 0.051، 0.053، 0.055، 0.058، 0.06، 0.064 و 0.068. شکل ۱۲ مقادیر متفاوت f'_t/f'_c را نشان می‌دهد که نتایج متغیری را بدست می‌دهند. قابل توجه است که در نظر نگرفتن مقاومت کششی بتن باعث خارج شدن از ناحیه ایمن می‌گردد.

معادله ۱۷ نشان می‌دهد که مقاومت بتن محصور شده به کمک FRP بستگی به تنش محصور شدگی (f'_t)، مقاومت فشاری بتن محصور نشده (f'_c) و مقاومت کششی تک محوری بتن (f'_t) دارد. هشت مدل با استفاده از هفت مقدار متفاوت f'_c تعیین شده‌اند (در مدل اول، بدون لحاظ کردن f'_c مقدار

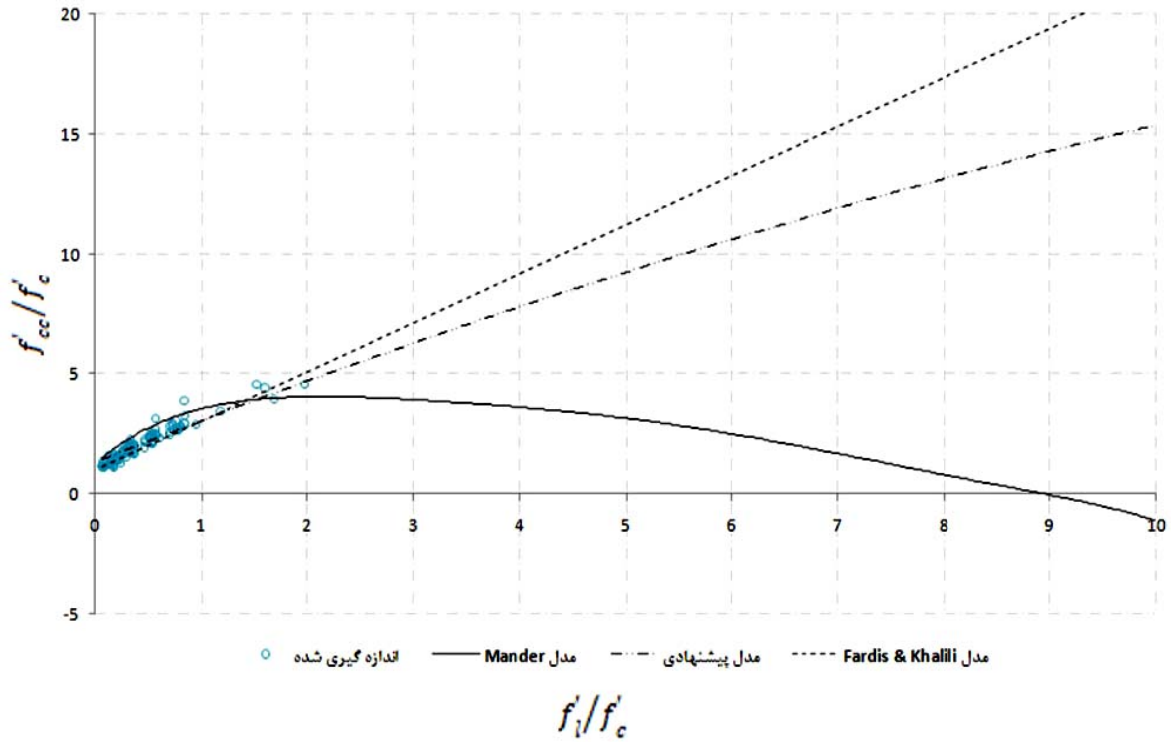
پیشنهاد رابطه محاسبه مقاومت بتن محصور شده در ستونهای ...



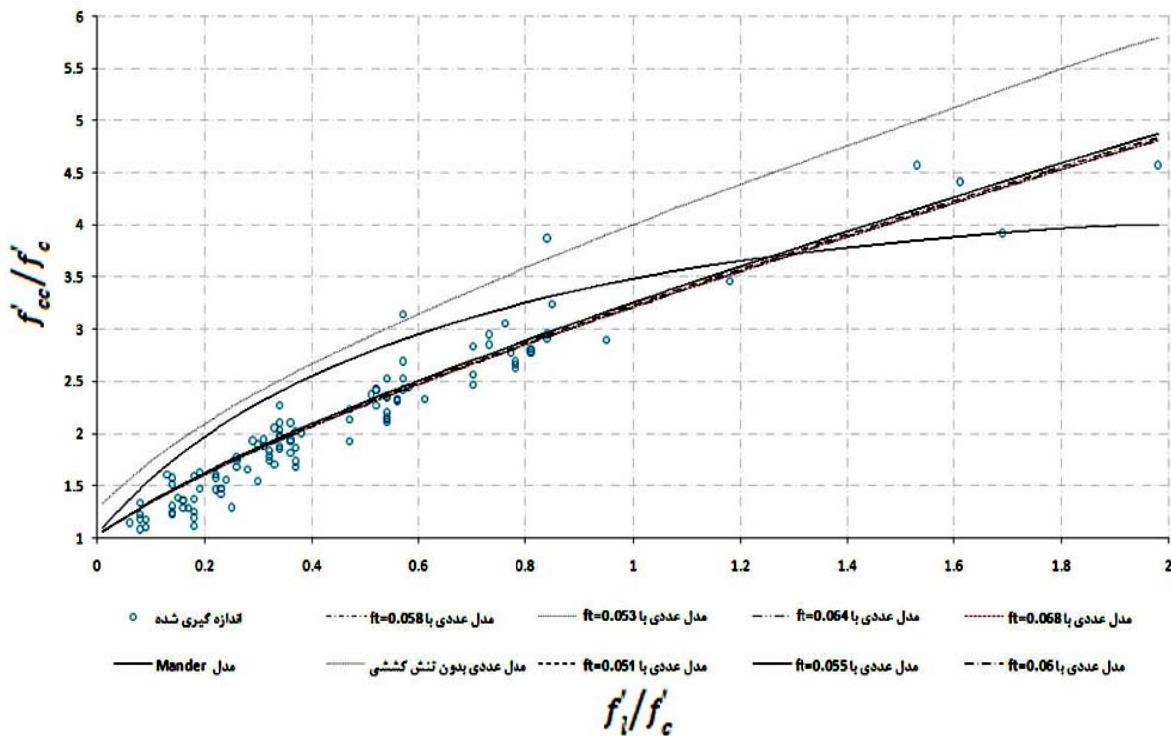
شکل ۹. مقایسه مقادیر مختلف عددی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده (f'_{cc}/f'_c) برای بتن محصور شده با FRP



شکل ۱۰. نمودار (f'_{cc}/f'_c) در مقابل (f'_i/f'_c) برای مدل‌های مختلف



شکل ۱۱. نمودار (f'_{cc}/f'_c) در مقابل (f'_i/f'_c) برای مدل‌های مختلف در محدوده گسترده تری از (f'_i/f'_c)



شکل ۱۲. تأثیر تنش کششی بتن، f'_t ، بر مقاومت محصور شدگی بتن با دورپیچ *FRP*

جدول ۴. مقادیر f'_{cc}/f'_c برای هشت مدل با مقادیر متفاوت f'_c

مقاومت فشاری بتن f'_c	$x = f'_i/f'_c$	$(1 + 2x - 2\sqrt{x(1+x)})$	$2 \times \sqrt{(1 + 2x - 2\sqrt{x(1+x)})}$	f'_{cc}/f'_c
230	0.068	0.597	1.546	$0.597 + f'_i/f'_c + 1.546 \sqrt{(f'_i/f'_c + 0.068)}$
260	0.064	0.606	1.557	$0.606 + f'_i/f'_c + 1.557 \sqrt{(f'_i/f'_c + 0.064)}$
290	0.060	0.614	1.568	$0.614 + f'_i/f'_c + 1.568 \sqrt{(f'_i/f'_c + 0.060)}$
320	0.058	0.622	1.577	$0.622 + f'_i/f'_c + 1.577 \sqrt{(f'_i/f'_c + 0.058)}$
350	0.055	0.628	1.585	$0.628 + f'_i/f'_c + 1.585 \sqrt{(f'_i/f'_c + 0.055)}$
380	0.053	0.634	1.592	$0.634 + f'_i/f'_c + 1.592 \sqrt{(f'_i/f'_c + 0.053)}$
410	0.051	0.639	1.599	$0.639 + f'_i/f'_c + 1.599 \sqrt{(f'_i/f'_c + 0.051)}$
-	0	1	2	$1 + f'_i/f'_c + 2 \sqrt{(f'_i/f'_c)}$

با در نظر گرفتن محاسبات و با استفاده از معادله پیشنهادی، مشاهده شد که با یک لایه دورپیچ FRP، مقاومت طراحی محوری ستون همچنان کمتر از مقاومت مورد نیاز است (با یک لایه: $\phi P_n = 858 \text{ ton} < 900 \text{ ton}$). با ادامه محاسبات و با استفاده از معادله پیشنهادی، مشخص شد که نیاز به دو لایه می باشد (با دو لایه: $\phi P_n = 984 \text{ ton} > 900 \text{ ton}$)؛ در حالی که با استفاده از مدل Mander تنها یک لایه مورد نیاز است (با یک لایه: $\phi P_n = 916 \text{ ton} > 900 \text{ ton}$). بنابراین مدل Mander غیر محافظه کارانه بوده و می تواند غیر ایمن باشد.

۱۰. نتیجه گیری

فراهم آوردن امنیت لرزه ای مناسب برای پل های بتن آرمه به عنوان یک مولفه حیاتی در سیستم حمل و نقل، امری اجتناب ناپذیر است. مدلی به منظور توضیح یک فرم کلی از پوش تنش فشاری سه محوری نهایی بتن ($\sigma_1 > \sigma_2, \sigma_2 = \sigma_3$) ارائه و بسط داده شده است. این معادله به خوبی وابستگی معادله کلی پوش را به خصوصیات مستقل مصالح (f'_c و f'_t) نشان می دهد. همچنین چنانچه یک تئوری مقاومت سه محوری سازگار در دسترس باشد، می بایست پارامتر توان n که در معادلات ظاهر می شود توسط آزمایش های دقیق تعیین شود. تمام مدل های پیشنهاد شده توسط محققین با استفاده از آنالیز

۹. مقاوم سازی ستون با استفاده از دورپیچ

FRP

مقاوم سازی یک ستون بتن آرمه پل با خاموت دورپیچ (بدون پیش تنیدگی و کمانش) به منظور تحمل بارهای جدید انجام گرفت.

۱- اطلاعات مربوط به مصالح و هندسه ستون به شرح زیر بودند:

- قطر ستون دایره ای: $D = 65 \text{ cm} \rightarrow A_c = 4225 \text{ cm}^2$
- آرماتور طولی: $8 \phi 30 \rightarrow A_s = 56.55 \text{ cm}^2$
- مقاومت فشاری تک محوره بتن محصور نشده:

$$f'_c = 270 \text{ kg/cm}^2$$

- تنش تسلیم آرماتور فولادی: $f_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$

۲- خصوصیات دورپیچ FRP:

- مدول الاستیسیته: $E_f = 640000 \text{ kg/cm}^2$
- مقاومت کششی نهایی: $f_{fu} = 7000 \text{ kg/cm}^2$
- مقاومت موثر:

$$f_{fe} = 0.95 \times 7000 = 6650 \text{ kg/cm}^2$$

- ضخامت: $t_f = 0.1 \text{ cm}$ در هر لایه

۳- اطلاعات بار جدید:

- $P_D = 400 \text{ ton}$
- $P_L = 200 \text{ ton}$
- $1.2P_D + 0.85P_L = 1.2 \times 400 + 0.85 \times 200 = 650 \text{ ton}$
- $1.4P_D + 1.7P_L = 1.4 \times 400 + 1.7 \times 200 = 900 \text{ ton}$

International Workshop on Mitigation of Seismic Effects on Transportation Structures (Loh, C. H. et al editors), pp. 242-247, National Center for Research on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan.

5- Chang, K.C., Liu, K.Y. and Chang, S.B. 2001. Seismic retrofit study of RC rectangular bridge columns lap-spliced at the plastic hinge zone. In: Proc. of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong, pp. 869-875.

6- Haroun, M.A., Mosallam, A.S., Feng, M.Q. and Elsanadedy, H.M. 2001. Experimental investigation of seismic repair and retrofit of bridge columns by composite jackets. In: Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong, pp. 839-848.

7- Japan Road Association (1998) "Reference for Seismic Retrofit of Existing Highway Bridges," Maruzen, Tokyo, Japan.

8- Kheyroddin, A., and Naderpour, H. (2008). "Nonlinear Finite Element Analysis of Composite RC Shear Walls", Iranian Journal of Science & Technology, Volume 32, No. B2, pp. 79-89.

9- Kheyroddin, A., Hoseini Vaez, S.R., and Naderpour, H. (2008). "Numerical Analysis of Slab-Column Connections Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymers", Journal of Applied Sciences, Volume 8, No. 3, pp. 420-431.

10-Kheyroddin, A. and Naderpour, H. 2006. Nonlinear Finite Element Analysis of RC Shear Walls Retrofitted Using Externally Bonded Steel Plates and FRP Sheets, CSCE, 1st International Structural Specialty Conference Calgary, Alberta, Canada, May23-26.

11-Naderpour, H., Kheyroddin, A., and Hoseini Vaez, S.R. (2008) " Nonlinear behavior of RC shear walls externally bonded with FRP sheets ", 4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE2008 Zurich, Switzerland, July 22-24.

12-Hoseini Vaez, S.R., Kheyroddin, A., and Naderpour, H. (2008)"3D Finite Element Simulation of Slab-Column Connections Strengthened with CFRP", Accepted in 4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE2008 Zurich, Switzerland, July 22-24.

۱۳- خیرالدین، علی و نادرپور، حسین ، " استفاده از FRP در مقاوم سازی دیوارهای برشی بتن آرمه"، اولین همایش بین المللی مقاوم سازی لرزه ای، تهران، اردیبهشت ماه ۱۳۸۵.

رگرسیون به صورت تجربی تعیین شدند. تعدادی از آن‌ها بر مبنای تئوری پلاستیسیته بودند اما پارامترهای مورد نیاز مربوطه باید به صورت تجربی با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی دقیق تعیین گردند. با توجه به آنکه بسیاری از روابط موجود در زمینه پیش بینی مقاومت محصور شدگی اعضای مرکب شده توسط کامپوزیت‌های *FRP* دارای خطای نسبتاً محسوس بوده و یا اغلب غیر محافظه کارانه و در نتیجه غیر ایمن می‌باشند، ارایه مدلی که بتواند با دقتی مناسب، مقاومت محصور شدگی را تقریب بزند، می‌تواند بسیار کاربردی باشد. یک مدل مقاومت برای بتن محصور شده به کمک *FRP* پیشنهاد شد و صحت آن با استفاده از اطلاعات آزمایش‌های متعدد تایید گردید. این مدل تنها بستگی به دو ثابت مهم بتن شامل مقاومت فشاری تک محوری بتن محصور نشده (f_c') و مقاومت محوری کششی بتن (f_t') دارد. با مقایسه نتایج بدست آمده توسط رابطه پیشنهادی و مدل‌های دیگر مشاهده شد که میزان خطا در روابط ارایه شده توسط سایر محققین بیشتر از ۱۰ درصد می‌باشد و در مواردی حتی غیر محافظه کارانه است؛ ولی رابطه پیشنهادی در این مطالعه کمتر از ۲ درصد خطا دارد.

۱.۱ پانویس‌ها

- 1- Fiber Reinforced Polymer
- 2- San Fernando
- 3- Northridge
- 4- Wrapping

۱.۲ مراجع

- 1- F.Seible, M.J.N. Priestley, G.A. Hegemier and D. Innamorato, "Seismic Retrofit of RC Columns With Continuous Carbon Fiber Jackets", Journal of Composites For Construction, 1, 52-62 (1997).
- 2- G. Ma, (1998), "The Use of Space Age Materials and Technology for Infrastructure Renewal: State of the Art Seismic Retrofit and Corrosion Rehabilitation in the United States," in Carbon Fibers 98: Meeting the Composite Challenge, edited and sponsored by INTERTECH CONFERENCES, San Antonio, Texas.
- 3- J.G. Teng, J.F. Chen, S.T. Smith and L. Lam, FRP Strengthened RC Structures, (John Wiley and Sons. West Sussex, England, 2002), pp. 1-10, 100-108, 148-236.
- 4- Chang, K. C., Chung, L. L., Hwang, S. J., Hang, J. S., Lee, Y. F., and Tsai, K. C. (1999) "Seismic Retrofit Studies on Existing Bridges in Taiwan,"

- 22- Mandal, S., Hoskin, A., and Fam, A. 2005. "Influence of concrete strength on confinement effectiveness of fiber-reinforced polymer circular jackets." *ACI Struct. J.*, 102 3 , 383–392.
- 23- Matthys, S., Toutanji, H., Audenaert, K., and Taerwe, L. 2005 . "Axial load behavior of large-scale columns confined with fiber-reinforced polymer composites." *ACI Struct. J.*, 102 2 , 258–267.
- 24- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. 1988 . "Theoretical stress–strain model for confined concrete." *J. Struct. Eng.*, 114 8 , 1804–1826.
- 25- Fardis, M. N., and Khalili, H. 1981 . "Concrete encased in fiberglass reinforced plastic." *ACI Struct. J.*, 78 6 , 440–446.
- 26- Miyauchi, K., Inoue, S., Kuroda, T., and Kobayashi, A. 1999 . "Strengthening effects of concrete columns with carbon fiber sheet." *Trans. Jpn. Concr. Inst.*, 21, 143–150.
- 27- Saafi, M., Toutanji, H. A., and Li, Z. 1999 . "Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes." *ACI Mater. J.*, 96 4 , 500–509.
- 28- Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M. 1998 . "Model of concrete confined by fiber composites." *J. Struct. Eng.*, 124 9 , 1025–1031.
- 29- Monti, G. and Spoelstra, M. R. 1999 . "FRP-confined concrete model." *J. Compos. Constr.*, 3 3 , 143–150.
- ۱۴- خیرالدین، علی و حسینی واعظ، سید روح‌الله، "مقاوم‌سازی دالهای تخت تحت برش پانچ به کمک FRP"، اولین همایش بین‌المللی مقاوم‌سازی لرزه‌ای، تهران، اردیبهشت ماه ۱۳۸۵.
- 15- Chen, W. F. 1982 . *Plasticity in reinforced concrete*, McGraw-Hill, New York.
- 16- Nadai, A. 1950 . *Theory of flow and fracture of solids*, 2nd Ed., Vol. 1, McGraw-Hill, New York, 89–108, 107–228.
- 17- Wight, J. K. 2004 . *Reinforced concrete: Mechanics and design*, 4th Ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 67–68.
- 18- American Concrete Institute, Committee 318 ACI . 2002a . *Building code requirements for structural concrete (ACI 318–02) and commentary (ACI 318R-02)*, Farmington Hills, Mich.
- 19- Nilson AH, Darwin D, Dolan ChW. *Design of Concrete Structures*. 13th ed., McGraw Hill, New York, NY, USA. 2003.
- 20- Carey, S., and Harries, K. A. 2005 . "Axial behavior and modeling of confined small medium and large scale circular sections with carbon fiber-reinforced polymer jackets." *ACI Struct. J.*, 102 4 , 596–604.
- 21- Bisby, L. A., Dent, A. J. S., and Green, M. F. 2005 . "Comparison of confinement models for fiber-reinforced polymer-wrapped concrete." *ACI Struct. J.*, 102 1 62–72.