

ارائه مدل پیش‌بینی مقاومت ستون‌های با مقاطع مربع یا مستطیل محصور شده با الیاف پلیمری (FRP) به وسیله روش برنامه‌نویسی عبارتی ژنتیک (GEP)

پویان فخاریان

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

حسین نادرپور*

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

عبدالحسین حداد

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

امیرحسین رفیعیان

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

دانیال رضازاده عیدگاهی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

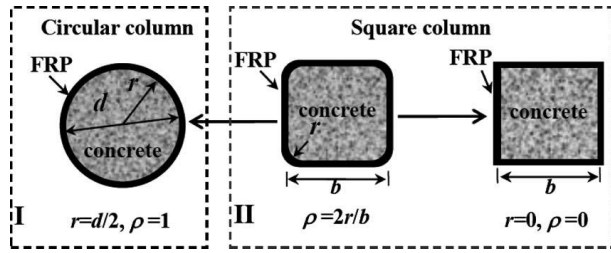
چکیده

در میان روش‌های مختلف برای مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌ها و به‌خصوص ستون‌های بتنی، استفاده از مصالح الیاف پلیمری (FRP) به دلیل مزیت‌های فراوان رواج یافته است. پژوهش‌های زیادی بر روی رفتار این مصالح بر روی اعضای مختلف سازه و تحت بارگذاری‌های مختلف صورت گرفته است. در این تحقیق با بیان چالش‌های موجود در نمونه‌های با مقاطع مربع و مستطیل به بررسی و آنالیز مدل‌های ارائه شده به منظور تخمین مقاومت این نمونه‌ها پرداخته و مدلی بر اساس روش برنامه‌نویسی عبارتی ژنتیک (GEP)، ارائه شده است. این روش بر مبنای استفاده از موالید تصادفی توابع مشخص می‌تواند به خوبی رابطه بین مجموع داده‌های ورودی و خروجی را تخمین زده و به عنوان جایگزین مناسبی برای جلوگیری از انجام آزمون‌های آزمایشگاهی مجدد به شمار رود. با استفاده از روابط متداول به منظور سنجش خطای مدل به دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر تخمین زده شده وجود دارد. ضریب همبستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و تخمین زده شده به وسیله مدل در مرحله آموزش و اعتبارسنجی به ترتیب ۰٫۹۲۳ و ۰٫۹۲۲ می‌باشند که نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل ارائه شده بر پایه برنامه‌نویسی ژنتیک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الیاف پلیمری (FRP)، محصورشدگی، فشار جانبی، برنامه‌نویسی عبارتی ژنتیک (GEP).

* نویسنده مسئول: naderpour@semnan.ac.ir

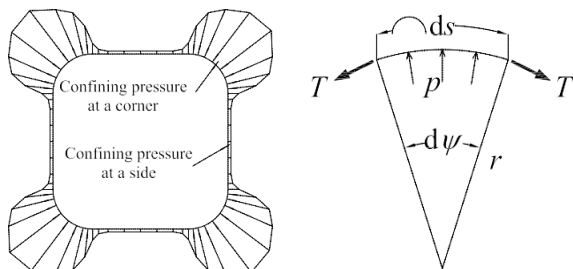
۱- مقدمه



شکل ۱- هندسه مقاطع نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای

۲- ساز و کار باربری ستون‌های با غشای FRP

توزیع فشار بر روی نمونه یکی از اثرات الیاف پلیمری ستون‌های بتنی محصور شده می‌باشد. به طور کلی باری که به صفحات پوسته‌ای وارد می‌شوند به صورت کششی و خمشی عمل می‌کند. وقتی ضخامت غشا بقدری کم باشد که به عنوان عضو پوسته‌ای در نظر گرفته شود، اثر خمشی نیز کاهش می‌یابد. شکل زیر مکانیزم و نحوه‌ی توزیع تنش را در این موارد نشان می‌دهد [۳].



الف- مکانیزم نیروی تنشی ب- پخش تنش در مقطع

شکل ۲- رفتار گوشه‌های مقطع نمونه در حالت محصورشدگی با الیاف پلیمری

با توجه به شکل ۲ می‌توان گفت بیشترین مقدار تنشی که به غشای محصور شده‌ی الیاف پلیمری (FRP) وارد می‌شود در گوشه‌های مقطع تمرکز یافته و تنش کمی در وسط اضلاع مقطع توزیع شده است که قابل صرف نظر کردن می‌باشد. به بیان دیگر، ستون‌های بتنی وقتی توسط غشای الیاف پلیمری (FRP) محصور می‌شوند و تحت بار فشاری قرار می‌گیرند، به صورت سه محوری همراه با تنش اصلی حداکثر σ_1 در راستای قائم و دو تنش اصلی جانبی σ_2 و σ_3 عمل می‌کند.

$$f_l = \frac{2f_{FRP}t}{D_{br}} = \frac{2E_{FRP}\epsilon_j t}{D_{br}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، f_{FRP} و E_{FRP} به ترتیب مقاومت کششی و مدول الاستیسیته الیاف پلیمری و t برابر ضخامت صفحات الیاف پلیمری

یکی از روش‌های بهبود مقاومت و شکل‌پذیری سازه‌های بتنی محصور کردن جانبی آن‌ها می‌باشد. سادگی، دقت بالا، آسیب‌جزئی و قابلیت تکرار، اجرای سریع و ساده، نسبت مقاومت به وزن بالای آن و کاهش هزینه‌ها باعث شده است که محصور کردن سازه با مصالح FRP برای بهسازی نسبت به سایر روش‌ها پرتعدادتر باشد. به دلیل عدم جمع‌شدگی کامل غشای FRP در گوشه‌های ستون‌های با مقطع مکعبی، محصور کردن این ستون‌ها با مصالح FRP نسبت به ستون‌های مشابه استوانه‌ای از اعتمادپذیری کمتری برخوردار است؛ اما برای این ستون‌ها هم مدل‌هایی ارائه شده است. پژوهش‌های صورت پذیرفته در این زمینه برای ستون‌های استوانه‌ای محصور شده با مصالح FRP بوده است و به طور کلی روابط کمتری برای ستون‌های بتنی مکعبی محصور شده ارائه شده اند. Wu و همکاران در سال ۲۰۰۶ بیان کردند که واگرایی و عدم اعتماد نسبت به نتایج نمونه‌های مکعبی محصور شده تا حد زیادی به عدم دقت در اندازه‌گیری شعاع گوشه غشای الیاف پلیمری (FRP) در کارهای آزمایشگاهی دارد [۱]. به طور کلی روابط و ساختار اصلی محاسبات برای ستون‌های استوانه‌ای و مکعبی با هم تشابه بسیار زیادی دارد و در بسیاری از موارد از روابط ستون‌های استوانه‌ای برای ستون‌های مکعبی نیز استفاده می‌شود. مهم‌ترین عاملی که تفاوت آن دو را نشان می‌دهد، نسبت شعاع گوشه (ρ) و مکانیزم تعریف شعاع معادل برای مقاطع مکعبی است. بعلاوه، عامل اصلی غیریکنواختی محصورشدگی در ستون‌های مکعبی است. مطابق شکل تعریف شعاع گوشه برابر نسبت شعاع قوس گوشه مربع به نصف عرض نمونه $(\frac{2r}{b})$ است. نتایج تئوری و عملی نشان می‌دهد که غشاهای مکعبی با شعاع گوشه صفر ($\rho=0$) هیچ اثر محصورشدگی بر نمونه نخواهند داشت و با افزایش شعاع گوشه اثر محصورشدگی نیز افزایش خواهد یافت [۲].

در این مقاله تحلیل و بررسی جامعی در مورد رابطه‌های ارائه شده برای محاسبه مقاومت ستون‌های بتنی مکعبی محصور شده با الیاف پلیمری (FRP) و تعریف پارامترهای موثر بر این روابط شده است. بعلاوه، رابطه‌ای به منظور تخمین مقاومت بر پایه روش برنامه‌نویسی ژنتیک (GEP) ارائه شده است.

برابر مقاومت فشاری محصور شده و محصور نشده‌ی بتن است و f_l برابر فشار جانبی محصور شده است [۴].

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \frac{f_l}{f'_{co}} + \sqrt{\left(\frac{16.7}{f'_{co}{}^{0.42}} - \frac{f'_{co}{}^{0.42}}{16.7}\right) \frac{f_l}{f'_{co}}} + 1 \quad (4)$$

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، پارامترهای زیادی بر مقاومت ستون‌های با مقطع مربعی محصور شده با غشای الیاف پلیمری (FRP) تاثیرگذار است. اگر همه‌ی پارامترها را به صورت ثابت و شعاع گوشه کناری ρ را به عنوان پارامتر متغیر در نظر بگیریم، فشار موثر محصور شده به عنوان تابعی از شعاع گوشه بیان می‌شود یا به عبارت دیگر داریم $f_l: f(\rho)$ که $f(\rho)$ ضریب شکل است که به دلیل اثر شعاع گوشه یک ضریب کاهشدهنده است. ضریب $f(\rho)$ برای نشان دادن دو اثر استفاده می‌شود: ۱- اثر شکل که بخاطر پخش غیریکنواخت فشار $f_1(\rho)$ لحاظ می‌شود. ۲- فشار واقعی محصورشدگی در هنگام شروع مقاومت $f_2(\rho)$ ستون در کرنش موثر الیاف پلیمری (FRP) با جایگزینی $k = f_1(\rho)$ و $f_1 = f_2(\rho)$ در رابطه (۳) داریم:

$$\begin{aligned} \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} &= 1 + f_1(\rho) \left[\frac{f_2(\rho) f_l'}{f'_{co}} \right]^{\gamma} \\ &= 1 + f_1(\rho) f_2^{\gamma}(\rho) \left(\frac{f_l'}{f'_{co}} \right)^{\gamma} \\ &= 1 + f(\rho) \left(\frac{f_l'}{f'_{co}} \right)^{\gamma} \end{aligned} \quad (5)$$

در رابطه بالا f_l' برابر فشار محصور شده‌ی گسیختگی کششی است که از آزمایش Coupon به دست آمده است. رابطه بالا نشان می‌دهد وقتی از ضریب شکل برای نشان دادن اثر کاهش شعاع گوشه بر مقاومت استفاده می‌شود، می‌توان فشار محصورشدگی (f_1) را با f_l' که مقاومت الیاف پلیمری (FRP) است، جایگزین نمود [۴].

حال با جایگذاری $f_l: f(\rho)$ به جای f_l در رابطه (۵) خواهیم داشت:

(FRP)، ϵ_j برابر کرنش کششی هوپ^۱ در هنگام گسیختگی و D_{br} برابر قطر نمونه استوانه‌ای است [۴]. البته با توجه به D_{br} که معادل قطر نمونه است، واضح است که رابطه (۱) برای ستون‌های استوانه‌ای مرسوم است که تنش جانبی در هر مقطع با مقطع دیگر برابر است. برای ستون‌های با مقاطع مربع تنش‌های جانبی σ_2 و σ_3 در مقاطع خود با یکدیگر برابر نیستند و این منجر به پیچیده شدن شرایط می‌شود. با این حال می‌توان از رابطه (۱) برای محاسبه‌ی میانگین تنش نهایی جانبی در ستون‌های با مقاطع مربع استفاده کرد که در آن D_{br} معادل عرض ستون‌های با مقاطع مربعی است.

در میان آزمایش‌های گسترده و مدل‌های موجود که در گذشته بر روی فشار جانبی ستون‌های با مقاطع دایره صورت گرفته است، Richart و همکاران که در این زمینه پیشگام بودند به رابطه‌ی زیر دست یافتند:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k f_l \quad (2)$$

که در آن f'_{cc} برابر مقاومت فشاری بتن، f_l فشار جانبی و k ضریب موثر محصورشدگی است. آزمایشات نشان می‌داد که k با افزایش فشار محصور شدگی افزایش می‌یابد ولی می‌توان به طور میانگین آن را ۴/۱ در نظر گرفت [۵].

تحقیقات بعدی رابطه بالا را به صورت رابطه زیر تعمیم داد:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (3)$$

به طوری که رابطه (۳) فرم کلی برای محاسبه‌ی مقاومت ستون‌های بتنی محصور شده توسط الیاف پلیمری (FRP) را به خود گرفت و مبنای تحقیقات سایر پژوهشگران شد و صورت‌های مختلفی برای ضریب k توسط آن‌ها ارائه شد، از جمله به عنوان ضریبی ثابت و یا به صورت تابعی بر حسب فشار جانبی محصور شده (f_l) و یا تابعی

$$\text{از } \frac{f_l}{f'_{co}} \text{ بیان شد [۶].}$$

رابطه زیر توسط Hoek-Brown پیشنهاد شده است که برای ستون‌های با مقاطع دایره است که در آن f'_{cc} و f'_{co} به ترتیب

¹ Hoop

۱- اثر شکل مقطع، ۲- اثر طول به قطر ستون و ۳- اثر پیوستگی غشای الیاف پلیمر و سطح بتن. که در نهایت رابطه زیر ارائه شد:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 6.0 \left(\frac{2r}{D} \right) \left(\frac{f_l^{0.7}}{f'_{co}} \right) \quad (9)$$

موسسه ACI در سال ۲۰۰۲ دستورالعملی را برای مقاوم سازی و بهسازی سازه‌ها با الیاف پلیمری (FRP) ارائه کرد. رابطه زیر برای تخمین مقاومت ستون‌های محصور شده با این مصالح است. این رابطه ابتدا در سال ۱۹۸۸ توسط Mander و همکارانش برای ستون‌های محصور شده با غلاف فلزی ارائه شده بود [۸].

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

در سال ۲۰۰۳، Tengo و Lamé با بهره‌گیری از کارهای صورت گرفته پیش از خودشان، داده‌های ۵۸ نمونه را جمع‌آوری کرده که ۵۰ ستون با مقطع مربعی و ۸ ستون با مقطع مستطیلی بودند. در کنار این ۵۸ نمونه، این دو محقق ۱۴ ستون آزمایشگاهی را ساختند که دو ستون با مقطع دایره و ۱۰ ستون با مقطع مربع به ضلع ۱۵۰ و دو ستون با مقطع مستطیل به اضلاع ۱۵۰ میلی‌متر در ۲۲۵ میلی‌متر و هر دو ستون‌های با مقاطع مربع و مستطیل با ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متری بودند [۹].

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.3 \left(\frac{A_e}{A_c} \right) \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (11)$$

در سال ۲۰۰۷، Al-Salloum و Yousef با انجام آزمایش مقاومت سه محوری بر روی ۲۰ ستون با مقطع مربع با ابعاد مقطع ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر اثر شعاع گوشه‌های ستون‌های با مقطع مربع را بر عملکرد الیاف پلیمری (FRP) بررسی کرده و رابطه زیر را ارائه دادند [۱۰]:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.14 k_s \left(\frac{b}{D} \right) \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (12)$$

که در رابطه بالا b معادل عرض و D معادل قطر مقطع مربع است. Restrepo و De Vito در سال ۱۹۹۶ رابطه ۱۳ را ارائه دادند، نسبت مقاومت ستون محصور شده به ستون محصور نشده برابر مقدار زیر است [۱۱]:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \frac{f_l}{f'_{co}} f(\rho) + \sqrt{\left(\frac{16.7}{f'_{co}{}^{0.42}} - \frac{f'_{co}{}^{0.42}}{16.7} \right) \frac{f_l}{f'_{co}} f(\rho) + 1} \quad (6)$$

نتایج کارهای آزمایشگاهی که در سال ۲۰۰۸ توسط Wang و Wu صورت گرفت نشان داد که مقاومت به دست آمده متناسب با شعاع گوشه است. تحقیقات همچنین نشان می‌دهد که شعاع گوشه وقتی صفر باشد مکانیزم هیچ‌گونه اثر محصورشدگی نشان نخواهد داد [۱]. با در نظر گرفتن این دو نتیجه، ضریب شکل را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$f(\rho) = \rho^\alpha \quad (7)$$

در رابطه بالا α ضریبی است که توسط کارهای آزمایشگاهی بیان می‌شود. با توجه به رابطه بالا و همچنین شکل ۱، واضح است که $\rho = 1$ بیانگر این است که نمونه گوشه‌های تیز و مربع یا مستطیل شکل دارد و $\rho = 0$ بیانگر دایره‌ای شکل بودن سطح مقطع است که باید برای محاسبه‌ی مقاومت آن از رابطه‌های ارائه شده برای ستون‌های با مقطع دایره استفاده شود که موضوع تحقیق این متن نیست. و بازه‌ی بین این دو بیانگر پخ بودن گوشه‌های مربع یا مستطیل شکل ستون‌ها است.

حال با جایگذاری رابطه ۷ در رابطه ۶ خواهیم داشت [۴]:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \frac{f_l}{f'_{co}} \rho^\alpha + \sqrt{\left(\frac{16.7}{f'_{co}{}^{0.42}} - \frac{f'_{co}{}^{0.42}}{16.7} \right) \frac{f_l}{f'_{co}} \rho^\alpha + 1} \quad (8)$$

۳- مدل‌های موجود برای ستون‌های با مقطع مربع یا مستطیل محصور شده با غشای FRP

در این زمینه کارهای آزمایشگاهی و عددی زیادی انجام گرفته است و بر مبنای آن مدل‌هایی ارائه شده است، این قسمت سعی دارد به بررسی مدل‌های ارائه شده توسط محققان بپردازد. روابط ارائه شده ساختار تقریباً مشابهی دارند و تفاوت آنها بیشتر مربوط به ضرایب پارامترهای موثر در رابطه است.

در سال ۱۹۹۸، Mirmirian و همکاران بیش از ۱۰۰ نمونه را بررسی کردند که ۹ ستون با مقطع مربع و به اضلاع ۱۵۲٫۵ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۵ میلی‌متر بود [۷]. در این تحقیق سه پارامتر برای مقاوم‌سازی ستون‌ها با الیاف پلیمری مورد بررسی قرار گرفتند،

در سال ۲۰۰۳، Miraglia و Campione با نگاه تحلیلی بر روی پارامترهایی همچون جنس الیاف پلیمری، مقاومت و ضخامت و سایر موارد بر روی ستون‌های با سطح مقطع مربع (۶ نمونه) و دایره رابطه زیر را ارائه نمودند [۱۴]:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.0k_s \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (22)$$

Ilki و همکاران در سال ۲۰۰۴، ۴۹ ستون که شامل ۸ ستون با مقطع مربع و ۲۴ ستون با مقطع مستطیل بودند را تحت بار محوری قرار دادند [۱۵]. مقاطع مربع دارای ابعاد ۲۵۰ میلی متر و مقاطع مستطیل دارای ابعاد ۲۲۵، ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی متر در ۱۵۰ میلی متر با شعاع گوشه‌های متفاوت بودند. در نهایت رابطه زیر برای این کار ارائه شد:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.4 \left(\frac{f'_{lmax}}{f'_{co}} \right)^{1.2} \quad (23)$$

در سال ۲۰۰۷ Kumutha و همکاران ۹ ستون با مقطع مربع به ضلع ۱۲۵ میلی متر و ارتفاع ۷۵۰ میلی متر را مورد آزمایش قرار دادند و رابطه زیر را ارائه نمودند [۱۶]:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 0.93 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (24)$$

در سال ۲۰۱۰، Wei و Wu با آزمایش محوری بر روی ۴۵ ستون با مقطع مستطیل و جمع‌آوری داده‌ها از کارهای گذشته‌گان رابطه زیر را ارائه دادند:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.2 \left(\frac{2r}{b} \right)^{0.72} \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.94} \left(\frac{h}{b} \right)^{-1.7} \quad (25)$$

همچنین در سال ۲۰۱۰، Toutanji و همکاران با کار بر روی ۶۲ ستون با ابعاد ۳۵۵ در ۳۵۵ میلی متر و ۲۵۰ در ۵۰۰ میلی متری به رابطه زیر دست یافتند. در رابطه زیر b برابر عرض ستون، d طول ستون، D معادل قطر مقطع مستطیل و r معادل شعاع گوشه است.

$$f'_{cc} = f'_{co} + 4 \left[\frac{2r}{D} \right]^{0.1} \left[\frac{d}{b} \right]^{0.13} f'_l \quad (26)$$

جدول ۱ تمامی مدل‌ها و روابط مربوطه را به طور خلاصه نشان می‌دهد:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \alpha_1 \alpha_2, \quad (13)$$

که در آن:

$$\alpha_1 = 1.25 \left(1.8 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_{l,j1}}{f'_{co}}} - 1.6 \frac{f_{l,j1}}{f'_{co}} - 1 \right), \quad (14)$$

$$\alpha_2 = \left[1.4 \frac{f_{l,j2}}{f_{l,j1}} - 0.6 \left(\frac{f_{l,j2}}{f_{l,j1}} \right)^2 - 0.8 \right] \sqrt{\frac{f_{l,j1}}{f'_{co}}} + 1, \quad (15)$$

و پارامترهای $f_{l,jx}$ و $f_{l,jy}$ برابر مقاومت جانبی محصور شده است که توسط الیاف پلیمری (FRP) ایجاد شده‌اند است.

$$f_{l,jx} = \frac{2nt}{b} k_s f_j, \quad (16)$$

$$f_{l,jy} = \frac{2nt}{h} k_s f_j, \quad (17)$$

و مقدار k_s در آن برابر رابطه زیر است:

$$k_s = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3bh(1-A_s)} \quad (18)$$

در سال ۲۰۰۷، Yousef و همکاران ۸۷ ستون که ۲۴ ستون با سطح مقطع مربع و ۲۴ ستون با سطح مقطع مستطیل را مورد آزمایش محوری قرار دادند، ستون‌های با مقطع مربع دارای ضلع ۳۸۱ میلی متر و ارتفاع ۷۶۲ میلی متری و مقطع مستطیل دارای اضلاع ۲۵۴ میلی متر در ۳۸۱ میلی متر و ارتفاع ۷۶۲ میلی متر بود [۱۲]. رابطه زیر نتیجه کار آنهاست:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0.5 + 1.225 \left(\frac{k_s f_l}{f'_{co}} \right)^{0.6}, \quad (19)$$

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 1.135 \left(\frac{\rho_f E_{FRP} \epsilon_{jt}}{f'_{co}} \right)^{1.25} \quad (20)$$

در سال ۲۰۰۲، Shehata و همکاران ۵۴ ستون که ۱۸ ستون دارای مقطع مربع و ۱۸ ستون دارای مقطع مستطیلی بود را مورد آزمایش محوری قرار دادند. مقاطع مربع دارای اضلاع ۱۵۰ میلی متری و مقاطع مستطیل دارای اضلاع ۹۴ در ۱۸۸ میلی متری و تمامی ستون‌ها با ارتفاع ۳۰۰ میلی متری بود [۱۳]. در نتیجه رابطه زیر ارائه شد:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 0.85 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (21)$$

جدول ۱- خلاصه مدل‌ها و روابط پیشنهادی توسط محققان پیشین

مدل	رابطه پیشنهادی
Mirmirian et al. (1998)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 6.0 \left(\frac{2r}{D} \right) \left(\frac{f'_l}{f'_{co}} \right)^{0.7}$
American Concrete Institute (ACI) Committee 440 (2002)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 k_s f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{k_s f'_l}{f'_{co}}$
Lam and Teng (2003b)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.3 \left(\frac{A_e}{A_c} \right) \left(\frac{f'_l}{f'_{co}} \right)$
Al-Salloum (2007)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.14 k_s \left(\frac{b}{D} \right) \left(\frac{f'_l}{f'_{co}} \right)$
Restrepo and De Vito (1996)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \alpha_1 \alpha_2,$ $\alpha_1 = 1.25 \left(1.8 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_{l,j1}}{f'_{co}}} - 1.6 \frac{f_{l,j1}}{f'_{co}} - 1 \right),$ $\alpha_2 = \left[1.4 \frac{f_{l,j2}}{f_{l,j1}} - 0.6 \left(\frac{f_{l,j2}}{f_{l,j1}} \right)^2 - 0.8 \right] \sqrt{\frac{f_{l,j1}}{f'_{co}}} + 1,$ $f_{l,jx} = \frac{2nt}{b} k_s f_j, f_{l,jy} = \frac{2nt}{h} k_s f_j,$ $k_s = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3bh(1-A_s)}$
Yousef et al. (2007)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 0.5 + 1.225 \left(\frac{k_s f'_l}{f'_{co}} \right)^{0.6}, \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 1.135 \left(\frac{\rho_f E_{FRP} \epsilon_{ft}}{f'_{co}} \right)^{1.25}$
Shehata et al. (2002)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 0.85 \left(\frac{f'_l}{f'_{co}} \right)$
Campione and Miraglia (2003)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.0 k_s \left(\frac{f'_l}{f'_{co}} \right)$
Ilki et al. (2004)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.4 \left(\frac{f'_{lmax}}{f'_{co}} \right)^{1.2}$
Kumutha et al. (2007)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 0.93 \left(\frac{f'_l}{f'_{co}} \right)$
Wu and Wei (2010)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.2 \left(\frac{2r}{b} \right)^{0.72} \left(\frac{f'_l}{f'_{co}} \right)^\eta \left(\frac{h}{b} \right)^{-1.7}$
Toutanji et al. (2010)	$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 \left(\frac{2r}{D} \right)^\gamma \left(\frac{d}{b} \right)^\eta f'_l$

ارائه مدل پیش‌بینی مقاومت ستون‌های با مقاطع مربع یا مستطیل...

۴- بررسی و مقایسه مدل‌ها

برای ارزیابی ستون‌ها باید میزان انحراف بین مقادیر به دست آمده از کارهای آزمایشگاهی و مقادیر به دست آمده از رابطه‌های پیشنهادی را محاسبه کرد.

در این تحقیق از نتایج ۱۷۶ ستون با مقطع مربع یا مستطیل محصور شده با الیاف پلیمری FRP استفاده شده که مشخصات هندسی و مقاومتی آن در جدول ۲ آورده شده است.

$$IAE = \sum \sqrt{\frac{\left[\text{expe.} \left(f'_{cc} / f'_{co} \right) - \text{theo.} \left(f'_{cc} / f'_{co} \right) \right]^2}{\sum \text{expe.} \left(f'_{cc} / f'_{co} \right)}} \quad (27)$$

جدول ۲- ویژگی‌های پارامترهای هندسی و مقاومتی ستون‌ها

Max	Min	پارامتر
456	94	عرض مقطع (b)
60	0	شعاع گوشه (r)
0.8	0	نسبت شعاع گوشه (ρ)
56.7	13	مقاومت بتن (f_{co}) MPa
95.20	26.2	مقاومت بتن محصور شده (f'_{cc}) MPa
3.37	0.99	مقاومت به دست آمده (f'_{cc} / f'_{co})
49.71	3.039	مقاومت محصورشدگی FRP (f_l)
2.612	0.089	نسبت محصورشدگی ($\frac{f_l}{f'_{co}}$)
4.5	0.41	کرنش نهایی FRP، ϵ_{FRP}

یکی دیگر از پارامترهایی که در این تحقیق از آن برای ارزیابی رابطه‌ها پرداخته شده است، نسبت مقاومت آزمایشگاهی به مقاومت تئوری است.

$$v = \frac{\text{expe.} \left(f'_{cc} / f'_{co} \right)}{\text{theo.} \left(f'_{cc} / f'_{co} \right)} \quad (28)$$

سایر پارامترهایی که برای مقایسه‌ی این رابطه‌ها استفاده شده اند عبارتند از: ضریب تغییرات (COV) داده‌ها، واریانس، مینیمم و ماکزیمم داده‌ها، که در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- مقایسه آماری مدل‌های ارائه شده

Vmin	Vmax	Vd	COV	V	IAE	نام مدل
0.5925	1.6683	0.0219	0.1549	0.9553	28.82	Mirmirian et al. (1998)
0.4779	1.5434	0.0309	0.2056	0.8548	24.42	Committee 440 (2002) (ACI)
0.5301	1.9195	0.0447	0.1884	1.1220	17.88	Lam and Teng (2003b)
0.4709	1.4208	0.0142	0.1372	0.8683	18.43	Al-Salloum (2007)
0.3399	1.7484	0.0273	0.2032	0.8130	28.27	Restrepo and De Vito (1996)
0.8208	2.5380	0.0911	0.1930	1.5643	35.96	Yousef et al. (2007)
0.4379	2.3723	0.1009	0.2563	1.2393	25.76	Shehata et al. (2002)
0.6837	1.9185	0.0316	0.1625	1.0943	13.54	Campione and Miraglia (2003)
0.5584	1.5291	0.0211	0.1400	1.0376	12.11	Ilki et al. (2004)
0.5371	2.2889	0.0899	0.2469	1.2145	24.38	Kumutha et al. (2007)

۵- برنامه‌نویسی عبارتی ژنتیک (GEP)

مشابه با درختان تجزیه در برنامه‌نویسی ژنتیک، ترکیب می‌شوند. در این روش پدیده‌های مختلف با استفاده از مجموعه‌ای از توابع و ترمینال‌ها، مدل‌سازی می‌شوند. مجموعه توابع، معمولاً شامل توابع اصلی حسابی (تقسیم، ضرب، جمع، تفریق)، توابع مثلثاتی یا هر نوع تابع ریاضی دیگر (\sqrt{x} ، x^2 ، \exp ، \cos ، \sin) و یا توابع تعریف

روش برنامه‌نویسی عبارتی ژنتیک، در سال ۱۹۹۹ توسط فریرا^۱ ارائه شد [۱۷]. این روش ترکیبی از روش‌های برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) و الگوریتم ژنتیک است (GA) که در آن، کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت، مشابه با آنچه در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت،

¹ Ferriera

ورودی برای تعیین متغیرهای معنادار استفاده و برای بررسی بیشتر علاوه بر مجموعه چهار عملگر اصلی حالت‌هایی بر اساس عملگرهای ریاضی پیش فرض در برنامه لحاظ شده است. چگونگی و دلیل انتخاب این نوع عملگرها با توجه به سعی و خطای بسیار زیاد و همچنین مقایسه تابع شایستگی در هر مرحله می‌باشد. داده‌های جمع آوری شده در این مقاله شامل ۱۷۶ داده از مراجع [۲۰، ۲۱، ۲۷، ۳۱] است که در برنامه‌نویسی عبارتی ژنتیک مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های ورودی مربوط به این شبکه شامل ۷ پارامتر شامل: عرض ستون b ، طول ستون h ، ارتفاع ستون L ، مدول الاستیسیته مصالح الیاف پلیمری E ، مقاومت فشاری بتن f_c ، شعاع معادل ستون r_c ، مقاومت مصالح الیاف پلیمری ff است و خروجی نسبت مقاومت مقاومت محصور شده به مقاومت محصور نشده (f'_{cc} / f'_{co}) است.

برای عملکرد بهتر داده‌ها در ژنتیک، داده‌های ورودی و خروجی با استفاده از رابطه زیر، نرمال سازی شده‌اند [۳۳، ۳۲]. بدین ترتیب، تمامی داده‌ها بین ۰٫۱ تا ۰٫۹ قرار گرفته و سپس مورد استفاده در توسعه رابطه قرار گرفته‌اند.

$$Parameter_{scaled} = \left[(0.9 - 0.1) \left(\frac{Parameter - Parameter_{min}}{Parameter_{max} - Parameter_{min}} \right) \right] + 0.1 \quad (29)$$

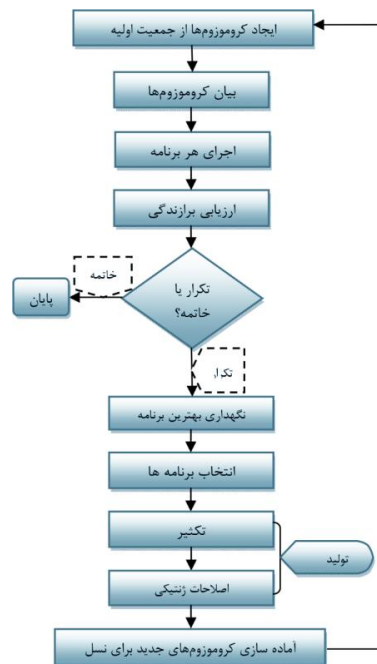
با استفاده از پارامترهای ارائه شده در جدول ۴ در توسعه رابطه بر پایه روش برنامه‌نویسی عبارتی ژنتیک، می‌توان گفت که ضریب همبستگی داده‌های استفاده شده در آموزش مقدار ۰٫۹۲۳ و کمترین میانگین خطای مطلق (MAE) مقدار ۰٫۰۵۱، همچنین کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، مقدار ۰٫۰۶۹ می‌باشد. در قسمت اعتبارسنجی نیز، این پارامترها به ترتیب برابر ۰٫۹۲۲، ۰٫۰۶۸، ۰٫۰۹۹۶ می‌باشند.

نمودار درختی بهترین ترکیب مدل ارایه شده بر اساس برنامه عبارتی ژن در شکل ۴ قابل مشاهده است. در این شکل Sub-ET1، Sub-ET2 و Sub-ET3 به ترتیب ژن ۱، ژن ۲ و ژن ۳ می‌باشد. رابطه پیشنهادی بر اساس این الگوریتم به صورت رابطه ذیل می‌باشد.

$$rc - 42.22 \exp frc - 0.43 Mrc \left(-\frac{(-3-5.57e)^{1/3}}{-2.0+b+3.15e} + rc \right) (ff + 0.5L + 0.5M^{1/3} - 1.27bM + \quad (30)$$

شده توسط کاربر است که می‌تواند برای تفسیر مدل، مناسب باشند. مجموعه ترمینال‌ها، از مقادیر ثابت و متغیرهای مستقل مسئله تشکیل شده‌اند [۱۹، ۱۸].

در حالت کلی، این روش بر اساس یک الگوریتم ژنتیک بنا نهاده شده که از جمعیت داده‌ها استفاده نموده و آن‌ها را مطابق تابع شایستگی انتخاب می‌کند. همچنین تغییرات ژنتیکی با استفاده از یک یا چند عملگر (ژن) اعمال می‌شود. در GEP، از روش معروف چرخ رولت برای انتخاب داده‌ها استفاده می‌شود و بر خلاف GA و GP، چندین عملگر ژنتیکی برای تکثیر داده‌ها به صورت هم‌زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. تکثیر، عملیاتی است که هدف آن نگهداری چندین داده مناسب از نسل فعلی به نسل بعدی است. هدف عملگر جهش، بهسازی تصادفی داخلی کروموزوم‌های معین است. این روند به صورت شماتیک در شکل نمایش داده شده است.



شکل ۳- شماتیک روند آنالیز داده‌ها در روش GEP

۱-۵- نتایج برنامه‌نویسی ژنتیک

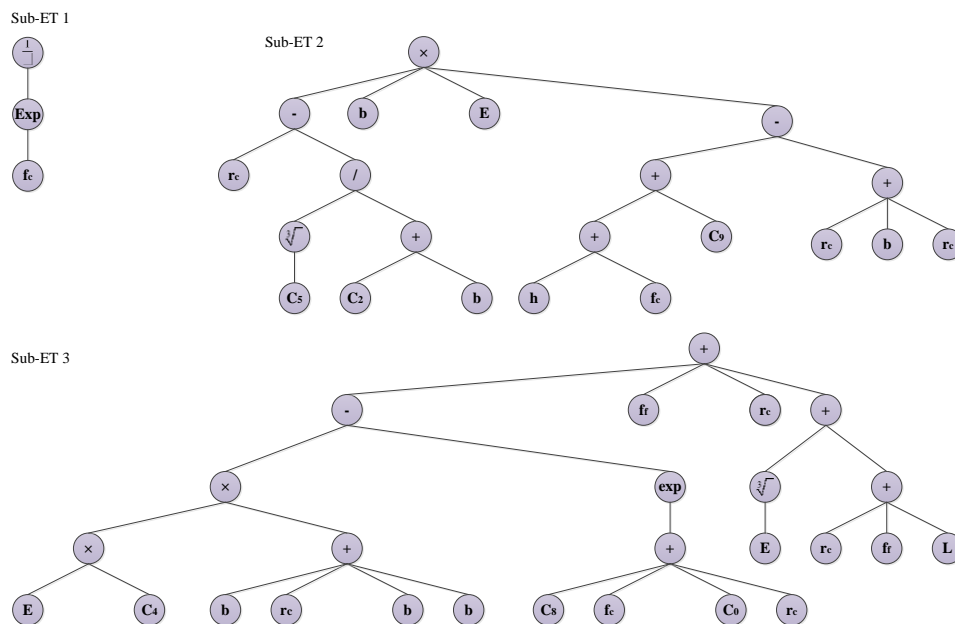
استفاده از برنامه‌نویسی عبارتی ژنتیک به دلیل توان انتخاب متغیرهای موثر در مدل و حذف متغیرهای با اثر کمتر و همچنین توانایی ارایه رابطه صریح برای تخمین مقاومت ستون‌های مربعی و مستطیلی مسلح شده به وسیله FRP، مدنظر قرار داده شده است. بنابراین هر ۷

جدول ۴- پارامترهای استفاده شده در برنامه‌نویسی عبارتی ژنتیک

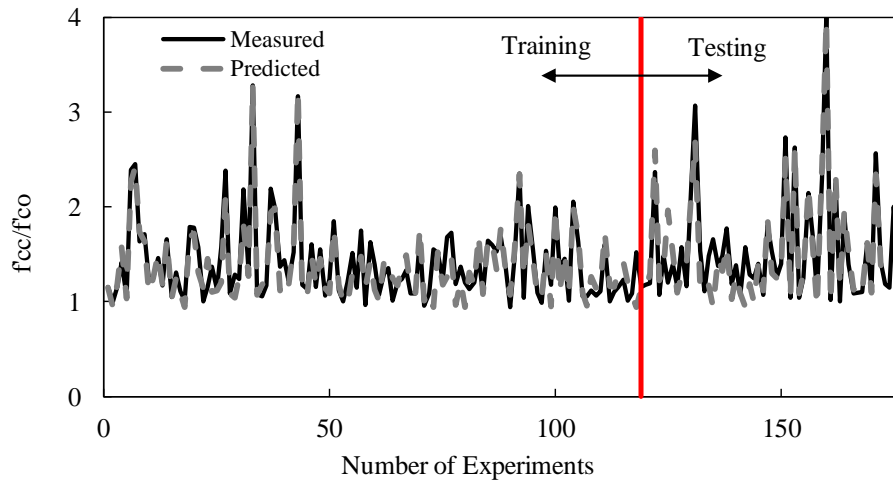
مقدار	پارامتر
12	اندازه سرشاخه‌ها (Head Size)
10-1000	تعداد کروموزوم‌ها (Chromosomes)
3	تعداد ژن‌ها در هر کروموزوم‌ها (Genes)
0.00138	نرخ جهش (Mutation)
0.00546	نرخ وارون سازی (Numbers of genes)
0.00277	نرخ ترکیب تک نقطه‌ای (One-Point Recombination Ratio)
0.00277	نرخ ترکیب دو نقطه‌ای (Two-Point Recombination Ratio)
0.00277	نرخ ترکیب ژن (Gene Recombination Ratio)
0.00277	نرخ ترانزیشن درج متوالی (IS Transposition Ratio)
0.00546	نرخ ترانزیشن ریشه درج (RIS Transposition Rate)
0.00277	نرخ ترانزیشن ژن (Gene Transposition Ratio)
RMSE	معیار خطای تابع (Fitness Function Error Type)
ضرب	تابع پیوند (Linking Function)

مقادیر تخمین زده شده و آزمایشگاهی و مقدار اختلاف آن‌ها در شکل ۵ مقایسه شده است. در این شکل مقادیر آموزش داده شده در کنار مقادیر اعتبارسنجی ارائه شده است. شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب مقدار انحراف مقادیر تخمین زده شده آموزش و اعتبارسنجی را با خط ایده‌آل نشان می‌دهند. با توجه به پژوهش [۳۴]، اگر مقدار ضریب همبستگی خطی بیشتر از ۰/۸ باشد و مقادیر خطای RMSE و MAE به اندازه مطلوبی کم باشند (با توجه به پراکندگی داده‌های ورودی) می‌توان مقادیر تخمین زده شده و آزمایشگاهی و مقدار اختلاف آن‌ها در شکل ۵ مقایسه شده است. در این شکل مقادیر آموزش داده شده در کنار مقادیر اعتبارسنجی ارائه شده است. شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب مقدار انحراف مقادیر تخمین زده شده آموزش و اعتبارسنجی را با خط ایده‌آل نشان می‌دهند. با توجه به پژوهش [۳۴]، اگر مقدار ضریب همبستگی خطی بیشتر از ۰/۸ باشد و مقادیر خطای RMSE و MAE به اندازه مطلوبی کم باشند (با توجه به پراکندگی داده‌های ورودی) می‌توان

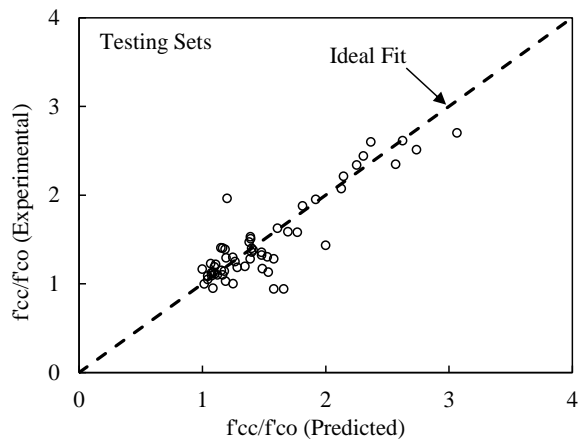
گفت که مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و تخمین زده شده به یکدیگر بسیار وابسته هستند. با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان دید که مدل ارائه شده دارای ضریب همبستگی خطی ۰,۹۲۳ و ۰,۹۲۲ برای داده‌های استفاده شده در آموزش و اعتبارسنجی می‌باشد. به علاوه، با توجه به شکل ۸ می‌توان دید که مقادیر خطای بدست آمده از مدل توسعه یافته بر اساس روش برنامه‌نویسی ژنتیک دارای مقادیر کمی بوده و توانایی تخمین مقادیر مقاومت ستون محصور شده با الیاف را دارا می‌باشد.



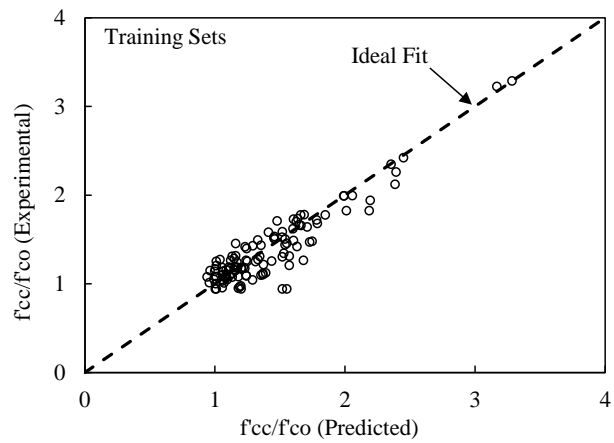
شکل ۴- نمودار درختی مدل پیشنهاد شده



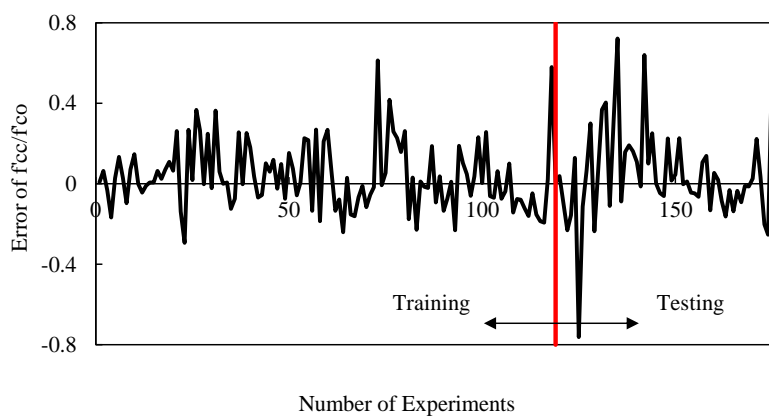
شکل ۵- داده‌های اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی در کنار داده‌های تخمین زده شده



شکل ۷- داده‌های آزمایشگاهی در برابر داده‌های تخمین زده شده در مجموعه اعتبارسنجی



شکل ۶- داده‌های آزمایشگاهی در برابر داده‌های تخمین زده شده در مجموعه آموزش



شکل ۸- خطاهای بدست آمده از رابطه توسعه یافته در مجموعه آموزش و اعتبارسنجی

۲-۵- سنجش پارامترهای خطا

مطلق (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین MAPE و NMAE طبق روابط زیر صورت می‌گیرد. بهترین مقدار برای این سه معیار به ترتیب یک، صفر و صفر است.

در این تحقیق ارزیابی دقت و قابلیت مدل با استفاده از نمایه‌های ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربعات خطا میانگین خطای

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (f'_{cc} / f'_{co(model)} - \overline{f'_{cc} / f'_{co(actual)}}) (f'_{cc} / f'_{co(model)} - \overline{f'_{cc} / f'_{co(actual)}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (f'_{cc} / f'_{co(model)} - \overline{f'_{cc} / f'_{co(actual)}})^2 \sum_{i=1}^N (f'_{cc} / f'_{co(model)} - \overline{f'_{cc} / f'_{co(actual)}})^2}} \right]^2 \quad (31)$$

$$NMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{f'_{cc} / f'_{co(model)} - f'_{cc} / f'_{co(actual)}}{f'_{cc} / f'_{co(max(model))} - f'_{cc} / f'_{co(min(actual))}} \right| \quad (35)$$

در روابط بالا، $f'_{cc} / f'_{co(model)}$ و $f'_{cc} / f'_{co(actual)}$ به ترتیب مقادیر تخمین زده شده و واقعی در نمونه‌های آم، N تعداد ستون‌ها، و نیز به ترتیب میانگین مقادیر تخمین زده شده و واقعی است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f'_{cc} / f'_{co(model)} - f'_{cc} / f'_{co(actual)})^2} \quad (32)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| f'_{cc} / f'_{co(model)} - f'_{cc} / f'_{co(actual)} \right| \quad (33)$$

$$MAPE = \frac{1}{M} \left[\frac{\sum_{i=1}^M \left| f'_{cc} / f'_{co(model)} - f'_{cc} / f'_{co(actual)} \right|}{\sum_{i=1}^M f'_{cc} / f'_{co(actual)}} \right] \times 100 \quad (34)$$

جدول ۵- مقدار پارامترهای سنجش خطا و دقت مدل ارائه شده بر پایه GEP

پارامتر	R	R^2	RMSE	MAPE	MAE
مجموعه آموزش	0.923	0.853	0.164	8.816	0.120
مجموعه اعتبارسنجی	0.922	0.851	0.233	10.652	0.159

۷- مراجع

- [1] Wu Y-F, Liu T, Oehlers D. Fundamental Principles that Govern Retrofitting of Reinforced Concrete Columns by Steel and FRP Jacketing. *Advances in Structural Engineering* 2006;9:507-33. doi:10.1260/136943306778812769.
- [2] Wu Y-F, Wei Y-Y. Effect of cross-sectional aspect ratio on the strength of CFRP-confined rectangular concrete columns. *Engineering Structures* 2010;32:32-45. doi:10.1016/j.engstruct.2009.08.012.
- [3] Pham TM, Hadi MNS. Stress Prediction Model for FRP Confined Rectangular Concrete Columns with Rounded Corners. *Journal of Composites for Construction* 2014;18:4013019. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000407.
- [4] Wu Y, Zhou Y. Unified Strength Model Based on Hoek-Brown Failure Criterion for Circular and Square Concrete Columns Confined by FRP. *Journal of Composites for Construction* 2010;14:175-84. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000062.
- [5] Richart F, Brandtzaeg A, Brown RL. A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses. *University of Illinois Bulletin* 1928;26, Bullet:1-104.
- [6] Wu Y, Wang L. Unified Strength Model for Square and Circular Concrete Columns Confined by External Jacket. *Journal of Structural Engineering*

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از بررسی اولیه پارامترهای مقاومتی و ساز و کار باربری ستون‌های مسلح شده با FRP و همچنین مدل‌های ارائه شده توسط محققان تا کنون؛ به ارائه مدلی بر مبنای روش برنامه‌نویسی عبارتی ژنتیک (GEP) پرداخته شده است. در این مطالعه از نتایج آزمایشگاهی ۱۷۶ ستون بتن آرمه تقویت شده با FRP استفاده شده است. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از این روش برای پیش‌بینی میزان مقاومت ستون‌های تقویت شده با FRP مناسب ارزیابی شده است؛ چرا که مدل پیشنهاد شده در این مقاله، دارای ضریب همبستگی بین داده‌های آزمایشگاهی و تخمین زده شده در مرحله‌ی آموزش و اعتبارسنجی به ترتیب ۰٫۹۲۳ و ۰٫۹۲۲ می‌باشد. این مقادیر نشان‌دهنده مطابقت و کارآیی مناسب مدل بر پایه GEP می‌باشد. لذا با استفاده از این روش می‌توان برای پیش‌بینی مقاومت ستون‌های تقویت شده با FRP بدون صرف هزینه و زمان زیادی استفاده نمود. لازم به ذکر است تعداد نمونه‌های تست شده آزمایشگاهی، تاثیر زیادی در دقت مدل‌های این چنینی دارد.

- Aalami MT. Predictability of relative humidity by two artificial intelligence techniques using noisy data from two Californian gauging stations. *Neural Computing and Applications* 2013;23:2241–52. doi:10.1007/s00521-012-1175-z.
- [19] Ghorbani M a., Singh VP, Daneshfaraz R, Kashani MH. Modelling Pan Evaporation Using Genetic Programming. *Journal of Statistics: Advances in Theory and Applications* 2012;8:15–36.
- [20] Demers M, Neale KW. Strengthening of concrete columns with unidirectional composite sheets. *Proceedings of the Fourth International Conference on Short and Medium Span Bridges, Canadian Society for Civil Engineering Montreal, Canada; 1994, p. 895–905.*
- [21] Rochette P, Labossière P. Axial Testing of Rectangular Column Models Confined with Composites. *Journal of Composites for Construction* 2000;4:129–36. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2000)4:3(129).
- [22] Parvin A, Wang W. Behavior of FRP Jacketed Concrete Columns under Eccentric Loading. *Journal of Composites for Construction* 2001;5:146–52. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2001)5:3(146).
- [23] Pessiki S, Harries KA, Kestner JT, Sause R, Ricles JM. Axial Behavior of Reinforced Concrete Columns Confined with FRP Jackets. *Journal of Composites for Construction* 2001;5:237–45. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2001)5:4(237).
- [24] Suter R, Pinzelli R. Confinement of concrete columns with FRP sheets. *Proc, 5th Int Conf on Fibre Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures, 2001, p. 793–802.*
- [25] Topçu İB, Sarıdemir M. Prediction of mechanical properties of recycled aggregate concretes containing silica fume using artificial neural networks and fuzzy logic. *Computational Materials Science* 2008;42:74–82. doi:10.1016/j.commatsci.2007.06.011.
- [26] ILKI A, KUMBASAR N. COMPRESSIVE BEHAVIOUR OF CARBON FIBRE COMPOSITE JACKETED CONCRETE WITH CIRCULAR AND NON-CIRCULAR CROSS-SECTIONS. *Journal of Earthquake Engineering* 2003;7:381–406. doi:10.1080/13632460309350455.
- [27] LAM L, TENG JG. Design-Oriented Stress-Strain Model for FRP-Confined Concrete in Rectangular Columns. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2003;22:1149–86. doi:10.1177/0731684403035429.
- [28] Mahajan S, Singh D. Fresh and Hardened Properties of Self Compacting Concrete Incorporating Different Binder Materials. *2009;135:253–61.* doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:3(253).
- [7] Mirmiran A, Shahawy M, Samaan M, Echary H El, Mastrapa JC, Pico O. Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete. *Journal of Composites for Construction* 1998;2:175–85. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:4(175).
- [8] American Concrete Institute (ACI). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.* vol. 440.2R-02. 2002.
- [9] LAM L, TENG JG. Design-Oriented Stress-Strain Model for FRP-Confined Concrete in Rectangular Columns. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2003;22:1149–86. doi:10.1177/0731684403035429.
- [10] Al-Salloum YA. Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates. *Composites Part B: Engineering* 2007;38:640–50. doi:10.1016/j.compositesb.2006.06.019.
- [11] Toutanji H, Han M, Gilbert J, Matthys S. Behavior of Large-Scale Rectangular Columns Confined with FRP Composites. *Journal of Composites for Construction* 2010;14:62–71. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000051.
- [12] Youssef MN, Feng MQ, Mosallam AS. Stress-strain model for concrete confined by FRP composites. *Composites Part B: Engineering* 2007;38:614–28. doi:10.1016/j.compositesb.2006.07.020.
- [13] Shehata IAEM. Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets. *Materials and Structures* 2001;35:50–8. doi:10.1617/13686.
- [14] Campione G, Miraglia N. Strength and strain capacities of concrete compression members reinforced with FRP. *Cement and Concrete Composites* 2003;25:31–41. doi:10.1016/S0958-9465(01)00048-8.
- [15] Ilki A, Kumbasar N, Koc V. Low strength concrete members externally confined with FRP sheets. *Structural Engineering and Mechanics* 2004;18:167–94. doi:10.12989/sem.2004.18.2.167.
- [16] Kumutha R, Vaidyanathan R, Palanichamy MS. Behaviour of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP. *Cement and Concrete Composites* 2007;29:609–15. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.03.009.
- [17] Ferreira C. *Gene Expression Programming in Problem Solving.* Soft Computing and Industry, London: Springer London; 2002, p. 635–53. doi:10.1007/978-1-4471-0123-9_54.
- [18] Khatibi R, Naghipour L, Ghorbani MA,

International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering 2013;3:689–93.

[29] Harajli MH, Hantouche E, Soudki K. Stress-strain model for fiber-reinforced polymer jacketed concrete columns. *ACI Structural Journal* 2006;103:672.

[30] Rousakis TC, Karabinis AI, Kiouisis PD. FRP-confined concrete members: Axial compression experiments and plasticity modelling. *Engineering Structures* 2007;29:1343–53.

doi:10.1016/j.engstruct.2006.08.006.

[31] Wang LM, Wu YF. Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test. *Engineering Structures* 2008;30:493–505.

doi:10.1016/j.engstruct.2007.04.016.

[32] نادریپور ح، فخاریان پ. پیش‌بینی مقاومت پیچشی تیرهای

بتن آرمه تقویت شده با FRP با استفاده از شبکه‌های عصبی

مصنوعی. نشریه مهندسی سازه و ساخت ۲۰۱۷.

doi:10.22065/jsce.2017.70668.1023.

[33] نادریپور ح، فخاریان پ، حسینی ف. پیش‌بینی رفتار ستون‌های

بتن آرمه دایروی شکل محصور شده با FRP به وسیله‌ی شبکه‌های عصبی

مصنوعی. هشتمین کنفرانس ملی بتن ایران، تهران: ۱۳۹۵

doi:10.13140/RG.2.2.11714.58568.

[34] Smith GN. *Probability and statistics in civil engineering*. Collins London; 1986.

Prediction of Unified Strength of Rectangular and Square Concrete Columns Confined by FRP Using Genetic Expression Programming (GEP)

Pouyan Fakharian

Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Hosein Naderpour*

Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Abdolhosein Haddad

Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Amir Hossein Rafiean

M.Sc. Student, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Danial Rezazadeh Eidgahee

Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract

Fiber reinforced polymers (FRP) are one of the most commonly used materials for rehabilitation and retrofit of structures, mainly concrete structures. There are many reported studies on the behavior of these materials under different types of loading and structures. The aim of this study is to declare the challenges and investigate the efficiency of existing models for samples with rectangular and square sections. Moreover, a new empirical model is developed to predict the strength of FRP confined samples using gene expression programming (GEP). The best model is selected after establishing and controlling several models with different combinations of the influencing parameters. An analysis is carried out to check the performance of the introduced model based on the common criterions such as correlation of coefficient (R). This parameter is 0.923 and 0.922 for training and testing datasets, respectively which reveals a good agreement between the predicted and measured data in the developed GEP model.

Keywords: Fiber Reinforced Polymers (FRP), Confinement, Confining Pressure, Genetic Expression Programming (GEP).

* Corresponding Author: naderpour@semnan.ac.ir