



## پیش‌بینی مقاومت فشاری ستون بتنی مربعی محصورشده با FRP با استفاده از منطق فازی

کوروش نصراله‌زاده<sup>۱\*</sup> و احسان نوحی<sup>۲</sup><sup>۱</sup> استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۱۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۱/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۲۳

## چکیده

محصورسازی ستون‌های بتنی با صفحات کامپوزیتی از جنس پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف، موسوم به ورقه‌های FRP، از جمله شیوه‌های نوین در بهسازی سازه‌ها محسوب می‌گردد. بررسی عملکرد ستون‌های بتنی با مقطع دایره‌ای محصورشده با FRP، در سال‌های اخیر به طور وسیعی انجام شده اما مقطع مربعی کمتر مطالعه گردیده است. در این تحقیق، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مربعی محصورشده با FRP، با استفاده از منطق فازی مدل خواهد شد. به منظور ساخت مدل فازی، نتایج آزمایشگاهی شامل ۱۸۲ نمونه از مقالات انتشار یافته استخراج گردیده است. همچنین روابط صریح مدل فازی پیشنهادی که مقاومت فشاری ستون بتنی مربعی محصورشده با FRP را به صورت تابعی از عرض و شعاع گردی گوشه مقطع، مقاومت مشخصه بتن، کل ضخامت دورپیچ FRP، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته FRP بیان می‌کند، ارائه شده است. دقت نتایج به دست آمده از مدل فازی پیشنهادی در مقابل داده‌های آزمایشگاهی بسیار رضایت بخش می‌باشد. علاوه بر این از مقایسه مدل فازی پیشنهادی با تعدادی از مدل‌های موجود که توسط محققان مختلف ارائه شده‌اند، مشاهده می‌شود که مدل فازی دقت بهتری نسبت به سایر مدل‌های موجود دارد.

**کلمات کلیدی:** ستون بتنی؛ مقطع مربعی؛ محصورشدگی؛ ورقه‌های FRP؛ مقاومت فشاری؛ منطق فازی.

### Prediction of compressive strength of FRP-confined concrete square columns using fuzzy logic approach

Kourosh Nasrollahzadeh<sup>1,\*</sup> and Ehsan Nouhi<sup>2</sup><sup>1</sup> Assist. Prof., Civil. Eng., K.N.Toosi University of Tech., Tehran, Iran<sup>2</sup> M.Sc., Civil. Eng., K.N.Toosi University of Tech., Tehran, Iran**Abstract**

The behavior and modeling of circular concrete sections confined by Fiber Reinforced Polymer (FRP) wraps have been recently studied extensively while non-circular sections have received much less attention. This study focuses on FRP-confined specimens with square sections under axial loading. A fuzzy logic based model is developed to predict the compressive strength of the FRP-confined square sections. The explicit formation of the proposed fuzzy model for the compressive strength of FRP-confined concrete is presented as a function of the section width, corner radius, compressive strength of unconfined concrete, thickness of FRP sheets, tensile strength and elastic modulus of FRP materials. The results indicated that the accuracy of the proposed fuzzy model is quite satisfactory as compared to a large database containing experimental results of 182 specimens assembled from the open literature. Moreover, the proposed fuzzy model is compared with the existing nine models developed by various researchers and is found to be more accurate.

**Keywords:** Concrete column; Square section; Confinement; FRP sheet; Fuzzy logic.

## ۱- مقدمه

بیش از پنجاه سال استفاده از FRP<sup>۱</sup> با عملکردی بسیار خوب در صنعت هوافضا، موجب شد تا این ماده در صنعت ساختمان نیز به کار گرفته شود. قابلیت‌های مطلوب FRP مانند نسبت زیاد مقاومت به وزن، مقاومت در برابر خوردگی، سهولت و سرعت حمل و نصب و خنثی بودن به لحاظ الکترومغناطیسی سبب شده است تا این ماده توسط مهندسان عمران در موارد مختلفی از تعمیر و بهسازی ساختمان‌های موجود تا استفاده در ساختمان‌های جدید مورد استفاده قرار گیرد [۱].

انواع اصلی FRP عبارت‌اند از: پلیمرهای مسلح شده با الیاف شیشه (GFRP<sup>۲</sup>)، با الیاف کربن (CFRP<sup>۳</sup>) و با الیاف آرامید (AFRP<sup>۴</sup>).

روش‌های بهسازی لرزه ای ستون‌های بتنی که مهمترین و بحرانی‌ترین عضو ساختمان‌ها می‌باشند، معطوف به محصورسازی ستون می‌شود. انواع FRP را می‌توان به صورت مارپیچ<sup>۵</sup>، دورپیچ<sup>۶</sup> و لوله<sup>۷</sup> برای محصورسازی ستون به کار برد. تأثیر محصورسازی بر مقاومت و ظرفیت تغییر شکل ستون‌های بتنی، توسط افراد مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است و مدل‌های تجربی و تئوری برای این منظور ارائه شده‌اند [۲].

پیچاندن الیاف FRP به دور ستون بتنی و استفاده از چسب جهت یکپارچه نمودن الیاف و اتصال آن به ستون، برای اولین بار در سال ۱۹۸۸ میلادی و توسط کاتسوماتا<sup>۸</sup> در ژاپن ارائه گردید.

در اثر محصورشدگی؛ مقاومت فشاری و کرنش محوری نهایی بتن تحت فشار کاملاً تغییر می‌کند. مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ستون‌های بتنی محصورشده با FRP را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود:

دسته اول، مدل‌های مبتنی بر محصورشدگی با فولاد هستند که از تغییر مدل‌های ویژه محصورشدگی با فولاد که

توسط ریچارت<sup>۹</sup> و همکاران [۳] و مندر<sup>۱۰</sup> و همکاران [۵] ارائه شده، به دست آمده‌اند. اساس این روابط مقاومت نهایی بتن در آزمایش سه محوره می‌باشد. بنابراین چنین روابطی افزایش مقاومت بتن محصورشده را به صورت تابعی از فشار محصورکننده می‌دهند و فرض بر این است که فشار در تمام مدت بارگذاری محوری ثابت است. مدل‌های فردیس<sup>۱۱</sup> و خلیلی<sup>۱۲</sup> [۶] و سعادت منش<sup>۱۳</sup> و همکاران [۷] جزء این دسته قرار می‌گیرند. در این مدل‌ها بیشترین فشار محصورکننده‌ای که FRP می‌تواند اعمال کند (یعنی فشار محصورکننده در زمان گسیختگی FRP)، جایگزین این فشار ثابت شده است. بسیاری از محققان معتقدند ایراد این مدل‌ها آن است که تفاوت عمده‌ای بین رفتار کششی فولاد و FRP در نظر نمی‌گیرند [۸]. فشار محصورکنندگی ثابت در حالت محصورشدگی با فولاد پس از مرحله جاری شدن صادق می‌باشد اما این فرض را نمی‌توان در مورد FRP توسعه داد زیرا FRP جاری نمی‌شود و فشار وارد بر هسته بتن تا زمان گسیختگی FRP به طور مداوم اضافه می‌گردد.

دسته دوم، مدل‌های تجربی می‌باشند که بهترین منحنی برازش شده بر نتایج آزمایش را به عنوان رفتار تنش-کرنش بتن محصورشده با FRP معرفی نموده‌اند. در اکثر این مدل‌ها سعی شده است مقاومت فشاری محاسبه شده، بیشترین انطباق را با آزمایش‌ها داشته باشد. مدل‌های کونو<sup>۱۴</sup> و همکاران [۱۰]، سمعان<sup>۱۵</sup> و همکاران [۸] و لم<sup>۱۶</sup> و تنگ<sup>۱۷</sup> [۲۱] از این نوع می‌باشند.

دسته سوم، مدل‌های محاسباتی هستند و از این نوع مدل‌ها می‌توان به مدل اسپولسترا<sup>۱۸</sup> و مونت<sup>۱۹</sup> [۱۱] اشاره نمود که برای مقطع دایره‌ای است و تأثیر افزایش تدریجی فشار محصورکنندگی FRP را با یک رویه سعی و خطا لحاظ می‌نماید.

<sup>9</sup> Richart

<sup>10</sup> Mander

<sup>11</sup> Fardis

<sup>12</sup> Khalili

<sup>13</sup> Saadatmanesh

<sup>14</sup> Kono

<sup>15</sup> Samaan

<sup>16</sup> Lam

<sup>17</sup> Teng

<sup>18</sup> Spoelstra

<sup>19</sup> Monti

<sup>1</sup> Fiber reinforced polymer

<sup>2</sup> Glass fiber reinforced polymer

<sup>3</sup> Carbon fiber reinforced polymer

<sup>4</sup> Aramid fiber reinforced polymer

<sup>5</sup> Spiral

<sup>6</sup> Wrap

<sup>7</sup> Tube

<sup>8</sup> Katsumata

مطالعه قرار گرفته و مدل‌های زیادی برای بررسی مقاومت فشاری و رفتار تنش-کرنش در این حالت ارائه شده است [۸، ۱۱، ۱۵-۲۱] اما اطلاعات در مورد رفتار ستون چهارضلعی محصورشده با FRP کمتر است. رفتاری که در آن تحت فشاری که FRP برای مقطع بتنی ایجاد می‌کند؛ تنها بخشی از مقطع به طور مؤثر محصور می‌شود [۲۲]. در نتیجه اثر محصورسازی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۲۳]. در مقاطع چهارضلعی زوایای قائم گوشه‌های مقطع گرد می‌شود تا اثر محصورسازی افزایش یابد و از تمرکز تنش در گوشه‌ها کاسته شود.

## ۲-۱- محصورسازی ستون بتنی دایره ای با FRP

هنگامی که یک ستون بتنی محصورشده، تحت اثر بار محوری قرار می‌گیرد، هسته ستون بتنی تحت این بار، به دلیل وجود اثر پواسون به طور جانبی منبسط خواهد شد. محصورسازی از این انبساط بتن تحت فشار جلوگیری می‌کند. از این رو نوعی فشار جانبی غیرفعال<sup>۴</sup> از جانب دورپیچ به بتن هسته اعمال می‌گردد و بتن تحت اثر فشار سه محوری قرار می‌گیرد و در نتیجه مقاومت آن افزایش می‌یابد.

در ستون بتنی مدور، فشار محصورسازی در محیط دایره ثابت است. البته با این توضیح که امکان نادیده گرفتن اختلاف جزئی در مشخصات؛ مانند غیریکنواختی بتن، وجود دارد. شکل ۲ تبادل تنش‌های میان هسته مدور بتنی و دورپیچ پیرامون آن را نشان می‌دهد.

زمانی که دورپیچ FRP گسیخته می‌شود، فشار محصورسازی به مقدار ماکزیمم خود رسیده است و با توجه به تعادل تنش‌های وارد بر دورپیچ و هسته بتنی و نیز با صرف-نظر از تنش‌های مماسی در راستای طولی ستون، می‌توان نوشت [۲۴]:

$$f_i = \frac{2\sigma_j t_{FRP}}{D} \quad (1)$$

$$\sigma_j = E_{FRP} \varepsilon_j \quad (2)$$

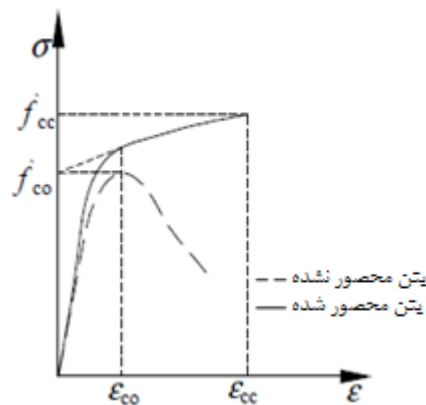
در رابطه ۱،  $f_i$ ، ماکزیمم تنش فشاری محصورکننده‌ای است که از سمت دورپیچ FRP به هسته مدور بتنی با قطر D وارد می‌گردد.  $\sigma_j$  حداکثر تنش کششی در دورپیچ FRP،  $t_{FRP}$  کل

در سال‌های اخیر نیز محققانی چون چویک<sup>۱</sup> [۱۲-۱۴] با کاربرد روش‌های محاسبات نرم<sup>۲</sup> همچون شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک، مقاومت فشاری ستون‌های دایره‌ای را بررسی کرده‌اند.

بیشتر تحقیقات و مدل‌ها به بررسی عملکرد ستون‌های مدور دورپیچ شده با FRP اختصاص دارند و ستون‌های با مقطع مربعی کمتر بررسی شده‌اند. در تحقیق حاضر یک روش جدید برای مدل کردن مقاومت فشاری ستون بتنی مربعی محصورشده با FRP با استفاده از منطق فازی<sup>۳</sup> ارائه می‌شود که تا کنون در این زمینه استفاده نشده است. برای بررسی دقت مدل فازی پیشنهادی، نتایج حاصل از مدل با نتایج مدل‌های ارائه شده توسط محققان دیگر و همچنین با مجموعه بزرگی از نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه می‌شود.

## ۲-۲ محصورسازی بتن با FRP

بهسازی لرزه‌ای ستون‌های بتن‌آرمه موجود با استفاده از FRP، براساس این حقیقت است که محصورسازی جانبی بتن، می‌تواند مقاومت فشاری آن را افزایش دهد (شکل ۱).



شکل ۱- نمودار تنش - کرنش بتن محصورشده با FRP [۵۴]

در یک ستون بتنی با مقطع مدور که تحت فشار محوری است، بتن توسط دورپیچ FRP به صورت یکنواخت محصور می‌شود. رفتار اینگونه محصورسازی، به صورت وسیعی مورد

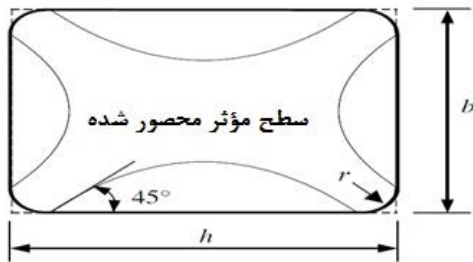
<sup>1</sup> Cevik

<sup>2</sup> Soft computing

<sup>3</sup> Fuzzy logic

<sup>4</sup> Passive

خاموت‌ها به واسطه عمل قوسی<sup>۱</sup> است و فقط بخشی از مقطع بتنی که توسط منحنی‌های درجه دو که گوشه‌های مقطع را با زاویه ۴۵ درجه قطع می‌کنند (شکل ۳)، احاطه شده است، به طور مؤثر محصور می‌شود. حال آن که اثر محصورسازی در بخش‌های باقیمانده مقطع قابل چشم‌پوشی است.



شکل ۳- ناحیه به طور مؤثر محصور شده در ستون مستطیلی [۲۵]

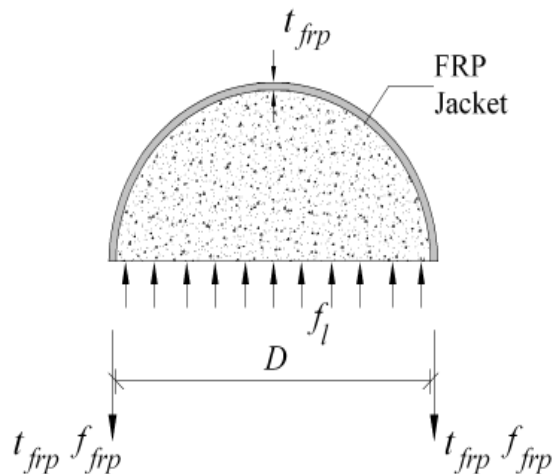
بین فولاد و FRP در محصورسازی مقطع تفاوت‌هایی وجود دارد اما این بحث که فقط بخشی از مقطع به طور کامل محصور می‌شود، در مورد دورپیچ FRP نیز صادق است. کاهش اثر دورپیچ FRP در مقطع مستطیلی نسبت به مقطع دایره‌ای توسط نتایج آزمایشگاهی نیز تأیید شده است [۲۳ و ۲۸] اما حتی با وجود این کاهش اثر، در یک ستون مستطیلی محصور شده با FRP نیز معمولاً علت خرابی، گسیختگی FRP می‌باشد [۲۸].

اغلب مدل‌های موجود برای محاسبه مقاومت فشاری ستون‌های چهارضلعی محصور شده با FRP رابطه‌ای به شکل زیر دارند و در آن‌ها مقاومت فشاری بتن به ابعاد مقطع، شعاع گردی گوشه‌ها، مقاومت فشاری هسته بتنی و سفتی دورپیچ FRP وابسته شده است.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 k_s \left( \frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (3)$$

در این رابطه،  $f'_{cc}$  مقاومت فشاری بتن محصور شده،  $f'_{co}$  مقاومت مشخصه بتن،  $k_s$  ضریب شکل مقطع و  $k_1$  ضریب تأثیر محصورشدگی است که برای مقطع مدور هم استفاده می‌شود.  $f_l$  نیز تنش محصورشدگی می‌باشد.

ضخامت دورپیچ FRP،  $D$  قطر هسته بتنی محصور شده و  $E_{FRP}$  مدول الاستیسیته FRP است. همچنین بین حداکثر تنش کششی  $\sigma_j$  و کرنش نهایی FRP در کشش  $\epsilon_j$ ، رابطه ۲ برقرار می‌باشد.



شکل ۲- توزیع تنش وارد بر روکش پیرامونی و هسته مدوربتنی [۲۴]

## ۲-۲- محصورسازی ستون‌های چهار ضلعی با FRP

اثر دورپیچ FRP در بهبود شاخصه‌های باربری ستون‌های چهارضلعی بتنی محصور شده با FRP، کمتر از مقطع دایره‌ای است. در مقاطع چهارضلعی فشار محصورکننده‌ای که از جانب دورپیچ FRP به بتن میانی وارد می‌آید، به طور یکنواخت در کل ستون توزیع نمی‌شود [۲۵]. شکل ۳ نواحی محصور شده در مقطع مستطیلی را نشان می‌دهد. در این شکل، عرض مقطع برابر  $b$  است که از ارتفاع مقطع  $h$ ، کوچکتر می‌باشد. ستون مربعی نیز حالت خاصی از ستون مستطیلی است که در آن  $b=h$  است. برای بهبود اثر دورپیچ FRP، گرد کردن چهار گوشه مقطع توصیه می‌گردد. با توجه به قرار دادن آرماتورهای فولادی در مقطع، شعاع گوشه  $r$ ، معمولاً به مقادیر کوچکی محدود می‌شود [۲۵].

محققان در مطالعات انجام شده بر روی محصورسازی بتن با استفاده از فولاد عرضی [۲۶، ۲۷ و ۲۸]، به این نتیجه رسیده‌اند که محصورسازی بتن در مقطع مستطیلی توسط

<sup>۱</sup> Arch action

در ستون دایره‌ای تحت بار محوری، تمام ستون به طور یکنواخت محصور می‌شود، در حالی که در ستون چهارضلعی تأثیر دورپیچ در گوشه و وسط مقطع بیشتر و در نقاط میانی کناره‌ها کمتر است. برای ساده‌سازی، مقطع را مانند شکل ۳ به دو قسمت تقسیم می‌کنیم [۲۵]: قسمت اول، سطح مؤثر محصورشده است. جایی که فرض می‌کنیم محصورشدگی یکنواخت باشد. برای قسمت باقیمانده مقطع نیز فرض می‌کنیم که محصورشدگی نداریم. با این تعریف، ضریب شکل مقطع  $k_s$  برای بیان اثر محصورشدگی غیریکنواخت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$k_s = \frac{A_{conf}}{A_{gross}} \quad (۴)$$

که در آن  $A_{conf}$  سطح مؤثر محصورشده و  $A_{gross}$  کل سطح مقطع است.

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد برای ستون دایره‌ای، تنش محصورشدگی از رابطه ۱ به دست می‌آید. فرمول مشابهی برای مقطع چهارضلعی پیشنهاد شده است که در آن مقدار  $D$ ، قطر مقطع مدور معادل می‌باشد که در هر مدل این مقدار تعریف می‌شود.

در این تحقیق، ۹ مدل پیش‌بینی مقاومت فشاری ستون چهارضلعی محصورشده با FRP، ارائه شده توسط محققان مختلف، برای مقایسه با مدل فازی پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۳، ۵۱، ۲۵، ۴۴، ۴۵، ۵۰، ۵۲، ۴۸ و ۴۹]. از این ۹ مدل، ۴ مدل کمپیونه<sup>۱</sup> و میراگلیا<sup>۲</sup> [۴۴]، السلوم<sup>۳</sup> [۴۵]، شهاتا<sup>۴</sup> و همکاران [۵۱] و کومتا<sup>۵</sup> و همکاران [۵۲] تنها برای ستون‌های بتنی مربعی محصورشده با FRP می‌باشند. پنج مدل میرمیران<sup>۶</sup> و همکاران [۲۳]، لم و تنگ [۲۵]، ایلکی<sup>۷</sup> و همکاران [۴۸]، وو<sup>۸</sup> و ونگ<sup>۹</sup> [۴۹] و پانتلیدس<sup>۱۰</sup> و یان<sup>۱۱</sup> [۵۰] را نیز می‌توان برای ستون بتنی

مستطیلی استفاده کرد. در جدول ۱ روابط مربوط به این مدل‌ها ارائه شده است. در جدول ۲ نیز روابطی که در هر مدل برای محاسبه تنش فشاری محصورکننده به کار می‌رود، بیان گشته است. پارامترهای به کار رفته در این جداول در ذیل جدول ۲ توضیح داده شده‌اند. در مواردی هم، نیاز به توضیحات بیشتری احساس می‌شود که در ادامه به آن پرداخته شده است.

میرمیران و همکارانش [۲۳] نسبت محصورشدگی،  $f_c/f_{co}$ ، را به صورت ضریب اصلاح محصورشدگی،  $MCR$ <sup>۱۲</sup> (رابطه ۵)، تعریف می‌کنند و معتقدند که اگر مقدار  $MCR$ ، بیشتر از ۰/۱۵ باشد، تأثیر دورپیچ FRP در افزایش مقاومت فشاری ستون محسوس خواهد بود و مدل ارائه شده توسط آن‌ها، می‌تواند برای پیش‌بینی مقاومت فشاری استفاده شود.

$$MCR = \left( \frac{2r}{h} \right) \left( \frac{f_l}{f_{co}} \right) \geq 0.15 \quad (۵)$$

در مدل لم و تنگ [۲۵]، مقدار کرنش نهایی FRP در کشش  $\epsilon_f$ ، برابر مقدار واقعی کرنش گسیختگی حلقوی FRP،  $\epsilon_{h,rup}$ ، فرض می‌شود و از رابطه ۶ به دست می‌آید.  $\epsilon_{h,rup}$  را می‌توان با استفاده از ضریب کارایی دورپیچ FRP،  $k_e$ ، که توسط پسیکی<sup>۱۳</sup> و همکارانش [۳۸] تعریف شده است، به کرنش کششی نهایی FRP،  $\epsilon_{FRP}$ ، ارتباط داد.

$$\epsilon_{h,rup} = k_e \epsilon_{FRP} \quad (۶)$$

مقدار ضریب کارایی به جنس کامپوزیت FRP وابسته است [۲۱]. همچنین  $\rho_{sc}$  که در مدل لم و تنگ [۲۵] به کار می‌رود، نسبت سطح مقطع آرماتورهای طولی به کل سطح مقطع چهارضلعی می‌باشد.

### ۳- داده‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق یک مطالعه گسترده بر روی کارهایی که به بررسی آزمایشگاهی مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مربعی محصورشده با FRP پرداخته بودند، صورت گرفته و مجموعه‌ای ۱۸۲ تایی از نتایج مطالعات آزمایشگاهی منتشر شده پیرامون مقاومت فشاری گردآوری شده است. دیمرز<sup>۱۴</sup> و

<sup>1</sup> Campione

<sup>2</sup> Miraglia

<sup>3</sup> Al-Salloum

<sup>4</sup> Shehata

<sup>5</sup> Kumutha

<sup>6</sup> Mirmiran

<sup>7</sup> Ilki

<sup>8</sup> Wu

<sup>9</sup> Wang

<sup>10</sup> Pantelides

<sup>11</sup> Yan

<sup>12</sup> Modified confinement ratio

<sup>13</sup> Pessiki

<sup>14</sup> Demers

جدول ۱- مدل‌های پیش‌بینی مقاومت فشاری ستون‌های چهارضلعی محصورشده با FRP

رابطه مقاومت فشاری $f'_{cc}$	نام محققان
$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 6.0 \left( \frac{2r}{h} \right) \left( \frac{f'_l}{f'_{co}} \right)^{0.7}$ for $MCR \geq 0.15$	میرمیران و همکاران [۲۳] (۱۹۹۸)
$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 0.85 \frac{f'_l}{f'_{co}}$	شهاتا و همکاران [۵۱] (۲۰۰۲)
$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.3 \left( \frac{b}{h} \right)^2 \left[ \frac{1 - \left( \frac{\left( \frac{b}{h} \right) (h - 2r)^2 + \left( \frac{h}{b} \right) (b - 2r)^2}{3(bh - (4 - \pi)r^2)} \right) - \rho_{sc}}{1 - \rho_{sc}} \right] \left( \frac{f'_l}{f'_{co}} \right)$	لم و تنگ [۲۵] (۲۰۰۳)
$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2 \left[ 1 - \frac{2 \left( 1 - \frac{2r}{b} \right)^2}{3 \left[ 1 - (4 - \pi) \left( \frac{r}{b} \right)^2 \right]} \right] \left( \frac{f'_l}{f'_{co}} \right)$	کمپونه و میراگلیا [۴۴] (۲۰۰۳)
$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.14 \left[ 1 - \frac{2 \left( 1 - \frac{2r}{b} \right)^2}{3 \left[ 1 - (4 - \pi) \left( \frac{r}{b} \right)^2 \right]} \right] \left( \frac{b}{\sqrt{2}b - 2r(\sqrt{2} - 1)} \right) \left( \frac{f'_l}{f'_{co}} \right)$	السلوم [۴۵] (۲۰۰۷)
$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = -4.322 + 4.271 \sqrt{1 + 4.193 \left( \frac{f'_l}{f'_{co}} \right)} - 2 \left( \frac{f'_l}{f'_{co}} \right)$ for $\frac{f'_l}{f'_{co}} \geq 0.2$	
$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = \max \left\{ \frac{-4.322 + 4.271 \sqrt{1 + 4.193 \left( \frac{f'_l}{f'_{co}} \right)} - 2 \left( \frac{f'_l}{f'_{co}} \right)}{0.0768 \ln \left( \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) + 1.122}, 1 \right\}$ for $\frac{f'_l}{f'_{co}} < 0.2$	پانتلیدس و یان [۵۰] (۲۰۰۷)
$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 0.93 \frac{f'_l}{f'_{co}}$	کوموتا و همکاران [۵۲] (۲۰۰۷)
$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.54 \frac{f'_l}{f'_{co}}$	ایلکی و همکاران [۴۸] (۲۰۰۸)
$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.16 \left( \frac{2r}{b} \right)^{0.651} \left( \frac{f'_l}{f'_{co}} \right)^{0.955}$	وو و ونگ [۴۹] (۲۰۰۸)

جدول ۲- رابطه تنش فشاری محصورکننده در مدل‌های پیش‌بینی مقاومت فشاری ستون‌های چهارضلعی محصورشده با FRP

رابطه تنش فشاری محصورکننده $f_l$	نام محققان
$f_l = \frac{2f_{FRP}t_{FRP}}{h}$	میرمیران و همکاران [۲۳] (۱۹۹۸)
$f_l = \frac{2E_{FRP}\epsilon_{FRP}t_{FRP}}{b}$	شهاتا و همکاران [۵۱] (۲۰۰۲)
$f_l = \frac{2E_{FRP}\epsilon_{h,FRP}t_{FRP}}{\sqrt{h^2 + b^2}}$	لم و تنگ [۲۵] (۲۰۰۳)
$f_l = \frac{2f_{FRP} \left[ 0.85 \left( \frac{2r}{b} \right) + 0.15 \right] t_{FRP}}{b}$	کمپونه و میراگلیا [۴۴] (۲۰۰۳)
$f_l = \frac{2E_{FRP}\epsilon_{FRP}t_{FRP}}{b\sqrt{2} - 2r(\sqrt{2} - 1)}$	السلوم [۴۵] (۲۰۰۷)
$f_l = 0.5 \left( 1 - \frac{(h-2r)^2 + (b-2r)^2}{3bh} \right) \left( \frac{b+h}{bh} \right) E_{FRP}\epsilon_{FRP}t_{FRP}$	پانتلیدیس و یان [۵۰] (۲۰۰۷)
$f_l = \frac{f_{FRP}t_{FRP}(b+h)}{bh}$	کوموتا و همکاران [۵۲] (۲۰۰۷)
$f_l = 0.85 \left( \frac{b+h}{bh} \right) \left[ 1 - \left( \frac{\left( \frac{b}{h} \right) (h-2r)^2 + \left( \frac{h}{b} \right) (b-2r)^2}{3(bh - (4-\pi)r^2)} \right) \right] E_{FRP}\epsilon_{FRP}t_{FRP}$	ایلکی و همکاران [۴۸] (۲۰۰۸)
$f_l = \frac{E_{FRP}\epsilon_{FRP}t_{FRP}}{b}$	وو و ونگ [۴۹] (۲۰۰۸)

توضیح: h: ارتفاع مقطع، b: عرض مقطع، r: شعاع گردی گوشه مقطع،  $t_{FRP}$ : مقاومت مشخصه بتن،  $\epsilon_{FRP}$ : کل ضخامت دورپیچ FRP،  $f_{FRP}$ : مقاومت کششی FRP،  $\epsilon_{FRP}$ : کرنش کششی نهایی FRP،  $E_{FRP}$ : مدول الاستیسیته FRP.

شیشه‌ای GFRP و آرامیدی AFRP می‌باشد. طول دورپیچ معادل طول نمونه می‌باشد، در آزمایش‌های جمع‌آوری شده طول نمونه‌های استفاده شده از ۳۰۰ تا ۱۸۳۰ میلی‌متر و نسبت طول به بعد عرضی نمونه‌ها از ۱/۶ تا ۴ متغیر می‌باشد. در این محدوده‌ی نسبت طول به بعد عرضی نمونه‌ها، نمونه به اندازه کافی بلند در نظر گرفته می‌شود و اثر طول نمونه قابل صرف‌نظر می‌باشد. شایان ذکر است که در مدل‌های ارائه شده توسط محققان (جدول ۲) نیز از اثر طول نمونه صرف‌نظر شده است. سایر اطلاعات آماری مربوط به داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۳ ارائه گردیده است.

#### ۴- مروری بر سیستم استنتاج بر مبنای منطق فازی

در طول دهه‌های گذشته، منطق فازی که برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ و توسط پروفیسور زاده [۲۹] مطرح شد، به طور گسترده در محدوده وسیعی از علوم مهندسی مورد استفاده

نیل<sup>۱</sup> [۵۳]، راجت<sup>۲</sup> و لابوسیر<sup>۳</sup> [۲۸]، سوتر<sup>۴</sup> و پینزلی<sup>۵</sup> [۴]، ایلکی و همکاران [۳۸]، پروین<sup>۶</sup> و ونگ [۴۶]، شهاتا و همکاران [۵۱]، چلال<sup>۷</sup> و همکاران [۹]، السلوم [۴۵]، لم و تنگ [۲۵]، ایلکی و همکاران [۳۶]، وو و همکاران [۳۷]، روساکیس<sup>۸</sup> و همکاران [۴۷] و ونگ و وو [۳۵] از جمله محققانی هستند که در مطالعات آزمایشگاهی خود، مقاومت فشاری ستون‌های محصورشده با FRP و با مقطع مربعی را اندازه‌گیری نموده‌اند. در مجموعه نتایج آزمایشگاهی گردآوری شده، پوشش پیرامون ستون از سه نوع الیاف کربنی CFRP،

<sup>1</sup> Neale  
<sup>2</sup> Rochette  
<sup>3</sup> Labossiere  
<sup>4</sup> Suter  
<sup>5</sup> Pinzelli  
<sup>6</sup> Parvin  
<sup>7</sup> Chaallal  
<sup>8</sup> Rousakis

جدول ۳- اطلاعات آماری داده‌های آزمایشگاهی جمع‌آوری شده

پارامترهای هر داده	COV(%)	میانگین	دامنه	Min	Max
b(mm)	۲۴/۳۳	۱۵۹/۳۸	۳۵۰	۱۰۸	۴۵۸
r(mm)	۷۰/۶۵	۲۳/۸۰	۶۰	۰	۶۰
$f'_{co}$ (MPa)	۳۰/۳۵	۳۷/۰۶	۴۹/۹	۶/۸	۵۶/۷
$t_{FRP}$ (mm)	۱۲۲/۷۵	۰/۶۶۶	۴/۹۲۳	۰/۱۱۷	۵/۰۴
$f_{FRP}$ (MPa)	۴۶/۰۳	۳۰۹۹/۳۲	۴۲۹۹	۲۲۰	۴۵۱۹
$E_{FRP}$ (GPa)	۵۱/۷۰	۱۸۳/۳۱	۶۲۹/۵	۱۰/۵	۶۴۰
$f'_{cc.exp}$ (MPa)	۲۹/۵۴	۴۹/۷۱	۸۴/۱	۱۱/۱	۹۵/۲

توضیح: b: بعد مقطع، t: شعاع گردی گوشه مقطع،  $f'_{co}$ : مقاومت مشخصه بتن،  $f_{FRP}$ : کل ضخامت دورپیچ FRP،  $f_{FRP}$ : مقاومت کششی FRP،  $E_{FRP}$ : مدول الاستیسیته FRP،  $f'_{cc.exp}$ : مقاومت فشاری بتن محصورشده.

مراحل به کارگیری منطق فازی برای مدل‌سازی عبارت است از [۳۳]:

- ۱- فازی‌سازی به منظور تبدیل داده‌های صریح به داده‌های فازی یا توابع عضویت.
- ۲- فرآیند استنتاج فازی که به توابع عضویت با قواعد فازی، برای استخراج خروجی فازی مربوط می‌شود.
- ۳- غیرفازی‌سازی هر خروجی و محاسبه خروجی صریح مربوطه.

سیستم‌های استنتاج فازی از نوع ممدنی<sup>۴</sup> و سوگنو<sup>۵</sup> به طور گسترده برای کاربردهای مختلف به کار گرفته می‌شوند. این سیستم‌ها در قسمت تالی قوانین فازی با هم تفاوت دارند زیرا رویه غیرفازی‌سازی آن‌ها با یکدیگر متفاوت است [۳۴].

#### ۴-۱- خوشه‌بندی کاهشی

الگوریتم‌های خوشه‌بندی نه تنها به طور گسترده برای سازماندهی و دسته‌بندی داده‌ها استفاده می‌شوند، بلکه برای شناسایی و ساخت مدل نیز قابل استفاده می‌باشند. چهار روش خوشه‌بندی وجود دارد که عبارتند از: خوشه‌بندی C میانگین (سخت)<sup>۶</sup>، خوشه‌بندی فازی C میانگین<sup>۷</sup>، خوشه‌بندی کوه<sup>۸</sup> و خوشه‌بندی کاهشی<sup>۹</sup> [۳۴]. در این تحقیق، از خوشه‌بندی کاهشی که در واقع توسعه یافته روش خوشه‌بندی کوه می‌باشد، برای شناسایی مدل فازی استفاده شده است. در خوشه‌بندی کاهشی، هر داده آزمایشگاهی به عنوان یک بردار  $x_i$  که مختصات آن شامل مقادیر ورودی و خروجی است، در نظر گرفته می‌شود. همچنین هر مختصه با تقسیم بر دامنه داده‌ها در جهت مزبور نرمال می‌شود؛ به‌گونه‌ای که بین [۰ و ۱] قرار می‌گیرد.

در مسئله مورد بررسی، مختصات بردار  $x_i$  شامل مقادیر نرمال شده  $[b, r, f'_{co}, t_{FRP}, f_{FRP}, E_{FRP}, f'_{cc}]$  برای i امین داده می‌باشد. توضیح آن‌که پارامترهای مختلف در ذیل جدول ۳ تعریف شده‌اند. برای شروع روش خوشه‌بندی کاهشی و تعیین اولین مرکز خوشه لازم است به هر نقطه مقداری به عنوان

قرار گرفته است. به عنوان نمونه می‌توان به کنترل فرآیندها، پردازش تصویر، شناسایی الگو و طبقه‌بندی اشاره کرد [۳۰]. سیستم‌های فازی را می‌توان به عنوان سیستم‌هایی مبتنی بر قانون که از مجموعه‌ای قواعد زبانی ساخته شده‌اند، تعریف کرد. سیستم مبتنی بر قوانین فازی یک سیستم با قواعد اگر-آنگاه می‌باشد و به این صورت بیان می‌شود که اگر قسمت مقدم<sup>۱</sup> برقرار باشد، آنگاه قسمت تالی<sup>۲</sup> نتیجه خواهد شد [۳۱].

عملگرهای فازی براساس نظریه گروه‌های فازی رفتار می‌کنند که در آن‌ها داده‌های ورودی ممکن است به عنوان یک مجموعه فازی تعریف شوند و یا یک عضو با مقدار عضویت واحد باشند [۳۲].

یک مجموعه فازی، بر خلاف مجموعه‌های صریح<sup>۳</sup> که در آن یک عضو یا به آن مجموعه تعلق دارد یا ندارد (۰ یا ۱)، شامل اعضای با درجه عضویت متفاوت می‌باشد. به هر حال، یک مجموعه فازی به یک عضو اجازه می‌دهد تا درجات مختلفی از عضویت داشته باشد و این درجات عضویت را می‌توان به یک تابع و یا یک مجموعه از مقادیر عضویت نگاشت [۳۳].

<sup>4</sup> Mamdani

<sup>5</sup> Sugeno

<sup>6</sup> (hard) C- means clustering

<sup>7</sup> Fuzzy C-means clustering

<sup>8</sup> Mountain clustering

<sup>9</sup> Subtractive clustering

<sup>1</sup> Antecedent

<sup>2</sup> Consequent

<sup>3</sup> Crisp



خوشه‌بندی کاهشی چهار پارامتر دارد که عبارت اند از: نسبت پذیرش<sup>۱</sup> ( $\bar{\varepsilon}$ )، نسبت رد<sup>۲</sup> ( $\varepsilon$ )، شعاع خوشه ( $r_a$ ) و ضریب نادیده گرفتن<sup>۳</sup> ( $\eta$ ). این پارامترها، تأثیر زیادی بر روی روی تعداد خوشه‌ها دارند. مقدار بزرگ  $\bar{\varepsilon}$  و  $\varepsilon$ ، سبب کاهش تعداد خوشه‌ها و به طور عکس مقدار کوچک برای  $\bar{\varepsilon}$  و  $\varepsilon$ ، موجب افزایش تعداد مراکز خوشه‌ها می‌گردد. یک مقدار بزرگ برای  $r_a$  سبب کاهش تعداد خوشه‌ها و مقدار کوچک  $r_a$  سبب افزایش بیش از حد تعداد خوشه‌ها می‌شود [۳۴].

در این تحقیق، برای خوشه‌بندی از پیشفرض‌های نرم‌افزار متلب برای پارامترهای  $\bar{\varepsilon}$ ،  $\varepsilon$  و  $\eta$  استفاده شده است که به ترتیب ۰/۵، ۰/۱۵ و ۱/۲۵ می‌باشند. مقدار بهینه شعاع  $r_a$  نیز با استفاده از سعی و خطا تعیین می‌شود که در قسمت‌های بعد توضیح داده خواهد شد.

#### ۴-۲- شناسایی مدل فازی اولیه

بر مبنای خوشه‌بندی داده‌ها و تعیین مراکز خوشه‌ها می‌توان یک مدل فازی را شناسایی نمود. به عبارت دیگر هر مرکز خوشه معرف یک قانون فازی به شکل اگر-آنگاه است که این‌گونه بیان می‌شود: اگر مختصات ورودی یک نقطه دلخواه نزدیک به مرکز یک خوشه باشد آنگاه خروجی آن نقطه نیز نزدیک به خروجی متناظر با مرکز خوشه خواهد بود. درجه ارضا یا وزن این قانون فازی به میزان نزدیکی نقطه دلخواه تا مرکز خوشه بستگی دارد و به صورت تابعی از فاصله اقلیدسی مختصات ورودی نقطه دلخواه تا مرکز خوشه مورد نظر تعریف می‌گردد. بنابراین تعداد قوانین مدل فازی برابر با تعداد خوشه‌ها خواهد بود و وزن هر قانون برای یک نقطه دلخواه (با مختصات ورودی نرمال شده  $x$ ) به صورت زیر قابل تعریف است:

$$w_i = e^{-\frac{4}{r_a^2} \|x - x_i^c\|^2} \quad (10)$$

که در آن  $x_i^c$  بردار مختصات ورودی نرمال شده مرکز خوشه  $i$ ام می‌باشد.

پتانسیل یا استعداد برای مرکز خوشه شدن نسبت داد. این پتانسیل  $P_i$ ، به صورت تابعی از فاصله اقلیدسی نقطه  $i$ ام از همه نقاط دیگر تعریف شده و از رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$P_i = \sum_{j=1}^n e^{-\frac{4}{r_a^2} \|x_i - x_j\|^2} \quad (7)$$

که در آن  $\| \cdot \|$ ، به معنی فاصله اقلیدسی بین دو نقطه (یعنی دو بردار نرمال شده  $x_i$  و  $x_j$ ) و  $n$  تعداد کل نقاط داده می‌باشند.  $r_a$  نیز عدد ثابت و مثبتی است که شعاع تأثیر یک مرکز خوشه را در هر جهت مختصات مشخص می‌کند و از آنجایی که مختصات نقاط نرمال شده‌اند،  $r_a$  کمتر از یک می‌باشد.

اولین مرکز خوشه  $x_1^c$ ، نقطه‌ای است که حداکثر مقدار پتانسیل را دارد. سپس پتانسیل بقیه نقاط  $x_i$  توسط رابطه ۸ کاهش داده می‌شود.

$$P_i \Leftarrow P_i - P_1^c e^{-\frac{4}{r_b^2} \|x_i - x_1^c\|^2} \quad (8)$$

در رابطه ۸،  $x_1^c$  و  $P_1^c$  به ترتیب موقعیت و پتانسیل اولین مرکز خوشه می‌باشند. این رابطه نشان می‌دهد پتانسیل نقاطی که در نزدیکی اولین مرکز خوشه قرار دارند، به مقدار قابل توجهی کاهش داده می‌شود و بنابراین احتمال آن‌که به عنوان مرکز خوشه انتخاب شوند؛ منتفی می‌گردد. عدد ثابت  $r_b$  شعاعی را مشخص می‌نماید که در آن کاهش قابل توجهی در پتانسیل رخ می‌دهد و به صورت مضربی از  $r_a$  بیان می‌شود (رابطه ۹).

$$r_b = \eta r_a \quad (9)$$

برای آن‌که مراکز خوشه از هم فاصله کافی داشته باشند، مقدار  $\eta$  در رابطه ۹، کمی بزرگتر از ۱ در نظر گرفته می‌شود. پس از آن‌که پتانسیل همه نقاط با استفاده از رابطه ۸ بازنگری شد، نقطه‌ای که دارای بیشترین پتانسیل باشد به عنوان دومین مرکز خوشه در نظر گرفته می‌شود. به طور کلی پس از تعیین یک مرکز خوشه جدید، پتانسیل همه نقاط کاهش می‌یابد و مرکز خوشه بعدی، نقطه با بیشترین پتانسیل خواهد بود. این روند تا آن جا ادامه خواهد یافت که پتانسیل همه نقاط به کمتر از کسری از پتانسیل اولین مرکز خوشه برسد.

<sup>1</sup> Accept ratio

<sup>2</sup> Reject ratio

<sup>3</sup> Quash factor

## ۴-۳- بهینه سازی مدل فازی

با توجه به رابطه ۱۰، مشخص می‌شود که قسمت مقدم قوانین فازی تعریف شده، دارای تابع عضویت از نوع گاوسی هستند. برای قسمت تالی قوانین فازی در این مقاله از مدل فازی سوگنو استفاده می‌شود که می‌تواند رفتارهای پیچیده را با تعداد قوانین محدود توصیف نماید. مدل فازی سوگنو می‌تواند از مرتبه اول (خطی) و یا مرتبه صفر (ثابت) باشد. مدل خطی دارای رابطه زیر است:

$$f'_{cc} = \frac{\sum_{i=1}^c w_i f'_{cci}}{\sum_{i=1}^c w_i} \quad (11)$$

که در آن

$$f'_{cci} = s_i b + u_i r + v_i f'_{co} + x_i t_{FRP} + y_i f_{FRP} + z_i E_{FRP} + q_i \quad (12)$$

در رابطه ۱۱،  $f'_{cc}$  مقدار مقاومت فشاری بتن محصورشده با FRP (خروجی مدل فازی)،  $c$  تعداد کل قوانین فازی یا تعداد کل خوشه‌ها و  $w_i$  وزن هر قانون (رابطه ۱۰) می‌باشد. مدل سوگنوی ثابت نیز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f'_{cc} = \frac{\sum_{i=1}^c w_i q_i}{\sum_{i=1}^c w_i} \quad (13)$$

در روابط ۱۲ و ۱۳، مقدار ضرایب  $s_i$ ،  $u_i$ ،  $v_i$ ،  $x_i$ ،  $y_i$  و  $z_i$  و  $q_i$  مجهول است و باید به گونه‌ای تعیین گردند که خطای مدل نسبت به داده‌هایی که در یادگیری مدل به کار می‌روند (training data) حداقل شود. با توجه به این که قسمت مقدم قوانین فازی، تابع مراکز خوشه می‌باشد و بنابراین ثابت نگه داشته می‌شود، تعیین این ضرایب در قسمت تالی قوانین، یک مسئله بهینه‌سازی خطی به صورت تخمین حداقل مربعات خواهد بود.

## ۵- ساخت مدل فازی برای مقاومت فشاری

## ستون‌های بتنی مربعی محصورشده با FRP

برای ساخت مدل فازی، ابتدا یک مقدار برای شعاع  $r_a$  انتخاب می‌شود. سپس داده‌های آزمایشگاهی جمع آوری شده به دو قسمت تقسیم می‌گردند. گروه اول داده‌هایی هستند که با آن‌ها مدل ساخته می‌شود (training data) یا داده‌های

آموزش) و گروه دوم داده‌هایی اند که با آن‌ها دقت مدل را کنترل می‌کنیم (testing data یا داده‌های آزمایش). برای مقادیر مختلف شعاع این کار انجام شده و نتایج مدل‌های ساخته شده بر روی داده‌های آموزش، داده‌های آزمایش و همه داده‌ها، به تفکیک در جدول ۴ ارائه گردیده است. در این جدول برای مقایسه میزان خطای هر مدل نسبت به نتایج آزمایشگاهی، مقدار MAPE<sup>۱</sup> مطابق با رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود که در آن  $n$ ، تعداد داده‌ها می‌باشد. همچنین مقدار میانگین و انحراف معیار برای نسبت  $(f'_{cc,exp}/f'_{cc,pred})$  محاسبه شده و مقدار ضریب تغییرات COV<sup>۲</sup>، از تقسیم مقدار انحراف معیار بر میانگین، حاصل می‌شود.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{EXP_i - PRED_i}{EXP_i} \right| \times 100 \quad (14)$$

همانطور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود بهترین مدل متناظر با کمترین مقادیر خطا، زمانی حاصل می‌شود که مقدار شعاع  $r_a$  برابر با ۸۵۲۵/۰ و سیستم استنتاج فازی از نوع سوگنو خطی در نظر گرفته شود.

تعداد خوشه‌های مدل انتخاب شده، سه عدد می‌باشد و مختصات مربوط به مرکز هر خوشه در جدول ۵ ارائه گشته است. مقدار ضرایب مجهول  $s_i$ ،  $u_i$ ،  $v_i$ ،  $x_i$ ،  $y_i$ ،  $z_i$  و  $q_i$ ، برای هر قانون (رابطه ۱۲)، از طریق تخمین حداقل مربعات تعیین شده و در جدول ۶ ارائه گشته است.

از نکات مهمی که باید در انتخاب شعاع بهینه در نظر داشت این است که مقادیر خطا هم روی داده‌هایی که با آن‌ها مدل را ساخته‌ایم، کم باشد و هم روی داده‌هایی که برای کنترل مدل جدا کرده‌ایم. همچنین مقادیر خطا روی هر دو دسته داده به هم نزدیک باشند. به این ترتیب مدل دارای قابلیت تعمیم دهی خواهد بود.

شکل ۴، نمودار مدل فازی پیشنهادی را برای یک داده آزمایشگاهی با مقادیر ورودی  $b = 150 \text{ mm}$ ،  $r = 30 \text{ mm}$ ،  $f'_{FRP} = 4364 \text{ MPa}$ ،  $t_{FRP} = 0.165 \text{ mm}$ ،  $f'_{co} = 32/3 \text{ MPa}$ ،  $E_{FRP} = 230$  و مقدار  $f'_{cc,exp} = 42/4 \text{ MPa}$  نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Mean absolute percentage error

<sup>2</sup> Coefficient of variation

جدول ۴- نتایج به دست آمده برای مدل‌های فازی با مقادیر مختلف  $r_a$

All data			Testing data			Training data			نوع	تعداد	شعاع
Mean	MAPE (%)	COV (%)	Mean	MAPE (%)	COV (%)	Mean	MAPE (%)	COV (%)	مدل فازی	قانون/خوشه	( $r_a$ )
۱/۰۰۲۹	۱۰/۰۲	۱۳/۱۰	۰/۹۹۹۲	۱۱/۳۲	۱۴/۲۰	۱/۰۰۶۳	۸/۸۷	۱۲/۰۵	خطی	۲	۰/۹۴
۱/۰۰۰۴	۱۰/۳۱	۱۳/۰۱	۰/۹۹۸۳	۱۱/۹۵	۱۴/۹۰	۱/۰۰۲۴	۸/۸۴	۱۱/۰۵	خطی	۳	۰/۸۶
۱/۰۰۱۵۰	۹/۴۵	۱۲/۲۵	۱/۰۲۸۲	۱۰/۱۰	۱۲/۸۷	۱/۰۰۴۲	۸/۹۱	۱۱/۵۷	خطی	۳	۰/۸۵۲۵
۱/۰۰۱۵۰	۹/۴۷	۱۲/۲۸	۱/۰۲۸۰	۱۰/۱۳	۱۲/۸۹	۱/۰۰۴۳	۸/۹۴	۱۱/۶۲	خطی	۳	۰/۸۴
۱/۰۰۰۶	۹/۷۵	۱۲/۲۴	۰/۹۹۸۴	۱۱/۴۵	۱۴/۳۱	۱/۰۰۲۱	۸/۵۵	۱۰/۵۶	خطی	۴	۰/۷۸
۱/۰۰۲۹	۸/۲۹	۱۱/۳۳	۱/۰۰۵۹	۱۰/۲۵	۱۴/۱۲	۱/۰۰۰۸	۶/۹۲	۸/۸۲	خطی	۵	۰/۷۶
۱/۰۰۲۰۵	۱۷/۸۹	۲۳/۵۷	۱/۰۴۶۴	۱۵/۸۹	۲۳/۳۵	۰/۹۹۹۲	۱۹/۵۳	۲۳/۵۴	ثابت	۳	۰/۷۹۹
۱/۰۰۶۷	۱۶/۷۳	۲۲/۲۴	۱/۰۱۴۸	۱۶/۲۵	۲۰/۸۳	۰/۹۹۹۸	۱۷/۱۳	۲۳/۳۶	ثابت	۷	۰/۵۹۷
۱/۰۰۷۳	۱۲/۷۰	۱۸/۸۰	۱/۰۱۷۸	۱۴/۹۰	۲۰/۴۱	۱/۰۰۰۰	۱۱/۱۶	۱۷/۵۰	ثابت	۲۰	۰/۳۶۱
۱/۰۰۳۸	۹/۸۴	۱۴/۰۸	۱/۰۰۸۵	۱۱/۴۸	۱۶/۲۹	۱/۰۰۰۵	۸/۵۶	۱۲/۲۲	ثابت	۲۱	۰/۳۴۱۵
۰/۹۹۴۰	۹/۹۷	۱۳/۵۹	۰/۹۸۵۱	۱۱/۸۹	۱۵/۴۰	۱/۰۰۰۲	۸/۵۶	۱۲/۲۱	ثابت	۲۲	۰/۳۳۷۵
۱/۰۰۵۵	۱۰/۶۵	۱۴/۴۸	۱/۰۱۳۶	۱۲/۹۳	۱۶/۲۷	۱/۰۰۰۱	۹/۱۶	۱۳/۱۲	ثابت	۲۸	۰/۲۸۹

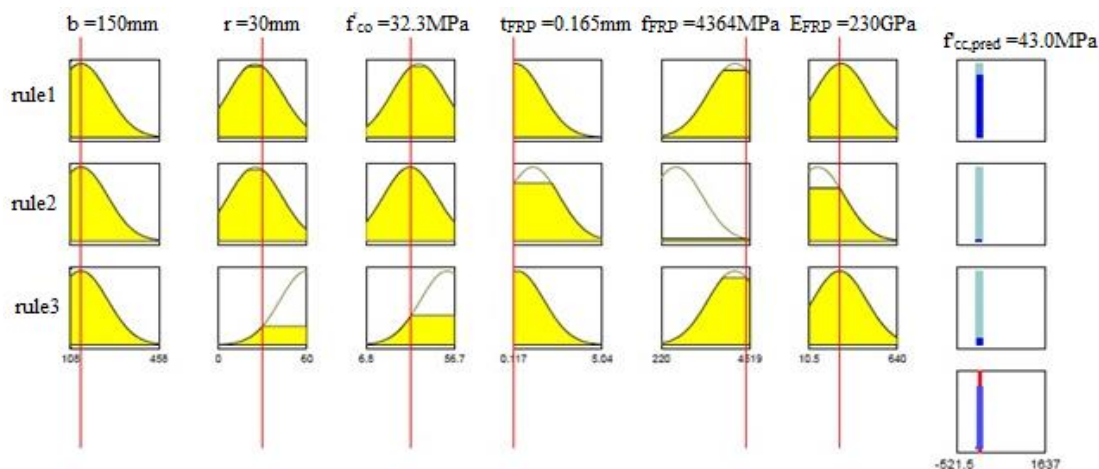
توضیح: Mean و COV مربوط به  $f_{cc,exp}/f_{cc,pred}$  است و MAPE از رابطه ۱۴ به دست می آید.

جدول ۵- مختصات مراکز خوشه مدل فازی پیشنهادی ( $r_a=0/8525$ )

b (mm)	r (mm)	$f_{co}$ (MPa)	$t_{FRP}$ (mm)	$f_{FRP}$ (MPa)	$E_{FRP}$ (GPa)	شماره مرکز خوشه
۱۵۰	۲۵	۳۶/۶	۰/۲۳۴	۳۸۰۰	۲۴۰	۱
۱۵۰	۲۵	۳۱/۸	۱/۲	۹۳۵	۷۵/۱	۲
۱۵۰	۶۰	۵۲/۷	۰/۳۳	۳۷۸۸	۲۳۰	۳

جدول ۶- ضرایب بهینه شده قسمت تالی قوانین مدل فازی پیشنهادی ( $r_a=0/8525$ )

s	u	v	X	y	z	q	شماره قانون
-۰/۲۲۸۶۶	۰/۳۹۷۷۶	۰/۸۴۵۲۰	۴۴/۲۶۵۲۵	۰/۰۰۲۹۶	-۰/۰۰۵۱۶	۲۰/۱۲۶۲۱	$f_{cc1}$
-۰/۰۷۳۹۲	۰/۴۰۰۳۶	۰/۲۱۸۷۱	۳/۳۵۰۴۳	-۰/۰۱۲۰۴	۰/۱۶۶۴۸	۳۷/۹۳۲۸۷	$f_{cc2}$
۱/۱۸۶۵۸	۰/۵۲۰۸۸	۱/۷۹۶۳۱	۱۷۶/۱۸۱۸۵	۰/۰۴۵۰۶	۰/۳۱۹۷۹	-۵۱۵/۸۷۹۶۸	$f_{cc3}$



شکل ۴- نمودار مدل فازی پیشنهادی برای یک داده آزمایشگاهی

پیشنهادی را نشان داده و یکی از نقاط کلیدی درستی رفتار مدل می‌باشد.

#### ۶-۲- مقایسه مدل فازی پیشنهادی با مدل های موجود

میزان خطای MAPE هر یک از مدل‌ها نسبت به نتایج آزمایشگاهی و همچنین مقادیر میانگین و ضریب تغییرات برای نسبت  $(f_{cc,exp}/f_{cc,pred})$  حساب و در جدول ۷ ارائه شده است. در ۹ مدل ارائه شده توسط سایر محققان، مقدار خطای محاسبه شده MAPE، بین  $11.37\% - 20.56\%$  و مقدار میانگین و ضریب تغییرات، به ترتیب بین  $1.317 - 0.860$  و  $1.12/0.6 - 0.33/0.78$  می‌باشد. در برخی از موارد مقدار به دست آمده از مدل، کمتر از مقدار آزمایشگاهی است که در عمل این اختلاف زیاد در تخمین مقاومت، طرح FRP را غیراقتصادی می‌کند. در مواردی نیز نتایج حاصل از مدل‌ها غیرایمن و بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی می‌باشند. در نتیجه ارائه مدل‌های دقیق تری که استفاده بهینه از مصالح FRP را به همراه داشته باشند، ضروری می‌باشد.

لازم به ذکر است که بررسی نتایج آزمایش‌های منتشر شده نشان می‌دهد یکی از ضعف‌های مهم این داده‌ها این است که از ۱۸۲ نمونه، در ۱۱۹ مورد مقدار MCR که در مدل میرمیران و همکارانش [۲۸] بیان شده، کمتر از  $0.15$  است. به عبارت دیگر اکثر نتایج آزمایشگاهی موجود برای سطوح پایین محصورشدگی هستند که در این موارد

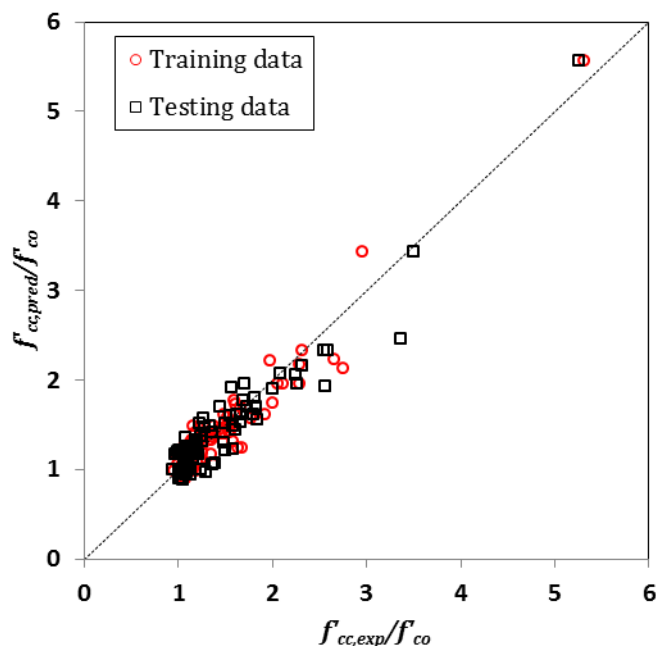
همان طور که ملاحظه می‌شود مقدار خروجی مدل برای مقاومت فشاری برابر با  $f_{cc,pred} = 43.0 \text{ MPa}$  خواهد شد و به مقدار به دست آمده از آزمایش نزدیک می‌باشد.

#### ۶- بحث و بررسی

##### ۶-۱- مقایسه مدل فازی پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی

در نمودار شکل ۵، مجموعه نتایج آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل فازی مقایسه شده است. در این نمودار محور افقی معرف مقادیر آزمایشگاهی و محور قائم معرف مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل فازی پیشنهادی می‌باشد. همان‌گونه که در نمودار شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ توزیع نقاط نشان داده شده، به خط قطری (خط ۴۵ درجه) نزدیک می‌باشد. بنابراین مدل فازی پیشنهادی با دقت خوبی می‌تواند نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی نماید.

همچنین نمودار شکل ۵، پیش‌بینی مدل فازی پیشنهادی را به تفکیک برای داده‌های آموزش (training data) و داده‌های آزمایش (testing data) نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است که داده‌های آزمایش در روند آموزش مدل فازی استفاده نشده‌اند؛ بلکه برای اعتبارسنجی مدل فازی پیشنهادی در پیش‌بینی داده‌های جدید به کار می‌روند. همان‌طور که مشاهده می‌شود پراکنش نتایج داده‌های آموزش حول خط قطری با پراکنش داده‌های آزمایش تقریباً مشابه است که نشان‌دهنده قابلیت خوب تعمیم‌دهی مدل فازی پیشنهادی می‌باشد. این شکل، صحت و اطمینان مدل فازی



شکل ۵- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج پیش بینی مدل فازی پیشنهادی برای مقاومت فشاری نمونه ستون‌های محصور شده

جدول ۷- مقدار خطا، میانگین و ضریب تغییرات مدل‌های پیش بینی مقاومت فشاری نسبت به نتایج آزمایشگاهی

MAPE (%)	for $f_{cc,exp}/f_{cc,pred}$		مدل
	Mean	COV (%)	
۱۳/۵۵	۱/۰۹۴	۱۸/۴۰	میرمیران و همکاران [۲۳]
۱۴/۹۹	۱/۰۰۵	۲۰/۲۲	شهاتا و همکاران [۵۱]
۱۱/۸۴	۰/۹۹۱	۱۴/۹۰	لم و تنگ [۲۵]
۱۱/۳۷	۱/۰۹۸	۱۶/۵۵	کمپیونه و میراگلیا [۴۴]
۱۵/۸۵	۰/۸۸۸	۱۲/۰۶	السلوم [۴۵]
۲۰/۵۶	۱/۳۱۷	۳۳/۷۸	پانتلیدس و یان [۵۰]
۱۵/۷۳	۰/۹۸۰	۱۹/۸۹	کوموتا و همکاران [۵۲]
۱۹/۷۶	۰/۸۶۰	۱۳/۵۱	ایلکی و همکاران [۴۸]
۱۱/۴۷	۰/۹۷۸	۱۳/۳۹	وو و ونگ [۴۹]
۹/۴۵	۱/۰۱۵	۱۲/۲۵	مدل فازی پیشنهادی

راه کار برای لحاظ اثر ماده FRP با خواصی کاملاً متفاوت از فولاد و همچنین مقطع مربعی با خصوصیات محصورشدگی متمایز از مقطع دایره‌ای محل بحث و تردید می‌باشد. فولاد رفتار الاستیک-پلاستیک داشته و FRP به شکل الاستیک عمل می‌کند. از سوی دیگر، فولاد شکل‌پذیر بوده و کرنش

نمی‌توان انتظار داشت منحنی تنش-کرنش به صورت یکنوا، صعودی باشد و مقاومت افزایش قابل توجهی پیدا کند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد مدل‌های موجود از تغییر روابط تجربی که در واقع برای مقطع مدور محصورشده با مصالح فولادی ارائه شده بودند، به دست آمده‌اند. البته این

نیز این مراحل تکرار شده و نتایج حاصله در شکل های ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند.

نمودارهای الف و ب شکل ۶، تأثیر شعاع گوشه را بر روی مقاومت فشاری محاسبه شده توسط مدل‌های موجود و مدل فازی پیشنهادی نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود مدل فازی نزدیکترین نتایج را به مقادیر آزمایشگاهی دارد و با شبیهی مناسب اثر شعاع گوشه بر مقاومت فشاری را پیش‌بینی می‌کند. در حالی که سایر مدل‌ها این اثر افزایشی شعاع گوشه بر مقاومت فشاری را یا اصلاً نشان نمی‌دهند (یعنی شیب را برابر با صفر پیش‌بینی می‌کنند) و یا این شیب را متفاوت از واقعیت نشان می‌دهند. همان‌طور که انتظار می‌رفت مشاهده می‌شود هرچه شعاع گوشه بیشتر باشد، عملکرد محصورسازی بهتر خواهد بود و مقاومت فشاری نمونه بتنی محصورشده بالاتر می‌رود. زیرا در این حالت مقطع نمونه‌ها به مقطع دایروی نزدیک‌تر شده و سطح محصورشده مؤثر (شکل ۳) افزایش می‌یابد و تمرکز تنش در گوشه‌ها کمتر خواهد شد.

نمودار شکل ۷ اثر مقاومت مشخصه بتن را بر روی مقاومت فشاری نمونه بتنی مربعی محصورشده با FRP نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش مقاومت مشخصه، مقاومت فشاری بتن محصورشده بالاتر می‌رود. مدل فازی پیشنهادی نسبت به سایر مدل‌ها تطابق بیشتری با نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی دارد و میزان افزایش مقاومت فشاری را بهتر پیش‌بینی می‌کند.

نمودارهای الف، ب و ج شکل ۸، به بررسی تأثیر ضخامت لایه‌های FRP بر روی مقاومت فشاری بتن محصورشده می‌پردازند. همانطور که مشخص است با افزایش ضخامت لایه‌های FRP مقاومت فشاری محصورشده افزایش می‌یابد و نتایج مدل فازی پیشنهادی این موضوع را کاملاً نشان می‌دهد و بیشترین تطابق را با نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی دارد. با مقایسه نمودارهای شکل ۸، مشاهده می‌شود که تأثیر افزایش ضخامت لایه‌های FRP بر روی مقدار مقاومت فشاری بتن محصورشده، برای بتن با مقاومت مشخصه خیلی پایین، بیشتر از بتن با مقاومت مشخصه خیلی بالا، می‌باشد.

#### ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق روش استنتاج مبتنی بر منطق فازی، برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ستون بتنی مربعی محصورشده با

پلاستیک زیادی را تحمل می‌نماید؛ در حالی که FRP، ترد بوده و کرنش نهایی آن بسیار کمتر از فولاد می‌باشد.

در ۹ مدل ارائه شده توسط سایر محققان، از ضریب شکل مقطع استفاده شده است. یعنی مقطع چهارضلعی با مقطعی مدور، معادل‌سازی می‌گردد و تنها برای بخشی از مقطع چهارضلعی که توسط چهار سهمی احاطه شده‌است (شکل ۳)؛ فشار یکنواخت محصورسازی در نظر گرفته می‌شود. جالب آنکه این ضریب شکل در مدل‌های مختلف دارای مقادیر متفاوتی می‌باشد.

برای رفع اشکالات بیان شده در مدل‌های موجود، روش استنتاج مبتنی بر منطق فازی گزینه بسیار مناسبی است. چرا که این قابلیت را دارد تا به طور مستقیم و بدون هیچ پیشفرضی بر روی شکل اولیه رابطه ریاضی و بدون استفاده از ضریب شکل، با لحاظ همه پارامترهای مؤثر در عملکرد مقطع مربعی از جمله شعاع گوشه (که در مقطع دایره‌ای مطرح نیست)، مقاومت فشاری را با دقت خوبی محاسبه کند.

با توجه به ردیف آخر از جدول ۷، مشاهده می‌شود که مدل فازی پیشنهادی با لحاظ همه شاخص‌های دقت مدل شامل MAPE، COV و میانگین از هر ۹ مدل بیان شده دارای عملکرد بهتری می‌باشد.

#### ۶-۳- مطالعه موردی بر روی اثر شعاع گوشه، مقاومت مشخصه بتن و ضخامت FRP بر نتایج مدل

با انجام یک تحلیل حساسیت با استفاده از مدل فازی پیشنهادی تأثیر شعاع گوشه  $r$ ، مقاومت مشخصه بتن  $f_{co}$  و ضخامت FRP،  $t_{FRP}$  بر روی مقاومت فشاری ستون بتنی مربعی محصورشده با FRP مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای مثال به منظور بررسی تأثیر شعاع گوشه، دو نمونه از داده‌های آزمایشگاهی موجود انتخاب شده است به گونه‌ای که پارامترهای دیگر شامل  $b$ ،  $f_{co}$ ،  $t_{FRP}$  و  $E_{FRP}$ ، برای این دو نمونه یکسان باشند، در حالی که مقدار شعاع گوشه متفاوت است.

آنگاه با استفاده از مدل فازی پیشنهادی مقاومت فشاری برای مقادیر مختلف  $r$ ، محاسبه می‌شود. با این توضیح که بقیه پارامترها ثابت فرض شده‌اند. به همین ترتیب تأثیر  $r$  در ۹ مدل دیگر محاسبه و همگی به همراه نتایج آزمایشگاهی در یک نمودار نمایش داده می‌شوند. برای پارامترهای  $f_{co}$  و  $t_{FRP}$

که پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن محصورشده توسط مدل فازی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

۳- مدل فازی پیشنهادی از هر ۹ مدل ارائه شده توسط سایر محققان، دقت بهتری در پیش‌بینی مقدار مقاومت فشاری ستون بتنی مربعی محصورشده با FRP دارد به طوری که مقدار میانگین و ضریب تغییرات آن برای نسبت  $(f_{cc,exp}/f_{cc,pred})$  به ترتیب برابر با ۱/۰۱۵ و ۱۲/۲۵٪ شده است که موجب استفاده اقتصادی‌تر از مصالح FRP می‌شود.

۴- با انجام مطالعه موردی بر روی پارامترهای  $f_{co}$  و  $t_{FRP}$  نشان داده شد که مدل فازی پیشنهادی تأثیر تغییرات این پارامترها را بر روی مقاومت فشاری بتن محصورشده در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به خوبی پیش‌بینی می‌کند.

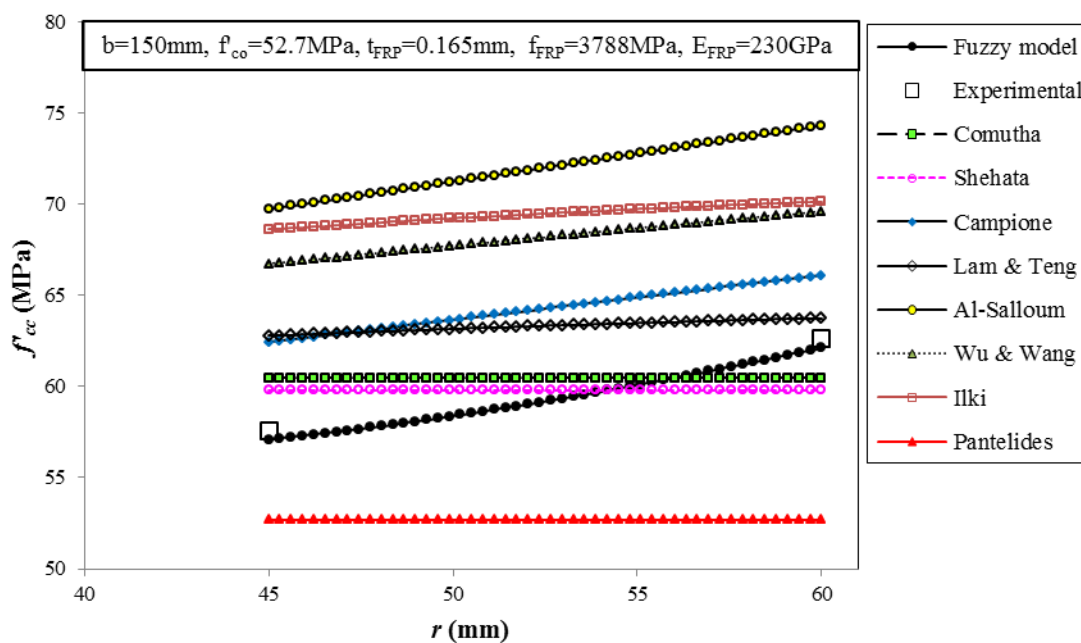
۵- اعتبار مدل فازی پیشنهادی در محدوده داده‌هایی است که مدل آموزش دیده و ساخته شده است. برون‌یابی مدل فازی خارج از این محدوده ممکن است با خطای بیشتری همراه باشد.

FRP، استفاده شده و نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با مجموعه‌ای از نتایج آزمایشگاهی و مدل‌های موجود مقایسه گشته است.

نتایج استخراج شده به شرح زیر می‌باشند:

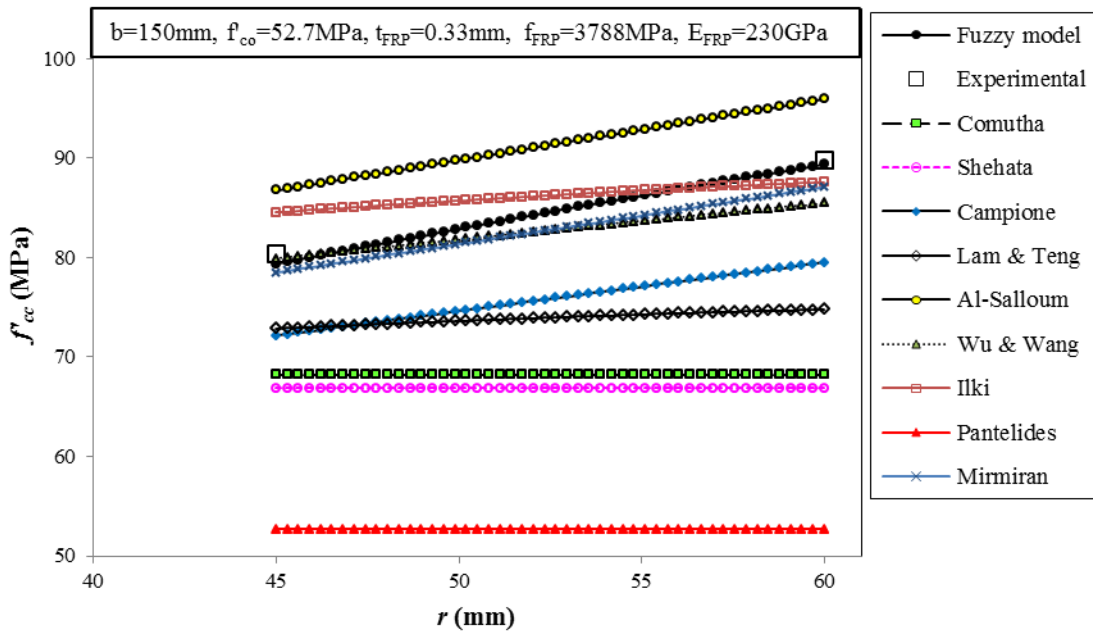
۱- روش استنتاج فازی می‌تواند به عنوان یک روش دقیق و قابل اعتماد جایگزین مدل‌های موجود برای محاسبه مقاومت فشاری ستون بتنی مربعی محصورشده با FRP گردد. قابل توجه آن که در به دست آوردن مدل فازی هیچ یک از فرضیات معمول مدل‌های موجود استفاده نمی‌شود، زیرا روش فازی نیاز به پیش‌فرضی برای ارائه مدل و حل مسئله ندارد. این مدل بدون استفاده از مفهوم فرضی ضریب شکل مقطع که در مدل‌های موجود استفاده می‌شود، اثر شعاع گردی گوشه مقطع را لحاظ می‌کند.

۲- با ارزیابی مدل فازی پیشنهادی در برابر یک مجموعه وسیعی از داده‌های آزمایشگاهی شامل ۱۸۲ نمونه که توسط محققان مختلف آزمایش و گزارش شده بود، مشاهده می‌شود

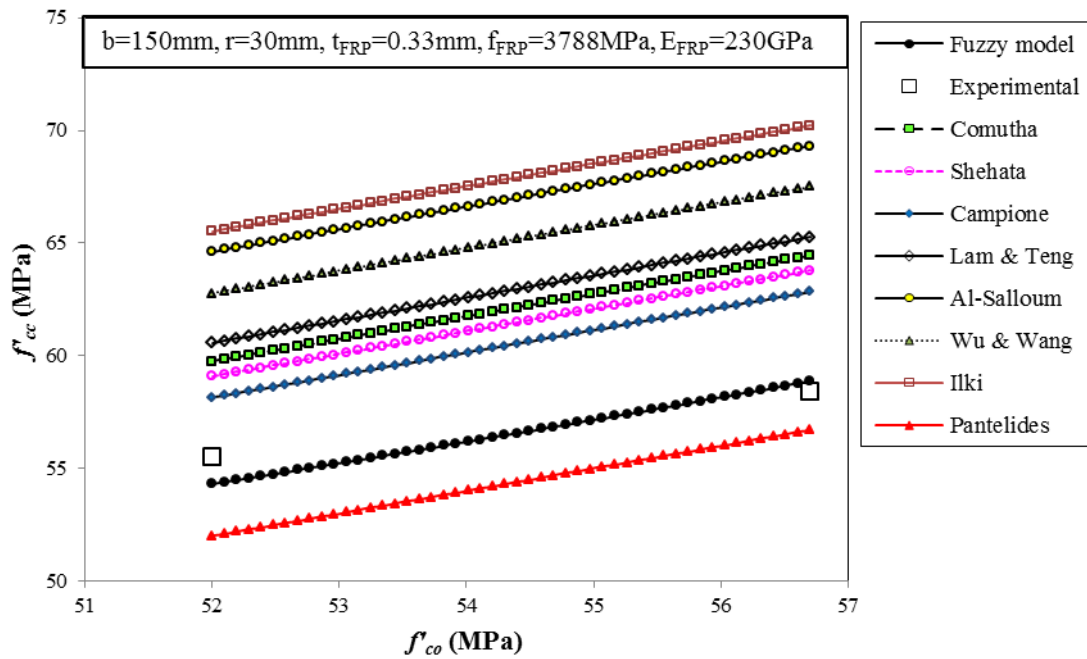


(الف)

شکل ۶- اثر تغییرات مقدار شعاع گوشه بر نتایج پیش‌بینی مدل‌ها برای مقاومت فشاری محصورشده

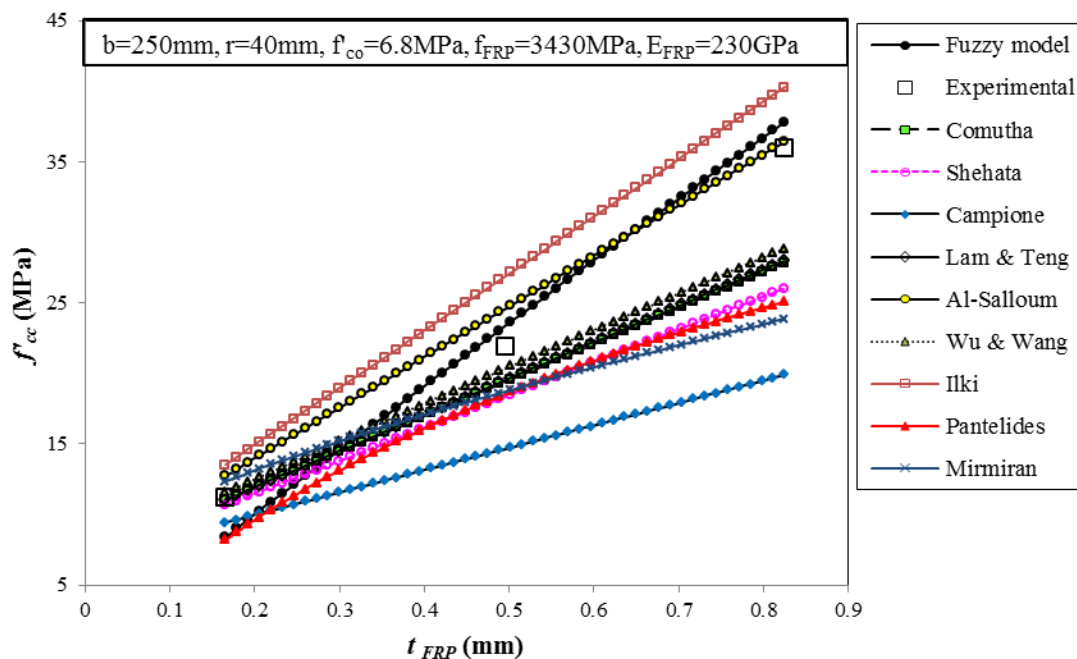


ادامه شکل ۶- اثر تغییرات مقدار شعاع گوشه بر نتایج پیش بینی مدل‌ها برای مقاومت فشاری محصورشده

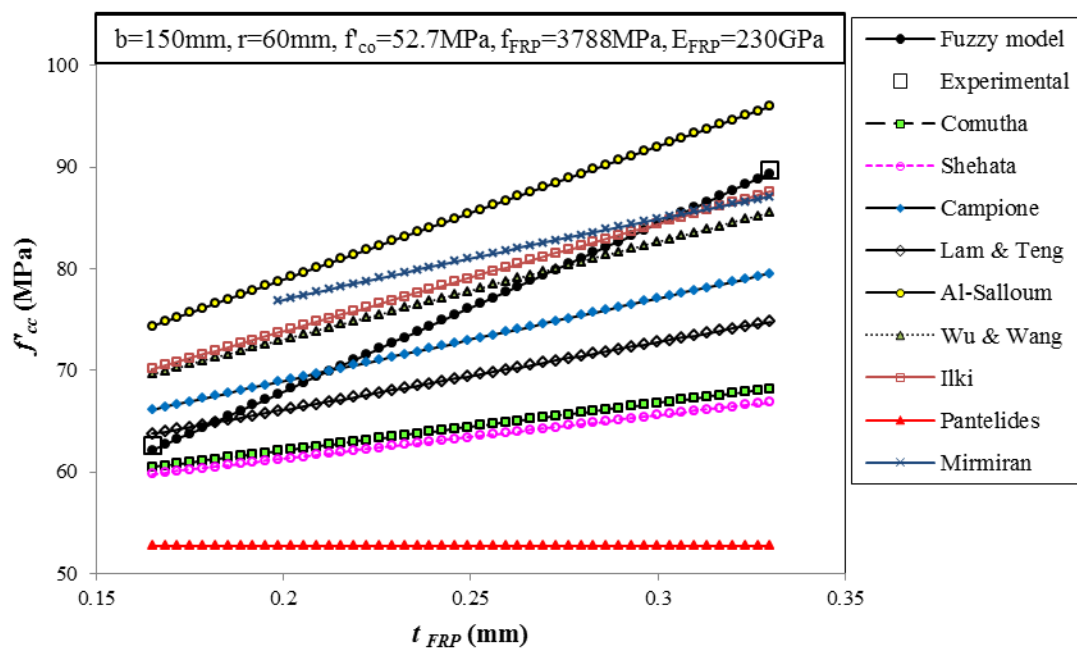


شکل ۷- اثر تغییرات مقدار مقاومت مشخصه بتن بر نتایج پیش بینی مدل‌ها برای مقاومت فشاری محصورشده



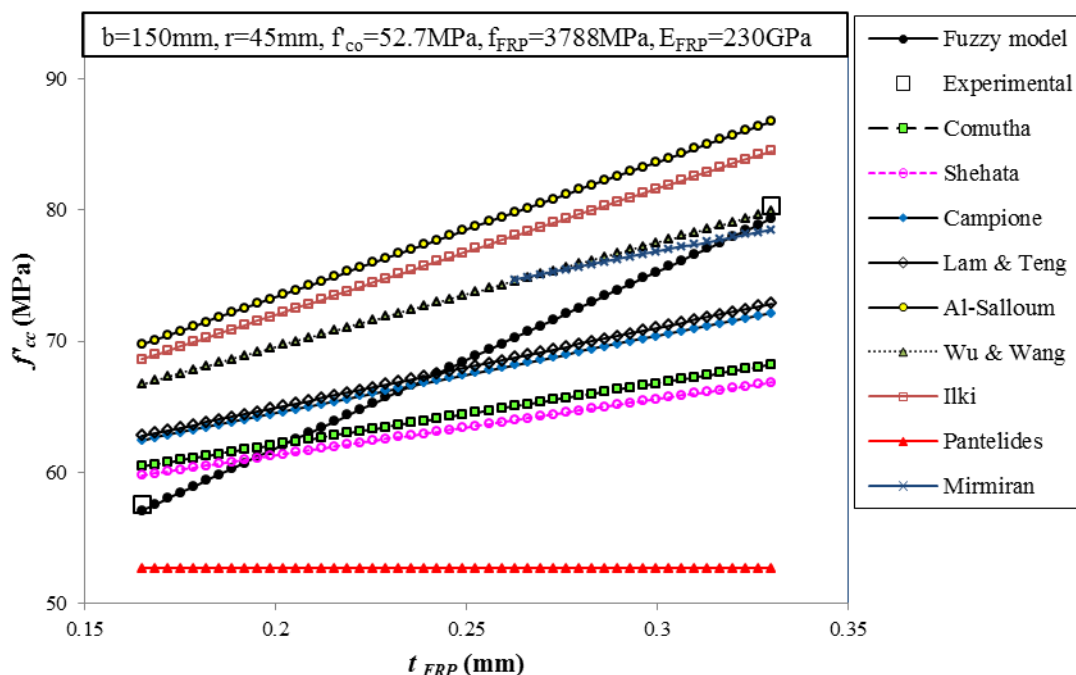


(الف)



(ب)

شکل ۸- اثر تغییرات مقدار ضخامت دورپیچ FRP بر نتایج پیش بینی مدل‌ها برای مقاومت فشاری محصورشده



(ج)

ادامه شکل ۸- اثر تغییرات مقدار ضخامت دورپیچ FRP بر نتایج پیش بینی مدل‌ها برای مقاومت فشاری محصورشده

American Concrete Institute, Proceedings 78(6): 440-446.

- [7] Saadatmanesh H, Ehsani MR, Li MW (1994) Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps. ACI Struct J 91(4): 434-447.
- [8] Samaan M, Mirmiran A, Shahawy M (1998) Model of concrete confined by fiber composites. Journal of Structural Engineering ASCE 124(9): 1025-1031.
- [9] Chaallal O, Hassan M, Shahawy M (2003) Confinement model for axially loaded short rectangular columns strengthened with fiber-reinforced polymer wrapping. ACI Structural Journal 100(2): 215-221.
- [10] Kono S, Inazumi M, Kaku T (1998) Evaluation of confining effects of FRP sheets on reinforced concrete members. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Conference on Composites in Infrastructure ICCI 98, Tucson, Arizona: 343-355.
- [11] Spoelstra MR, Monti G (1999) FRP-confined concrete model. Journal of Composites for Construction ASCE 3(3): 143-150.
- [12] Cevik A, Guzelbey IH (2008) Neural network modeling of strength enhancement for CFRP

## مراجع

- [1] Hollaway LC (2004) Advanced polymer composites for structural applications in construction. ACIC 2004. Woodhead Publishing.
- [2] Lorenzis L (2001) A comparative study of models on confinement of concrete cylinders with FRP composites. PhD thesis, Division for Building Technology, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [3] Richart FE, Brandtzaeg A, Brown RL (1928) A study of the failure of concrete under combined compressive stresses. University of Illinois, Urbana. Engineering Experiment Station Bulletin, No.185.
- [4] Suter R, Pinzelli R (2001) Confinement of concrete columns with FRP sheets. In: Proceedings, Fifth International Conference on Fibre Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures, Cambridge, UK: 793-802.
- [5] Mander JB, Priestley MJN, Park R (1988) Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of Structural Engineering, ASCE 114(8): 1804-1826.
- [6] Fardis MN, Khalili H (1981) Concrete encased in fiberglass-reinforced-plastic. Journal of the

- [26] Mander JB, Priestley MJN, Park R (1988) Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 114(8): 1804–1826.
- [27] Teng JG, Chen JF, Smith ST, Lam L (2002) FRP strengthened RC structures. John Wiley and Sons. West Sussex, England: pp 1–10, 100–108, 148–236.
- [28] Rochette P, Labossiere P (2000) Axial testing of rectangular column models confined with composites. *Journal of Composites for Construction* 4(3): 129–136.
- [29] Zadeh LA (1965) Fuzzy sets. *Journal of Information and Control* 8(3): 338–353.
- [30] Rutkowski L (2004) Flexible neuro-fuzzy systems: Structures, learning and performance evaluation. Kluwer Academic Publishers.
- [31] Sivanandam SN, Sumathi S, Deepa SN (2007) Introduction to fuzzy logic using MATLAB. Springer.
- [32] Haris J (2006) Fuzzy logic applications in engineering science. Springer.
- [33] Bai YY, Zhuang H, Wang D (2006) Advanced fuzzy logic technologies in industrial applications. Springer.
- [34] Jang JSR, Sun CT, Mizutani E (1997) Neuro-fuzzy and soft computing: A Computational approach to learning and machine intelligence. Prentice Hall.
- [35] Wang LM, Wu YF (2008) Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test. *Engineering Structures* 30: 493–505.
- [36] Ilki A, Kumbasar N, Koc V (2004) Low strength concrete members externally confined with FRP sheets. *Int J Struct Eng Mech* 18(2): 167–194.
- [37] Wu YF, Tao L, Oehlers DJ (2006) Fundamental principles that govern retrofitting of reinforced concrete columns by steel and FRP jacketing. *Advances in Structural Engineering* 9(4): 507–533.
- [38] Pessiki S, Harries KA, Kestner JT, Sause R, Ricles JM (2001) Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets. *Journal of Composites for Construction ASCE* 5(4): 237–245.
- [39] Restrepol JI, De Vino B (1996) Enhancement of the axial load-capacity of reinforced concrete columns by means of fiberglass-epoxy jackets. In: El-Badry, M.M.(ed.), *Proceedings, Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Montreal, Canada: 547–690.
- confined concrete cylinders. *Building and Environment* 43(5): 751–763.
- [13] Cevik A, Tolga MG, Guzelbey IH, Filiz H (2010) Soft computing based formulation for strength enhancement of CFRP confined concrete cylinders. *Advances in Engineering Software* 41(4): 527–536.
- [14] Cevik A (2011) Modeling strength enhancement of FRP confined concrete cylinders using soft computing. *Expert Systems with Applications* 38(5): 5662–5673.
- [15] Fardis MN, Khalili H (1982) FRP-encased concrete as a structural material. *Magazine of Concrete Research* 34(122): 191–202.
- [16] Karbhari VM, Gao Y (1997) Composite jacketed concrete under uniaxial compression – verification of simple design equations. *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE* 9(4): 185–193.
- [17] Miyauchi K, Inoue S, Kuroda T, Kobayashi A (1999) Strengthening effects of concrete columns with carbon fiber sheet. *Transactions of The Japan Concrete Institute* 21: 143–150.
- [18] Saafi M, Toutanji HA, Li Z (1999) Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes. *ACI Materials Journal* 96(4): 500–509.
- [19] Toutanji HA (1999) Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets. *ACI Materials Journal* 96(3): 397–404.
- [20] Xiao Y, Wu H (2000) Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets. *Journal of Materials in Civil Engineering* 12(2): 139–146.
- [21] Lam L, Teng JG (2003) Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. *Journal of Construction and Building Materials*, 17: 471–489.
- [22] Park R, Paulay T (1975) Reinforced concrete structures. John Wiley & Sons, NY, USA.
- [23] Mirman A, Shahawy M, Samman M, Echary H, Mastrapa JC, Pico O (1998) Effect of column parameters on FRP-confined concrete. *Journal of Composites for Construction* 2(4): 175–185.
- [24] Purba BK, Mufti AA (1999) Investigation of the behavior of circular concrete columns reinforced with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) jackets. *Canadian Journal of Civil Engineering* 26(4): 590–596.
- [25] Lam L, Teng JG (2003) Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 22(13): 1149–1186.

- [48] Ilki A, Peker O, Karamuk E, Demir C, Kumbasar N (2008) FRP retrofit of low and medium strength circular and rectangular concrete columns. *Journal of Materials in Civil Engineering* 20(2): 169–188.
- [49] Wu YF, Wang LM (2008) A unified model for the compressive strength of FRP-confined square and circular concrete columns. Forth International conference on FRP composites in civil Engineering (CICE2008), Zurich, Switzerland.
- [50] Pantelides CP, Yan Z (2007) Confinement model of concrete with externally bonded FRP jackets or post tensioned FRP shells. *Journal of Structural Engineering* 133(9): 1288–1296.
- [51] Shehata IAEM, Carneiro LAV, Shehata, LCD (2002) Strength of short columns confined with CFRP sheets. *Journal of Material and Structures* 35(1): 50–58.
- [52] Kumutha R, Vaidoyanathan R, Palanichamy MS (2007) Behavior of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP. *Journal of Cement & Concrete Composites* 29: 609–615.
- [53] Demers M, Neale KW (1994) Strengthening of concrete columns with unidirectional composite sheets. In: Mufti, A.A., Bakht, B. and Jaeger, L.G. (eds), *Development in Short and Medium Span Bridge Engineering '94*, Proceedings of the Fourth International Conference on Short and Medium Span Bridges, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Canada: 895–905.
- [54] Wu Yi-bin, Jin Guo-fang, Ding Ting and Meng Dong (2010) Modeling confinement efficiency of frp-confined concrete column using radial basis function neural network. *Intelligent Systems and Applications (ISA)*, 2nd International Workshop on IEEE.
- [40] Wang YC, Restrepo JI (2001) Investigation of concentrically loaded reinforced concrete columns confined with glass fiber-reinforced polymer jackets. *ACI Structural Journal* 98(3): 377–385.
- [41] Chun SS, Park HC (2002) Load carrying capacity and ductility of RC columns confined by carbon fiber reinforced polymer. In: *Proceedings, Third International Conference on Composites in Infrastructure*.
- [42] Parretti R, Nanni A (2002) Axial testing of concrete columns confined with carbon FRP: effect of fiber orientation. In: *Proceedings, Third International Conference on Composites in Infrastructure*.
- [43] Pulido C, Saiidi MS, Sanders D, Itani A (2002) Experimental validation and analysis of a CFRP-retrofit of a two-column bent. In: *Proceedings, Third International Conference on Composites in Infrastructure*.
- [44] Campione G, Miraglia N (2003) Strength and strain capacities of concrete compression members reinforced with FRP. *Cement and Concrete Composites* 25: 31–41.
- [45] Al-Salloum YA (2007) Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates. *Journal of Composites, Part B: engineering* 38: 640–650.
- [46] Parvin A, Wang W (2001) Behavior of FRP jacketed concrete columns under eccentric loading. *Journal of Composites for Construction* 5(3): 146–152.
- [47] Rousakis TC, Karabinis AI, PD (2007) FRP-confined concrete members: axial compression experiments and plasticity modeling. *Engineering Structures* 29(7): 1343–1353.