



## بررسی آماری اثر مقاومت و قطر ستون بر ظرفیت باربری ستون‌های بتنی محصور شده با دورپیچ‌های CFRP

مریم حبیبی خراسانی<sup>۱</sup> و محمد رضا توکلی زاده<sup>۲</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

drt@um.ac.ir

### خلاصه

امروزه بسیاری از سازه‌های بتنی زیربنایی به دلیل قدمت ساخت، فرسودگی یا عدم انطباق با آیین‌نامه‌های جدید طراحی، نیازمند مقاوم‌سازی می‌باشند. تقویت ستون‌های بتنی با استفاده از دورپیچ‌های ساخته شده از پلیمرهای مسلح با الیاف (FRP) به دلیل مزایایی که دارد، یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها مطرح شده و کاربرد آن رشد زیادی نموده است. خرابی چنین ستون‌هایی اغلب با پارگی دورپیچ رخ می‌دهد. اهمیت تخمین ضریب بهره‌وری کرنش ( $K_c$ )، به منظور تعیین فشار محصورکنندگی بیشینه و در نتیجه ظرفیت باربری ستون دورپیچ شده، اهمیت ویژه‌ای دارد. تاکنون پژوهش‌های بسیاری درباره اندازه  $K_c$  انجام شده است. برخی از پژوهش‌گران این ضریب را معادل عدد یک تخمین زده و برخی دیگر سعی بر آن داشته‌اند که با استفاده از جمع‌آوری نتایج آزمایشگاهی و ایجاد یک پایگاه داده معتبر، رابطه‌ای برای تخمین بهتر آن ارائه دهند. در این پژوهش تلاش شده تا با تکمیل و بروزرسانی پایگاه داده‌های معتبر موجود، اثر پارامترهایی همچون مقاومت فشاری بتن و قطر ستون در تعیین مقدار  $K_c$  برای ستون‌های بتنی دورپیچ شده با دورپیچ‌های پلیمر مسلح با الیاف کربن (CFRP) مورد بررسی قرار گیرد. در نتیجه با استفاده از تحلیل‌های آماری مانند درون‌یابی داده‌ها، رابطه‌ی کاربردی و دقیقی برای تخمین  $K_c$  دورپیچ‌های CFRP پیشنهاد گردد.

**کلمات کلیدی:** محصور شدگی، دورپیچ CFRP، ضریب بهره‌وری کرنش، تنش نهایی موثر، روش‌های آماری

### ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از پلیمرهای مسلح با الیاف (FRP) در تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و به خصوص ستون‌های بتنی جایگاه خاصی پیدا نموده است. مرسوم‌ترین شکل مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی با مصالح FRP شامل دورپیچ کردن بیرونی ستون با استفاده از ورق‌ها یا نوارهای FRP است. از آنجایی که الیاف کربن نسبت به سایر انواع الیاف از مقاومت و مدول الاستیسیته‌ی بالاتری برخوردارند، لذا FRP‌های کربنی (CFRP) بهترین گزینه جهت استفاده در بهسازی ساختمان می‌باشند. از دیگر مزیت‌های CFRP می‌توان به مقاومت بالا در مقابل خستگی اشاره کرد. از طرف دیگر دوام یک خصوصیت مهم در انتخاب نوع FRP به منظور پایداری در برابر بارهای لرزه‌ای می‌باشد که به صورت کار مورد نیاز برای شکست در واحد حجم تعریف می‌شود. CFRP دارای بیشترین دوام و پایایی بوده و در زمینه مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی در مقوله پایایی، بهترین گزینه می‌باشد. پژوهشگران بسیاری در این زمینه به پژوهش پرداخته‌اند اما هنوز رفتار FRP به خصوص در تقویت ستون‌ها به طور کامل شناخته شده نیست؛ به طوری که استانداردهای معتبر دنیا هم هنوز بسیاری از جنبه‌های مهم رفتاری آنها را مسکوت گذاشته‌اند. یکی از موارد ناشناخته در این زمینه، ضریب بهره‌وری کرنش یا ضریب  $K_c$  می‌باشد که برای مدل‌سازی کاهش ظرفیت کرنش نهایی دورپیچ‌های FRP به کار برده می‌شود. زیائو و وو [۱] در سال ۲۰۰۰ با انجام آزمایش‌هایی نتیجه گرفتند که دورپیچ کردن ستون‌های بتنی با CFRP، مقاومت فشاری و شکل‌پذیری بتن را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. همچنین شکست نمونه با پارگی دورپیچ کنترل شده و کرنش متوسط دورپیچ در لحظه‌ی گسیختگی بسیار کمتر از کرنش نهایی به دست آمده از آزمایش‌های نمونه‌های تخت است. به اعتقاد آن‌ها مهم‌ترین عواملی که باعث تمرکز تنش و توزیع غیریکنواخت





کرنش می‌شود شامل مواردی از قبیل انحنای دورپیچ FRP، وجود تنش سه محوره، تغییر شکل غیریکنواخت بتن ترک خورده و وجود منطقه همپوشانی می‌باشد.

در همین راستا لم و تنگ [۲] در سال ۲۰۰۳ برای مدل‌سازی این پدیده، رابطه زیر را برای محاسبه کرنش گسیختگی واقعی ورقه‌های FRP دورپیچ شده به دور نمونه ستون‌های استوانه‌ای، پیشنهاد نمودند.

$$\varepsilon_{h,rup} = K_e \varepsilon_{frp} \quad (1)$$

در رابطه (۱)  $\varepsilon_{h,rup}$  کرنش حلقوی پارگی FRP چسبیده به بتن،  $\varepsilon_{frp}$  کرنش پارگی کششی حاصل از آزمایش نمونه تخت FRP و  $K_e$  عامل بهره‌وری کرنش FRP بوده و برای مدل‌سازی نارسایی و شکست زود هنگام سیستم FRP محاسبه می‌شود. در ادامه این دو پژوهشگر نتیجه گرفتند که نسبت متوسط  $\varepsilon_{h,rup}/\varepsilon_{frp}$  برای نمونه‌های با انواع مختلف FRP، متفاوت است و به طور میانگین دارای اندازه ۰/۶۳ است. این نسبت برای دورپیچ CFRP معادل ۰/۵۸۶ برآورد می‌شود. بر همین اساس کمیته ۴۴۰ انجمن بتن آمریکا [۳]، با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و تحقیقات مختلف، عدد ۰/۵۵ را به عنوان ضریب  $K_e$  برای انواع FRP معرفی کرده‌است. لازم به ذکر است که در بعضی از آیین‌نامه‌ها ممکن است که این ضریب به صراحت بیان نشده باشد اما مفهوم آن به طور ذاتی در ضرایب تجربی گنجانده شده‌است.

بررسی ارزش  $K_e$  گزارش شده توسط محققین مختلف نشان می‌دهد طیف ۱/۱۳۳ تا ۰/۲۷۴ برای ستون محصور شده با CFRP پیشنهاد شده‌است. با این وجود بیشترین پراکندگی اندازه  $K_e$  بین ۰/۵ تا ۰/۷ گزارش شده‌است. این طیف گسترده را می‌توان با مراجعه به جدول (۱) مشاهده نمود. در این جدول مقدار ضریب بهره‌وری CFRP پیشنهادی توسط پژوهشگران مختلف به طور خلاصه آورده شده‌است. نکته قابل تذکر این است که علت بیشتر از یک بودن مقدار  $K_e$  در برخی از گزارش‌ها دلایلی از قبیل استفاده از استوانه‌های یکپارچه‌ی CFRP که ناحیه‌ی همپوشانی ندارند و استفاده از آزمون تقسیم دیسک به جای آزمون نمونه‌ی تخت می‌باشد.

جدول ۱- مقادیر ضریب  $K_e$  پیشنهادی توسط پژوهشگران مختلف برای نمونه‌های استوانه‌ای دورپیچ شده با CFRP

نام پژوهشگر	تعداد نمونه	تعداد کرنش سنج	نام تجاری FRP	$K_e$
زیانو و وو [۱]	۲۵	۲	-	۰/۵۳۳
دلورنسیس و همکاران [۴]	۴	۲	-	۰/۶۸۷
هریس و خارل [۵]	۳	-	-	۱/۱۳۲
تپفر و همکاران [۶]	۷	-	-	۰/۲۷۴
لم و تنگ [۲]	۹	۵	SikaWrap 300C/60	۰/۶۳۷
جیانگ و تنگ [۷]	۶	۵	SikaWrap 300C/60	۰/۶۱۲
ونگ و وو [۸]	۸	۲	MBrace CF130W	۰/۶۷۰
ونگ و وو [۸]	۸	۲	SIRIG Carbopree HS300	۰/۸۲۶
بیسبی و تیک [۹]	۳	۴	SikaWrap Hex 230C	۰/۹۰۲
کیو [۱۰]	۶	۲	TU cloth HM300S	۱/۱۳۳
کیو [۱۰]	۶	۲	TU cloth ST200	۰/۸۷۰
وو و جیانگ [۱۱]	۲۶	۵	TORAY UT70-30	۰/۹۰۱

به منظور تخمین دقیق‌تر و اقتصادی‌تر از ضریب  $K_e$  برخی از پژوهشگران به ارائه رابطه برای این ضریب پرداختند. برای اولین بار متیس و همکاران [۱۲] در سال ۱۹۹۹ توانستند با ارائه رابطه‌ی (۲) ضریب  $K_e$  را تخمین بزنند.



$$K_E = 0.105(\kappa_{conf})^{0.266} = 0.105(2.t_j.E_f/D)^{0.266} \quad (2)$$

در این رابطه  $t_j$  ضخامت دورپیچ،  $E_f$  مدول الاستیسته FRP و  $D$  قطر استوانه بتنی می‌باشد. نکته قابل تذکر این است که برای ارائه این رابطه فقط مجموعه داده‌های تجربی در نظر گرفته شده است که  $K_{conf}/f_{co} > 5$  باشد.  $K_{conf}$  سختی محصوریت دورپیچ بوده و  $f_{co}$  مقاومت بتن محصور نشده می‌باشد.

پس از آن در سال ۲۰۱۱، رالفونزو و ناپلی [۱۳] یک پایگاه داده‌ی بزرگ شامل ۴۵۰ نمونه آزمایشگاهی استوانه‌ی بتنی تقویت شده با دورپیچ FRP را جمع‌آوری کردند نتایج جمع‌آوری شده برای اولین بار برای انجام ارزیابی آماری از عامل بهره‌وری کرنش استفاده شد. در این پژوهش میانگین مقدار  $K_E$  برای CFRP معادل ۰/۶ برآورد شده است. همچنین برای تمام انواع بتن محصور نشده رابطه‌ی زیر برای تخمین ضریب  $K_E$  پیشنهاد شده است.

$$K_E = -3 \cdot 10^{-5} \kappa_{conf} + 0.6378 \quad (3)$$

$$\kappa_{conf} = 2.t_j.E_f/D \quad (4)$$

برای بتن محصور نشده با مقاومت کمتر از ۴۰ مگاپاسکال نیز رابطه زیر ارائه شده است.

$$K_E = -3 \cdot 10^{-5} \kappa_{conf} + 0.6806 \quad (5)$$

در این رابطه  $t_j$  ضخامت دورپیچ،  $E_f$  مدول الاستیسته FRP و  $D$  قطر استوانه بتنی می‌باشد. نکته قابل تذکر این است که در این رابطه فقط مجموعه داده‌های تجربی در نظر گرفته شده است که  $K_{conf}/f_{co} > 5$  باشد. در این رابطه  $f_{co}$  مقاومت بتن محصور نشده است. همچنین این پژوهشگران دریافتند که به طور کلی  $K_E$  با افزایش مقاومت بتن محصور نشده کاهش می‌یابد. علاوه بر این هر چه سختی محصوریت ( $K_{conf}$ ) بیشتر شود، مقدار  $K_E$  با نرخ کمی کاهش می‌یابد.

از یک کالوقلو و لیم [۱۴] در سال ۲۰۱۳ موفق شدند که پایگاه داده‌ی جامع‌تر و کامل‌تری جمع‌آوری کنند. این پایگاه داده از طریق بررسی و جمع‌آوری ۳۰۴۲ نتیجه‌ی آزمایش از ۲۵۳ مقاله‌ی منتشر شده بین سال‌های ۱۹۹۱ تا اواسط ۲۰۱۳ تنظیم شده است. این پژوهشگران برای تخمین  $K_E$  رابطه زیر را بیان کرده‌اند:

$$K_{E,f} = 0.9 - 2.3f_{co} \cdot 10^{-3} - 0.75E_f \cdot 10^{-6} \quad (6)$$

در این رابطه  $f_{co}$  مقاومت بتن محصور نشده و  $E_f$  مدول الاستیسته الیاف در دورپیچ FRP می‌باشد.  $E_f$  و  $f_{co}$  هر دو بر حسب مگاپاسکال هستند. این معادله برای  $f_{co}$  کمتر از ۱۲۰ مگاپاسکال و برای دورپیچ‌های CFRP، GFRP، AFRP و HM CFRP کاربرد دارد. در نهایت نیز این دو پژوهشگر برای بتن با مقاومت کم و دورپیچ CFRP مقدار  $K_E$  برابر با ۰/۶۳ را پیشنهاد کردند.

این پژوهشگران طی مطالعه‌ی دیگری [۱۵] به صورت تجربی به بررسی صحت معادله‌ی پیشنهادی پرداختند. طی این پژوهش برای ۱۲ نمونه استوانه‌ای دورپیچ شده با CFRP رابطه‌ی زیر پیشنهاد گردیده است.

$$K_{E,f} = 0.817 - 0.0020f_{co} \quad (7)$$

در ادامه این پژوهش و پس از جمع‌آوری پایگاه داده برای نمونه‌های دورپیچ شده با CFRP و استفاده از اطلاعات ۲۱۹ نمونه، رابطه‌ی زیر را به دست آورده‌اند.

$$K_{E,f} = 0.767 - 0.0026f_{co} \quad (8)$$

## ۲. تخمین ضریب $K_E$

در مورد تخمین ضریب  $K_E$  در پژوهش‌ها معمولاً دو نوع رویکرد وجود دارد. در رویکرد اول پژوهشگران به انجام آزمایش‌های تجربی و جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی مشابه شرایط آزمایشگاهی خود پرداخته و میانگین نتایج به دست آمده را به عنوان بهترین مقدار برای  $K_E$  مطرح می‌کنند. اما در



رویکرد دوم، به جمع‌آوری پایگاه داده‌ی بزرگ شامل انواع مختلف نمونه‌ها و شرایط آزمایشگاهی متفاوت به صورت طبقه‌بندی شده پرداخته و با انجام بررسی‌های آماری به کمک نرم‌افزارهای مختلف، مدل‌های طراحی گرا و تحلیل گرا برای تخمین  $K_E$  ارائه کرده‌اند. رویکرد اول از نظر آماری، قابل قبول نمی‌باشد. چرا که نمونه‌های محدود در یک دسته آزمایش، عموماً رفتار هدفمند را به درستی نشان نمی‌دهند. به همین دلیل برای رفع این کاستی باید از پایگاه داده‌های بزرگ‌تر استفاده کرد تا طیف گسترده‌ای از متغیرهای تاثیرگذار را پوشش دهد. همچنین از آنجایی که اختصاص یک عدد برای ضریب  $K_E$  برای شرایط مختلف مقاوم‌سازی نظیر ابعاد متفاوت ستون‌ها، گونه‌های مختلف FRP و مقاومت‌های متفاوت بتن، امری غیر اقتصادی می‌باشد و در برخی موارد ممکن است ناایمن نیز باشد، تمایل محققان به رویکرد دوم در سال‌های اخیر بیشتر شده‌است. از طرفی دیگر پیشرفت چشم‌گیر نرم‌افزارهای آماری که با سرعت بالا، محاسبات پیچیده و زمان‌بر را انجام می‌دهند و نتایج حاصله را به راحتی در دسترس کاربر قرار می‌دهند، از دیگر عوامل ترغیب محققان به رویکرد دوم می‌باشد.

### ۳. جمع‌آوری داده‌ها

پایگاه داده‌ی جمع‌آوری شده در این پژوهش برای ستون‌های بتنی دورپیچ شده با مصالح CFRP شامل ۸۸ نمونه آزمایشگاهی می‌باشد. این داده‌ها با استفاده از معیارهای مشخصی با دقت انتخاب شده‌اند تا نتیجه‌ی قابل اعتمادی را به ارمغان بیاورند. معیارهای انتخاب داده در این پژوهش به شرح زیر است:

- نمونه‌ی بتنی دایروی محصور شده با الیاف در جهت حلقوی باشد.
- بدون فولاد طولی یا عرضی باشد.
- محصورشدگی به طور کامل باشد نه به صورت منقطع.
- دورپیچ به صورت خیس چسبانده شده باشد.
- نسبت ارتفاع به قطر نمونه کمتر از ۳ برای حذف اثرات لاغری باشد.
- شکست نمونه تنها با پارگی دورپیچ رخ داده باشد.
- شرایط نهایی به صورت ثبت دقیق با ابزارها و تجهیزات کافی باشد.
- جزئیات کافی درباره‌ی ویژگی‌های مواد و هندسه نمونه‌ها گزارش شده باشد.

پایگاه داده‌ی جمع‌آوری شده شامل ۴ داده از نمونه‌های دلتورنسیس و همکاران [۱۶]، ۴۰ داده از نمونه‌های خوشزاد [۱۷]، ۱۲ داده از نمونه‌های لیم و ازبک‌کالوقلو [۱۵]، ۱ داده از نمونه‌های بیچر و همکاران [۱۸]، ۳ داده از نمونه‌های رچت و لایوسیر [۱۹]، ۱ داده از نمونه‌های روساکیس [۲۰]، ۲ داده از نمونه‌های شهاوی و همکاران [۲۱] و ۲۵ داده از نمونه‌های زیائو و وو [۱] می‌باشد.

### ۳. تحلیل و بررسی داده‌ها

پس از جمع‌آوری داده‌ها، به منظور تحلیل و بررسی آن‌ها از نرم‌افزار اکسل<sup>۱</sup> استفاده شده‌است. با استفاده از این نرم‌افزار، میانگین ضریب  $K_E$  برای دورپیچ CFRP معادل ۰/۶۶۷ محاسبه گردیده‌است.

<sup>۱</sup> Excel



**تأثیر قطر نمونه بر ضریب  $K_E$ :** با افزایش قطر نمونه، مقدار میانگین ضریب  $K_E$  کاهش می‌یابد. از آن جایی که احتمال یافتن نقص در نمونه‌های بزرگ‌تر، بیشتر است؛ بنابراین با افزایش قطر نمونه‌ها، احتمال وجود نقص‌هایی که باعث کاهش ضریب  $K_E$  می‌شوند، افزایش می‌یابد.

**تأثیر مقاومت بتن محصور نشده بر ضریب  $K_E$ :** با افزایش مقاومت بتن محصور نشده، ضریب  $K_E$  کاهش می‌یابد. دلیل این امر نیز این موضوع می‌تواند باشد که معمولاً برای افزایش مقاومت فشاری بتن، نسبت سنگدانه را در طرح اختلاط بتن افزایش می‌دهند. با افزایش میزان سنگدانه‌ها در بتن، احتمال ایجاد تمرکز کرنش در محل سنگدانه نیز افزایش می‌یابد. افزایش احتمال تمرکز کرنش، موجب تغییر ناهمگون الگوهای ترک بتن می‌شود. به عبارت دیگر باعث تبدیل ترک‌های کوچک به ترک‌های بزرگ می‌گردد. این موضوع نیز موجب کاهش ضریب  $K_E$  می‌گردد.

#### ۴. پیشنهاد رابطه برای تخمین ضریب کارایی کرنش $K_E$

به جهت ارائه‌ی رابطه برای ضریب  $K_E$  از نرم‌افزار سیگماپلات<sup>۱</sup> بهره گرفته شده است. این نرم‌افزار یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای روز دنیا برای درون‌یابی داده‌ها بوده که به ابزارهای پیشرفته‌ای برای انجام محاسبات ریاضی پیچیده و زمان‌بر روی داده‌های ورودی مجهز شده است. همچنین این نرم‌افزار تمام داده‌های آماری را به صورت مشورتی با کاربر تحلیل کرده تا بتواند تا حد امکان از اشتباه‌های آماری جلوگیری نماید.

در نرم‌افزار سیگماپلات قبل از انجام درون‌یابی، ابتدا باید یک رابطه‌ی کلی با پارامترهای مجهول، در نظر گرفت و به نرم‌افزار معرفی کرد. سپس نرم‌افزار با استفاده از بهینه‌سازی، پارامترهای مجهول در رابطه‌ی معرفی شده را تعیین می‌کند. برای ارائه‌ی یک رابطه‌ی کاربردی و مناسب می‌توان توابع مختلفی به عنوان تابع هدف بهینه‌یابی معرفی کرد. نرم‌افزار هر یک از این توابع هدف را بهینه کرده و وزن پارامترهای تأثیرگذار در ضریب  $K_E$  را مشخص می‌کند. نکته‌ی قابل به ذکر این است که در نرم‌افزار سیگماپلات یک سری توابع هدف به صورت پیش فرض تعریف شده‌اند که در صورت تمایل، کاربر می‌تواند به راحتی از این مدل توابع بهره گیرد. توابعی از قبیل توابع خطی، لگاریتمی، توانی، سه بعدی و بسیاری دیگر در این نرم‌افزار گنجانده شده‌اند. در این پژوهش ابتدا توابع هدف به صورت دستی توسط کاربر معرفی شده و سپس برای تحلیل و بررسی بیشتر از توابع پیش فرض نرم‌افزار نیز استفاده شده است. در توابع هدف معرفی شده به نرم‌افزار، برای تخمین ضریب  $K_E$  از چهار پارامتر قطر نمونه، ضخامت دورپیچ CFRP، مقاومت بتن محصور نشده و مدول الاستیسیته‌ی CFRP بهره گرفته شده است. در نهایت نتایج زیر حاصل آمده است:

- شکل جمع پارامترها با توان‌های مختلف، بهترین درون‌یابی برای تخمین ضریب  $K_E$  را ارائه می‌نماید.
- روابطی که در آن ضریب  $K_E$  تابعی از مقاومت بتن محصور نشده یا ترکیبی از آن با پارامترهای دیگر است، به نتایج تجربی نزدیک‌تر است.
- مقاومت بتن محصور نشده و قطر ستون به ترتیب بیشترین تأثیر را در ضریب  $K_E$  دارا می‌باشند. همچنین مدول الاستیسیته CFRP کمترین تأثیر در ضریب  $K_E$  را دارا است.
- بهترین رابطه‌ی حاصل از درون‌یابی داده‌های مربوط به دورپیچ CFRP به شکل زیر می‌باشد:

$$K_E = -4.0890 + D^{0.1739} + f_{co}^{-0.5015} + t_j^{-0.1380} + E_f^{0.2408} \quad (9)$$

- مقدار میانگین آزمایشگاهی  $K_E$  / محاسباتی  $K_E$  برای رابطه (۹) برابر ۱/۰۳۷ و انحراف از معیار آن معادل ۰/۵۲۱ محاسبه می‌باشد.
- برای ساده‌سازی رابطه (۹)، روابط مختلفی با توان‌های متفاوت، مورد آزمون و خطا قرار گرفته و در نهایت رابطه‌ی (۱۰) پیشنهاد می‌گردد:

$$K_E = -4.09 + D^{0.17} + f_{co}^{-0.50} + t_j^{-0.14} + E_f^{0.24} \quad (10)$$

<sup>1</sup> Sigmaplot

- مقدار میانگین آزمایشگاهی  $K_E$  / محاسباتی  $K_E$  برای رابطه (۹) معادل  $1/0.91$  و انحراف از معیار آن برابر  $0/474$  می‌باشد. این در حالی است که مقدار میانگین آزمایشگاهی  $K_E$  / محاسباتی  $K_E$  برای رابطه (۱۰) معادل  $1/0.89$  بوده و دارای انحراف از معیاری برابر  $0/472$  می‌باشد.

## ۵. مقایسه نتایج

جهت مقایسه‌ی رابطه‌ی (۱۰) با روابط پیشنهادی سایر محققان، ابتدا باید مقدار میانگین آزمایشگاهی  $K_E$  / محاسباتی  $K_E$  را محاسبه نمود. نکته‌ی قابل تذکر این است که چنانچه میانگین آزمایشگاهی  $K_E$  / محاسباتی  $K_E$  بالاتر از یک باشد به معنی این است که ضریب  $K_E$  محاسباتی بزرگ‌تر از ضریب  $K_E$  آزمایشگاهی است. به عبارت دیگر هرچه میانگین بالاتر از یک باشد، رابطه غیرمحافظة کارانه‌تر است. لذا مدلی مطلوب‌تر تلقی می‌شود که مقدار میانگین آزمایشگاهی  $K_E$  / محاسباتی  $K_E$  آن به یک نزدیک‌تر باشد. همچنین هرچه انحراف از معیار برای یک رابطه بیشتر باشد، پراکندگی داده‌ها در آن مدل بیشتر بوده و دقت رابطه‌ی پیشنهادی کمتر است. بنابراین هرچه انحراف از معیار برای یک مدل کمتر باشد، مطلوب‌تر محسوب می‌شود. لذا میانگین و انحراف از معیار مقادیر آزمایشگاهی  $K_E$  / محاسباتی  $K_E$  دو معیار برای مقایسه‌ی مدل‌های مختلف می‌باشند. بر اساس هر دو معیار، رابطه‌ی ساده‌سازی شده مطلوب‌تر تلقی می‌گردد. به عبارت دیگر، این رابطه محافظه کارانه‌تر می‌باشد.

مقدار میانگین آزمایشگاهی  $K_E$  / محاسباتی  $K_E$  برای روابط شماره (۲)، (۳) و (۶) به ترتیب معادل  $1/0.34$ ،  $1/0.37$  و  $1/3.63$  می‌باشد. همچنین انحراف از معیار این روابط به ترتیب برابر  $0/679$ ،  $0/546$  و  $0/723$  محاسبه گردیده‌است. با مقایسه‌ی این مقادیر با مقادیر به دست آمده از روابط (۹) و (۱۰) می‌توان گفت که روابط پیشنهادی در این پژوهش از نظر ایمنی قابل قبول بوده و پراکندگی کمتری نسبت به روابط پیشنهاد شده توسط پژوهشگران پیشین دارد.

جهت مقایسه‌ی خطای روابط، باید گفت که معیارهای مختلفی برای سنجش خطای روابط درون‌یابی وجود دارد. طبیعی است که رابطه‌ای که کمترین خطا را داشته باشد، مطلوب‌تر خواهد بود. از آنجایی که هدف درون‌یابی در این پژوهش، برآورد و تخمین می‌باشد، از خطای جذر میانگین مربع تفاضلات نرمال شده ( $nrmse^1$ ) استفاده می‌گردد. در این معیار سنجش خطا، جذر میانگین مربع تفاضل داده‌ها بر دامنه‌ی داده‌های تجربی یعنی تفاضل بیشترین مقدار داده‌های تجربی از کمترین مقدار آن‌ها، تقسیم می‌شود. به این ترتیب خطای رابطه، بی‌بعد شده و می‌تواند به صورت درصد بیان شود. مقدار خطای  $nrmse$  برای رابطه‌ی (۱۰) معادل  $0/157$  می‌باشد. مقدار این خطا برای روابط (۲)، (۳) و (۶) به ترتیب معادل  $0/255$ ،  $0/198$  و  $0/194$  می‌باشد. به این ترتیب خطای رابطه‌ی پیشنهادی در این پژوهش از روابط سایر پژوهشگران کمتر است.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا به جمع‌آوری پایگاه داده برای دورپیچ‌های CFRP پرداخته و سپس داده‌های آماری این اطلاعات انجام گردیده‌است. بدین منظور ابتدا ارتباط ضریب  $K_E$  با پارامترهای قطر نمونه و مقاومت بتن محصور نشده مورد بررسی قرار گرفته‌است. آن‌چه در این بررسی نمایان بود، وجود رابطه‌ی منفی ضریب  $K_E$  با مقاومت بتن محصور نشده و قطر نمونه می‌باشد.

در نهایت با وارد کردن اطلاعات پایگاه داده در نرم‌افزار سیگماپلات، به ارائه رابطه برای ضریب  $K_E$  پرداخته شده‌است. سپس رابطه‌ی حاصل از درون‌یابی ساده‌سازی شده‌است. رابطه‌ی ساده‌سازی شده با روابط ارائه شده توسط سایر محققان مقایسه گردیده‌است. رابطه‌ی ساده‌سازی شده از نظر معیارهای آماری مطلوب‌تر بوده و خطای کمتری نسبت به روابط ارائه شده توسط سایر محققان دارد. بنابراین می‌توان گفت که این رابطه از نظر تخمین ضریب  $K_E$  دقیق‌تر عمل می‌کند.

<sup>1</sup> normalized root-mean-square error



1. Xiao, Y. and Wu, H. (2000), "Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets," *J Mater Civil Eng*, 12(2), pp 139–146.
2. Lam, L. and Teng, J.G. (2003), "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete," Elsevier, *Construction and Building Materials*, 17(6-7), pp 471–489.
3. ACI Committee 440. (2002), "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp 45
4. De Lorenzis, L., Micelli, F. and La Tegola, A. (2002), "Influence of specimen size and resin type on the behavior of FRP confined concrete cylinders," *Proc. of the 1st int. conf. advanced polymer composites for structural applications in construction*, London (UK), pp 231–239.
5. Harries, K.A. and Kharel, G. (2002), "Behavior and modeling of concrete subject to variable confining pressure," *ACI Mater*, J(99), pp 180–189.
6. Tepfers, R., Rousakis, T., You C.S. (2003), "Concrete cylinders confined by carbon FRP sheets, subjected to monotonic and cyclic axial compressive load," *Proc. 6th int symp on fibre reinforced polymer (FRP) reinforcement for concrete structures (FRPRCS-6)*, pp 571–80.
7. Jiang, T. and Teng, J.G. (2007), "Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete," *Eng Struct*(29), pp 2968–2986.
8. Wang, L.M. and Wu, Y.F. (2008), "Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns," *test. Eng Struct*(30), pp 493–505.
9. Bisby, L.A. and Take, W.A. (2009), "Strain localisations in FRP-confined concrete: new insights," *Structures and Buildings* 162, ice; Issue SB5, pp 301-309
10. Cui, C. (2009), "Behaviour of normal and high strength concrete confined with fibre reinforced polymers (FRP)," University of Toronto, pp 1–376.
11. Wu, Y.F. and Jiang, J.F. (2013), "Effective strain of FRP for confined circular concrete columns," *Composite Structures* (95), Elsevier, pp 479–491.
12. Matthys, S., Taerwe, L., and Audenaert, K. (1999), "Tests on axially loaded concrete columns confined by fiber reinforced polymer sheet wrapping," *Proc. of the 4th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, Detroit, pp 217–228.
13. Realfonzo, R. and Napoli, A. (2011), "Concrete confined by FRP systems: Confinement efficiency and design strength models" *Compos. Part B, Eng.*, 42(4), pp 736–775.
14. Ozbakkaloglu, T. and Lim, J.C. (2013), "Axial compressive behavior of FRP-confined concrete: Experimental test database and a new design oriented model," *Compos. Part B: Eng.*, 55, pp.607–634.
15. Lim, J.C. and Ozbakkaloglu, T. (2015), "Hoop strains in FRP-confined concrete columns: Experimental observations," *Mater. Struct.*, 48(9), pp 2839–2854.
16. De Lorenzis, L., Micelli, F., and La Tegola, A. (2002), "Influence of specimen size and resin type on the behavior of FRP confined concrete cylinders," *Proc. of the 1st int. conf. advanced polymer composites for structural applications in construction*, London (UK), Thomas Telford, pp 231–239.
۱۷. خوشزاد مغانی، م. (۱۳۹۴)، "بررسی تاثیر پیوستگی بین دورپیچ‌های FRP و سطح بتن بر ظرفیت فشاری بتن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
18. Picher, F., Rochette, P. and Labossiere, P. (1996), "Confinement of concrete cylinders with CFRP," *Proc. of ICCI '96 conf. Tucson, Arizona; January*, pp 829–841.
19. Rochette, P. and Labossiere, P. (2000), "Axial testing of rectangular column models confined with composites," *J Compos Constr*, 4(3), pp 129–136.
20. Rousakis, T. (2001), "Experimental investigation of concrete cylinders confined by carbon FRP sheets, under monotonic and cyclic axial compressive load," Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
21. Shahawy, M., Mirmiran, A. and Beitelamann, T. (2000), "Tests and modelling of carbon wrapped concrete columns," *Composites, Part B*(31), pp 471–80.