

# بررسی رفتار ستون‌های بتن آرمه تقویت شده با دورپیچ CFRP تحت اثر نیروی برون محور

محمد رضا اصفهانی

دانشیار گروه عمران - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

Esfahani@ferdowsi.um.ac.ir

حمیدرضا صالحیان

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد عمران - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

hamid.r.salehian@gmail.com

(تاریخ دریافت ۸۳/۱۲/۲۲، تاریخ تصویب ۸۴/۶/۲۶)

## چکیده

دورپیچ نمودن ستون‌های بتنی با پلیمرهای مسلح FRP از جمله روش‌های نوین ترمیم و مقاوم‌سازی این اعضا محسوب می‌شود. رابطه‌های تحلیلی موجود برای محاسبه و تخمین مشخصه‌های باربری ستون‌های تقویت شده با این روش غالباً با انجام آزمایش بر روی نمونه‌هایی با مقطع مدور و تحت اثر نیروی فشاری محوری به دست آمده‌اند، در حالی که بسیاری از ستون‌های نیازمند ترمیم مقطعی چهارگوشه دارند و تحت اثر اندرکنش بار فشاری و لنگر خمشی قرار می‌گیرند. در این مقاله، نتایج مطالعه‌ای آزمایشگاهی پیرامون ظرفیت باربری ستون‌های دورپیچ‌شده با پلیمرهای مسلح کربنی CFRP ارائه می‌گردد. نمونه‌های آزمایشگاهی شامل ۶ ستون دورپیچ شده به طول ۷۰ سانتیمتر و با مقطعی مربعی شکل به ضلع ۲۰ سانتیمتر هستند که در برون محوری‌های مختلف تحت اثر بار فشاری قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که تاثیر مثبت محصورشدگی ستون‌ها با افزایش برون محوری بار فشاری کاهش می‌یابد. در این مقاله روشی برای در نظر گرفتن کاهش اثر محصورکنندگی دورپیچ FRP در برون محوری‌های مختلف ارائه شده و نتایج حاصل از آن با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: برون محوری، پلیمرهای مسلح، دورپیچ، ستون بتن آرمه، محصورشدن

## مقدمه

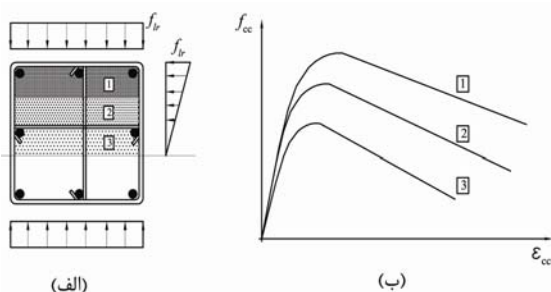
بسیار بالا، مقاومت خوردگی و دوام مطلوب، سهولت حمل و به کارگیری و نیز تاثیر هندسی ناچیز در اجزای تقویت شده بود. استفاده از کامپوزیت‌های FRP از دهه ۱۹۸۰ و به منظور ترمیم و حفاظت از ستون‌های آسیب‌دیده بتنی پل‌ها، مرسوم گردید. مطالعات بعد نشان داد که دورپیچ‌های FRP، علاوه بر محافظت ستون‌ها در برابر عوامل مخرب محیطی، بهبود شاخصه‌های باربری آنها را نیز به دنبال دارند. هنگامی که ستون دورپیچ شده، تحت اثر بار فشاری قرار می‌گیرد، دورپیچ پیرامونی از انبساط محیطی مقطع، ناشی از گسترش ترک‌های فشاری در آن جلوگیری نموده و نوعی تنش فشاری محصورکننده غیر فعال بدان وارد می‌آورد. به این ترتیب باربری هسته بتنی ادامه می‌یابد و ستون در تنش فشاری بالاتری منهدم می‌گردد.

توزیع تنش محصورکننده دورپیچ‌هایی از جنس FRP،

خرابی‌های حاصل از زلزله‌های شدیدی که در طول دو دهه گذشته در نقاط مختلف جهان به وقوع پیوست، نشان داد که بسیاری از ستون‌های بتنی پل‌ها از ظرفیت باربری لازم برخوردار نبوده و به ترمیم و مقاوم‌سازی فوری نیازمندند. در نخستین شیوه‌های ترمیم ستون‌ها، از روپوش‌های فولادی برای محصورنمودن پیرامون ستون استفاده می‌گردید. علی‌رغم آنکه این شیوه مقاومت فشاری و برشی ستون‌ها را بهبود می‌بخشید، اما به علت وزن بالای ورقه‌های فولادی و قابلیت خوردگی آن، هزینه‌های زیادی را در مراحل نصب و نگهداری به همراه داشت. با پیدایش پلیمرهای مسلح شده با الیاف یا مواد مرکب<sup>۱</sup> FRP و گسترش استفاده از آن در مهندسی عمران، روش‌های ترمیم و مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی، جهش قابل ملاحظه‌ای یافت. این امر به دلیل ویژگی‌های ممتاز این نوع مواد، همچون نسبت مقاومت کششی به وزن

کاهش یافته و توزیع کرنش محوری در ارتفاع، خطی می‌گردد. در این حالت توزیع تنش فشاری محصورکننده همانند تصاویر شکل (۱) نیست. به این ترتیب استفاده از رابطه‌های پیشین، برای تخمین مقاومت فشاری بتن محصورشده تحت اثر بار فشاری برون محور غیر منطقی به نظر می‌رسد.

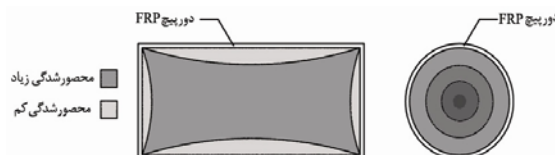
ساجیوگلو و همکارانش [۳] به هنگام اعمال بار برون محور فشاری، تغییراتی خطی همانند شکل (۲- الف) را برای تنش فشاری محصورکننده ناشی از آرماتورهای فولادی موجود در مقطع ستون پیشنهاد نموده‌اند. به این ترتیب مقدار تنش و کرنش فشاری بتن در تارهای مختلف مقطع، همانند شکل (۲- ب)، متغیر خواهد بود.



شکل ۲: توزیع تنش محصورکننده جانبی و نمودار تنش-کرنش بتن محصورشده [۳].

در پژوهشی دیگر، فام و همکارانش [۴] با فرض شرایط حدی، مقاومت فشاری بتن محصورشده با قالب‌های CFRP را در برون محوری‌های مختلف بار فشاری مدل‌سازی کرده‌اند. در این مدل مقدار مقاومت فشاری بتن محصورشده همزمان با افزایش برون محوری بار، کاهش می‌یابد. چعلال و شهاوی [۵] نیز از کامپوزیت‌های مسلح شده با الیاف کربنی دو سویه، برای دورپیچ نمودن ستون‌های بتن‌آرمه بهره گرفتند. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که به هنگام استفاده از قالب‌های کامپوزیتی و یا ورقه‌های مسلح شده با الیاف دو سویه، افزایش ظرفیت خمشی تیر- ستون‌های دورپیچ شده محسوس‌تر از بهبود ظرفیت باربری محوری آنهاست. علت آن است که قرارگیری الیاف در راستای طولی ستون، همچون آرماتورهای کامپوزیتی موجود در ناحیه کششی مقطع، ظرفیت خمشی آن را بهبود می‌بخشد. مقدار نیروی محوری و لنگر خمشی وارد بر ستون‌های واقعی به گونه‌ای است که نقطه شکست نهایی ستون‌های بتنی معمولاً در

در مقاطع مدور و چهارگوشه متفاوت است. این تفاوت در شکل (۱) به تصویر درآمده است. مطابق این شکل، در مقطع مدور تنش محصورکننده جانبی به طور یکنواخت در کل مقطع ستون توزیع می‌شود. در حالی که در مقاطع چهارگوشه، توزیع فشار محصورکننده غیر یکنواخت است. در این مقاطع گوشه‌ها از دو جهت تحت فشار محصورکننده قرار می‌گیرند. از اینرو مقدار تنش در این نواحی بیشتر از نواحی دیگر است. توزیع یکنواخت تنش محصورکننده در ستون‌هایی با مقاطع مدور، تنش‌های یکنواختی را در دورپیچ FRP ایجاد می‌نماید. محصورشدن این نوع مقاطع، مقاومت فشاری آنها را به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. رابطه‌های متعددی برای محاسبه مقاومت بتن محصورشده در مقاطع مدور پیشنهاد شده است. از آن جمله می‌توان به مدل سمان و همکارانش [۱] به صورت رابطه ۱ و مدل کاربهراری و ژائو [۲] به شکل رابطه ۲ اشاره کرد. در این روابط  $f'_{c0}$ ،  $f'_{cc0}$  و  $f'_{lfrp}$  به ترتیب مقاومت فشاری بتن اولیه، مقاومت فشاری بتن محصورشده و تنش محصورکننده جانبی دورپیچ هستند.



شکل ۱: توزیع فشار محصورکننده در مقطع مدور و چهارگوشه.

$$f'_{cc0} = f'_{c0} + 6.0 f'_{lfrp}{}^{0.7} \quad (1)$$

$$f'_{cc0} = f'_{c0} \left[ 1 + 2.1 \left( \frac{f'_{lfrp}}{f'_{c0}} \right)^{0.87} \right] \quad (2)$$

رابطه‌هایی که برای بیان مقاومت فشاری بتن محصورشده با مواد FRP ارائه شده است، غالباً بر اساس آزمایش اعمال بار فشاری مرکزگرا به نمونه‌ها ستون‌ها به دست آمده‌اند. در حالی که در عمل تمامی ستون‌های بتنی، تحت اثر اندرکنش بار فشاری و لنگر خمشی قرار می‌گیرند. هنگامی که بار فشاری برون محور به مقطع ستون وارد می‌آید، حجم تنش فشاری وارد بر مقطع

تسلیح نمونه ستون‌ها با استفاده از آرماتورهای نوع دو انجام پذیرفت. مقدار تنش جاری شدن این آرماتورها برابر با ۳۷۰ مگاپاسکال به دست آمده است.

نمونه ستون‌ها با یک لایه کامپوزیت پلیمری مسلح شده با الیاف کربنی یک جهته و به روش "Wet Layup" دورپیچ شدند. برای تعیین خصوصیات باربری دورپیچ CFRP، نمونه‌هایی از این کامپوزیت مطابق با استاندارد ASTM D3039، تحت آزمایش ظرفیت کششی قرار گرفت. خصوصیات مکانیکی به دست آمده برای این کامپوزیت در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱: ویژگیهای مکانیکی CFRP.

نوع الیاف	C-Sheet240
ضخامت (mm)	۰/۱۷۶
کرنش نهایی (%)	۱/۲۳
مقاومت کششی (MPa)	۲۸۷۶
ضریب کشسانی (GPa)	۲۳۴

الیاف کربنی در مقایسه با انواع دیگر، عموماً از مقاومت کششی بالاتری برخوردارند. از اینرو بهبود ظرفیت باربری ستون‌های دورپیچ شده با این کامپوزیت‌ها مشهودتر از انواع دیگر است. همچنین تک سویه بودن الیاف به کارگرفته شده سبب می‌شود تا فقط اثرات محصورکنندگی کامپوزیت مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۲: نمونه‌ها و برون محوری اولیه بار فشاری.

سری بتن‌ریزی	مشخصه نمونه‌ها*	برون محوری اولیه (mm)	مقاومت فشاری بتن (MPa)
I	BC-E3-W	۳۰	۲۳/۲
	BC-E3.5-W	۳۵	
II	BC-E1-W	۱۰	۲۰/۱
	BC-E1.5-W	۱۵	
III	BC-E2-W	۲۰	۲۱/۸
	BC-E2.5-W	۲۵	

\* BC-Ea-W: تیرستون دورپیچ شده و تحت اثر بار فشاری با برون محوری برابر با a

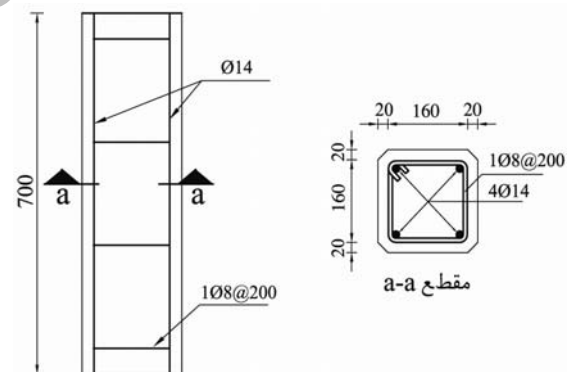
## برنامه آزمایش

اعمال بار فشاری به نمونه ستون‌ها به کمک یک جک

بالای نقطه بالانس از نمودار اندرکنش قرار می‌گیرد. به این ترتیب ستون‌های بتنی عموماً به تقویت فشاری بیش از تقویت خمشی نیازمندند. به همین دلیل در مواردی که بهبود ظرفیت محوری ستون مورد نظر است، اقتصادی‌تر آن است که تقویت ستون‌ها با دورپیچ نمودن الیاف یک‌سویه به دور مقطع ستون و محصورنمودن آن صورت پذیرد.

## نمونه‌های آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش مورد نظر، ۶ ستون بتن‌آرمه به طول ۷۰۰ میلیمتر و با مقطعی مربعی شکل با طول ضلع ۲۰۰ میلیمتر، به عنوان نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شدند. جزئیات و ابعاد نمونه‌ها در شکل (۳) مشاهده می‌شود. مطالعات اصفهانی و کیانوش [۶] نشان داده است که وجود زوایای تیز در مقطع، تاثیر دورپیچ FRP را در بهبود افزایش باربری ستون به صفر می‌رساند. از اینرو به منظور کاهش تمرکز تنش در دورپیچ و افزایش میزان تاثیرگذاری آن، گوشه‌های مقطع به طول ۲۰ میلیمتر در راستای هر ضلع گرد می‌شود.



شکل ۳: جزئیات نمونه ستون‌های آزمایشگاهی.

## مصالح

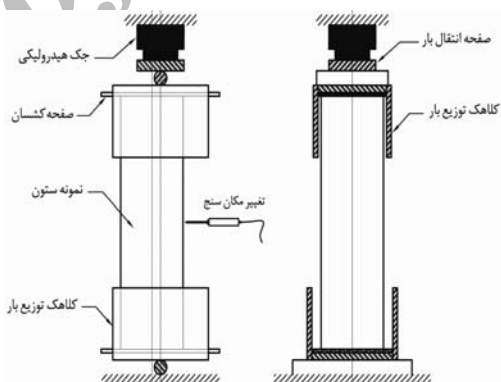
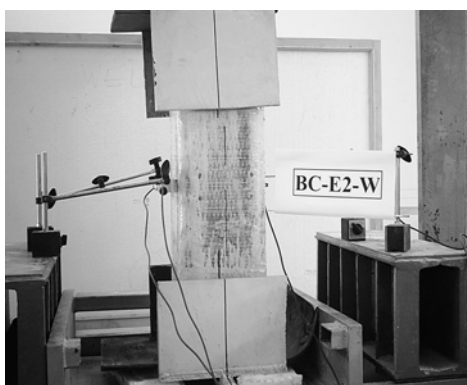
ساخت نمونه‌ها در سه نوبت بتن‌ریزی و توسط شرکت بنیان بتن صورت پذیرفته است. از هر سری بتن‌ریزی، نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای شکل تهیه گردیده و در شرایطی مشابه با نمونه‌های آزمایشگاهی نگهداری شده است. در خلال آزمایش نمونه ستون‌ها، مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای اندازه‌گیری شد. مقاومت فشاری میانگین بتن در بتن‌ریزی نوبت اول، دوم و سوم به ترتیب برابر ۲۳/۲، ۲۰/۱ و ۲۱/۸ مگاپاسکال به دست آمده است.

شدن بتن و کشیدگی الیاف در ناحیه فشاری مقطع است. شکل (۵) تصاویری از نحوه انهدام دو ستون را نشان می دهد. با افزایش نیروی فشاری وارد بر مقطع ستون، مقدار تنش در ناحیه فشاری مقطع، بتدریج به مقاومت فشاری بتن محصورنشده نزدیک می شود. در این هنگام خرد شدن بتن در ناحیه فشاری مقطع آغاز می گردد. وجود دورپیچ پیرامونی سبب می گردد تا جداسازی بتن خرد شده به تاخیر افتد و باربری ستون ادامه می یابد. با ادامه بارگذاری ستون، تخریب ناحیه فشاری مقطع تشدید می گردد. در این هنگام صداهای مربوط به کشیده شدن الیاف پیرامون ستون و یا جدا شدن دورپیچ از سطح جانبی ستون شنیده می شود. در حالت نهایی دورپیچ پیرامونی، در وجه فشاری ستون به مقاومت کششی خود می رسد و همراه با صدای بلند و به طور ناگهانی منهدم می شود. با انهدام کامپوزیت پیرامونی، ستون به نقطه گسیختگی می رسد. این نوع رفتار کم و بیش در تمامی نمونه ها مشاهده شده است.

فشاری هیدرولیکی صورت پذیرفته است. مقدار نیروی اعمال شده به نمونه ها و تغییر مکان میانه ارتفاع آنها به کمک نیروسنج و تغییر مکان سنج یا LVDT اندازه گیری شده و توسط سیستم کامپیوتری ثبت و پردازش اطلاعات ذخیره گردید. جزئیات قرارگیری نمونه ها در زیر جک و نحوه انتقال بار برون محور فشاری به آنها در شکل (۴) به تصویر درآمده است. با توجه به ابعاد مقطع ستون، مقدار برون محوری بار فشاری به گونه ای انتخاب شده است تا فولادهای طولی مقطع تحت تنش کششی قرار نگیرد. در جدول (۲) نحوه نامگذاری نمونه ها و مقدار برون محوری اولیه بار فشاری وارد بر هر یک از آنها مشخص شده است.

### مشاهدات و نتایج آزمایش

شکست نهایی نمونه ستون های محصورشده با CFRP، کاملاً ترد و ناگهانی است. تنها علامت هشدار دهنده در این نمونه ها، شدت روند افزایش تغییر مکان های اندازه گیری شده و نیز تشدید صداهای ناشی از خرد



شکل ۴: جزئیات انتقال بار به نمونه ستون ها .



شکل ۵: انهدام دو نمونه ستون بار گذاری شده.

میانۀ ارتفاع نمونه‌ها، همزمان با افزایش نیروی فشاری وارد بر آنها ترسیم شده است. همچنین در جدول (۳) مقادیر نیروی محوری و لنگر خمشی نهایی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌ها آمده است.

### مقایسه نتایج با آیین‌نامه‌ها

برای استفاده از روابط آیین‌نامه بتن آمریکا [ACI-318M-02] و آیین‌نامه کانادا [CSA-A23.3-M94]، به منظور محاسبه ظرفیت نهایی نمونه ستون‌های محصورشده، ابتدا مقاومت فشاری بتن محصورشده محاسبه گردیده و سپس این مقدار در رابطه‌های آیین‌نامه‌ای جایگزین می‌شود. مقدار تقریبی مقاومت فشاری بتن محصورشده با دورپیچ CFRP تحت اثر بار فشاری محوری، در توصیه‌نامه طراحی انجمن ISIS کانادا [۹]، از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$f'_{cc0} = f'_{c0} (1 + \alpha_{pc} \omega_w) \quad (3)$$

$$\omega_w = \frac{f_{lfrpu}}{f'_{c0}} \quad (4)$$

در روابط بالا  $f_{lfrpu}$  بیشینه تنش محصورکننده از طرف دورپیچ کامپوزیتی بر مقطع چهارگوشه است و به کمک رابطه ۵ محاسبه می‌گردد.  $\alpha_{pc}$  نیز ضریب اجراست و در شرایط آزمایشگاهی برابر با واحد اختیار می‌گردد.

$$f_{lfrpu} = \frac{2N_b E_{frp} \varepsilon_{frpu} t_{frp} (b+h)}{bh} \quad (5)$$

در رابطه ۵،  $b$  و  $h$  ابعاد مقطع و  $N_b$  تعداد لایه‌های FRP به دور آن است.  $E_{frp}$  و  $t_{frp}$  نیز به ترتیب ضخامت هر لایه دورپیچ و ضریب کشسانی آن است. همچنین  $\varepsilon_{frpu}$  کرنش کششی نهایی FRP است و به طور محافظه‌کارانه برابر با ۰/۰۰۲ فرض می‌شود. با جایگذاری مشخصات کامپوزیت مورد استفاده، در رابطه‌های بالا مقدار مقاومت فشاری محصورشده بتن محاسبه می‌گردد. این مقادیر در جدول (۴) آمده است. شکل (۹) نیروهای موجود در مقطع ستون بتنی محصورشده را در حضور لنگر خمشی نشان می‌دهد. در این شکل،  $\varepsilon_{c0}$  کرنش نهایی بتن فشاری است که در آیین‌نامه آمریکا و کانادا به ترتیب برابر با

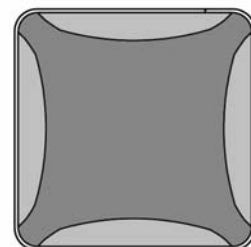
گسیختگی دورپیچ در یکی از دو انتهای ستون و به فاصله‌ای حدود یک سوم ارتفاع ستون، از محل اعمال بار اتفاق افتاده است. محل گسیختگی دورپیچ CFRP در مقطع تمامی نمونه‌ها، در وجه فشاری ستون و همانند تصویر شکل (۶) نزدیک به یکی از گوشه‌ها رخ می‌دهد. همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده، در محل گوشه‌های مقطع ناحیه محصورشده وسیع‌تری به وجود می‌آید. بدیهی است که در این نواحی تمرکز تنش کششی بیشتری در دورپیچ ایجاد شده و گسیختگی آن را موجب می‌شود.

جدول ۳: نتایج آزمایش نمونه ستون‌ها.

مشخصه نمونه‌ها	مقاومت فشاری بتن (MPa)	نیروی نهایی (kN)	لنگر خمشی نهایی (kN.m)
BC-E1-W	۲۰/۱	۸۴۱/۵۲۱	۸/۴۱۵
BC-E1.5-W		۷۸۳/۱۵۰	۱۱/۷۴۷
BC-E2-W	۲۱/۸	۷۵۹/۲۸۷	۱۵/۱۸۶
BC-E2.5-W		۶۹۳/۸۲۴	۱۷/۳۴۶
BC-E3-W	۲۳/۲	۶۷۴/۵۸۱	۲۰/۲۳۷
BC-E3.5-W		۵۸۵/۸۰۷	۲۰/۵۰۳

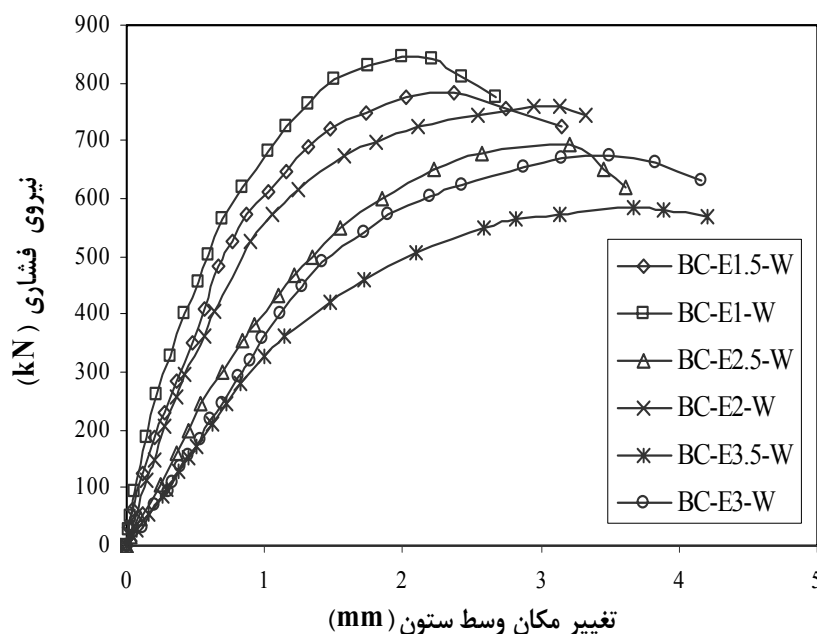


شکل ۶: نحوه گسیختگی دورپیچ CFRP.



شکل ۷: توزیع تنش محصورکننده در مقطع ستون.

در شکل (۸) تغییر مکان جانبی اندازه‌گیری شده در



شکل ۸: نمودارهای تغییرات نیروی فشاری و تغییر مکان جانبی میانه ارتفاع نمونه‌ها.

جدول ۴: مقاومت فشاری محصور شده بتن.

سری بتن‌ریزی	مقاومت فشاری محصور نشده $f'_{c0}$ (MPa)	مقاومت فشاری محصور شده $f'_{cc0}$ (MPa)	افزایش مقاومت فشاری (%)
I	۲۳/۲	۲۴/۹	۷/۳
II	۲۰/۱	۲۱/۷	۸/۰
III	۲۱/۸	۲۳/۴	۷/۳

با تعریف بلوک تنش معادل و بهره‌گیری از تعادل نیروهای وارد بر مقطع، می‌توان ظرفیت نهایی ستون در برون محوری‌های مختلف را محاسبه کرد. برای تعیین مقدار نهایی نیروی فشاری  $P$  و لنگر خمشی  $M$  که همزمان موجب انهدام ستون می‌شوند، کافی است که تعادل نیروهای وارد بر مقطع ستون در شکل (۹)، برقرار شود. با توجه به جهت و نقطه اثر نیروها و لنگرهای خمشی نشان داده شده در این شکل، روابط زیر به دست می‌آید:

$$P = (\alpha f'_{c0})(\beta c)b + C_s + C_s' \quad (۸)$$

$$M = 0.5(\alpha f'_{c0})(\beta c)(h - \beta c)b + C_s(0.5h - d') - C_s'(d - 0.5h) \quad (۹)$$

با تغییر عمق ناحیه فشاری در رابطه‌های بالا، مقادیر

$0.003$  و  $0.0035$  در نظر گرفته می‌شود. همانگونه که در شکل (۹) مشاهده می‌گردد، توزیع تنش در قسمت فشاری مقطع با بلوک تنش فشاری معادل، قابل جایگزینی است. ابعاد بلوک تنش فشاری در شکل (۹)، با  $\alpha f'_{c0}$  و  $\beta c$  مشخص گردیده است.  $f'_{c0}$  مقاومت فشاری بتن محصور نشده و  $c$  عمق ناحیه فشاری مقطع ستون است. مقدار ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  نیز در آیین‌نامه بتن آمریکا و آیین‌نامه کانادا به ترتیب با رابطه‌های ۶ و ۷ تعریف می‌گردد [۸،۷]:

$$\alpha = 0.85$$

$$\beta = 1.06429 - 0.00714 f'_{c0}$$

$$0.65 \leq \beta \leq 0.85 \quad (۶)$$

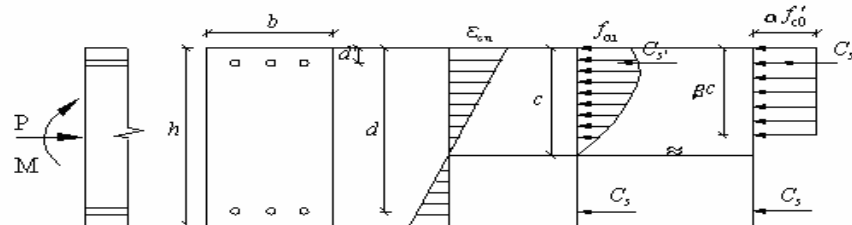
$$\alpha = 0.85 - 0.0015 f'_{c0} \geq 0.67$$

$$\beta = 0.97 - 0.0025 f'_{c0} \geq 0.67 \quad (۷)$$

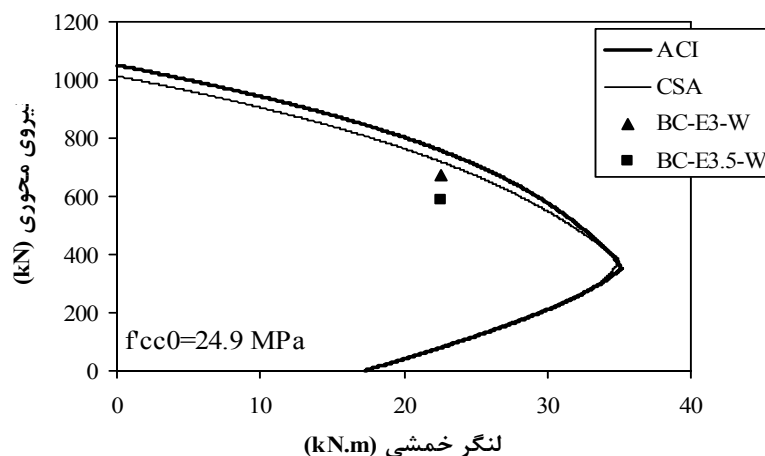
نکته جالب توجه آن است که با افزایش برون محوری بار فشاری، ضریب اطمینان موجود در پاسخهای آیین‌نامه‌ای روبه کاهش می‌نهد. به گونه‌ای که بیشترین اختلاف میان مقدار حاصل از هر دو آیین‌نامه با نتایج تجربی در نمونه ستون BC-E3.5-W با بیشینه برون محوری بار فشاری است. این امر را می‌توان ناشی از تأثیر برون محوری بار فشاری در نمونه ستونهای محصورشده دانست. اعمال لنگر خمشی بر نمونه ستونهای محصورشده، علاوه بر کاهش ظرفیت باربری فشاری ستون به دلیل اندرکنش بار فشاری و لنگر خمشی، سبب کاهش مقدار تنش فشاری محصورکننده و به تبع آن مقاومت فشاری محصورشده این نمونه ستونها گردیده است. به بیان دقیق‌تر در نمونه‌هایی که با برون محوری بیشتری تحت بار فشاری قرار می‌گیرند، تنش محصورکننده واقعی ناشی از دورپیچ CFRP کمتر از مقداری است که از رابطه ۵ محاسبه می‌شود. انتظار می‌رود که با افزایش برون محوری، فاصله نتایج آیین‌نامه‌ای با مقادیر تجربی بیشتر شود. از اینرو محاسبه مقاومت فشاری بتن محصور شده به کمک روابطی که در شرایط بارگذاری محوری تدوین شده‌اند، تحت اثر همزمان بار فشاری و لنگر خمشی منطقی به نظر نمی‌رسد.

جدیدی برای نیروی محوری و لنگر خمشی نهایی وارد بر مقطع ستون به دست می‌آید. با قرارگیری مقادیر متناظر در یک نمودار، منحنی اندرکنش ستون به صورت نمودارهای (۱۰) الی (۱۲) ترسیم می‌شود.

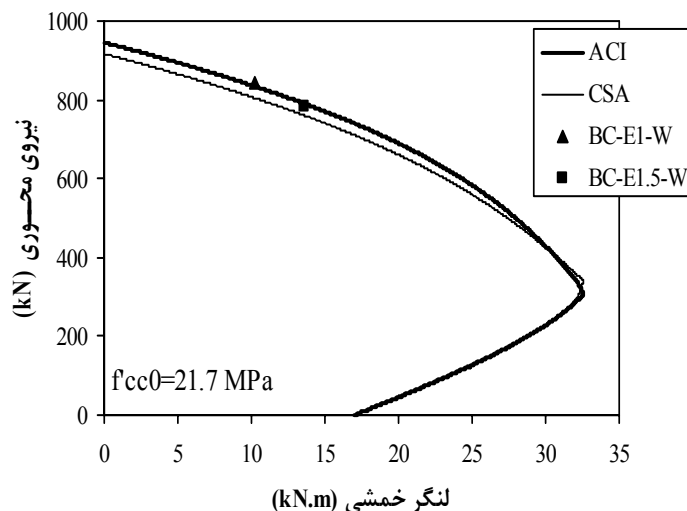
در جدول (۵) نتایج حاصل از رابطه‌های فوق، با مقادیر به دست آمده از آزمایش مقایسه شده است. بر اساس مقادیر به دست آمده، روند محاسباتی بالا در برون محوری‌های کم به جواب‌های نزدیک به واقعیت منجر شده است. فاصله ناچیزی که میان نتایج تجربی و آیین‌نامه‌ای است با افزایش برون محوری بار رو به کاهش می‌نهد و روابط آیین‌نامه پاسخ‌هایی بیشتر از مقدار آزمایشگاهی داده‌اند. این امر را می‌توان ناشی از کاهش حجم تنش فشاری وارد بر مقطع دانست. به بیان دقیق‌تر در نمونه ستون‌هایی با برون محوری‌های زیاد، تنش محصورکننده واقعی ناشی از دورپیچ CFRP کمتر از مقداری است که از رابطه ۵ محاسبه می‌گردد. بدیهی است که در این حالت مقدار مقاومت فشاری محصورشده بتن کاهش خواهد یافت. از اینرو انتظار می‌رود که در برون محوری‌های بالاتر، فاصله نتایج آیین‌نامه‌ای با مقادیر تجربی افزایش یابد.



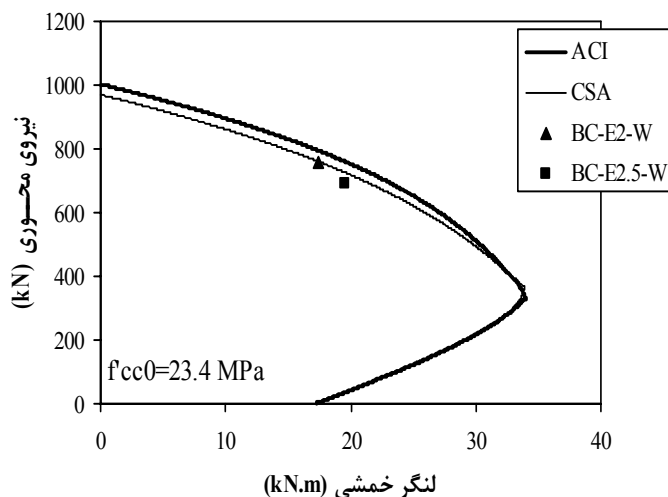
شکل ۹: توزیع تنش و کرنش در مقطع ستون و بلوک تنش معادل در حضور لنگر خمشی.



شکل ۱۰: نمودار اندرکنش بار فشاری و لنگر خمشی در بتن محصورشده نوع I و برون محوری های ۳ و ۳.۵ سانتیمتر.



شکل ۱۱: نمودار اندرکنش بار فشاری و لنگر خمشی در بتن محصورشده نوع II و برون محوری های ۱ و ۱٫۵ سانتیمتر.



شکل ۱۲: نمودار اندرکنش بار فشاری و لنگر خمشی در بتن محصورشده نوع III و برون محوری های ۲ و ۲٫۵ سانتیمتر.

جدول ۵: مقایسه نتایج آزمایش با مقادیر آیین نامه ای.

مشخصه نمونه ها	مقاومت فشاری $f'_{cc0}$ (MPa)	آزمایشگاهی $P_{Exp.}$ (kN)	آیین نامه امریکا $P_{ACI}$ (kN)	آیین نامه کانادا $P_{CSA}$ (kN)	$\frac{P_{Exp.} - P_{ACI}}{P_{Exp.}}$ (%)	$\frac{P_{Exp.} - P_{CSA}}{P_{Exp.}}$ (%)
BC-E1-W	۲۱٫۷	۸۴۱/۵۲۱	۸۳۴/۸۶	۸۰۹/۱۵	۰/۸	۳/۸
BC-E1.5-W		۷۸۳/۱۵۰	۷۸۸/۷۵	۷۶۴/۸۳	-۰/۷	۲/۳
BC-E2-W	۲۳/۵	۷۵۹/۲۸۷	۷۸۵/۱۰	۷۵۹/۵۸	-۳/۴	-۰/۰
BC-E2.5-W		۶۹۳/۸۲۴	۷۳۷/۵۵	۷۱۴/۹۹	-۶/۳	-۳/۱
BC-E3-W	۲۴/۸	۶۷۴/۵۸۱	۷۲۴/۲۴	۷۰۱/۲۴	-۷/۴	-۴/۰
BC-E3.5-W		۵۸۵/۸۰۷	۶۷۹/۲۵	۶۵۹/۷۶	-۱۶/۰	-۱۲/۶



و حجم آن در بارگذاریهای برون محور به عمق ناحیه فشاری مقطع ( $c$ ) وابسته است. بسته به مقدار برون محوری بار فشاری، مقدار  $c$  از صفر تا بینهایت متغیر است. با در اختیار داشتن عمق ناحیه فشاری مقطع، حجم تنش فشاری محصورکننده‌ای که در برون محوری خاص به مقطع ستون وارد می‌آید به کمک رابطه ۱۱ محاسبه می‌گردد:

$$V_{efrp} = \begin{cases} 0.5bcf_{frrpu} & (if\ c \leq h) \\ (1 - \frac{h}{2c})bh f_{frrpu} & (if\ c > h) \end{cases} \quad (11)$$

در روش پیشنهاد شده برای محاسبه ظرفیت نهایی نمونه ستون‌ها در برون محوری‌های مختلف بار، نسبت حجم تنش محصورکننده فشاری وارد بر مقطع در هنگام بارگذاری برون محور به حجم تنش فشاری محصورکننده در بارگذاری محوری، به عنوان ضریبی کاهش‌دهنده در محاسبه مقدار تنش فشاری محصورکننده اعمال می‌شود. مقدار این ضریب از رابطه ۱۲ به دست می‌آید:

$$k'_e = \frac{V_{efrp}}{V_{frp}} = \begin{cases} \frac{c}{2h} \leq 0.5 \\ 1 - \frac{h}{2c} \geq 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

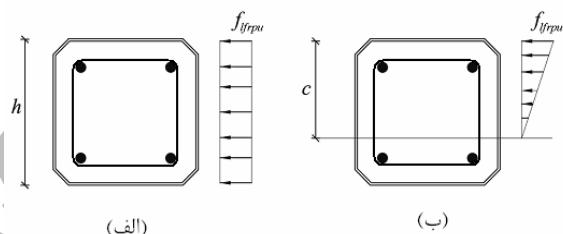
با ضرب مقدار به دست آمده از رابطه فوق در رابطه ۵، رابطه ۱۳ حاصل می‌آید که برای محاسبه مقاومت فشاری محصورکننده متغیر در برون محوری مورد نظر قابل استفاده است.

$$f_{frrpu} = k'_e \frac{2N_b E_{frrpu} \varepsilon_{frrpu} t_{frrpu} (b+h)}{bh} \quad (13)$$

رابطه بالا متناسب با مقدار ضریب  $k'_e$ ، پاسخ‌های مختلفی را برای مقدار تنش محصورکننده جانبی نمونه ستون‌های آزمایش شده در اختیار می‌گذارد که با شرایط مرزی و فرضیات نخستین، سازگاری دارد. اگر در بارگذاری‌های محوری عمق ناحیه فشاری برابر با بینهایت انگاشته شود، مقدار ضریب  $k'_e$  حاصل از رابطه ۱۲ برابر با واحد خواهد شد. از اینرو کاهش‌دهنده در مقدار تنش فشاری محصورکننده وارد بر مقطع ستون اعمال نمی‌شود. در حالتی که فقط لنگر خمشی بر مقطع ستون وارد می‌آید، اگر مقدار  $c$  برابر با صفر اختیار گردد، ضریب  $k'_e$  نیز برابر

## روش پیشنهادی برای کاهش تنش محصورکننده در حضور لنگر خمشی

در این بخش با توجه به فرضیات ارائه شده توسط محققان پیشین و به منظور سازگار نمودن روابط آیین‌نامه‌ها با نتایج به دست آمده برای ستون‌های محصورشده، روش ساده‌ای برای کاهش تنش محصورکننده وارد بر نمونه‌های محصورشده در حضور لنگر خمشی پیشنهاد خواهد شد. شکل (۱۳) نحوه توزیع تنش محصورکننده جانبی دورپیچ CFRP بر مقطع ستون‌های محصورشده را در دو نوع بارگذاری محوری و برون محور نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: توزیع فرضی تنش محصورکننده؛ (الف) بارگذاری محوری، (ب) بارگذاری برون محور.

مطابق شکل (۱۳-الف) مقدار تنش فشاری محصورکننده در مقطع ستونی که تحت بار فشاری محوری قرار می‌گیرد، در کل ارتفاع مقطع ثابت است و از رابطه ۵ به دست می‌آید. در این شکل حجم تنش فشاری محصورکننده وارد بر مقطع ستون برابر با رابطه ۱۰ است.

$$V_{frp} = bh f_{frrpu} \quad (10)$$

در هنگام اعمال بارفشاری برون محور به ستون محصورشده، توزیع تنش محصورکننده همانند شکل (۱۳-ب) در نظر گرفته می‌شود. تنش محصورکننده وارد بر مقطع ستون، از مقداری بیشینه و حاصل از رابطه ۵ در دورترین تار فشاری مقطع، تا مقدار صفر در روی تار خنثی به طور خطی تغییر می‌نماید. همچنین مقدار این تنش در نقاط هم ارتفاع مقطع ثابت فرض می‌شود. این شیوه توزیع تنش محصورکننده در بارگذاری‌های برون محور، مبتنی بر فرضیاتی است که پیش از این توسط ساجیوگلو و همکارانش [۳] در مورد ستون‌های محصورشده با آرماتورهای فولادی پیشنهاد شده است. با توجه به شکل (۱۳-ب) شدت توزیع تنش محصورکننده

جنس کربن بوده است. این نمونه‌ها تحت اثر بار فشاری با برون محوری‌های مختلف آزمایش شده‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

۱- دورپیچ نمودن ستون‌های مربعی شکل سبب بهبود ظرفیت باربری آنها شده است. هر چند که این افزایش کمتر از میزانی است که توسط محققان دیگر برای ستون‌های محصورشده با مقطع مدور پیش‌بینی شده است.

۲- اعمال لنگر خمشی بر ستون‌های محصورشده اثر کاهنده‌ای بر مقاومت فشاری بتن محصورشده و در نتیجه بر اندرکنش بار فشاری و لنگر خمشی می‌گذارد.

۳- با توجه به بند ۲، محاسبه مقاومت فشاری بتن محصورشده و جابجایی آن با مقاومت فشاری معمولی بتن در روابط بتن آمریکا و کانادا، پاسخ‌های فاقد اطمینانی به همراه دارد. این امر با افزایش برون محوری بار تشدید می‌گردد.

۴- اعمال ضریب پیشنهاد شده در این تحقیق به منظور محاسبه مقاومت فشاری بتن محصورشده در برون محوری‌های مختلف و جایگذاری مقاومت فشاری به دست آمده در روابط آیین‌نامه‌ها پاسخ‌های نزدیک به نتایج آزمایشگاهی می‌دهد.

### قدردانی

نمونه‌های آزمایش شده در این پروژه تحقیقاتی، با مساعدت صمیمانه مدیریت و پرسنل محترم شرکت بنیان بتن ساخته شده است. بدین وسیله از همکاری این عزیزان سپاسگذاری می‌گردد.

با صفر می‌شود. به این ترتیب در خمش خالص، مقدار تنش فشاری محصورکننده وارد بر مقطع ستون برابر با صفر می‌شود. در مقادیر مختلف بار محوری و لنگرخمشی با هر بار تغییر مقدار  $C$ ، ضریب  $k'_e$  نیز محاسبه شده و در روابط آیین‌نامه‌ای جایگذاری می‌گردد. به این ترتیب با اتمام مراحل محاسباتی، مقدار نیروی محوری نهایی و لنگر خمشی متناظر با آن بر اساس تنش محصورکننده متغیر در اختیار خواهد بود.

در جدول (۶) مقدار ظرفیت فشاری محاسبه شده برای نمونه ستون‌های محصورشده، با فرض محصورشدگی متغیر بر اساس آیین‌نامه‌های بتن آمریکا و کانادا با نتایج تجربی مقایسه شده است.

مقایسه نتایج جدول (۶) با نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که استفاده از روش محصورشدگی متغیر در تخمین ظرفیت فشاری نمونه ستون‌ها، به طور کلی سبب افزایش ضریب اطمینان موجود در پاسخ‌های آیین‌نامه‌ای شده است. همچنین بهره‌گیری و تلفیق این روش با روابط و فرضیات آیین‌نامه کانادا به پاسخ‌های بهتری منجر شده است. اگر چه در بیشترین مقدار برون محوری بار، هنوز هم مقادیر دو آیین‌نامه آمریکا و کانادا در خلاف جهت اطمینان است.

### خلاصه و نتیجه‌گیری

در این پژوهش ظرفیت نهایی نمونه ستون‌های بتن‌آرمه تقویت شده با پلیمرهای مسلح CFRP، مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های آزمایش شده شامل ۶ ستون مربعی شکل و دورپیچ شده با الیاف یک‌سویه از

جدول ۶: بار نهایی نمونه‌های محصورشده بر مبنای آیین‌نامه‌های آمریکا و کانادا با فرض محصورشدگی متغیر.

مشخصه نمونه‌ها	برون محوری نهایی بار (mm)	مقاومت فشاری محصورشده متغیر $f'_{cco}(V)$	$P_{Exp}$ (kN)	$P_{ACI(V)}$ (kN)	$\frac{P_{Exp}-P_{ACI(V)}}{P_{Exp}}$ (%)	$P_{CSA(V)}$ (kN)	$\frac{P_{Exp}-P_{CSA(V)}}{P_{Exp}}$ (%)
BC-E1-W	۱۲/۲۱۱	۲۰/۹۹	۸۴۱/۵۲۱	۸۱۲/۱۸	۳/۵	۷۸۶/۴۵	۶/۵
BC-E1.5-W	۱۷/۳۶۷	۲۰/۹۴	۷۸۳/۱۵۰	۷۶۶/۰۹	۲/۲	۷۴۲/۵۶	۵/۲
BC-E2-W	۲۲/۹۵۵	۲۲/۵۹	۷۵۹/۲۸۷	۷۶۲/۵۸	-۰/۴	۷۳۷/۸۵	۲/۸
BC-E2.5-W	۲۸/۲۰۴	۲۲/۵۴	۶۹۳/۸۲۴	۷۱۵/۶۸	-۳/۲	۶۹۳/۹۸	-۰/۰
BC-E3-W	۳۳/۴۹۳	۲۳/۹۰	۶۷۴/۵۸۱	۷۰۲/۳۸	-۴/۱	۶۸۰/۹۰	-۰/۹
BC-E3.5-W	۳۸/۶۷۱	۲۳/۸۶	۵۸۵/۸۰۷	۶۵۸/۲۹	-۱۲/۴	۶۴۰/۳۲	-۹/۳

## مراجع

- 1 - Samaan M., Miemiran, A. and Shahawy, M. (1998). "Model of concrete confined by fiber composite." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 9, PP. 1025-1031.
- 2 - Karbhari, V. M. and Gao, Y. (1997). "Composite jacketed concrete under uniaxial compression- verification of simple design equations." *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 9, No. 4, PP. 185-193.
- 3 - Saatcioglu, M., Salamat, A. H. and Razvi, S. R. (1995). "Confined columns under eccentric loading." *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 11, PP. 1547-1556.
- 4 - Fam, A., Flisak, B. and Rizkalla, S. (2003). "Experimental and analytical modeling of concrete-filled fiber-reinforced polymer tubes subjected to combined bending and axial loads." *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 4, PP. 499-509.
- 5 - Chaallal, O. and Shahawy, M. (2000). "Performance of fiber-reinforced polymer-wrapped reinforced concrete column under combined axial-flexural loading." *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 4, PP. 650-669.
- 6 - Esfahani, M. R. and Kianoush, M. R. (2004). "Axial compressive strength of reinforced concrete columns wrapped with FRP." *1<sup>st</sup> conference on Application of FRP Composites in Construction and Rehabilitation of Structures*, May 4, Tehran, Iran.
- 7 - ACI, (2002). "Building code requirements for structural concrete." *Standard 318M-02*, American Concrete Institute.
- 8 - CSA (1994). "Design of concrete structures." *Standard A23.3-94*, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario.
- 9 - ISIS CANADA (2001). "The canadian network of centers of excellence on intelligent sensing for innovative structures." *Strengthening Reinforced Concrete Structures with External  $\gamma$ -Bonded Fiber Reinforced Polymer*, Design Manual No. 4.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Fiber Reinforced Polymers