

An Investigation on the Contribution of FRP Longitudinal Rebar In RC Columns with Square Cross Section

Masood Mofid

Professor, Civil Engineering Department, Sharif University of Technology

Amir Reza Tabkhi Wayeghan*

M.Sc. Graduate, Civil Engineering Department, Sharif University of Technology

a.tabkhi@gmail.com

Abstract

Concrete columns were previously only reinforced with steel reinforcements. Nowadays, with the introduction of FRP rebar, these reinforcements are used in concrete elements as a proper replacement for steel reinforcements, especially in corrosive environments such as marine environments. But the use of this type of reinforcement in columns of concrete structures faces uncertainties, so that the various international codes do not take into account the effect of this type of rebar, or they do not allow them. Due to the elastic behavior of FRP reinforcements and their high ultimate strain as compared to the ultimate strain of concrete, these rebar are generally not contributed to concrete in concrete columns. In this study, using mathematical equations and parametric study as well as finite element software, the contribution of FRP reinforcements has been investigated and it has been shown that neglecting FRP reinforcement in some cases can lead to very conservative results in terms of capacity. The type of FRP reinforcement and the percentage of longitudinal reinforcement have the greatest impact on the contribution of these reinforcement to the compressive strength of the column so that this increase can form up to one quarter of the compressive capacity of the column.

Keywords: FRP Rebar, Rectangular Concrete Column, FRP Rebar Contribution

بررسی مشارکت آرماتورهای طولی FRP در ستون‌های بتنی مسلح با مقطع مربع شکل

دریافت مقاله: ۱۳۹۸-۱۱-۲۸

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹-۰۲-۱۷

مسعود مفید

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

امیر رضا طبخی وایقان*

دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

a.tabkhi@gmail.com

چکیده

ستون‌های بتنی در گذشته تنها به وسیله آرماتورهای فولادی مسلح می‌شدند. امروزه و با معرفی آرماتورهای FRP، این آرماتورها به عنوان جایگزین مناسبی برای آرماتورهای فولادی، به خصوص در محیط‌های خورنده نظیر محیط‌های دریایی در اعضاء بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما هم‌چنان استفاده از این نوع آرماتورها در ستون‌های سازه‌های بتنی با عدم قطعیت‌هایی روبرو است به طوری که آیین‌نامه‌های معتبر دنیا از اثر این نوع آرماتور در فشار صرف‌نظر کرده یا به طور کل استفاده از آن را مجاز نمی‌دانند. با توجه به الاستیک بودن رفتار آرماتورهای FRP و بالاتر بودن کرنش نهایی آن‌ها در مقایسه با کرنش نهایی بتن، عموماً این آرماتورها در ستون‌های بتنی و تحت اثر فشار به مقاومت نهایی خود نمی‌رسند و مشارکت پایینی دارند. در این تحقیق با استفاده از روابط ریاضی و مطالعه پارامتریک و همچنین نرم افزار اجزاء محدودی، میزان مشارکت آرماتورهای FRP بررسی شده است و نشان داده شده است که صرف نظر کردن از آرماتورهای FRP در برخی موارد می‌تواند به نتایج بسیار محافظه کارانه‌ای در رابطه با ظرفیت فشاری ستون بیانجامد. نوع آرماتورهای FRP و درصد آرماتورهای طولی بیشترین تاثیر را در میزان مشارکت این آرماتورها در مقاومت فشاری ستون دارند به طوری که این افزایش تا حدود یک چهارم ظرفیت فشاری ستون را می‌تواند تشکیل بدهد.

کلید واژه: آرماتور FRP، ستون بتنی مستطیلی، مشارکت آرماتور FRP

استفاده از آرماتور FRP در ستون‌های بتنی هنوز با ابهاماتی روبرو است، به طوری که استفاده از این نوع آرماتور در گزارش 440.1R کمیته ACI در سال ۲۰۰۶ [۱] در ستون‌ها و اعضای فشاری به علت عدم وجود تحقیقات کافی، منع شده است. البته با انجام برخی تحقیقات در طی سالیان گذشته بر روی رفتار اعضای فشاری بتنی با آرماتورهای FRP، استفاده از این آرماتورها در آیین‌نامه‌های جدیدتر، مانند گزارش ۴۰ اتحادیه بین‌المللی سازه‌های بتنی [۲] و گزارش 440.1R کمیته ACI در سال ۲۰۱۵ [۳] مجاز می‌باشد، اما هم‌چنان این گزارش‌ها اجازه‌ی دخیل کردن اثر آرماتورهای FRP در اعضاء فشاری را نمی‌دهند و در طراحی‌ها از اثر آن‌ها صرف نظر می‌شود. علت این امر را می‌توان سه عامل دانست: ۱- وجود تحقیقات نسبتاً کم در این زمینه ۲- مقاومت پایین‌تر و ضعف این‌گونه آرماتورها در فشار. ۳- مشارکت پایین‌تر این آرماتورها در فشار به علت پایین بودن ضریب کشسانی فشاری این آرماتورها در مقایسه با آرماتورهای فولادی. در این تحقیق از وجود ورقه‌های FRP که خاصیت محصور کنندگی بتن را دارند، جهت افزایش مشارکت آرماتورهای FRP در فشار و کاهش یا به تاخیر انداختن ریز کمانش‌های^۱ الیاف این آرماتورها در المان‌های فشاری استفاده می‌شود.

اواخر دهه ۱۹۸۰ میلادی، زمانی که تقاضا برای آرماتورهای ضد مغناطیسی^۲ افزایش یافت، آرماتورهای FRP وارد بازار شدند و به عنوان مصالح تسلیح کننده داخلی بتن مورد استفاده قرار گرفتند. تا اواسط دهه ۱۹۹۰ میلادی، ژاپنی‌ها بیشترین استفاده از آرماتورهای FRP را با استفاده در بیش از ۱۰۰ پروژه داشتند. انجمن مهندسان عمران ژاپن در سال ۱۹۹۷ ضوابط طراحی FRP را منتشر کردند [۴] در دهه ۲۰۰۰ میلادی، چینی‌ها به بزرگترین مصرف کننده این نوع آرماتورها در پروژه‌های مختلف، از عرشه پل تا کارهای زیرزمینی، تبدیل شدند [۵]. استفاده از این نوع آرماتورها در اروپا با ساخت پل پیش‌تنیده FRP در سال ۱۹۸۶ در آلمان آغاز شد [۶]. بعد از ساخت این پل، تحقیقات جهت استفاده از این نوع آرماتورها در اروپا افزایش یافت [۷]. مهندسان کانادایی نیز در سال ۲۰۰۶، ضوابط و مقرراتی برای استفاده از این آرماتورها تحت عنوان CAN/CSA-S6-06 منتشر کردند و تعدادی سازه نیز در این کشور بر این اساس طرح و ساخته شد. از جمله این سازه‌ها می‌توان به پل Floodway بر روی رود قرمز شهر وینیپگ^۳ اشاره کرد. در این پل که دارای ۱۶ دهانه با طول دهانه تقریبی ۴۳ متر می‌باشد، تمامی اعضای بتنی بالای شاه‌تیرها با آرماتور GFRP مسلح شده‌اند. وزن آرماتور GFRP به کار رفته در این پروژه در حدود ۱۴۰ تن بوده است که این پروژه را به بزرگترین پل بتنی مسلح شده به آرماتورهای غیر فلزی دنیا تاکنون تبدیل کرده است [۳]. در آمریکا نیز اولین استفاده از این نوع آرماتورها به سال ۱۹۹۶ برمی‌گردد که در آن سال عرشه پلی در ویرجینیای غربی به کمک آرماتورهای FRP مسلح گردید [۸].

آزمایشاتی که توسط Wu [۹] در سال ۱۹۹۰ بر روی رفتار فشاری آرماتورهای FRP با نسبت طول به قطر کم صورت پذیرفت، نشان داد که مقاومت فشاری این آرماتورها کمتر از مقاومت کششی آن‌ها می‌باشد. مقاومت فشاری آرماتورهای FRP برای انواع GFRP، CFRP و AFRP به ترتیب برابر با ۵۵، ۷۸ و ۲۰ درصد مقاومت کششی آن‌ها گزارش شده است [۹] و [۱۰]. همچنین نتایج تقریباً مشابهی برای ضریب کشسانی فشاری این نوع آرماتورها به دست آمده است. با توجه به تحقیقات، آزمایشات و گزارشات ارائه شده، ضریب کشسانی فشاری آرماتورهای FRP برای انواع GFRP، CFRP و AFRP به ترتیب برابر با ۸۰، ۸۵ و ۱۰۰ درصد ضریب کشسانی کششی آن‌ها گزارش شده است [۱۰] و [۱۱].

¹ Micro-Buckling

² Non-Magnetic

³ Winnipeg

تاکنون تحقیقات کمی بر روی رفتار ستون‌های بتنی مسلح شده با آرماتورهای FRP صورت پذیرفته است. یکی از اولین تحقیقات انجام شده روی این موضوع مربوط به سال ۱۹۹۹ می‌باشد. Alsayed و همکاران در این سال، ۵۰ ستون بتنی با ابعاد ۴۵۰ در ۲۵۰ میلی‌متر و طول ۱۲۰۰ میلی‌متر را تحت بار محوری فشاری خالص مورد آزمایش قرار داد. ستون‌ها به پنج گروه سه‌تایی از هر نمونه تقسیم بندی شده بودند. گروه اول هیچ گونه آرماتوری نداشتند، در حالی که چهار گروه دیگر آرماتورهای فولادی یا GFRP به عنوان آرماتور طولی و عرضی داشتند. او به این نتیجه رسید که جایگزین کردن آرماتورهای طولی فولادی با آرماتورهای طولی GFRP ظرفیت ستون را تا حدود ۱۳ درصد کاهش می‌دهد و همچنین جایگزین کردن آرماتورهای عرضی فولادی با آرماتورهای عرضی GFRP ظرفیت ستون را مجدداً تا ۱۰ درصد دیگر کاهش می‌دهد. نمونه‌های مسلح شده به فولاد با کماتش آرماتورهای فولادی در میانه ارتفاع ستون به خرابی رسیدند، در حالی که نمونه‌های مسلح شده به آرماتور GFRP با خرد شدن بتن و شکست میلگردها به خرابی رسیدند [۱۲]. البته این پژوهشگر منظور دقیق خود را از شکست آرماتورهای GFRP در فشار بیان نکرد اما ظاهراً با توجه به نسبت طول مهارنشده آرماتورهای طولی GFRP به قطر آن‌ها در میانه ستون که در حدود ۱۶ بوده، منظور از شکست آرماتورها، کماتش این آرماتورها بوده است.

Mirmiran و همکاران در سال ۲۰۰۱ یک مطالعه پارامتریک بر روی ستون‌های بتنی لاغر مسلح به آرماتورهای FRP انجام دادند و نشان دادند که اگرچه ستون‌های بتنی مسلح به آرماتورهای FRP نسبت به خرابی ناشی از ناپایداری و مسائل لاغری مستعدتر از ستون‌های بتنی مسلح به آرماتورهای فولادی می‌باشند، اما استفاده از روش طراحی ضرایب بزرگنمایی لنگر^۴ همچنان برای ستون‌های بتنی مسلح به آرماتورهای FRP قابل استفاده می‌باشند [۱۳].

Deluca در سال ۲۰۰۹ ستون‌های بتنی مسلح به آرماتور GFRP با ابعاد مقطع ۶۱۰ در ۶۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳ متر را مورد آزمایش فشاری خالص قرار داد. پارامترهای اصلی مورد بررسی در این پژوهش، نوع آرماتور GFRP و میزان آرماتورهای عرضی است.

خلاصه نتایج اصلی Deluca را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

* در ستون‌های با نسبت کم آرماتور طولی، رفتار ستون‌های مسلح به آرماتور GFRP بسیار شبیه به نمونه مسلح به آرماتور فولادی می‌باشند.

* اثر مشارکتی آرماتورهای GFRP در محاسبه ظرفیت محوری ستون را می‌توان نادیده گرفت.
 $(P_0 = 0.85 f_c (A_g - A_{frp}))$

* تحقیقات بیشتری برای درک رفتار ستون‌های بتنی مسلح به آرماتور GFRP، تحت اثر نیروی محوری و خمش نیاز است [۱۴].

Tobbi و همکارانش در سال ۲۰۱۲ آزمایشاتی را بر روی هشت ستون بتنی مربع شکل با ابعاد ۳۵۰ در ۳۵۰ میلی‌متر و مسلح به آرماتور فولادی و GFRP صورت دادند و اثرات چینش و فواصل تنگ‌ها را مورد بررسی قرار دادند. تمامی نمونه‌ها دارای درصد آرماتور طولی ثابت و برابر با ۱/۹٪ بودند. دو عدد از نمونه‌ها دارای آرماتور فولادی و پنج عدد دارای آرماتور GFRP بودند و یک نمونه نیز بدون هیچ گونه آرماتوری بود [۱۵].

این محققین با انجام آزمایشات و تحلیل و مقایسه خروجی‌ها با آیین‌نامه‌های ACI آمریکا و CSA کانادا به نتایج زیر رسیدند:

* خردشدگی زود هنگام پوشش بتن باعث کاهش ظرفیت محوری، پیش از به وجود آمدن هرگونه اثر محصور شدگی می‌شود. پس از اینکه پوشش بتن به طور کامل از بین رفت (خرد شد)، تقویت قابل توجهی در مقاومت، شکل‌پذیری

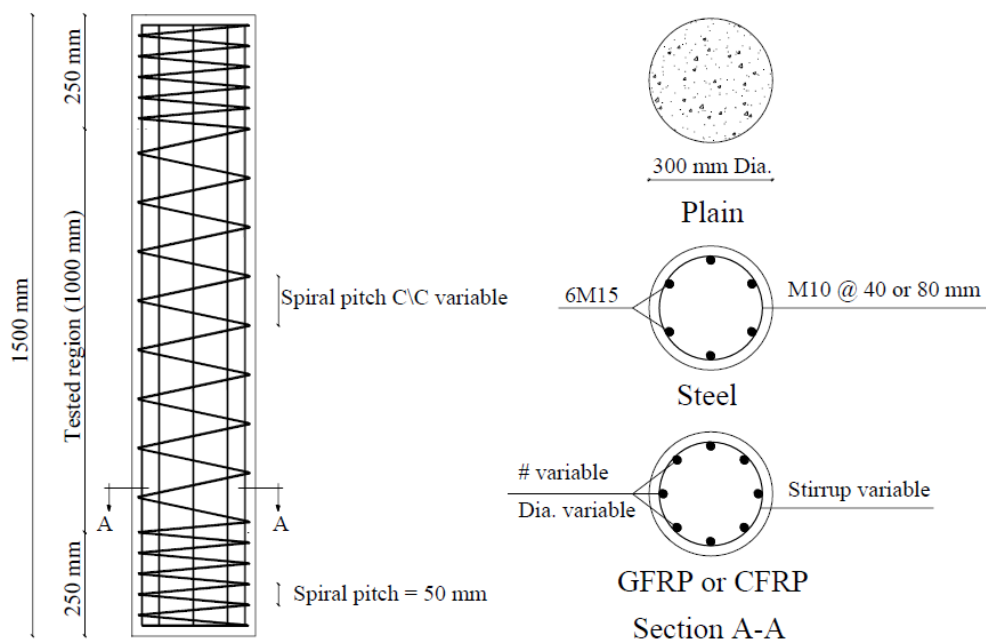
⁴ Moment magnification factors

و سختی برای هسته مرکزی بتن در نمونه‌های با محصور شدگی زیاد مشاهده گردید. این مشاهدات، توصیه می‌کنند که تنها اثر هسته مرکزی بتن را می‌توان در محاسبات فشاری ستون‌ها مورد استفاده قرار داد، مگر آن‌که تمهید خاصی برای جلوگیری از جداشدگی پوشش بتن در نظر گرفته شده باشد.

*ضریب کاهش مقاومت ۰/۸۵ که در ستون‌های بتنی برای آرماتور فولادی مورد پذیرش آیین‌نامه‌های مختلف قرار گرفته است را می‌توان برای آرماتورهای GFRP نیز استفاده کرد.

*آرماتورهای GFRP در حدود ۱۰ درصد ظرفیت فشاری کل ستون سهم باربری داشتند که تقریباً برابر با سهم آرماتورهای فولادی (حدود ۱۲ درصد) می‌باشد. این مساله نشان می‌دهد که آرماتورهای GFRP در فشار، به شرط محصور شدگی مناسب به جهت جلوگیری از کماتورها، سهم موثری دارند [۱۵].

Afifi در سال ۲۰۱۳ به بررسی آزمایشگاهی و تئوری رفتار محوری ستون‌های بتنی با مقطع دایره‌ای مسلح به آرماتورهای GFRP و CFRP پرداخت. او در کل ۲۷ عدد ستون بتنی دایره‌ای به قطر ۳۰۰ میلی‌متر را مورد آزمایش قرار داد. او نمونه‌های خود به سه بخش دسته‌بندی کرد. بخش اول شامل سه نمونه، که یکی از آن‌ها بتن ساده (بدون هیچ گونه آرماتور)، و دو عدد دیگر با آرماتورهای فولادی بودند، می‌باشد. بخش دوم شامل ۱۲ ستون بتنی مسلح به آرماتور طولی و عرضی GFRP، و بخش سوم نیز عیناً مشابه با بخش دوم با این تفاوت که نوع آرماتورها از GFRP به CFRP تغییر کرده است، می‌باشند. در این آزمایشات، پارامترهای مختلفی نظیر نوع آرماتور، نسبت آرماتور طولی، نسبت حجمی آرماتورهای عرضی، قطر آرماتورها، فواصل دورپیچ‌ها، نحوه چینش آرماتورهای عرضی (دورپیچ و خاموت) و همچنین طول هم‌پوشانی خاموت‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۱، نمای کلی نمونه‌های مورد آزمایش و برخی مشخصات آن را نمایش می‌دهد [۱۶].



شکل (۱): نمای کلی نمونه‌های مورد آزمایش Afifi [۱۶]

نتایج حاصله از آزمایشات انجام شده توسط Afifi را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

*نمونه‌های مسلح به آرماتور GFRP به طور میانگین ظرفیتی به میزان ۷ درصد پایین‌تر از نمونه‌های مسلح به آرماتور فولادی دارند، در حالی که ستون‌های مسلح به آرماتور CFRP به طور میانگین ظرفیتی به میزان ۵ درصد پایین‌تر از نمونه مشابه مسلح به آرماتور فولادی دارند.

*استفاده از آرماتورهای عرضی GFRP و CFRP به شکل‌های دورپیچ و تنگ، با توجه به ضوابط CSA S806-12 باعث ایجاد قیدهای کافی کمانش آرماتورهای طولی می‌شود و محصورشدگی مناسبی را درهسته بتن در مراحل بعد از نقطه اوج، فراهم می‌آورد.

*در این پژوهش به این نتیجه رسیده شد که صرف‌نظر کردن از اثر آرماتورهای طولی FRP در آیین‌نامه کانادا CAN/CSA S806-12 باعث پایین‌تر در نظر گرفتن ظرفیت ستون بتنی می‌شود.

*آرماتورهای GFRP و CFRP در این آزمایشات تا ۷۵ درصد کرنش فشاری خود رسیدند که نشان‌دهنده موثر بودن این آرماتورها در تحمل فشار، حتی تا بعد از خرابی بتن می‌باشد.

ممقانی و خالو در سال ۲۰۱۹، رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی مسلح به آرماتورهای GFRP را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که قاب‌های مسلح به این آرماتورها نسبت به قاب‌های مشابه ولی مسلح به آرماتورهای فولادی دارند هم مقاومت بیشتر و هم شکل پذیری بیشتری دارند [۱۷].

میزان مشارکت آرماتورهای FRP در مقاومت فشاری ستون

با توجه به مقدار کرنش نهایی بتن (در حدود ۰/۰۰۳) و همچنین رفتار خطی آرماتورهای FRP تا حد نهایی و مقدار کرنش نهایی آرماتورهای FRP (در حدود ۰/۰۱) و در نظر داشتن بحث سازگاری کرنش‌ها، می‌توان به این نتیجه رسید که در حد نهایی تنها حدود یک سوم مقاومت نهایی آرماتورهای FRP فعال می‌شوند و امکان استفاده از کل ظرفیت فشاری آرماتورها نیست. با این حال می‌توان با در نظر گرفتن تمهیداتی نظیر استفاده از آرماتور FRP با مقاومت بیشتر یا ضریب کشسانی بیشتر و یا درصد آرماتور طولی بالاتر، درصد مشارکت آرماتورهای FRP در باربری فشاری ستون‌های بتنی را افزایش داد. رابطه ۱ برای محاسبه میزان نیروی فشاری قابل تحمل توسط ستون بتنی مسلح شده به آرماتور FRP پیشنهاد می‌شود.

$$P_{\max} = 0.85f'_c(A_g - A_{FRP}) + [\min \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon'_c \times (0.8E_{fu}) \\ 0.55f_{fu} \end{array} \right\} \times A_{FRP}] \quad (1)$$

در رابطه ۱، A_g مساحت کل مقطع بتنی، A_{FRP} مساحت آرماتورهای FRP، E_{fu} ضریب کشسانی آرماتورهای FRP، f_{fu} تنش نهایی آرماتورهای FRP و ε'_c کرنش نهایی بتن می‌باشد. در این رابطه، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

۱- مقدار ضریب کشسانی فشاری آرماتور FRP مطابق با تحقیقات ذکر شده در بخش قبلی، برابر با ۸۰ درصد ضریب کشسانی کششی در نظر گرفته شده است.

۲- مقدار تنش نهایی فشاری آرماتور FRP مطابق با تحقیقات ذکر شده در بخش قبلی، برابر با ۵۵ درصد تنش نهایی کششی در نظر گرفته شده است.

۳- فرض شده است آرماتورهای عرضی به میزان کافی و با فواصل مناسب وجود دارد و عملاً کمانش آرماتورهای طولی مهار شده اند.

۴- توزیع تنش ویتنی^۵ برای بتن فرض شده است.

برای بررسی میزان مشارکت آرماتورهای FRP بر روی مقاومت فشاری ستون های بتنی، یک مطالعه پارامتریک صورت گرفت که در آن پارامترهای ابعاد ستون، میزان آرماتورهای طولی، انواع آرماتورهای FRP و مقاومت بتن مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات نمونه های در نظر گرفته شده و میزان درصد مشارکت آرماتورهای FRP برای این نمونه ها در جدول شماره ۱ معرفی شده اند.

جدول (۱): مشخصات نمونه های در نظر گرفته شده به همراه میزان درصد مشارکت آرماتورهای FRP

نمونه	ابعاد ستون (میلی متر)	آرماتور طولی *	نوع آرماتور FRP	ضریب کشسانی آرماتور FRP (GPa)	مقاومت کششی آرماتور FRP (MPa)	f_c' (MPa)	درصد آرماتور طولی ** (ρ)	درصد مشارکت آرماتورهای FRP
S-1	۵۰۰x ۵۰۰	8 ϕ 25	GFRP	۴۵	۶۰۰	۳۰	۱.۵۷	۶.۳۳
S-2	۵۰۰x ۵۰۰	8 ϕ 20	GFRP	۴۵	۶۰۰	۳۰	۱.۰۰	۴.۱۲
S-3	۵۰۰x ۵۰۰	12 ϕ 25	GFRP	۴۵	۶۰۰	۳۰	۲.۳۵	۹.۲۷
S-4	۵۰۰x ۵۰۰	16 ϕ 25	GFRP	۴۵	۶۰۰	۳۰	۳.۱۴	۱۲.۰۷
S-5	۷۰۰x ۷۰۰	8 ϕ 25	GFRP	۴۵	۶۰۰	۳۰	۰.۸۰	۳.۳۱
S-6	۳۵۰x ۳۵۰	8 ϕ 25	GFRP	۴۵	۶۰۰	۳۰	۳.۲۰	۱۲.۳۰
S-7	۵۰۰x ۵۰۰	8 ϕ 25	CFRP	۲۰۰	۳۰۰۰	۳۰	۱.۵۷	۲۳.۰۹
S-8	۵۰۰x ۵۰۰	8 ϕ 25	AFRP	۸۰	۲۰۰۰	۳۰	۱.۵۷	۱۰.۷۲
S-9	۵۰۰x ۵۰۰	8 ϕ 25	GFRP	۴۵	۶۰۰	۲۵	۱.۵۷	۷.۵۰
S-10	۵۰۰x ۵۰۰	8 ϕ 25	GFRP	۴۵	۶۰۰	۴۰	۱.۵۷	۴.۸۲

* قطر آرماتورهای طولی در نظر گرفته شده به صورت فرض می باشند و ممکن است با موجودی سایزهای مختلف در بازار متفاوت باشد.

** در حال حاضر آیین نامه ACI 440.1R محدودیتی برای حداقل یا حداکثر مقدار آرماتور طولی در ستون ها ندارد.

خلاصه نتایج این تحقیق به شرح زیر می باشد:

* با افزایش میزان آرماتورهای طولی (و در نتیجه افزایش درصد آرماتورها در سطح مقطع بتن) میزان مشارکت آرماتورهای FRP بیشتر می شود به طوری که با افزایش آرماتورها از 8 ϕ 20 به 16 ϕ 25 میزان مشارکت از ۴/۱۲ درصد به ۱۲/۰۷ درصد افزایش یافته است.

* با افزایش ابعاد ستون، در یک میزان آرماتور مشخص (و در نتیجه افزایش درصد آرماتورها در سطح مقطع بتن)، میزان مشارکت آرماتورهای FRP کمتر می شود به طوری که با افزایش ابعاد ستون از ۳۵۰ میلی متر به ۷۰۰ میلی متر میزان مشارکت از ۱۲/۳۰ درصد به ۳/۳۱ درصد کاهش یافته است.

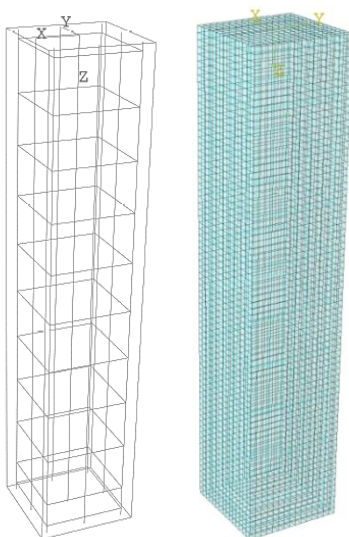
* نوع آرماتورهای FRP (و در نتیجه میزان مقاومت و ضریب کشسانی) تاثیر به سزایی در میزان مشارکت این آرماتورها دارد. با تغییر نوع آرماتورها از GFRP با مقاومت نهایی ۶۰۰ مگاپاسکال و ضریب کشسانی ۴۵ گیگاپاسکال به CFRP با مقاومت نهایی ۳۰۰۰ مگاپاسکال و ضریب کشسانی ۲۰۰ گیگاپاسکال، میزان مشارکت از ۶/۳۳ درصد به ۲۳/۰۹ درصد افزایش یافت.

⁵ Whitney Stress Block

* تغییر مقاومت بتن هم می‌تواند تا حدودی بر میزان تاثیرگذاری آرماتورهای FRP تاثیر گذار باشد به طوری که با افزایش مقاومت بتن از ۲۵ مگاپاسکال به ۴۰ مگاپاسکال میزان مشارکت از ۴/۸۲ درصد به ۷/۵۰ درصد افزایش یافته است.

صحت سنجی نتایج با استفاده از نرم افزار المان محدودی

به جهت صحت سنجی نتایج به دست آمده نظیر درصد مشارکت آرماتورهای FRP که از روی میزان مقاومت نهایی ستون به دست آمده اند، یک مدل مشابه با نمونه آزمایشگاهی Deluca [۱۶]، شامل ستون و آرماتورهای طولی و عرضی FRP، در نرم‌افزار اجزاء محدودی آباکوس مدل سازی شده است تا رفتار آن ارزیابی شود. مدل ساخته شده، با تقریب بسیار خوبی نزدیک به شرایط آزمایشگاهی مدل Deluca بوده است. شکل ۲، مدل ساخته شده در این نرم‌افزار را نمایش می‌دهد.



شکل (۲): نمای مدل ساخته در المان محدودی

مشخصات رفتاری بتن در نرم‌افزار اجزاء محدودی مطابق با جدول ۲ در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): مشخصات رفتاری بتن در نرم‌افزار اجزاء محدودی

مشخصات الاستیک بتن	مشخصات پلاستیک بتن بر اساس مدل خرابی خمیری بتن ^۶
ضریب کشسانی ^۷ : ۲۷۸۰۵ مگاپاسکال	زاویه اتساع ^۹ : ۳۱ درجه
ضریب پواسون ^۸ : ۰/۱۵	خروج از مرکزیت ^{۱۰} : ۰/۱
	$fb0/fc0$: ۱/۱۶
	K : ۰/۶۷
	پارامتر گرانیوی ^{۱۱} : ۰/۰۰۰۱

⁶ Concrete Damage Plasticity

⁷ Elasticity Modulus

⁸ Poisson's ratio

⁹ Dilation Angle

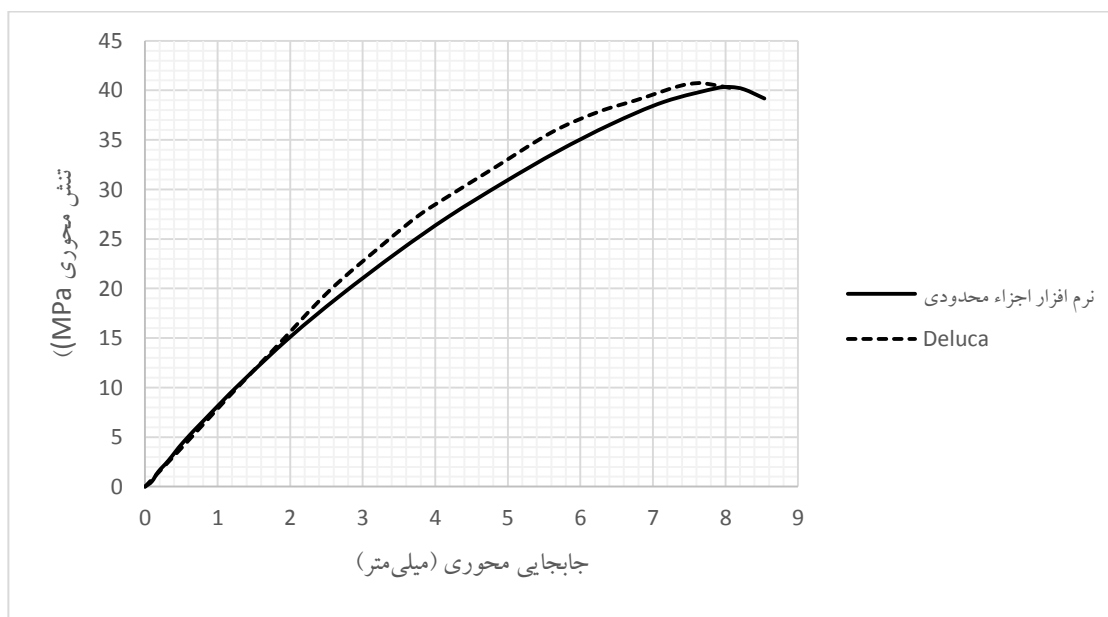
¹⁰ Eccentricity

¹¹ Viscosity Parameter

برای رفتار تنش-کرنش فشاری بتن از مدل Hognestad و برای رفتار کششی از مدل تک خطی بدون سختی پس از ترک خوردگی¹² استفاده شده است. اثرات محصور شدگی ستون در اثر آرماتورهای عرضی در هسته اصلی ستون نیز در نظر گرفته شده است و نمودار تنش-کرنش در این ناحیه (هسته ستون) اصلاح شده است. در نتیجه ناحیه پوشش¹³ اطراف ستون به صورت محصور نشده و ناحیه هسته ستون به صورت محصور شده در نظر گرفته شده است.

برای آرماتورهای FRP هم از مدل رفتاری خطی کشسان استفاده شده است. مشخصات مقاومت کششی و ضریب کشسانی این آرماتورها در هر یک از مدل‌ها در جدول ۱ آورده شده است. همچنین برای اتصال بین آرماتورها و بتن با استفاده از قید¹⁴ ناحیه مدفون¹⁵ در نرم‌افزار تعریف شده است.

نمودار تنش-جابجایی محوری مدل ساخته شده، که مشابه با نمونه آزمایشگاهی Deluca می‌باشد در شکل ۳، در کنار نمودار نمونه آزمایشگاهی Deluca نمایش داده شده است. همان‌گونه که از این نمودار مشخص می‌باشد، نتایج بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشند و اندک اختلاف موجود، مربوط به برخی فرضیات در مدل مصالح می‌باشد. همچنین شکل ۴، تنش محوری (S11) را در مدل ایجاد شده در نرم‌افزار اجزاء محدودی نمایش می‌دهد. این شکل نمایانگر مشارکت آرماتورهای FRP در باربری محوری ستون می‌باشد، به طوری که این آرماتورها در این مدل متحمل تنش فشاری حدود ۱۹۰ مگاپاسکال شده‌اند. هرچند این مقدار تنش، هنوز با تنش نهایی این آرماتورها (۶۰۰ مگاپاسکال) تفاوت زیادی دارد، اما با این حال، این آرماتورها توانسته‌اند حدود ۶ درصد ظرفیت محوری ستون را در این مدل افزایش بدهند که این موضوع نشان دهنده تاثیرگذاری این آرماتورها در ظرفیت محوری ستون می‌باشد.



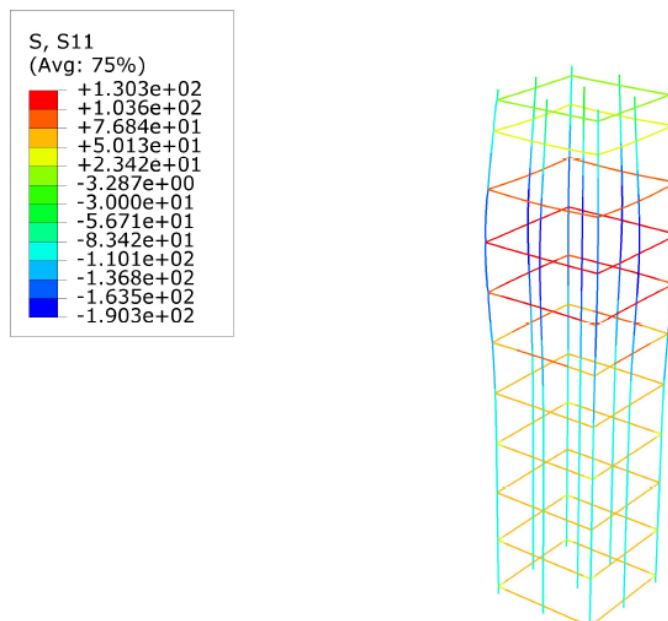
شکل (۳): مقایسه نمودار تنش محوری-جابجایی محوری برای نمونه آزمایشگاهی Deluca و مدل S-1

¹² No stiffening

¹³ Cover

¹⁴ Constraint

¹⁵ Embedded Region



شکل (۴): تنش محوری آرماتورهای FRP در مدل S-1

نتیجه گیری

همانطور که در بخش ۳ این مقاله نشان داده شد، میزان تاثیرگذاری و مشارکت آرماتورهای FRP می تواند به عوامل متعددی بستگی داشته باشد و صرف نظر کردن از آن می تواند در برخی موارد بسیار محافظه کارانه باشد، تا جایی که به طور مثال در نمونه S-7، ۲۳ درصد از ظرفیت فشاری ستون مربوط به این آرماتورها بوده است و صرف نظر کردن از آن ها یعنی نادیده گرفتن تقریباً یک چهارم ظرفیت ستون. موثرترین پارامترها در میزان مشارکت درصد آرماتور طولی در سطح مقطع بتن و نوع آرماتورهای FRP است. به طور خلاصه با افزایش میزان آرماتورهای طولی ستون، کاهش ابعاد ستون، افزایش مقاومت نهایی و ضریب کشسانی آرماتورهای FRP و افزایش مقاومت بتن، میزان مشارکت آرماتورهای FRP افزایش می یابد. در نهایت به نظر می رسد علیرغم نشان دادن این موضوع که آرماتورهای FRP می توانند در تعیین ظرفیت فشاری ستون تاثیرگذار باشند و صرف نظر از آن ها به نتایج غیر اقتصادی می انجامد، تحقیقات بیشتری به خصوص تحقیقات آزمایشگاهی در این زمینه مورد نیاز است.

مراجع

- [1]. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars," ACI Committee Reports, 2006.
- [2]. federation internationale du beton (fib), "FRP Reinforcement in RC Structures," fib, Luasanne, 2007.
- [3]. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars," ACI Committee Reports, 2015.
- [4]. Japan Concrete Institute, "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials," Concrete Engineering Series No. 23, Tokyo, 1997.
- [5]. L. P. Ye, P. Feng, K. Zhang, L. Lin, Q. R. Yue and T. Yang, "FRP in Civil Engineering in China: Research and Applications," in Proceedings of the Sixth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6), Singapore, 2003 .

- [6]. U. Meier, "Carbon Fiber Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering," *Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 7-12, 1992 .
- [7]. L. Taerwe, "FRP Activities in Europe: Survey of Research and Applications," in *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, Tokyo, 1997 .
- [8]. ACI Committee 440, "ACI 440.R - Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures," *ACI Committee Reports*, 2007.
- [9]. W. P. Wu, "Thermomechanical Properties of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bars," *West Virginia University, Morgantown*, 1990.
- [10]. P. K. Mallick, "Fiber Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design,," *Marcell Dekker, Inc, New York*, 1988.
- [11]. M. R. Ehsani, *Glass-Fiber Reinforcing Bars, London: Alternative Materials for the Reinforcement and Prestressing*, 1993 .
- [12]. S. Alsayed, Y. Al-Salloum, T. Almusallam and M. Amjad, "Concrete Columns Reinforced by Glass Fiber Reinforced Polymer Rods," *ACI Structural Journal*, pp. 103-112, 1999 .
- [13]. A. Mirmiran, W. Yuan and X. Chen, "Design for Slenderness in Concrete Columns Internally Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars," *ACI Structural Journal*, vol. 1, no. 98, pp. 116-125, 2001 .
- [14]. A. De Luca, "Behavior of Full-Scale Reinforced Concrete Members with External Confinement or Internal Composite Reinforcement under Pure Axial Load," *University of Miami, Florida*, 2009.
- [15]. H. Tobbi, A. Faraghy and B. Benmokrane, "Concrete Columns Reinforced Longitudinally and Transversally with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars," *ACI Structural Journal*, vol. 4, no. 109, pp. 551-558, 2012 .
- [16]. M. Afifi, "Behavior of Circular Concrete Columns Reinforced With FRP Bars And Stirrups," *Universite de Sherbrooke - Département de génie civil, Québec*, 2013.
- [17]. M. Aliasghar-Mamaghani and A. Khaloo, "Seismic behavior of concrete moment frame reinforced with GFRP bars" *Composites Part B: Engineering*, vol. 163, pp. 324-338, 2019.