

## بررسی آزمایشگاهی و عددی ستون پروفیل کامپوزیت GFRP بتنی محصورشده با FRP

محسن اسحاقیان<sup>۱</sup>، ابوالقاسم کرامتی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

نوع جدیدی از ستون مرکب متشکل از پروفیل کامپوزیت، بتن و الیاف پلیمری (FRP) ارائه شده و توسط تست آزمایشگاهی و مدل عددی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این تحقیق طراحی یک ستون بتنی کامپوزیتی بدون استفاده از مصالح فولادی اما با وزن نسبتاً کم می باشد. مشکلات رایج خرابی بتن به دلیل انبساط و زنگ زدگی اعضای تقویت کننده اجتناب ناپذیر است. با استفاده از مقاطع سازه‌ای کامپوزیتی I شکل FRP بجای فولاد تقویت کننده در بتن می توان به این هدف رسید. ستون مرکب با استفاده از استوانه FRP با الیاف شیشه پروفیل کامپوزیت را احاطه نموده و پس از آن مقطع با بتن پر شده است. استوانه GFRP بعنوان یک قالب درجا عمل می کند، علاوه بر این محصورشدگی بتن را نیز تأمین می کند. لذا سه عدد ستون در برنامه آزمایشگاهی تحت بارگذاری فشاری محوری مونوتونیک مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. ظرفیت نهایی هریک از ستون‌های مرکب کامپوزیتی آزمایش شده با ظرفیت تئوری مدل عددی پیشنهادی برنامه ANSYS مقایسه شده‌اند، نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی و آنالیز عددی سازگاری و توافق خوبی داشته‌اند.

کلمات کلیدی: ستون مرکب، بتن، FRP، محصورشدگی، استوانه، پروفیل کامپوزیت، فشردگی.

\*نویسنده مسئول: ابوالقاسم کرامتی

پست الکترونیکی: keramati@aut.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2016.41235  
<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2016.41235>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۶

## ۱- مقدمه

امروزه تولیدات الیاف تقویت شده (FRP) در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مقایسه با فولاد تولیدات FRP مزیت‌هایی دارند، در حالات مختلف محیط زیستی به علت عوامل آب و هوایی و اثر خوردگی و خرابی مواد آتش‌زا و نمک‌ها و فعل و انفعالات عوامل شیمیایی، الیاف پلیمری و پروفیل‌های کامپوزیتی یک انتخاب موفق‌آمیز و عملی در جایگزینی مواد و مصالح ستون‌های رایج بتن مسلح بوده است. مطالعات گسترده‌ای بمنظور تأثیر الیاف پلیمری مسلح شده روی رفتار ستون‌های بتنی تقویت شده با FRP انجام شده است [۱-۳]. در تحقیق حاضر، یک کاربرد جدید از ترکیب یک پروفیل کامپوزیت GFRP و بتن پیشنهاد شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، کاربرد کامپوزیت‌های FRP بمنظور رشد و گسترش سیستم‌های سازه‌ای جدید و عملکرد آنها متمرکز شده است. یکی از این سیستم‌های سازه‌ای، استوانه‌های FRP پر شده با بتن بوده که بطور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است [۴-۱۰]. این مطالعات توانایی ستون‌های مرکب به پدید آمدن یک رفتار شکل پذیر را نشان داده است. مزیت‌های مصالح ساختمانی گوناگون در یک همبستگی و یکپارچگی مؤثر توسط Karimi و سایرین [۱۱]، همچنین Yu و سایرین [۱۲] بصورت یک ستون مرکب جدید پیشنهاد شده است. ستون مرکب مورد نظر شامل مقطع فولادی بوده که با یک استوانه FRP پر شده از بتن احاطه شده است. در حال حاضر الیاف پلیمری مسلح شده (FRP) بعنوان یک مصالح سازه‌ای بخوبی اثبات شده است. تیر، صفحه و پروفیل‌ها از تولیدات رایج و متداول تکنولوژی پالتروژن می‌باشند. برای نمونه، یک کاربردی کاملتر از ترکیب پروفیل کامپوزیت GFRP و بتن توسط Ashraf Biddah [۱۳] پیشنهاد شده و آزمایش شده است.

در این مطالعه، مقطع فولادی I شکل و استوانه فولادیه ترتیب با پروفیل کامپوزیت GFRP و استوانه یا لایه الیاف پلیمری مسلح شده FRP جایگزین شده‌اند که در شکل ج-۱ نشان داده شده است. جایگزینی استوانه فولادی با FRP یک قالب بندی مناسب برای بتن بوده و به کاهش قابل ملاحظه در وزن و هزینه ساخت منجر می‌شود. تحقیق رایج رفتار فشاری ستون‌های مرکب پیشنهادی در تراز مقطع تحت بارگذاری مونوتونیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای جلوگیری از شکست پایداری، همه نمونه‌های آزمایش شده ستون‌های کوتاه انتخاب شده‌اند. یک مدل عددی اجزاء محدود بمنظور پیش بینی رفتار مقطع ستون‌های مرکب از قبیل ظرفیت باربری و مود شکست توسعه یافته است. همچنین نتایج آزمایشگاهی با مدل عددی پیشنهادی مقایسه شده‌اند و توافق خوبی مشاهده شده است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

بطور کلی مجموع سه عدد نمونه ستون در این مطالعه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نمونه محصور نشده C برای مقایسه و کنترل آزمایش، نمونه CG ستون مرکب تقویت شده با استوانه GFRP (شکل الف-۱) و نمونه CF تقویت شده با لایه CFRP (شکل ب-۱) و در تمام نمونه‌ها پروفیل کامپوزیتی پالتروژن GFRP مدفون شده است. در شکل‌های ۱ و ۲ جزئیات و مقاطع نمونه‌های ستون کامپوزیت نشان داده شده است. جدول ۱ مشخصات طراحی و ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی درج شده است.

جدول ۱: مشخصات و ابعاد آزمایش

نوع نمونه	مشخصه	ابعاد مقطع L-D (mm)	ضخامت استوانه GFRP (mm) <sup>۱</sup>	ضخامت لایه CFRP (mm)	پروفیل کامپوزیت فایبرگلاس I شکل $d_s \times b_f \times t_w \times t_f$ (mm)
استوانه بتنی محصور نشده	C	۵۰۰-۱۰۸	N.A.	N.A.	۴۰×۶۰×۵×۵
استوانه GFRP محصور شده	CG	۵۰۰-۱۱۶	۴	N.A.	۴۰×۶۰×۵×۵
لایه CFRP محصور شده	CF	۵۰۰-۱۰۸/۸	N.A.	۰/۴	۴۰×۶۰×۵×۵

<sup>۱</sup> قطر داخلی و قطر خارجی به ترتیب ۱۰۸ و ۱۱۶ میلیمتر هستند.

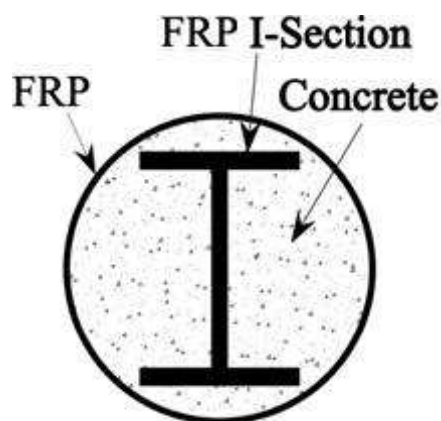
برنامه و کار آزمایشگاهی شامل آزمایش بار محوری فشاری مونوتونیک بوده و نمونه‌های آزمایش شده، استوانه بتنی با قطر  $D=108 \text{ mm}$  و ارتفاع (طول)  $L=500 \text{ mm}$  که پروفیل کامپوزیت I شکل درون آن مدفون شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱: (الف) ستون محصور شده با استوانه GFRP (ب) ستون محصور شده با لایه CFRP (ج) شماتیکی از ابعاد مقطع.

در ساخت نمونه‌های ستون مرکب اطراف و حول پروفیل کامپوزیت I شکل قرار گرفته و پس از آن با بتن پر شده است. پوشش مناسب بتن، حداقل معادل  $15 \text{ mm}$  در نظر گرفته شده است. ابعاد مقطع پروفیل کامپوزیت I شکل شامل ارتفاع جان  $d_s=40 \text{ mm}$  عرض بال

$b_f=60 \text{ mm}$ ، ضخامت بال و جان  $t_f=5 \text{ mm}$  می‌باشد.

### ۳- مشخصات و خواص مصالح

به منظور تعیین مقاومت مشخصه فشاری بتن مصرفی آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های استاندارد محصور نشده انجام شد. میزان مقاومت تعیین شده بطور میانگین برای نمونه‌ی اول و دوم به ترتیب برای  $30 \text{ MPa}$  بدست آمده است. خواص مکانیکی پروفیل‌های کامپوزیتی (پلتروزن) و استوانه فایبرگلاس براساس اطلاعات کارخانه تولید کننده (آسیا کامپوزیت) از آزمایشهای استاندارد بدست آمده‌اند که در جدول ۲ ارائه شده است. برای تهیه و آماده سازی نمونه های محصور شده با لایه های CFRP سطح استوانه بتنی قبل از استفاده از چسب اپوکسی بطور کامل صاف و خشک شده است. ترکیب دو جزئی (SIKADUR ۳۳۰)، رزین و هاردنر با نسبت ترکیب ۱:۲ به مدت حداقل پنج دقیقه با دست مخلوط شده و یک لایه نازک چسب اپوکسی روی سطح استوانه بتنی بوجود آمده است. تمام نمونه‌ها با زاویه صفر درجه و در جهت شعاعی ستون بتنی دورپیچ شده‌اند و بمنظور عمل آوری چسب اپوکسی بمدت ۲۱ روز در دمای محیط نگهداری شده‌اند. مشخصات مکانیکی لایه CFRP (Sika Wrap Hex ۲۳۰C) و رزین مورد استفاده در برنامه آزمایشگاهی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: خواص مکانیکی مواد مرکب استفاده شده در ستون‌ها

مشخصه کامپوزیت	استوانه GFRP	لایه CFRP	پروفیل کامپوزیت فایبرگلاس I شکل
تنش کششی در جهت الیاف (MPa)	۵۴۷	۸۹۴	۵۴۷
مدول الاستیسیته در جهت الیاف (GPa)	۲۶	۶۵/۴	۲۶
مقاومت فشاری در جهت الیاف (MPa)	۵۴۷	۷۷۹	۵۴۷
مدول الاستیسیته عمود در جهت الیاف (GPa)	۱۷	۶۷	۱۷
مقاومت برشی در صفحه X-Y (MPa)	۵۰	۶۳	۵۰
کرنش نهایی کششی (%)	۲/۵	۱/۴	۲/۵
نسبت پواسن در صفحه X-Y	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۲۵
نسبت پواسن در صفحه Y-Z	۰/۳۲	۰/۳	۰/۳۲
نسبت پواسن در صفحه X-Z	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۲۵

#### ۴- نصب و آماده سازی تجهیزات

آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌ها در آزمایشگاه بخش سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (BHRC) و در سال ۱۳۹۳ (۲۰۱۵ میلادی) انجام شده است. نمونه‌ها توسط جک هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰۰ kN در مرکز نمونه و با استفاده از صفحه فولادی در دو انتها بمنظور رسیدن به یک توزیع تنش ثابت در مقطع بتن مرکب در معرض بار محوری قرار گرفته است. تراز بار اعمالی به نمونه ستون‌ها بطور پیوسته توسط نیروسنج (Load Sell) اندازه گیری شده و مقدار بار در هر مرحله از بارگذاری بمنظور اندازه گیری و مشاهده نتایج ثابت نگه داشته شده است. شکل ۲ عکس‌هایی از نحوه ابزار بندی و تجهیزات برنامه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

سه تغییر مکان سنج جهت ثبت تغییر مکان طولی و ۳ تغییر مکان سنج جهت ثبت تغییر مکان جانبی نمونه نصب شده است. تعداد چهار کرنش سنج محوری و جانبی بمنظور اندازه گیری کرنش‌های شعاعی و محوری در مرکز استوانه‌ها نصب شده‌اند. نمونه‌های ستون مرکب تحت بارگذاری فشاری بصورت کنترل نیرو و بدون میزان نرخ (بارگذاری) مورد آزمایش قرار گرفته‌اند (شکل ۲).



(الف)



(ب)

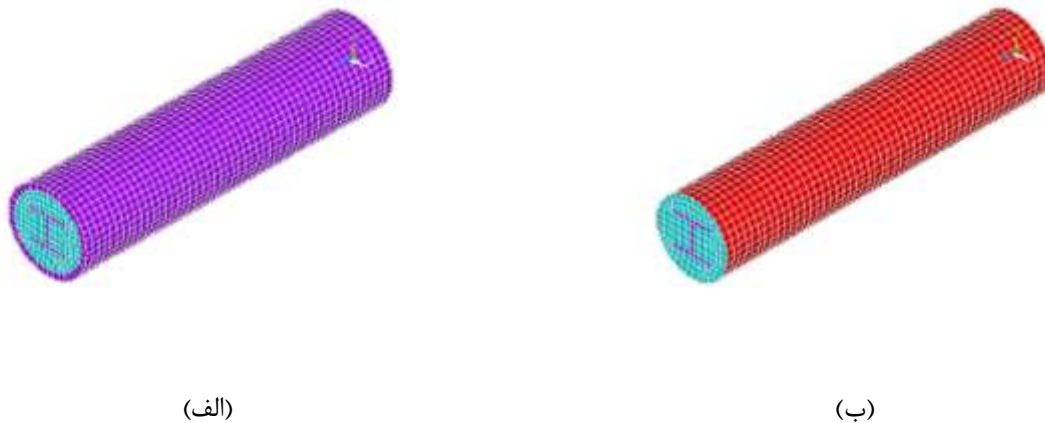
شکل ۲: عکس‌هایی از نصب و آماده سازی تجهیزات (الف) ستون محصور شده با استوانه GFRP (ب) ستون محصور شده با لایه CFRP.

#### ۵- مدل عددی

مدل‌سازی عددی ستون‌های مرکب کامپوزیتی، پیچیدگی زیادی دارد. در مدل‌سازی عددی این ستونها، استراتژی‌های جدید مدل‌سازی بررسی شده و جهت مطالعه پارامتریک عوامل موثر بر عملکرد ستون‌های FRP پروفیل کامپوزیتی مدفون شده در بتن از نرم‌افزار اجزاء محدود غیرخطی ANSYS [۱۴] استفاده شده است. استوانه GFRP و پروفیل کامپوزیت I شکل با استفاده از المان‌های Solid (SOLID۴۶) غیرخطی

مدل شده‌اند. المان مورد نظر هشت گره دارد و در هر گره شامل سه درجه آزادی (سه تغییرمکان) است. برای مدل‌سازی لایه‌های CFRP از المان‌های الاستیک و خطی shell (۱۸۱) استفاده شده است. این المان از چهار گره و هر گره از شش درجه آزادی (سه تغییرمکان و سه دوران) تشکیل شده است. برای مدل‌سازی مسائل بتن تقویت شده از المان سه بعدی SOLID۶۵ استفاده شده است. این المان متشکل از هشت گره بوده و در هر گره سه درجه آزادی وجود دارد. با توجه به نوع بارگذاری و استفاده از چند نوع مصالح متفاوت بیشترین اندازه مش‌بندی در مدل‌سازی و آنالیز اجزاء محدود برابر ۲۰ mm و با نسبت ۰/۴ درصد طول (ارتفاع) ستون مرکب در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی اعمالی در انتهای نمونه‌های ستون حالت تکیه‌گاه ساده بوده و بنابراین تغییرمکان گره‌ها در تکیه‌گاه باید مقید شده باشند. تعداد المان‌ها در مدل‌سازی و آنالیز اجزاء محدود بعد از رسیدن به یک همگرایی مناسب در نتایج عددی لحاظ شده‌اند. برای حل معادلات غیرخطی از روش استاندارد نیوتن-رافسون استفاده شده است.

مدل شکست با توجه به شکست بتن یا شکست FRP به ترتیب برطبق معیار willam-warnke [۱۵] و معیار کامپوزیت‌ها Tsai-Wu [۱۶] فرض شده است. در شکل ۳ مش‌بندی و نحوه یکپارچگی المان‌ها به مقطع بتن از ستون مرکب نشان داده شده است.



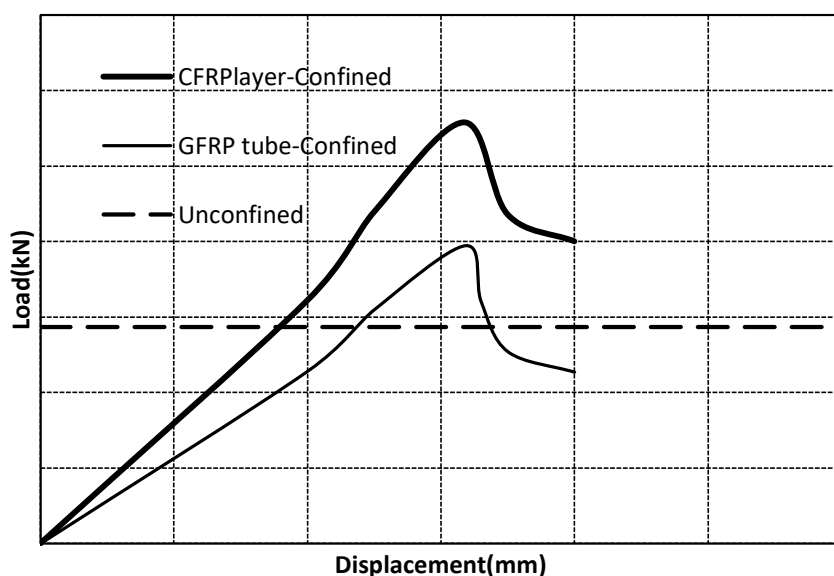
شکل ۳: مدل‌سازی اجزاء محدود ستون مرکب الف) ستون محصورشده با استوانه GFRP ب) ستون محصورشده با لایه CFRP.

## ۶- تحلیل نتایج آزمایشگاهی

نتایج آزمایشگاهی تغییرمکان، بار، کرنش‌ها و گسترش ترک در مراحل مختلف بارگذاری ثبت شدند تا زمانیکه نمونه‌های آزمایش شده به لحظه بار شکست رسیدند. سختی فشاری نمونه کنترل و شاهد C از نمونه‌های تقویت شده CG و CF به ترتیب با استوانه GFRP و لایه CFRP کمتر بوده است. ظرفیت باربری نمونه CF از نمونه CG بدلیل مدول الاستیک پایین استوانه GFRP در مقایسه با لایه CFRP بیشتر بوده است. کاربرد پروفیل کامپوزیت فایبرگلاس I شکل در تمام نمونه‌ها سختی فشاری را تا اندازه افزایش می‌دهد. این عملکرد بین بتن و پروفیل کامپوزیت فایبرگلاس I شکل نه تنها مقاومت نمونه را بهبود بخشیده بلکه نمونه را به سمت سختی بیشتر هدایت می‌کند.

## ۷- منحنی بار-تغییر مکان

نمودار بار محوری و تغییر مکان یک مقطع سازه‌ای با استفاده از مدل اجزاء محدود با ترکیب پروفیل کامپوزیت I شکل و هسته بتنی و با در نظر گرفتن FRP بعنوان یک سیستم محصورکننده توسعه یافته است. نمودارهای بار-تغییر مکان عددی برای ستون مرکب پروفیل کامپوزیت I شکل مدفون شده در بتن در شکل ۴ نشان داده شده است. از این منحنی‌ها مشاهده میشود که تکنیک و روش تقویت می‌تواند مقاومت حداکثر مقاطع را از  $287/1$  kN برای مقطع محصورنشده به  $394/77$  kN و  $557/73$  به ترتیب برای سیستمهای استوانه-GFRP و لایه-CFRP تحت بارگذاری مونوتونیک افزایش پیدا کند. وجود استوانه GFRP و لایه CFRP بار شکست مقاطع را از  $200/4$  kN برای مقطع محصورنشده به  $228/08$  kN و  $400/13$  به ترتیب برای سیستمهای استوانه-GFRP و لایه-CFRP تحت بارگذاری مونوتونیک افزایش داده است. همه منحنی‌ها در مرحله‌ای متوقف شدند که ستون مرکب به ظرفیت بار نهایی خود رسید.

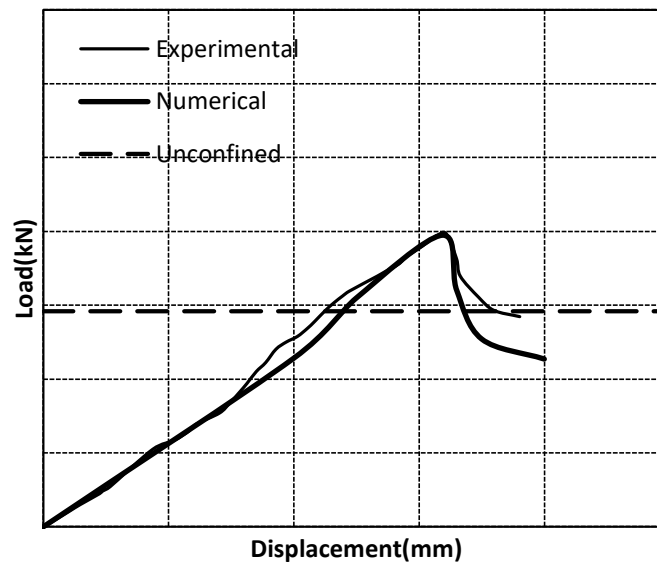


شکل ۴: نمودار بار-تغییر مکان ستون مرکب محصور شده با FRP.

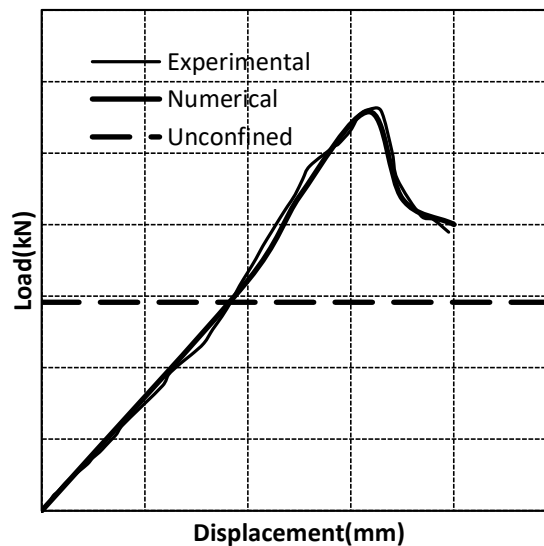
## ۷-۱ ستون پروفیل کامپوزیتی و بتن تقویت شده با استوانه GFRP

نمودار مندرج در شکل ۵ با خط توپر مشکی نشان دهنده رفتار ستون کامپوزیتی تقویت شده با استوانه GFRP تحت بارگذاری مونوتونیک می‌باشد. ملاحظه می‌شود که از ابتدای اعمال نیرو تا تراز نیروی  $147/5$  kN نمودار کاملاً به صورت خطی بوده است. با شروع ترکهای کششی در بتن و افزایش بارگذاری پس از آن به علت ترک ایجاد شده در استوانه GFRP مشاهده می‌شود مقاومت ستون مرکب افت کمی با شیب ملایم پیدا کرده و تراز نیرو به میزان  $167$  kN رسیده است. سپس مجدداً نمودار با همان شیب قبلی روندی صعودی پیدا کرده و هنگامی که نیروی فشاری اعمالی به ستون به میزان  $396/9$  kN می‌رسد این مقطع مرکب مقاومت حداکثر خود را تجربه می‌نماید در این لحظه میزان جابجایی اعمالی به نمونه معادل  $5/6$  mm می‌باشد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، بعد از این تراز بار به یکباره استوانه GFRP کاملاً گسیخته شده و بتن مقطع مرکب به کلی خرد شده است. همچنین اگرچه پروفیل GFRP درون نمونه به خوبی مشاهده نمی‌شود اما

این میزان آسیب و افت مقاومت نشان می‌دهد که پروفیل GFRP هم در درون مقطع شکسته شده است و بار نهایی ستون مرکب در این لحظه ۲۸۴/۴ kN اندازه گیری شده است.



شکل ۵: مقایسه آزمایشگاهی و عددی نمودارهای بار-تغییر مکان ستون مرکب تقویت شده با استوانه GFRP.



شکل ۶: مقایسه آزمایشگاهی و عددی نمودارهای بار-تغییر مکان ستون مرکب محصور شده با لایه CFRP.

## ۷-۲- ستون پروفیل کامپوزیتی و بتن تقویت شده با لایه CFRP

رفتار بار- تغییر مکان نمونه استوانه‌ای تقویت شده با لایه CFRP با خط توپر مشکی تحت اثر بار مونوتونیک در شکل ۶ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود تا تراز بار  $234/3$  kN که نظیر جابجایی  $3/15$  mm است، نمودار رفتاری نسبتاً خطی داشته، هرچند که با اعمال بار و افزایش بارگذاری افت قابل ملاحظه‌ای در نمودار بوجود آمده که این موضوع می‌تواند در اثر بروز اولین شکستها و پارگی در لایه دورپیچ CFRP باشد. پس از تراز بار  $560/8$  KN که مقاومت حداکثر نمونه می‌باشد به یکباره در اثر شکست کامل لایه و گسیختگی CFRP شکست بتن در لبه تکیه‌گاه همانگونه که در شکل نشان داده شده نمودار با روند نزولی به نقطه بار  $413/25$  kN و جابجایی  $7/3$  mm می‌رسد و پس از آن به علت این که پروفیل GFRP همچنان دارای مقاومت می‌باشد نمودار رشد و گسترش داشته و در نهایت در اثر ایجاد گسیختگی در پروفیل GFRP تا تراز بار و جابجایی بار  $389/4$  kN و  $7/9$  mm کاهش می‌یابد.

## ۸- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

نتایج مدل عددی در پارامترهای مختلف شامل بارنهایی، بارحداکثر، سختی محوری الاستیک، تغییر مکان نهایی در جهت محوری ستون مرکب در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین نسبت پارامترهای محاسبه شده عددی به مقادیر آزمایشگاهی مطابق آنها در جدول ۳ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، پیش بینی‌های مدل عددی با مقادیر بدست آمده آزمایشگاهی برای پارامترهای ارائه شده توافق خوبی داشته‌اند. پیش بینی‌های عددی برای همه نمونه‌ها صحیح و درست هستند (کمتر از ۵٪ خطا برای پارامترهای محاسبه شده). اگرچه بین نتایج پیش بینی و آزمایشگاهی برای نمونه‌ها در مرحله خطی و غیرخطی در شکل‌های ۷ و ۸ اختلافی وجود دارد، مدل عددی مقادیر مقاومت حداکثر، بارنهایی و سختی را رضایت بخش ارزیابی کرده است.

جدول ۳: نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با مقادیر پیش بینی عددی (مدل اجزاء محدود)

طراحی نمونه	بارحداکثر (kN)			سختی الاستیک (kN/mm)			تغییر مکان شکست (mm)			بارنهایی (kN)		
	Exp.	Numeric.	Exp./ Numeric.	Exp.	Numeric.	Exp./ Numeric.	Exp.	Numeric.	Exp./ Numeric.	Exp.	Numeric.	$P_u/P_m^1$
P	118/73	115/6	1/0.27	25/0.5	24/26	1/0.32	3/41	3/65	0/934	95/0	72/8	0/629
C	291/78	287/1	1/0.16	56/93	55/80	1/0.2	8/10	7/75	1/0.45	193/23	200/4	0/698
CG	396/85	394/77	1/0.05	59/56	57/0.7	1/0.44	7/60	8/20	0/927	284/4	227/1	0/575
CF	560/82	557/73	1/0.05	74/37	80/48	0/924	7/60	8/10	0/938	40/73	414/14	0/742

$P_u$ =بار حداکثر،  $P_m$ =بارنهایی

## ۹- نتیجه گیری

یک نوع جدید ستون مرکب شامل پروفیل کامپوزیت، بتن و الیاف پلیمری (FRP) شرح داده شد و تحت بارگذاری فشاری محوری مونوتونیک مورد آزمایش قرار گرفته است. سیستم‌های تقویت شده پیشنهادی می‌توانند در ساختمان‌های جدید یا کاربردهای تقویت بمنظور افزایش ظرفیت باربری و سختی محوری ستون‌های مرکب استفاده شوند. رفتار فشاری ستون‌های مرکب پیشنهادی توسط سه نمونه ستون با تکیه



گاه ساده مطالعه شد و یک روش عددی به پیش بینی مقاومت فشاری ستون‌های مرکب پیشنهاد شد. براساس این بررسی‌ها می‌توان بیان کرد، ظرفیت بارپذیری ستون مرکب تحت بارگذاری محوری فشاری مونوتونیک در چند وضعیت و حالت مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. یکی در ناحیه حداکثر بار مقطع پروفیل کامپوزیت I شکل، استوانه GFRP و لایه دورپیچ CFRP و دیگری در محل شکست بتن و گسیختگی ستون به علت افزایش تنش در FRP زمانیکه ستون مرکب تقویت شده است. همچنین سختی محوری و مکانیزم‌های گسیختگی در ناحیه بار شکست ستون‌های مرکب تقویت شده انجام گرفت. نتایج حاکی از آن بود که با استفاده از FRP ظرفیت بار در نقطه حداکثر و بارنهایی و سختی در مقطع تقویت شده (نسبت به حالت محصور نشده) به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. مقاومت فشاری و سختی ستون مرکب تقویت شده با استوانه GFRP کمتر از لایه CFRP بوده است. بنابراین، ستون محصورشده با استوانه GFRP شکل‌پذیری و استهلاک انرژی بیشتری را از خود نشان داده است. ستون پروفیل کامپوزیت فایبرگلاس I شکل مدفون شده در بتن و الیاف پلیمری مسلح شده خارجی (استوانه GFRP، لایه CFRP) نه تنها سختی را افزایش می‌دهد بلکه از شکست کمانش محلی و شکست ناگهانی مقاطع پروفیل کامپوزیت I شکل جلوگیری می‌کند. همچنین نتایج عددی دلالت بر این امر دارند که ظرفیت بار فشاری و سختی ستون‌های محصورشده نسبت به حالت ستون محصورنشده از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار بوده است.

## مراجع

- [1] Teng JG, Yu T, Wong YL, Dong SL. Hybrid FRP-concrete-steel tubular columns: concept and behaviour. *Journal of Construction Build Material* 2007; 21:846-854.
- [2] Wu HL, Wang YF, Yu L, Li XR. Experimental and computational studies on high strength concrete circular columns confined by aramid fiber-reinforced polymer sheets. *Journal of Composite Construction* 2009;13(2):125-34.
- [3] Phama TM, Youssed J. Effect of Different FRP Wrapping Arrangements on the Confinement Mechanism. *Procedia Engineering* 2016; 142: 307 – 313.
- [4] Hadi M, Khan QS, Sheikh MN. Axial and flexural behavior of unreinforced and FRP bar reinforced circular concrete filled FRP tube columns. *Journal of Construction Build Material* 2016; 122: 43-53.
- [5] ElGawady MA, Booker AJ, H.M. Dawood HM. Seismic behavior of post tensioned concrete-filled fiber tubes. *J Composite Construction ASCE* 2010; 14 (5): 616-628.
- [6] Huang L, Sun X, Yan L, Zhu D. Compressive behavior of concrete confined with GFRP tubes and steel spirals. *Polymers* 2015; 7 (5): 851-875.
- [7] Ozbakkaloglu T. A novel FRP-dual-grade concrete-steel composite column system. *Thin-Walled Structures* 2015; 96: 295-306.
- [8] Ozbakkaloglu T. Behavior of square and rectangular ultrahigh-strength concrete-filled FRP tubes under axial compression. *Compos B Engineering* 2013; 54: 97-111.
- [9] Dundar C, Erturkmen D, Tokgoz S. Studies on carbon fiber polymer confined slender plain and steel fiber reinforced concrete columns. *Engineering Structures* 2015; 102: 31-39.
- [10] Ozbakkaloglu T, Oehlers DJ. Manufacture and testing of a novel FRP tube confinement system”, *Engineering Structures* 2008; 30(9): 2448-59.
- [11] Kian Karimi K, Tait MJ, El-Dakhkhni WW. Testing and modeling of a novel FRP-encased steel-concrete composite column. *Journal of composite structures* 2011; 93(5): 1463-73.
- [12] Yu T, Lin G, Zhang SS. Compressive behavior of FRP-confined concrete-encased steel columns. *Composite Structure* 2016; 154: 493-506.
- [13] Ashraf Biddah. Structural reinforcement of bridge decks using pultruded GFRP grating. *Journal of Composite Structures* 2008; 74: 80-88.
- [14] ANSYS User manual 12.0. Release 12.0, ANSYS, Inc; 2014.
- [15] Willam KJ, Warnke ED. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. Proceedings of the international association for bridge and structural engineering 1975; 19: 1-30.
- [16] Tsai SW, Wu EMA. General theory of anisotropic materials. *Journal of Composite Materials* 1971; 5: 58-80.