

## بررسی عددی و آزمایشگاهی ستون های فولادی توخالی مقاوم سازی شده با کامپوزیت های مسلح به الیاف کربن

امیرحمزه کیخا<sup>۱</sup>، مسعود نکویی<sup>۲</sup>، رضا رهگذر<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

### چکیده

در این تحقیق ستون های فولادی قوطی شکل توخالی که در سطح خارجی بوسیله ورقهای CFRP دور پیچ شده و تحت فشار محوری قرار گرفته، بررسی شده اند. روشهای متداول مقاوم سازی از جمله استفاده از ورقهای فولادی ضمن اینکه وزن سازه را افزایش می دهد در بعضی موارد دشوار و حتی غیر ممکن است. تحقیق حاضر در دو مرحله، به صورت تست آزمایشگاهی و مدل سازی به روش اجزای محدود و به کمک نرم افزار ANSYS انجام شده است. به منظور تعیین میزان افزایش بار نهایی فشاری ستون های فولادی قوطی شکل توخالی، تعداد ۷ نمونه قوطی توخالی به ابعاد  $90 \times 90 \times 2/5 \text{ mm}$  که با CFRP تقویت شده بودند، و دو نمونه شاهد مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی گردید. سپس نمونه ها با استفاده از نرم افزار ANSYS شبیه سازی شد. نتایج نشان داد، وقتی که پوشش لایه های CFRP کامل نباشد، CFRP تأثیری در افزایش بار محوری فشاری ستون ها ندارد. همچنین نتایج نشان داد که، موقعیت قرارگیری، تعداد، جهت و درصد پوشش لایه های CFRP در افزایش ظرفیت فشاری ستون های فولادی قوطی شکل توخالی موثر می باشند.

کلمات کلیدی: ستون های فولادی، مقاوم سازی، CFRP، روش اجزای محدود، روش آزمایشگاهی

\*نویسنده مسئول: رضا رهگذر.

پست الکترونیکی: rahgozar@uk.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۲۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱۶

## ۱- مقدمه

پلیمر های مسلح شده به الیاف کربن سالیان زیادی است که جهت تقویت سازه های بتنی استفاده می شود و بدین منظور دستور العمل ها و آئین نامه هایی تهیه شده است [۱]. اخیراً از CFRP جهت تقویت سازه های فولادی استفاده می گردد. بیشتر تحقیقات گذشته جهت تقویت سازه های فولادی بوسیله CFRP، بر روی تیرها و به منظور تقویت خمشی و برشی انجام شده است [۲-۵]. بررسی ها نشان می دهد که تحقیقات کمی جهت تقویت محوری اعضای فولادی با استفاده از CFRP انجام شده است. در یک تحقیق که به منظور افزایش ظرفیت محوری اعضای فشاری انجام شد، کالواگونتا و همکاران، ستون های کانال شکل لبه دار مقاوم سازی شده با CFRP تحت بار محوری را مورد بررسی قرار دادند. به دلیل لایه لایه و جدا شدن CFRP، شکست ناگهانی ستون مشاهده گردید. نتایج نشان داد که استفاده از CFRP، ظرفیت باربری این گونه ستون ها را افزایش می دهد، همچنین آماده سازی سطح و دما دو عامل مهم برای دست یافتن به چسبندگی مناسب بین فولاد و کامپوزیت ها می باشد [۶]. در تحقیق دیگر، جائو و همکاران لوله های توخالی فولادی را با ورق های CFRP تقویت نمودند، آنها نشان دادند که با توجه به تعداد لایه های مورد استفاده، افزایش در مقاومت و سختی بوجود می آید [۷]. همچنین شت و فام، دریافتند که لایه های CFRP عرضی در محدود کردن کمانش موضعی بیرونی اعضای فشاری کوتاه موثر هستند و ظرفیت باربری برای این اعضا را تا ۱۸٪ افزایش می دهند [۸]. هیدر و ژائو، تاثیر مقاوم سازی با CFRP در ستون های کوتاه را ارزیابی کردند. نتایج آزمایش های آنها نشان داد که، ترکیب استفاده CFRP به صورت طولی و عرضی باعث افزایش ظرفیت تسلیم می شود. همچنین میزان استفاده بیشتر از CFRP، تاثیر بیشتری در به تاخیر انداختن کمانش دارد [۹]. در تحقیق مشابه بمیچ و ال چالاکانی، مقاطع فولادی قوطی شکل مقاوم سازی شده با CFRP را تحت فشار محوری قرار دادند، مصالح CFRP باعث افزایش باربری مقاطع تحت فشار گردید [۱۰]. تحقیقات سانداراجا و همکاران نشان داد که، ظرفیت باربری و سختی محوری ستون های فولادی کوتاه که با پیچاندن ورقهای CFRP مقاوم سازی شده بودند، افزایش می یابد. همچنین تغییر شکل محوری کاهش و کمانش موضعی به تاخیر می افتد [۱۱ و ۱۲]. در تحقیقات دیگر به منظور جلوگیری از کمانش موضعی داخلی، اعضای فشاری فولادی توخالی ابتدا با بتن پر و سپس با ورقهای CFRP مقاوم سازی شدند. نتایج نشان داد که اثر توام بتن و CFRP باعث افزایش قابل ملاحظه ی باربری این اعضا می شود [۱۳ و ۱۴].

نتایج بررسی ها نشان می دهد که تحقیقات کمی جهت مقاوم سازی محوری مقاطع فولادی توخالی با استفاده از CFRP انجام شده است. از آنجائیکه مقاطع توخالی فولادی به سبب افزایش نسبت مقاومت به وزن و در واقع صرفه جویی هزینه های ساخت، حمل و نصب، بطور فزاینده ای در صنعت و ساخت سازه های فولادی استفاده می شود، لذا در این تحقیق به بررسی و مقاوم سازی محوری آن مقاطع با استفاده از CFRP پرداخته شده است. در تحقیق حاضر که به صورت عددی و آزمایشگاهی انجام شد، به منظور بدست آوردن الگوی مناسب جهت تقویت محوری ستون های فولادی توخالی با استفاده از پلیمر های مسلح شده به الیاف کربن: موقعیت قرارگیری، درصد پوشش، جهت قرار گیری و تعداد لایه های CFRP مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند.

## ۲- مشخصات مصالح

اندازه و خواص مقاطع فولادی مورد استفاده در تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است. تنش تسلیم و تنش حد نهایی بر اساس آزمایش تست کشش به ترتیب  $352 \text{ N/mm}^2$  و  $419 \text{ N/mm}^2$  بدست آمده است. کامپوزیت مصرفی در این تحقیق از نوع SikaWrap-230C می باشد (جدول ۲). چسب مصرفی به پیشنهاد کارخانه سازنده کامپوزیت از نوع Sikadurs-330 می باشد. مشخصات چسب مصرفی در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱: ابعاد و مشخصات فولاد مصرفی

| تیپ مقطع | ابعاد مقطع (mm) | طول (mm) | مدول الاستیسته (N/mm <sup>2</sup> ) | تنش تسلیم (N/mm <sup>2</sup> ) | تنش نهایی (N/mm <sup>2</sup> ) |
|----------|-----------------|----------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| A        | ۹۰×۹۰×۲/۵       | ۵۰۰      | ۲۰۰۰۰۰                              | ۳۵۲                            | ۴۱۹                            |

جدول ۲: مشخصات کامپوزیت مصرفی (CFRP Sheet: SikaWraps-230C)

| ضخامت (mm) | مدول الاستیسته (N/mm <sup>2</sup> ) | تنش نهایی (N/mm <sup>2</sup> ) | کرنش شکست (%) |
|------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------|
| ۰/۱۳۱      | ۲۳۸۰۰۰                              | ۴۳۰۰                           | ۱/۸           |

جدول ۳: مشخصات چسب مصرفی (Adhesive: Sikadurs-330)

| تنش نهایی (N/mm <sup>2</sup> ) | مدول الاستیسته (N/mm <sup>2</sup> ) | کرنش شکست (%) |
|--------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| ۳۰                             | ۴۵۰۰                                | ۰/۸           |

### ۳- روش انجام آزمایش

#### ۳-۱- آماده نمودن نمونه

نمونه ها از نوع قوطی فولادی توخالی، با طول ۵۰۰ میلی متر از شاخه های ۶ متری برش شدند. سپس سطح مقطع آنها بوسیله ماشین گونیا، تراز شدند. جهت چسباندن بهتر کامپوزیت، سطح خارجی نمونه ها به مقدار مورد نیاز سندبلاست گردیدند (شکل ۱). به منظور تمیز نمودن سطوح، تمامی سطوحی که سند بلاست شده بود با استون نظافت و تمیز گردیدند. سپس چسب (Sikadurs-330) که از دو قسمت A و B تشکیل شده بود به نسبت توصیه شده کارخانه سازنده با هم به صورت یکنواخت مخلوط شده و سطوح خارجی نمونه ها با چسب آغشته شدند. لایه های CFRP کاملاً با چسب اشباع و نمونه ها با توجه به تعداد لایه مورد نیاز همانطوری که در شکل ۲ نشان داده شده است، دورپیچ شدند.



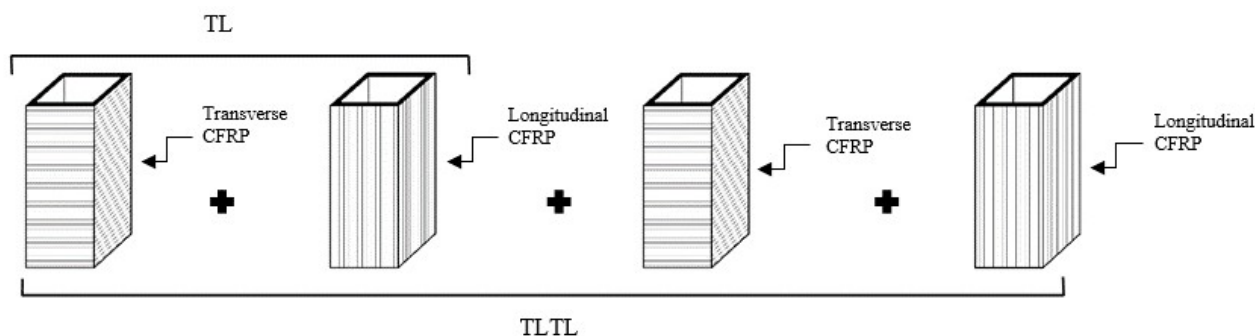
شکل ۲: مقاوم سازی نمونه ها با CFRP.



شکل ۱: نمونه ها قبل و بعد از سند بلاست.

## ۳-۲- نام گذاری نمونه ها

تعداد نمونه های تست شده، شامل ۲ نمونه کنترل و ۷ نمونه مقاوم سازی شده می باشند. مقاوم سازی نمونه ها با یک، دو و چهار لایه CFRP و در هر چهار سطح ستون با پوشش های ۴۰٪ و ۱۰۰٪ انجام شده است. نمونه ها، با نام های AC2-100-500-LL، AC2-40-500-LL، AC2-100-500-TT، AC1-100-500-L، AC1-100-500-T، 500-LL، AC4-100-500-TLTL، AC2-100-500-TL نام گذاری شدند. A نوع تیپ سطح مقطع ستون را نشان می دهد. C، مخفف اسم لاتین ستون (Column) می باشد. عدد بعد از C تعداد لایه های کامپوزیت مصرفی را نشان می دهد. اعداد ۴۰ و ۱۰۰ درصد، پوشش CFRP (نسبت طول CFRP به طول ستون) را نشان می دهد. عدد ۵۰۰ طول ستون به میلی متر، حروف L (Longitudinal) و T (Transverse) جهت قرار گیری کامپوزیت CFRP با توجه به یک جهت بودن SikaWrap-230C به ترتیب در راستای طولی و عرضی ستون را نشان می دهد. به عنوان مثال نمونه AC2-100-500-LL، نمونه ای است با دو لایه CFRP و ۱۰۰٪ پوشش با طول ۵۰۰ میلی متر که الیاف کامپوزیت در جهت طول ستون قرار گرفته اند. مشابهاً نمونه AC2-40-500-LL، نمونه ای با دو لایه CFRP و ۴۰٪ پوشش که الیاف کامپوزیت در جهت طول ستون قرار گرفته اند. همچنین نمونه AC4-100-500-TLTL، نمونه ای است با چهار لایه CFRP و ۱۰۰٪ پوشش، که به ترتیب الیاف کامپوزیت CFRP در جهت عرضی و طولی ستون قرار گرفته اند. در شکل ۳ نحوه ی قرار گیری الیاف کامپوزیت CFRP بر روی قوطی های فولادی توخالی نشان داده شده است. خطوط نشان داده در سطح خارجی ستون جهت قرار گیری الیاف کامپوزیت CFRP را نشان می دهد (با توجه به یک جهت بودن SikaWrap-230C).



شکل ۳: نحوه ی دور پیچ نمودن قوطی فولادی توخالی با استفاده از لایه های CFRP.

## ۳-۳- دستگاهها و لوازم انجام آزمایش

نمونه ها بوسیله جک فشاری ۲۰۰ تنی مورد آزمایش قرار گرفتند. انتهای نمونه ها در موقعیت خود قرار گرفتند. دقت لازم برای اینکه نمونه ها شاقولی و بار بدون خروج از مرکزیت به نمونه وارد شود، به عمل آمد. اندازه گیری بار و تغییر شکل های مربوطه توسط کابل های مخصوص از طریق جک بارگذاری و LVDT ها به دیتالاگر ۲۰ کاناله منتقل گردید. انتقال داده ها از دیتالاگر به کامپیوتر امکان پذیر بود.

## ۳-۴- مود شکست نمونه ها

اشکال ۴ الی ۱۱ نحوه ی بار گذاری و مود شکست نمونه ها را نشان می دهد. همانطوریکه مشاهده می شود در تمامی نمونه مود شکست از نوع کمانش موضعی بوده و در یکی از دو انتهای ستون اتفاق افتاده است.



شکل ۷: نمونه AC2-100-500-L



شکل ۶: نمونه AC1-100-500-T



شکل ۵: نمونه AC1-100-500-L



شکل ۴: نمونه AC0-500



شکل ۱۱: AC2-40-500-LL



شکل ۱۰: AC4-100-500-TLTL



شکل ۹: نمونه AC2-100-500-T



شکل ۸: نمونه C2-100-500-TL

### ۳-۵- نتایج آزمایش

ظرفیت و درصد افزایش بار نهایی تمامی نمونه ها در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که، CFRP باعث افزایش بار نهایی ستون های فولادی قوطی شکل تو خالی می گردد. همچنین ظرفیت بار نهایی ستون با افزایش تعداد لایه ها CFRP، افزایش می یابد (نمونه ۸). همچنین نتایج نشان می دهد که وقتی نمونه ها به صورت عرضی (Transverse) دورپیچ شوند افزایش بار نهایی آنها بیشتر است. علت این افزایش به عوامل مختلفی از جمله: نوع کامپوزیت، تعداد لایه و نوع چسب مورد استفاده بستگی دارد. همانطوریکه در بخش ۲ بیان شد کامپوزیت استفاده شده در این تحقیق از نوع SikaWrap-230C می باشد. این نوع کامپوزیت از نوع یک طرفه (Unidirectional) می باشد، چون الیاف کربن قادرند تنش کششی زیادی را تحمل کنند لذا نتایج آزمایش نشان داد که وقتی به صورت عرضی در سطح ستون دورپیچ شوند، تاثیر بیشتری در افزایش بار نهایی ستون ها دارند. در نمونه های ۳ و ۴ (تک لایه) بدلیل کمانش موضعی ستونهای فولادی و ضخامت کم لایه کامپوزیت، این افزایش ناچیز است ولی وقتی تعداد لایه CFRP افزایش می یابد (نمونه ۷) بدلیل محصور شدگی مناسب که باعث به تاخیر انداختن کمانش موضعی ستون می شود، CFRP باعث افزایش قابل ملاحظه ی بار نهایی ستون ها می شود. همچنین نتایج نشان می دهد که وقتی درصد پوشش CFRP کامل نباشد (نمونه ۹)، CFRP تاثیری در افزایش بار نهایی ستون ندارد. علت این است که مود شکست (کمانش موضعی) در خارج از ناحیه مقاوم سازی اتفاق می افتد (شکل ۱۱).

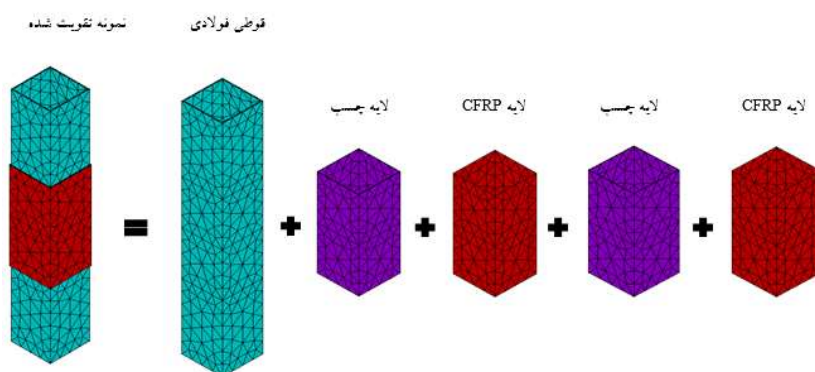
جدول ۴: جزئیات نمونه ها و نتایج آزمایشگاهی

| شماره | نام مدل          | طول ستون (mm) | تعداد لایه CFRP | درصد پوشش CFRP | بار نهایی حاصل از نتایج آزمایشگاهی (kN) | درصد افزایش بار |
|-------|------------------|---------------|-----------------|----------------|---|-----------------|
| ۱     | AC0-500-1        | ۵۰۰           | ۰               | ۰              | ۲۲۱/۲۰                                  | ۰               |
| ۲     | AC0-500-2        | ۵۰۰           | ۰               | ۰              | ۲۱۵/۹۰                                  | ۰               |
| ۳     | AC1-100-500-L    | ۵۰۰           | ۱               | ۱۰۰            | ۲۴۶/۳۰                                  | ۱۱/۳۵           |
| ۴     | AC1-100-500-T    | ۵۰۰           | ۱               | ۱۰۰            | ۲۴۸/۵۷                                  | ۱۲/۳۷           |
| ۵     | AC2-100-500-LL   | ۵۰۰           | ۲               | ۱۰۰            | ۲۸۸/۶۰                                  | ۳۰/۴۷           |
| ۶     | AC2-100-500-TL   | ۵۰۰           | ۲               | ۱۰۰            | ۲۶۴/۲۰                                  | ۱۹/۴۴           |
| ۷     | AC2-100-500-TT   | ۵۰۰           | ۲               | ۱۰۰            | ۲۹۰/۱۰                                  | ۳۱/۱۵           |
| ۸     | AC4-100-500-TLTL | ۵۰۰           | ۴               | ۱۰۰            | ۳۴۴/۰۰                                  | ۵۵/۵۲           |
| ۹     | AC2-40-500-LL    | ۵۰۰           | ۲               | ۴۰             | ۲۲۵/۲۰                                  | ۱/۸             |

#### ۴-۱- مدل سازی نرم افزاری

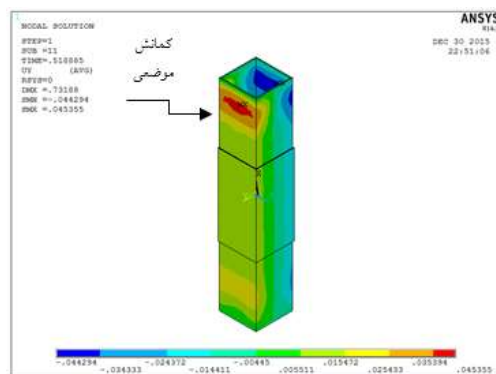
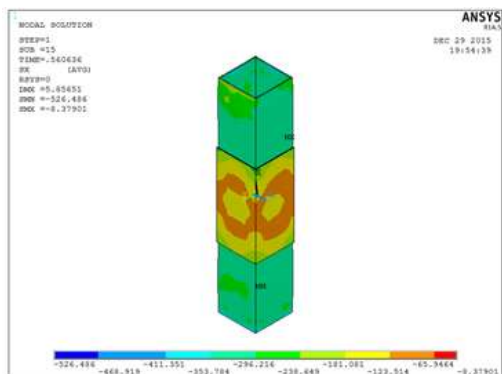
##### ۴-۱-۱- نحوه آماده سازی و روش تحلیل نمونه ها

امروزه با توجه به پیشرفت های گسترده ای که در زمینه برنامه های نرم افزاری صورت گرفته، دقت محاسبات آنها بالا رفته و به صورت چشمگیری مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از نرم افزارهای قدرتمند تحلیلی که کاربرد فراوانی در علوم مهندسی مکانیک و عمران دارد، نرم افزار ANSYS می باشد. روش حل مسائل در این نرم افزار بر اساس روش اجزای محدود (FEM) که یک روش عددی می باشد، استوار است. در این تحقیق از نرم افزار مذکور و از روش تحلیل غیر خطی استاتیکی جهت آنالیز نمونه ها استفاده شده است. با توجه به اینکه مصالح به صورت سه بعدی مدل شده اند، از المان SOLID استفاده شده است. برای مدل هایی که مش بندی نامنظم دارند یکی از المانهایی که بیشتر استفاده می شود، SOLID187 است [۱۵]. در این تحقیق نیز از المان SOLID187 استفاده شد که نتایج رضایت بخشی به همراه داشت. نحوه ی قرار گیری چسب و CFRP روی ستون ها در مدل سازی نرم افزاری (به عنوان مثال نمونه AC2-40-500-LL) در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



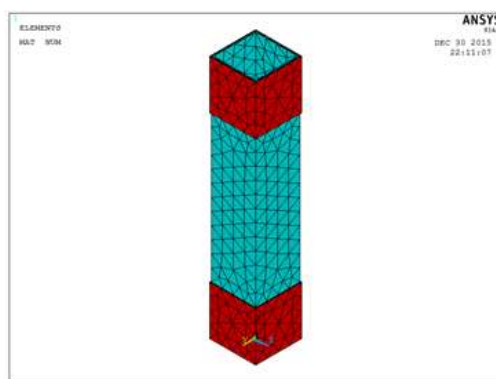
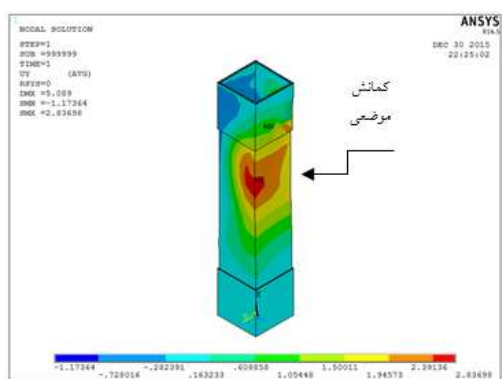
شکل ۱۲: جزئیات نمونه AC2-40-500-LL مدل شده در نرم افزار.

شکل ۱۳ مود کمناش نمونه AC2-40-500-LL، مدل سازی شده در نرم افزار را نشان می دهد. همانطوریکه مشاهده می شود کمناش این نوع ستون موضعی و در انتهای نمونه اتفاق افتاده، که با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد. در شکل ۱۴ کانتور تنش فشاری قائم ستون مدل AC2-40-500-LL نشان داده شده است.



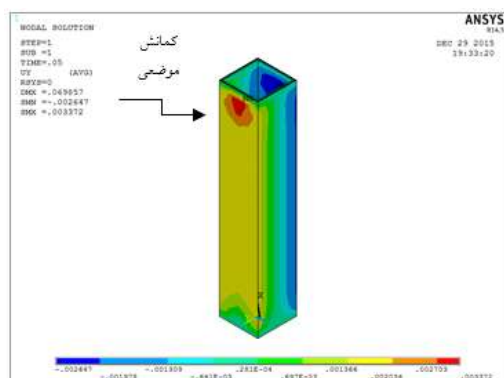
شکل ۱۳: مود شکست نمونه ی AC2-40-500-LL مدل سازی شده در نرم افزار. شکل ۱۴: کانتور تنش فشاری قائم نمونه ی AC2-40-500-LL.

همانطوریکه در مدل های آزمایشگاهی و نرم افزاری مشخص شد، وقتی پوشش کامپوزیت کمتر از ۱۰۰٪ باشد (AC2-40-500-LL) مشابه پوشش کامل، کمناش موضعی در یکی از دو انتهای نمونه اتفاق می افتد، و عملاً CFRP در تقویت ستون بی تاثیر است. لذا به منظور بررسی بیشتر، نمونه ی جدیدی غیر از نمونه های آزمایشگاهی در نرم افزار مدل سازی گردید. این نمونه که دو انتهای آن با CFRP تقویت گردید، با نام AC2-2-20-500-LL، نام گذاری شد. نمونه AC2-2-20-500-LL مشابه مدل AC2-40-500-LL است با این تفاوت که مقدار پوشش CFRP (۴۰٪) به صورت دو تا پوشش ۲۰٪ در دو انتهای نمونه قرار گرفته است (شکل ۱۵). شکل ۱۶ نشان می دهد که کمناش موضعی در قسمت خارج از ناحیه تقویت شده اتفاق افتاده است. همچنین جدول ۵ نشان می دهد که تاثیر این جابجایی نیز ناچیز است.

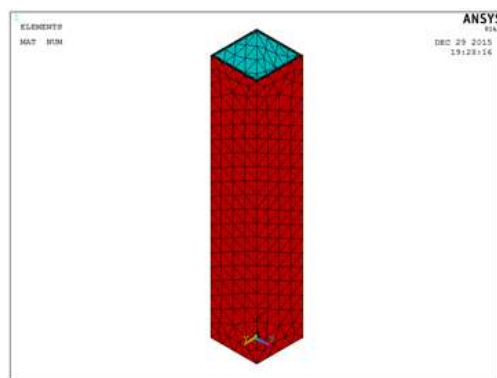


شکل ۱۵: نمونه ی AC2-2-20-500-LL مدل سازی شده در نرم افزار. شکل ۱۶: مود شکست نمونه ی AC2-2-20-500-LL.

با توجه به اینکه تصاویر نمونه های با پوشش کامل، مدل سازی شده در نرم افزار مشابه هم می باشد، لذا در این بخش فقط به ارائه تصاویر نمونه AC2-100-500-LL اکتفا شده است. شکل ۱۷ مش بندی نمونه مذکور را نشان می دهد. همچنین شکل ۱۸ مود شکست این مدل را نشان می دهد. همانطوریکه مشاهده می شود مود شکست نمونه های با پوشش کامل CFRP مدل سازی شده در نرم افزار نیز در انتهای ستون اتفاق افتاده است.



شکل ۱۸: مود شکست نمونه ی AC2-100-500-LL مدل سازی شده در نرم افزار.



شکل ۱۷: مش بندی نمونه ی AC2-100-500-LL.

#### ۲-۴- نتایج شبیه سازی نرم افزار

ظرفیت و درصد افزایش بار نهایی در نمونه های مدل سازی شده در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج تحلیل نشان می دهد که تطابق خوبی بین نتایج شبیه سازی شده در نرم افزار و نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی وجود دارد. همچنین نتایج نشان می دهد که وقتی پوشش کامپوزیت CFRP کمتر از ۱۰۰٪ باشد، جابجایی موقعیت قرارگیری CFRP تاثیر کمی در افزایش بار نهایی ستون ها دارد (AC2-2-20-500-LL). علت تاثیر کم کامپوزیت CFRP در این حالت بخاطر این است که موقعیت مود شکست جابجا می شود و در قسمت خارج ناحیه مقاوم سازی اتفاق می افتد.

جدول ۵: نتایج شبیه سازی نرم افزاری

| شماره | نام مدل          | طول ستون (mm) | تعداد لایه CFRP | درصد پوشش CFRP | بار نهایی حاصل از نتایج شبیه سازی (kN) | بار نهایی حاصل از نتایج آزمایشگاهی (kN) | درصد خطا |
|-------|------------------|---------------|-----------------|----------------|--|---|----------|
| ۱     | AC0-500          | ۵۰۰           | ۰               | ۰              | ۲۲۹/۷۱                                 | ۲۲۱/۲۰                                  | ۳/۸۵     |
| ۲     | AC1-100-500-L    | ۵۰۰           | ۱               | ۱۰۰            | ۲۶۰/۸۴                                 | ۲۴۶/۳۰                                  | ۵/۹۰     |
| ۳     | AC1-100-500-T    | ۵۰۰           | ۱               | ۱۰۰            | ۲۶۳/۵۱                                 | ۲۴۸/۵۷                                  | ۶/۰۱     |
| ۴     | AC2-100-500-LL   | ۵۰۰           | ۲               | ۱۰۰            | ۲۸۸/۹۰                                 | ۲۸۸/۶۰                                  | ۰/۱۰     |
| ۵     | AC2-100-500-TL   | ۵۰۰           | ۲               | ۱۰۰            | ۲۷۵/۹۵                                 | ۲۶۴/۲۰                                  | ۴/۴۵     |
| ۶     | AC2-100-500-TT   | ۵۰۰           | ۲               | ۱۰۰            | ۲۸۹/۳۹                                 | ۲۹۰/۱۰                                  | ۰/۲۵     |
| ۷     | AC4-100-500-TLTL | ۵۰۰           | ۴               | ۱۰۰            | ۳۴۲/۸۶                                 | ۳۴۴/۰۰                                  | ۰/۳۳     |
| ۸     | AC2-40-500-LL    | ۵۰۰           | ۲               | ۴۰             | ۲۳۳/۸۷                                 | ۲۲۵/۲۰                                  | ۳/۸۵     |
| ۹     | AC2-2-20-500-LL  | ۵۰۰           | ۲               | ۴۰ = ۲×۲۰      | ۲۳۵/۱۷                                 | -----                                   | -----    |



## ۵- نتیجه گیری

در بخش آزمایشگاهی این تحقیق تعداد ۹ عدد ستون که تعداد ۷ عدد از آنها با CFRP مقاوم سازی شده بودند، مورد آزمایش فشار محوری قرار گرفتند. تعداد لایه ها، درصد پوشش و جهت قرار گیری الیاف CFRP متفاوت در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که CFRP باعث افزایش بار نهایی ستون های فولادی قوطی شکل توخالی می شود. درصد پوشش و جهت قرار گیری الیاف CFRP در میزان بار نهایی ستون های فولادی تو خالی موثر است. افزایش تعداد لایه های CFRP باعث افزایش میزان بار نهایی ستون های فولادی توخالی می شود. همچنین در این گونه ستون ها وقتی که پوشش CFRP کامل نباشد، CFRP تاثیر ناچیزی (تقریباً بی تاثیر) در افزایش بار نهایی ستون ها دارد. دلیل موثر نبودن CFRP در این ستون ها بخاطر این است که مود شکست (کمانش موضعی) در خارج از ناحیه مقاوم سازی اتفاق می افتد. بیشترین افزایش بار نهایی برای ستون ها زمانی اتفاق می افتد، که پوشش CFRP کامل و جهت الیاف به صورت عرضی قرار گیرد (Transverse). البته این افزایش برای ستون ها مقاوم سازی شده با یک لایه ناچیز و از دو لایه به بالا بیشتر می شود. موقعیت مود شکست در هر دو انتهای ستون ها مشاهده شد، که در انتهای پائین بیشتر اتفاق افتاد. در تمامی نمونه های تست شده، مود شکست از نوع کمانش موضعی می باشد. بیشترین درصد افزایش بار نهایی ستون ها، مربوط به نمونه ی با چهار لایه و پوشش ۱۰۰٪ CFRP به مقدار ۵۵/۵۲٪ بدست آمد. در بخش تحلیل عددی، نمونه های آزمایشگاهی به کمک نرم افزار ANSYS شبیه سازی شدند. نتایج این بخش نشان می دهد که، بار نهایی بدست آمده از شبیه سازی نرم افزاری اندکی بیشتر از نتایج آزمایشگاهی است. با توجه به اینکه در قسمت تست آزمایشگاهی مشاهده گردید که مود شکست (کمانش موضعی) ستون ها در دو انتهای ستون اتفاق می افتد، بنابراین یک نمونه جدید (AC2-20-500-LL) که دو انتهای آن با دو لایه و ۲۰٪ CFRP تقویت شده بود در نرم افزار ANSYS شبیه سازی گردید. نتایج حاصل از تحلیل این نمونه نشان داد که CFRP باعث جابجایی موقعیت مود کمانش می شود. همچنین بدلیل اینکه مود کمانش در این ستون در خارج از ناحیه مقاوم سازی شده اتفاق افتاده، بنابراین CFRP تاثیر چندانی در افزایش بار نهایی فشاری ستون ندارد.

## مراجع

- [1] ACI Committee 440, "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures", ACI440.2R-02, Farmington Hills, MI, American Institute, 2002.
- [2] Teng, J. G., Hu, Y. M., "Behavior of FRP jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under compression", International Journal of Construction and Building Materials, Vol. 21 (2007) 827-838.
- [3] Kalavagunta, S., Naganathan, S., Bin Mustapha K. N., "Proposal for design rules of axially loaded CFRP strengthened cold formed lipped channel steel sections", Thin-Walled Structures, Vol. 72 (2013) 1-14.
- [4] Jiao, H., Zhao, X. L., "CFRP strengthened butt-welded very high strength (VHS) circular steel tubes", Thin-Walled Structures, Vol. 42(7) (2004) 963-78.
- [5] Tao, Z., Han, L. H., Wang, L. L., "Compressive and flexural behavior of CFRP-repaired concrete-filled steel tubes after exposure to fire", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 63 (2007) 1116-1126.
- [6] Kalavagunta, S., Naganathan, S., Bin Mustapha K. N., "Proposal for design rules of axially loaded CFRP strengthened cold formed lipped channel steel sections", Thin-Walled Structures, Vol.72 (2013) 1-14.
- [7] Gao, X. Y., Balendra, T., Koh, C. G., "Buckling strength of slender circular tubular steel braces strengthened by CFRP", Engineering structures, Vol. 46 (2013) 547-556.
- [8] Shaat, A., Fam, A., "Axial loading tests on CFRP-retrofitted short and long HSS steel columns", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 33, No.4 (2006) 458-70.
- [9] Haedir, J., Zhao, X. L., "Design of short CFRP-reinforced steel tubular columns, Journal of Constructional Steel Research", Vol. 67 (2011) 497-509.
- [10] Bambach, M. R., Elchalakani, M., "Plastic mechanism analysis of steel SHS strengthened with CFRP under large axial deformation", Thin-Walled Structures, Vol. 45 (2007) 159-170.
- [11] Sundarraja, M. C., Sivasankar, S., "Experimental investigation on FRP confined HSS tubular members under compression", Journal of structural Engineering, Vol. 40 (2013) 298-304.
- [12] Sundarraja, M. C., Ganesh Prabhu, G., "Experimental study on CFST members strengthened by CFRP composites under compression", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 72 (2012) 75-83.

- 
- [13] Tao, Z., Han, L. H., Wang, L. L., "Compressive and flexural behavior of CFRP-repaired concrete-filled steel tubes after exposure to fire", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 63 (2007) 1116-1126.
- [14] Feng, P., Zhang, Y., Bai, Y., Ye, L., "Strengthening of steel members in compression by mortar-filled FRP tubes", *Thin-Walled Structures*, Vol. 64 (2013) 1-12.
- [15] Narmashiri, K., Sulong, N. H. R., Jumaat, M. Z., "Failure analysis and structural behavior of CFRP strengthened steel I-beams", *Construction and Building Materials*, Vol. 30 (2012) 1-9.