

تاثیر موقعیت قرار گیری CFRP بر رفتار محوری و خمشی ستون های فولادی توخالی تقویت شده با CFRP

امیرحمزه کیخا^{۱*}

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران

چکیده

در سال های اخیر استفاده از کامپوزیت های مسلح به الیاف کربن جهت تقویت و مقاوم سازی سازه های فولادی به طرز قابل ملاحظه ای افزایش یافته است. دلایل تقویت و مقاوم سازی متعدد و عبارتند از: اشتباهات طراحی و محاسباتی، عدم اجرای مناسب، تغییر کاربری بعد از ساخت، خسارت های ناشی از حوادث طبیعی مانند سیل و زلزله، رخداد پدیده های خستگی و خوردگی فلزات و غیره. ستون یکی از اعضای مهم سازه های ساختمانی بوده، که وظیفه ی تحمل و انتقال بار های وارده به سازه را بر عهده دارد. در سازه های فولادی پایداری ستون ها از اهمیت بالایی برخوردار است. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط نویسندگان مطالعات ناچیزی بر روی رفتار محوری ستون های فولادی لاغر مقاوم سازی شده با کامپوزیت مسلح به الیاف کربن انجام شده است. هدف اصلی این تحقیق آنالیز بار نهایی فشاری و بارهای نهایی فشاری-خمشی (بارهای اندرکنشی) ستون های فولادی توخالی با مقطع مربع، مقاوم سازی شده با استفاده از کامپوزیت های مسلح به الیاف کربن می باشد. جهت مدل سازی و آنالیز نمونه ها از روش اجزای محدود و به کمک نرم افزار ANSYS استفاده شده است. ۴۰ نمونه ستون فولادی که با استفاده از کامپوزیت های مسلح به الیاف کربن ساخته شده بودند تحت بار محوری فشاری مورد تحلیل غیر خطی استاتیکی قرار گرفتند. همچنین ۳ نمونه از ستون ها تحت اثر اندرکنش بار محوری فشاری و لنگر خمشی مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که، مقدار پوشش و تعداد لایه های کامپوزیت بر بار محوری فشاری و لنگر خمشی ستون های فولادی مؤثر می باشند. همچنین نتایج نشان داد که جابجا کردن محل قرار گیری کامپوزیت کربن با درصد پوشش مشخص می تواند اثر متفاوت بر بار محوری فشاری ستون های فولادی داشته باشد.

کلمات کلیدی: ستون های فولادی توخالی، روش المان محدود، مقاوم سازی، موقعیت قرار گیری CFRP، بار محوری فشاری.

*نویسنده مسئول: امیرحمزه کیخا

پست الکترونیکی: ah.keykha@iauzah.ac.ir

شناسه دیجیتال DOI: 10.22065/jsce.2017.67147.1000

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۱۶

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.67147.1000>

تعریف پارامترهای استفاده شده در مقاله			
y	منحنی تغییر شکل	L	طول ستون
y _{max}	تغییر شکل حداکثر	k	ضریب طول موثر
M _B	لنگر خمشی تکیه گاه گیردار (تکیه گاه B)	I	ممان اینرسی
M _i	لنگر داخلی مقطع	E	مدول الاستیسیته
P	بار محوری فشاری		

۱- مقدمه

پلیمر های مسلح به الیاف کربن سالیان زیادی است که جهت تقویت و مقاوم سازی سازه های بتنی استفاده می شود. جهت مقاوم سازی و طراحی سازه ها با این کامپوزیت ها دستور العمل ها و آئین نامه هایی تهیه شده است [۱]. استفاده از CFRP جهت تقویت و مقاوم سازی سازه های فولادی در سالهای اخیر رواج پیدا کرده است. اکثر تحقیقات گذشته جهت مقاوم سازی سازه های فولادی بوسیله CFRP، بر روی تیرها و به منظور مقاوم سازی بررشی و خمشی انجام شده است [۵-۲]. بررسی ها نشان می دهد که تحقیقات کمی جهت مقاوم سازی محوری ستون های فولادی با استفاده از CFRP انجام شده است. در یک تحقیق که به منظور افزایش بار محوری ستون ها انجام شد، کالاواگونتو و همکاران، ستون های U شکل لبه دار مقاوم سازی شده با CFRP تحت بار محوری را مورد آزمایش قرار دادند. آنها مشاهده کردند که به دلیل لایه لایه و جدا شدن CFRP، شکست ناگهانی ستون رخ می دهد. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که استفاده از CFRP، ظرفیت باربری این گونه ستون ها را افزایش می دهد، همچنین آماده سازی سطح و تنظیم 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 مقاوم سازی نمودند، آنها نشان دادند که با توجه به تعداد لایه های کامپوزیت مورد استفاده، افزایش در مقاومت و سختی بوجود می آید [۷]. همچنین در تحقیق دیگر که بر روی ستون های کوتاه توسط شت و فام انجام شد، مشاهده گردید که لایه های CFRP عرضی در محدود کردن کمانش موضعی بیرونی اعضای ستون های کوتاه موثر هستند و ظرفیت باربری برای این اعضا را تا ۱۸٪ افزایش می دهند [۸]. در تحقیق مشابه هیدر و ژائو، تاثیر CFRP بر مقاوم سازی ستون های کوتاه را ارزیابی کردند. نتایج آزمایش های آنها نشان داد که، ترتیب استفاده از کامپوزیت CFRP به صورت عرضی و طولی باعث افزایش ظرفیت تسلیم ستون ها می شود. همچنین مقدار استفاده بیشتر از CFRP، تاثیر بیشتری در به تاخیر انداختن کمانش موضعی ستون ها دارد [۹]. بمبج و ال چالاکانی، ستون های فولادی قوطی شکل تقویت شده با CFRP را تحت فشار محوری قرار دادند، آنها مشاهده کردند که مصالح کامپوزیت CFRP باعث افزایش ظرفیت باربری مقاطع تحت فشار می گردد [۱۰]. تحقیقات سانداراجا و گانش پرابو نشان داد که، ظرفیت باربری و سختی محوری ستون های فولادی کوتاه که با پیچاندن ورقهای CFRP تقویت شده بودند، افزایش قابل ملاحظه ای می یابد. همچنین تغییر شکل محوری ستون ها کاهش و کمانش موضعی آنها به تاخیر می افتد [۱۱ و ۱۲]. به منظور جلوگیری از کمانش موضعی ستون های فولادی توخالی، این ستون ها 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 ستون های پر شده با بتن می گردد [۱۳ و ۱۴]. کیخا و همکاران ستون های فولادی را مورد آزمایش و تحلیل قرار دادند. آنها نشان دادند که وقتی پوشش کامپوزیت های مسلح به الیاف کربن کامل نباشد، CFRP تاثیر قابل ملاحظه ای بر ستون های کوتاه و با لاغری کم ندارد [۱۵ و ۱۶].

بررسی ها نویسنده نشان می دهد که تحقیقات کمی جهت مقاوم سازی محوری ستون فولادی توخالی لاغر با پوشش های مختلف و با رویکرد موقعیت قرار گیری متفاوت CFRP انجام شده است. از آنجائیکه ممکن است ستون ها در طول عمر سازه تحت اثر توامان نیروی های متفاوت قرار گیرند، لذا بررسی این موضوع مهم به نظر می رسد. یکی از خلأهای موجود در این زمینه بررسی رفتار متقابل ستون های مقاوم سازی شده با کامپوزیت های مسلح به الیاف کربن تحت اثر توامان نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی می باشد. لذا بررسی موارد بیان شده از اهداف اصلی این تحقیق می باشد. در تحقیق حاضر که به روش اجزای محدود و با استفاده از نرم افزار ANSYS انجام شد، به منظور بدست آوردن الگوی مناسب جهت تقویت محوری و محوری-خمشی ستون های فولادی توخالی با استفاده از پلیمر های مسلح شده به الیاف کربن: تغییر موقعیت قرارگیری، درصد پوشش و تعداد لایه های CFRP مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند.

۲- روابط تئوریک جهت محاسبه تغییر شکل حد اکثر ستون مورد مطالعه

در این بخش به منظور بدست آوردن معادله تغییر شکل و محل تغییر شکل حد اکثر ستون مورد مطالعه، روابط حاکم بر مسئله را بدست می آوریم. از نتایج بدست آمده در این بخش جهت استفاده در بخش تحلیل نرم افزاری استفاده خواهد شد. شکل ۱- (a) منحنی تغییر شکل و شرایط مرزی ستون مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می دهد. همچنین معادله تعادل با توجه به شکل ۱- (b) به شرح ذیل محاسبه می شود.

$$\frac{M_B}{L} x + M_i - Py = 0 \quad (1)$$

لنگر داخلی مقطع عبارت است از:

$$M_i = -EIy'' \quad (2)$$

با فرض اینکه:

$$k^2 = P/EI \quad (3)$$

با جایگذاری رابطه (۲) و (۳) در رابطه (۱) داریم:

$$y'' + k^2 y - \frac{M_B}{EIL} x = 0 \quad (4)$$

حل معادله تغییر شکل ستون (معادله ۴) برابر است با:

$$y = A \sin kx + B \cos kx + \frac{M_B}{PL} x \quad (5)$$

شرایط مرزی ستون با توجه به شکل ۱- (a) برابر است با:

$$y(0) = 0 \quad (6)$$

$$y(L) = 0 \quad (7)$$

$$y'(L) = 0 \quad (8)$$

با اعمال دو شرط مرزی اول (معادلات ۶ و ۷) مقادیر A و B عبارتند از:

$$B = 0 \quad (9)$$

$$A = -\frac{M_B}{P \sin kL} \quad (10)$$

با جایگذاری مقادیر A و B در معادله ۵ معادله تغییر شکل ستون عبارت است از:

$$y = \frac{M_B}{P} \left(\frac{x}{L} - \frac{\sin kx}{\sin kl} \right) \quad (11)$$

با اعمال شرط مرزی سوم (معادلات ۸) در معادله ۱۱ داریم:

$$kL = 4.4934 \quad (12)$$

$$y = \frac{M_B}{P} \left[\frac{x}{L} + 1.0245 \sin \left(4.4934 \frac{x}{L} \right) \right] \quad (13)$$

با مشتق گرفتن از معادله ۱۳ و سپس برابر صفر قرار دادن آن (معادله ۱۴) محل تغییر شکل حداکثر ستون برابر معادله ۱۵ بدست می آید.

$$0 = \frac{dy}{dx} = \frac{M_B}{P} \left[\frac{1}{L} + 4.6035 \cos \left(4.4934 \frac{x}{L} \right) \right] \quad (14)$$

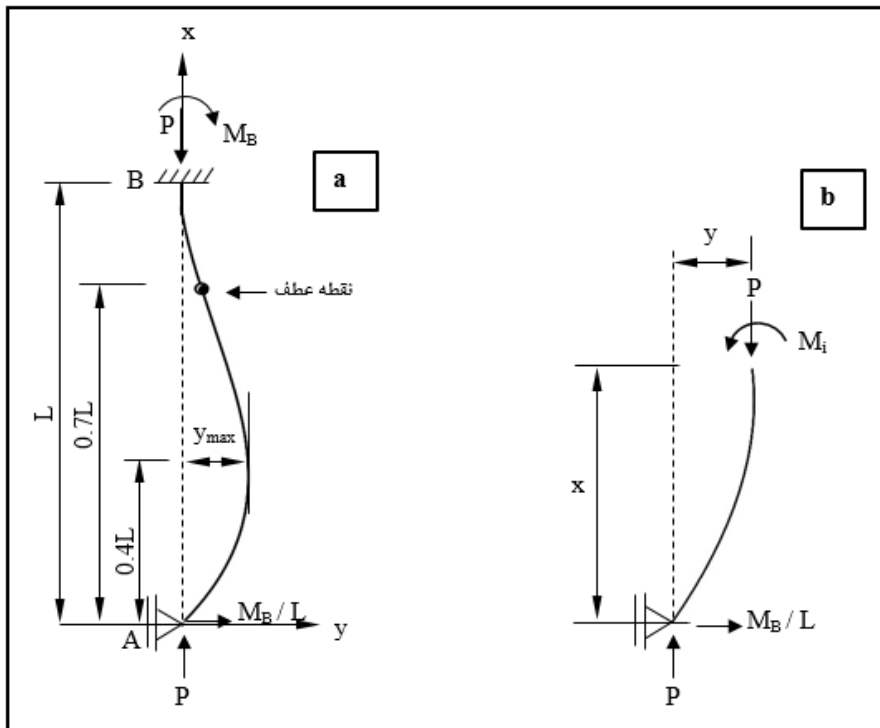
$$x = 0.4L \quad (15)$$

با جایگزین کردن مقدار x در معادله ۱۳ ماکزیمم تغییر شکل ستون بدست می آید که عبارت است از:

$$y_{\max} = 1.40 \frac{M_B}{P} \quad (16)$$

همچنین طول موثر ستون عبارت است از:

$$k = \sqrt{\frac{\pi^2}{(4.4934)^2}} = 0.7 \quad (17)$$



شکل ۱: ستون با شرایط تکیه گاهی یکسر مفصل - یکسر گیردار: (a) منحنی تغییر شکل. (b) دیاگرام جسم آزاد ستون به فاصله x .

۳- مصالح

۳-۱- اندازه و مشخصات

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 N/mm^2 و 419 N/mm^2 بدست آمده است [۱۶]. کامپوزیت مورد استفاده در این تحقیق از نوع SikaWrap-230C می باشد (جدول ۲). چسب مورد استفاده از نوع Sikadurs-330 می باشد. مشخصات چسب مورد استفاده در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱: ابعاد و مشخصات فولاد مصرفی

ابعاد مقطع (mm)	سطح مقطع (mm ²)	ممان اینرسی (mm ⁴)	شعاع ژیراسیون (mm)	طول (mm)	مدول الاستیسته (N/mm ²)	تنش تسلیم (N/mm ²)	تنش نهایی (N/mm ²)
۲ × ۴۰ × ۴۰	۳۰۰	۷۳۳۰۰	۱۵/۵۰	۳۰۰۰	۲۰۰۰۰۰	۳۵۲	۴۱۹

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

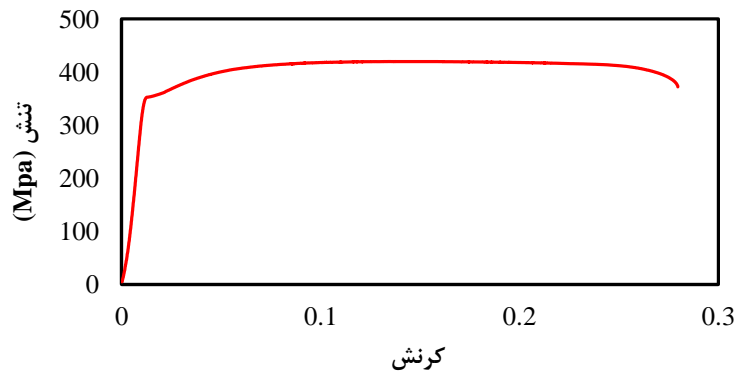
ضخامت (mm)	مدول الاستیسته (N/mm ²)	تنش نهایی (N/mm ²)	کرنش شکست (%)
۰/۱۳۱	۲۳۸۰۰۰	۴۳۰۰	۱/۸

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

تنش نهایی (N/mm ²)	مدول الاستیسته (N/mm ²)	کرنش شکست (%)
۳۰	۴۵۰۰	۰/۸

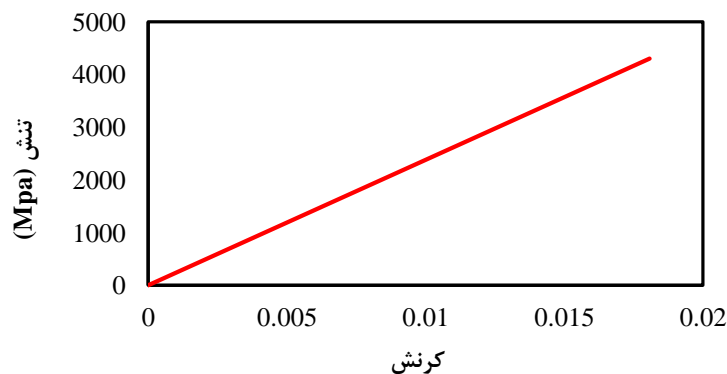
۳-۲- منحنی تنش و کرنش

منحنی تنش و کرنش فولاد مورد استفاده در تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطوریکه در بخش قبل بیان شد این منحنی بر اساس آزمایش تست کشش بدست آمده است.

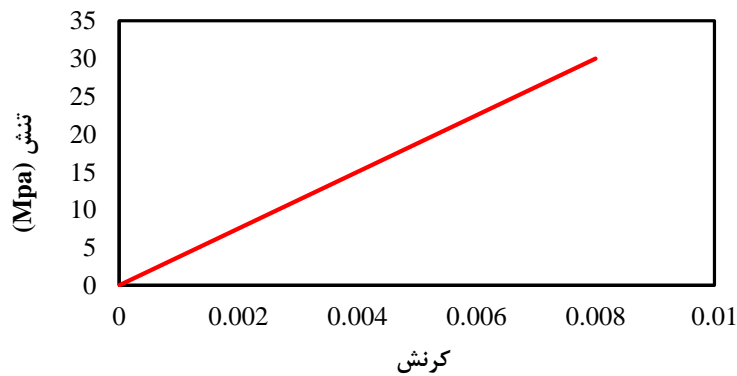


شکل ۲: منحنی تنش-کرنش فولاد.

ورق های CFRP در هنگام بارگذاری کششی رفتاری کاملاً کشسان دارند و گسیختگی آنها ناگهانی است. در صورت رسم نمودار تنش-کرنش برای الیاف بکار رفته در آنها، خطوط راستی بدست خواهد آمد که شیب آنها ضریب کشسانی الیاف می باشد [۱]. منحنی تنش و کرنش کامپوزیت و چسب مورد استفاده در تحقیق به ترتیب در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است. در این تحقیق رفتار مصالح کامپوزیت و چسب خطی فرض شده است.



شکل ۳: منحنی تنش-کرنش کامپوزیت در کشش



شکل ۴: منحنی تنش-کرنش چسب

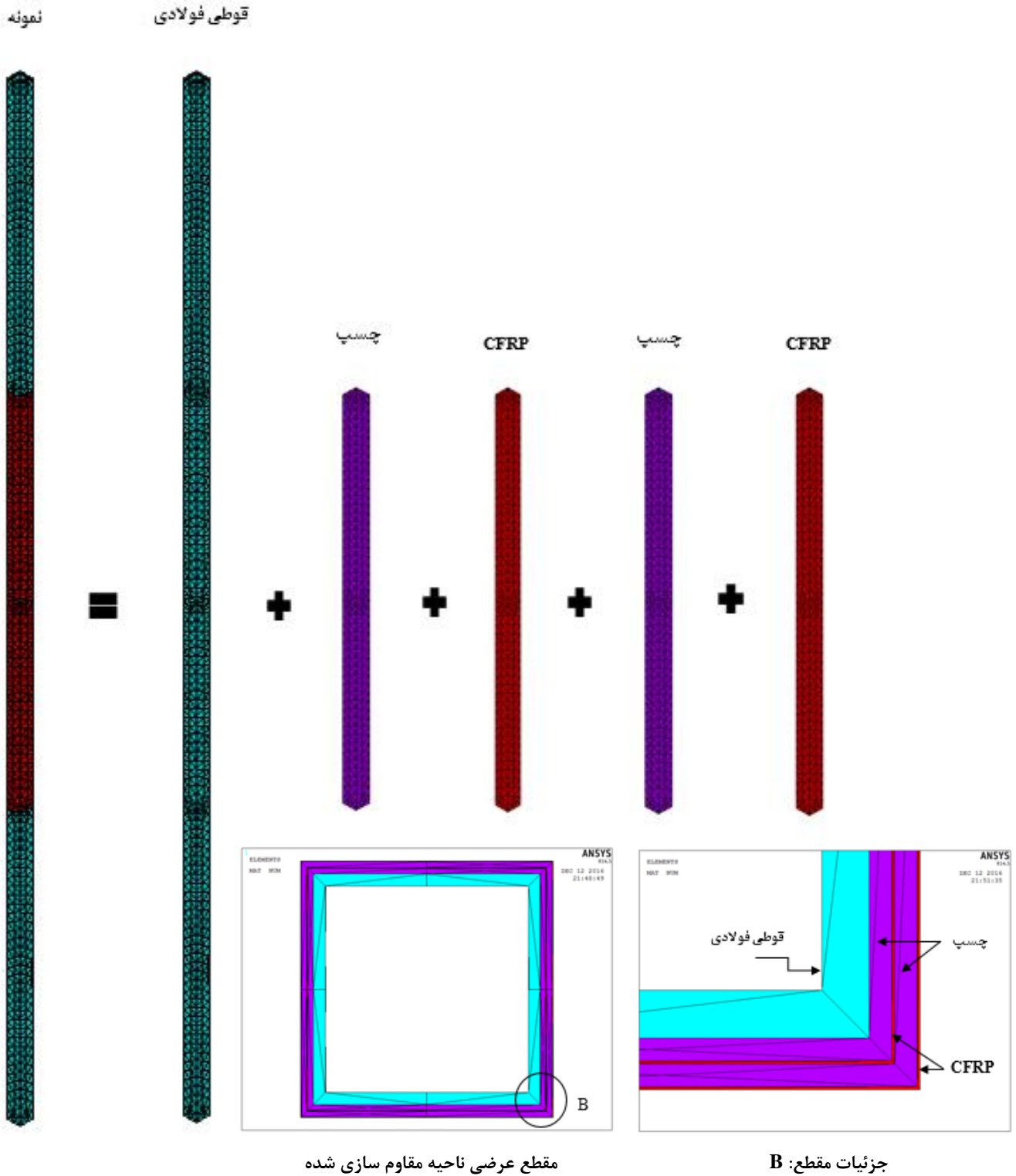
۴- مدل سازی نرم افزاری

۴-۱- روش تحلیل نمونه ها

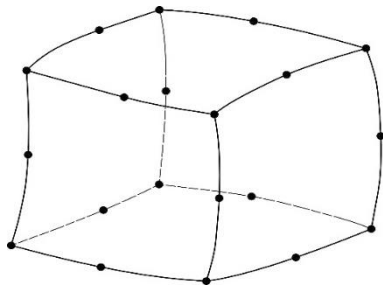
امروزه با توجه به پیشرفت های گسترده ای که در زمینه برنامه های نرم افزاری صورت گرفته، دقت محاسبات آنها بالا رفته و به صورت چشم گیری مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از نرم افزارهای قدرتمند تحلیلی که کاربرد فراوانی در علوم مهندسی عمران و مکانیک دارد، نرم افزار ANSYS می باشد. روش تحلیل مسائل در این نرم افزار بر اساس روش اجزای محدود (FEM) که یک روش تحلیل عددی می باشد، استوار است. در تحقیق حاضر 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 [۱۶ و ۱۷]. 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 در شکل ۵ نشان داده شده است.

۴-۲- صحت سنجی نرم افزار

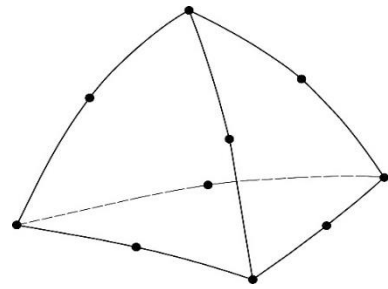
در مدل سازی به روش اجزای محدود که بوسیله نرم افزارها انجام می شود، ضروری است که نتایج حاصل از نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شود. در این تحقیق نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی کیخا و همکاران [۱۵] صحت سنجی گردید. همانطوریکه در بخش قبل بیان شد تحلیل نمونه ها به کمک نرم افزار ANSYS و با استفاده از المان SOLID انجام شد. این المان انواع مختلفی دارد، چهار نوع از آنها که بیشترین کاربرد را در اجسام جامد دارند انتخاب شدند. این المان ها عبارتند از: المانهای 10 node 187، 20 node 186 و Tet 4 node 285 و Brick 8 node 185 (شکل ۶). جهت بررسی بیشتر نمونه C2-40-D900 با چهار المان فوق و اندازه مش متفاوت در نرم افزار شبیه سازی شد و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از انجام آزمایش مدل فوق مقایسه گردید. مشاهده می شود که، نتایج استفاده از المانهای 10 node 187 و 20 node 186 (جدول ۴) نزدیک به هم بوده و اختلاف کمتری با نتایج آزمایشگاهی دارند. با توجه به اینکه هرچه تعداد گره ها افزایش می یابد زمان تحلیل کامپیوتر نیز افزایش خواهد یافت لذا مناسبتر است که در صورت رسیدن به دقت لازم از المان با تعداد گره کمتر استفاده گردد. در تحقیق حاضر از المان 10 node 187 با اندازه مش ۲۰ میلی متر که ضمن داشتن دقت لازم از تعداد گرهی کمتری نیز برخوردار است، استفاده گردید.



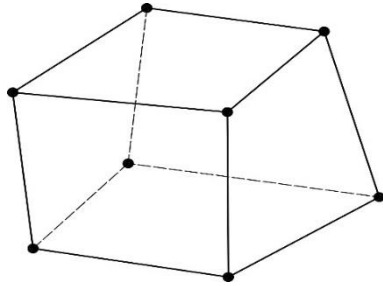
شکل ۵: جزئیات قرار گیری چسب و CFRP بر روی قوطلی فولادی در مدل سازی نرم افزاری (نمونه ی: C2-40-D900).



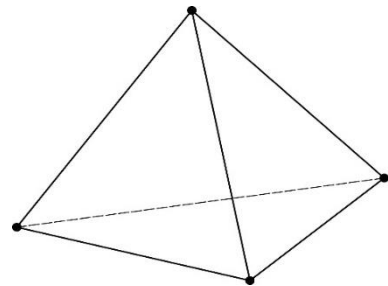
20 node 186



10 node 187



Brick 8 node 185



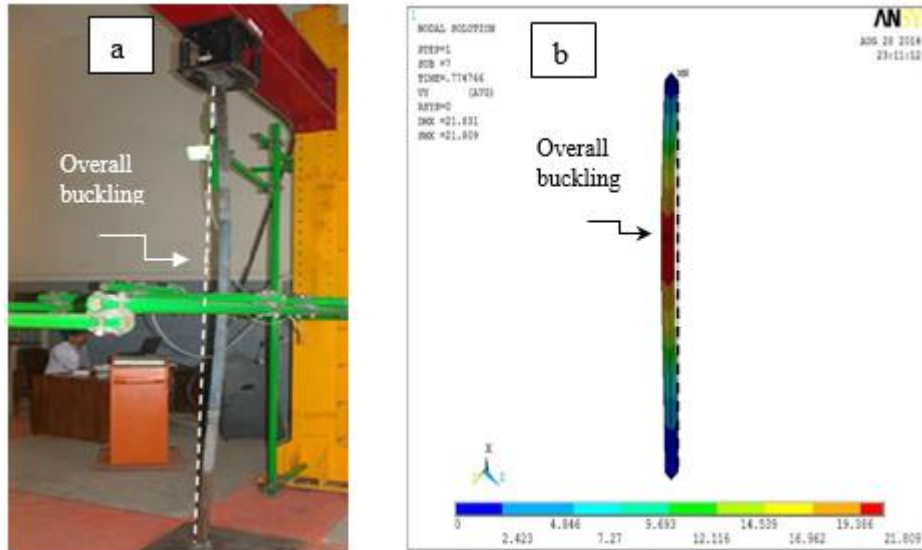
Tet 4 node 285

شکل ۶: انواع المان های مورد بررسی جهت انتخاب المان مناسب.

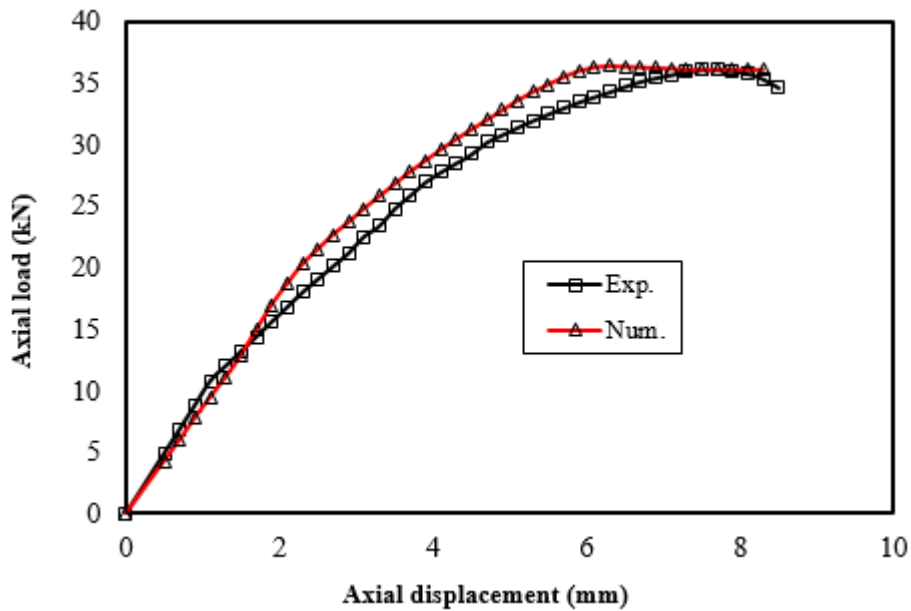
جدول ۴: مقایسه بار نهایی ستون در دو حالت آزمایشگاهی و شبیه سازی برای مدل C2-40-D900 با المان های متفاوت

نتایج آزمایشگاهی (kN)	نتایج شبیه سازی نرم افزار (kN)				
	اندازه مش (mm)	10 node 187	20 node 186	Tet 4 node 285	Brick 8 node 185
۳۶/۱۰	۱۰	۳۵/۰۰۷	۳۵/۰۰۴	۴۴/۱۶۴	۵۰/۱۲۵
	۱۵	۳۵/۴۱۸	۳۵/۳۸۴	۴۶/۸۳۲	۵۸/۱۶۸
	۲۰	۳۶/۷۷۹	۳۶/۸۱۰	۵۰/۰۶۵	۵۸/۴۶۷
	۲۵	۳۸/۱۲۲	۳۷/۸۷۴	۵۰/۷۱۷	۶۷/۵۳۱
	۳۰	۳۸/۸۲۶	۴۱/۱۵۷	۴۹/۲۸۱	۷۳/۸۳۰

شکل ۷ مود شکست نمونه ی C2-40-D900 به دو روش تحلیل عددی و آزمایشگاهی را نشان می دهد. همچنین در شکل ۸ منحنی نیرو-تغییر مکان محوری نمونه ی آزمایشگاهی و نمونه ی مشابه در تحلیل عددی به کمک نرم افزار ANSYS و با استفاده از المان 10 node 187 نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که همگرایی خوبی بین دو روش تحلیل عددی و آزمایشگاهی برقرار است.



شکل ۷: مود شکست نمونه ی C2-40-D900: (a) تست شده در آزمایشگاه [۱۵]. (b) مدل شده در نرم افزار

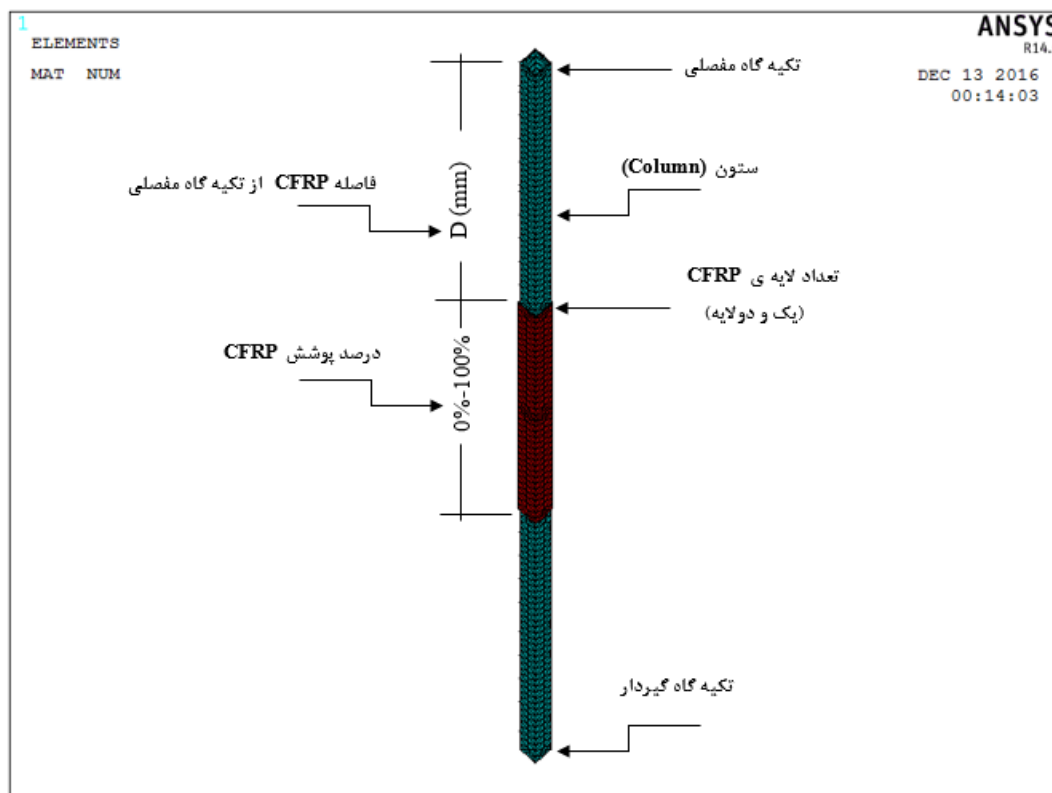


شکل ۸: مقایسه بار نهایی بر حسب تغییر شکل محوری نمونه ی C2-40-D900 در دو حالت آزمایشگاهی [۱۵] و مدل سازی.

۳-۴- نام گذاری نمونه ها

نام گذاری نمونه ها به این ترتیب انجام شد، که پس از علامت اختصاری C که از کلمه لاتین ستون گرفته شده، تعداد لایه CFRP مورد استفاده جهت مقاوم سازی به کار رفته است. سپس درصد پوشش CFRP بیان شده است (اعداد ۱۰، ۲۰، ۳۰ و...). حرف D فاصله کامپوزیت از تکیه گاه مفصلی نمونه را نشان می دهد. به عنوان مثال نمونه ی C1-70-D450 ستونی است با یک لایه CFRP و ۷۰٪ پوشش که مرکز کامپوزیت بر مرکز ستون قرار دارد و فاصله کامپوزیت از تکیه گاه مفصلی ۴۵۰ میلی متر می باشد. مشابهاً، نمونه ی C2-40-D900 ستونی است با دو لایه CFRP و ۴۰٪ پوشش که مرکز کامپوزیت بر مرکز ستون قرار دارد و فاصله کامپوزیت از تکیه گاه مفصلی ۹۰۰ میلی متر می باشد. تغییر موقعیت قرار گیری کامپوزیت ها فقط برای پوشش ۳۰٪ و تعداد یک و دولایه انجام شده است. برای این نمونه ها

موقعیت قرارگیری کامپوزیت در آنها تغییر می کند مرکز کامپوزیت بر مرکز ستون قرار نداشته بلکه متغیر می باشد. مثلا نمونه ی C2-30- D700 ستونی است با دو لایه CFRP و ۳۰٪ پوشش که فاصله کامپوزیت (D) از تکیه گاه مفصلی ستون ۷۰۰ میلی متر می باشد. همچنین نمونه ی تقویت نشده (نمونه شاهد) با C0 نشان داده شده است. در بخش ۴-۱ نحوه ی مدل کردن و قرارگیری کامپوزیت ها (شکل ۵) بر روی ستون های فولادی نشان داده شد. همچنین به منظور ارائه جزئیات بیشتر، پارامترهای نام گذاری در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹: جزئیات و پارامترهای نام گذاری نمونه ها.

۵- نتایج مدل سازی نرم افزار

۵-۱- ستون های تقویت شده با درصد پوشش CFRP متفاوت

جداول ۵ و ۶ ظرفیت و درصد افزایش بار نهایی ستون هایی که با یک و دو لایه CFRP مقاوم سازی شده اند، را نشان می دهد. نتایج تحلیل نشان می دهد که با افزایش درصد پوشش CFRP بار نهایی ستون ها نیز افزایش می یابد. اختلاف بار نهایی نمونه ها در درصدهای پوشش ۷۰ و ۸۰٪ کمتر از بقیه نمونه هاست. دلیل کاهش اختلاف بار در این درصدها همانطوریکه در بخش ۲ ارائه شد، نوع تغییر شکل ستون و ایجاد نقطه عطف در فاصله ی 0.7L از تکیه گاه مفصلی می باشد (شکل ۱-a). همچنین حد اکثر بار نهایی برای ستون هایی است که پوشش کامپوزیت CFRP در آنها ۱۰۰٪ می باشد.

جدول ۵: نتایج مدل سازی نرم افزاری برای ستون های با یک لایه CFRP با پوشش متفاوت

نام گذاری نمونه ها	تعداد لایه ی CFRP	درصد پوشش CFRP	بار نهایی ستون (kN)	درصد افزایش بار
C1-100-D0	۱	۱۰۰	۳۷/۳۸۳	۱۶/۶۰۳
C1-90-D150	۱	۹۰	۳۶/۲۲۵	۱۲/۹۹۱
C1-80-D300	۱	۸۰	۳۵/۹۱۰	۱۲/۰۰۹
C1-70-D450	۱	۷۰	۳۵/۷۷۸	۱۱/۵۹۷
C1-60-D600	۱	۶۰	۳۵/۴۳۴	۱۰/۵۲۴
C1-50-D750	۱	۵۰	۳۴/۹۶۳	۹/۰۵۵
C1-40-D900	۱	۴۰	۳۴/۵۸۷	۷/۸۸۲
C1-30-D1050	۱	۳۰	۳۴/۱۰۱	۶/۳۶۶
C1-20-D1200	۱	۲۰	۳۳/۶۳۸	۴/۹۲۲
C1-10-D1350	۱	۱۰	۳۳/۲۷۸	۳/۷۹۹
C0	۰	۰	۳۲/۰۶۰	۰/۰۰

جدول ۶: نتایج مدل سازی نرم افزاری برای ستون های با دو لایه CFRP با پوشش متفاوت

نام گذاری نمونه ها	تعداد لایه ی CFRP	درصد پوشش CFRP	بار نهایی ستون (kN)	درصد افزایش بار
C2-100-D0	۲	۱۰۰	۴۱/۵۰۳	۲۹/۴۵۴
C2-90-D150	۲	۹۰	۳۸/۵۱۰	۲۰/۱۱۹
C2-80-D300	۲	۸۰	۳۸/۱۷۰	۱۹/۰۵۸
C2-70-D450	۲	۷۰	۳۸/۰۳۲	۱۸/۶۲۸
C2-60-D600	۲	۶۰	۳۷/۷۳۰	۱۷/۶۸۶
C2-50-D750	۲	۵۰	۳۷/۵۶۶	۱۷/۱۷۴
C2-40-D900	۲	۴۰	۳۶/۷۷۹	۱۴/۷۱۹
C2-30-D1050	۲	۳۰	۳۶/۰۸۴	۱۲/۵۵۱
C2-20-D1200	۲	۲۰	۳۵/۷۵۷	۱۱/۵۳۲
C2-10-D1350	۲	۱۰	۳۵/۳۷۵	۱۰/۳۴۰

۵-۲- ستون های تقویت شده با درصد پوشش CFRP ثابت (۳۰٪)

جداول ۷ و ۸ ظرفیت و درصد افزایش بار نهایی ستون هایی که با یک و دو لایه و پوشش ۳۰٪ CFRP مقاوم سازی شده اند، را نشان می دهد. نتایج تحلیل نشان می دهد که حد اکثر بار نهایی برای ستون هایی است که فاصله کامپوزیت CFRP از تکیه گاه در آنها ۷۰۰ میلی متر می باشد. با توجه به بخش ۲ مشاهده می شود که حداکثر تغییر شکل ستون در فاصله 0.4L از تکیه گاه مفصلی ستون اتفاق می افتد. لذا اگر پوشش ۳۰٪ کامپوزیت در دو طرف این ناحیه به صورت مساوی (هر طرف ۱۵٪) قرار گیرد به حداکثر بار خواهیم رسید. در این صورت فاصله کامپوزیت از تکیه گاه مفصلی ستون ۲۵٪ طول آن خواهد بود. این فاصله با توجه به طول ستون (۳۰۰۰ میلی متر) ۷۵۰ میلی متر می باشد. با توجه به اینکه هر فاصله ی مورد بررسی برای جابجایی کامپوزیت ها ۱۰۰ میلی متر در نظر گرفته شده (جداول ۷ و ۸)، لذا این فاصله در موقعیتی بین ۷۰۰ و ۸۰۰ میلی متر قرار دارد. مقایسه ی نتایج تحلیل عددی (حداکثر بار نهایی وقتی اتفاق می افتد که فاصله کامپوزیت CFRP از تکیه گاه مفصلی ۷۰۰ میلی متر باشد) با نتایج تئوریک نشان از دقت مناسب نتایج تحقیق حاضر دارد.

جدول ۷: نتایج مدل سازی نرم افزاری برای ستون های با یک لایه CFRP و ۳۰٪ پوشش

نام گذاری نمونه ها	تعداد لایه ی CFRP	درصد پوشش CFRP	فاصله CFRP از تکیه گاه مفصلی (میلی متر)	بار نهایی ستون (kN)	درصد افزایش بار
C1-30-D100	۱	۳۰	۱۰۰	۳۳/۹۷۱	۵/۹۶۱
C1-30-D200	۱	۳۰	۲۰۰	۳۴/۲۳۶	۶/۷۸۷
C1-30-D300	۱	۳۰	۳۰۰	۳۴/۴۳۶	۷/۴۱۱
C1-30-D400	۱	۳۰	۴۰۰	۳۴/۵۸۲	۷/۸۶۷
C1-30-D500	۱	۳۰	۵۰۰	۳۴/۶۷۱	۸/۱۴۴
C1-30-D600	۱	۳۰	۶۰۰	۳۴/۶۷۸	۸/۱۶۶
C1-30-D700	۱	۳۰	۷۰۰	۳۴/۸۰۴	۸/۵۵۹
C1-30-D800	۱	۳۰	۸۰۰	۳۴/۵۷۹	۷/۸۵۷
C1-30-D900	۱	۳۰	۹۰۰	۳۴/۴۷۵	۷/۵۳۳
C1-30-D1000	۱	۳۰	۱۰۰۰	۳۴/۲۳۶	۶/۷۸۷

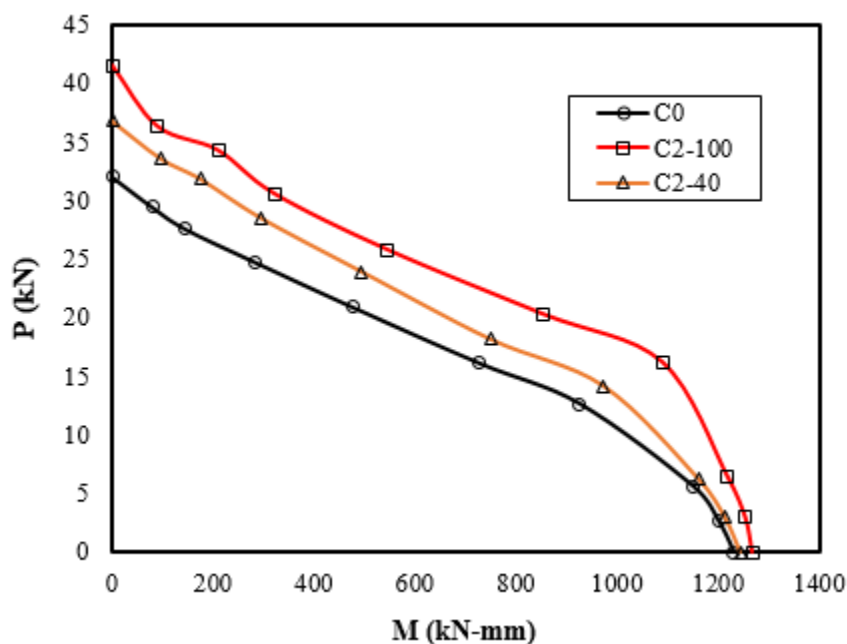
جدول ۸: نتایج مدل سازی نرم افزاری برای ستون های با دو لایه CFRP و ۳۰٪ پوشش

نام گذاری نمونه ها	تعداد لایه ی CFRP	درصد پوشش CFRP	فاصله CFRP از تکیه گاه مفصلی (میلی متر)	بار نهایی ستون (kN)	درصد افزایش بار
C2-30-D100	۲	۳۰	۱۰۰	۳۴/۶۷۱	۸/۱۴۴
C2-30-D200	۲	۳۰	۲۰۰	۳۵/۰۹۹	۹/۴۷۹
C2-30-D300	۲	۳۰	۳۰۰	۳۵/۳۵۶	۱۰/۲۸۱
C2-30-D400	۲	۳۰	۴۰۰	۳۵/۷۸۴	۱۱/۶۱۶
C2-30-D500	۲	۳۰	۵۰۰	۳۶/۳۴۱	۱۳/۳۵۳
C2-30-D600	۲	۳۰	۶۰۰	۳۶/۴۰۱	۱۳/۵۴۰
C2-30-D700	۲	۳۰	۷۰۰	۳۶/۴۰۷	۱۳/۵۵۹
C2-30-D800	۲	۳۰	۸۰۰	۳۶/۳۴۱	۱۳/۳۵۳
C2-30-D900	۲	۳۰	۹۰۰	۳۶/۱۰۶	۱۲/۶۲۱
C2-30-D1000	۲	۳۰	۱۰۰۰	۳۶/۰۹۷	۱۲/۵۹۲

۵-۳- بررسی اثر متقابل بار محوری و لنگر خمشی بر ستون های فولادی توخالی

اعضای فشاری در سازه های فولادی ممکن است توامان علاوه بر نیروی محوری تحت اثر لنگر خمشی نیز قرار گیرند. لنگر خمشی ممکن است در اثر بارهای نامتعادل کف و یا در اثر نیروهای جانبی بوجود آیند. حتی در صورتی که محاسبات استاتیکی نشان دهد که یک عضو فشاری تحت بار محوری خالص قرار دارد عیوب ناشی از ساخت ممکن است سبب ایجاد خروج از مرکزیت هایی هر چند ناچیز در بار محوری ستون ها شود. این خروج از مرکزیت ها در عضو ایجاد خمش می کند. هدف از تعیین مقاومت یک عضو محوری تحت فشار و خمش محاسبه مقادیر P و M است که بطور همزمان سبب گسیختگی آن عضو می شود. بدیهی است که برای هر مقطع مشخص بی نهایت ترکیب مختلف از نیرو محوری و لنگر خمشی وجود دارد. این ترکیب مقاومت ها را می توان بر روی یک منحنی، که به منحنی اثر متقابل فشار و خمش موسوم است، نشان داد. منحنی های اثر متقابل (منحنی های پوش) نقش بسیار مهمی در طراحی اعضای تحت اثر نیروی محوری-لنگر خمشی دارند. به عنوان مثال، شکل ۱۰ منحنی های پوش لنگر خمشی-نیروی محوری دو نمونه از ستون های مقاوم سازی شده و نمونه شاهد را نشان می دهد. همانطوریکه مشاهده می شود، CFRP باعث افزایش مقاومت ستون ها شده است. این افزایش در ستون هایی که

پوشش کامپوزیت در آنها کامل است، بیشتر می باشد. شیب منحنی های پوش لنگر خمشی-نیروی محوری با افزایش لنگر خمشی کاهش می یابد. در محدوده ی بارهای محوری ۱۴ الی ۱۶ کیلو نیوتن کاهش شیب این منحنی ها بیشتر مشاهده می گردد.



شکل ۱۰: مقایسه پوش لنگر خمشی-نیروی محوری ستون ها (نمونه های: C0, C2-40-D900 و C2-100-D0).

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق تعداد ۴۱ عدد ستون که تعداد ۴۰ عدد از آنها با CFRP مقاوم سازی شده بودند، مورد تحلیل غیر خطی قرار گرفت. تعداد لایه ها، درصد پوشش و فاصله CFRP از تکیه گاه ستون ها متفاوت در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که CFRP باعث افزایش بار نهایی ستون های فولادی قوطی شکل توخالی می شود. همچنین درصد پوشش CFRP در میزان افزایش 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 (ستون های فولادی لاغر) وقتی که پوشش CFRP کامل نباشد، CFRP تاثیر قابل ملاحظه ای در افزایش بار نهایی ستون ها دارد. دلیل موثر بودن CFRP در این ستون ها بخاطر این است که مود شکست (کمانش) در ناحیه مقاوم سازی اتفاق می افتد. نتایج تحلیل نشان داد که اختلاف بار نهایی نمونه ها در درصدهای پوشش ۷۰ و ۸۰٪ کمتر از بقیه نمونه هاست. دلیل کاهش اختلاف بار در این درصدها همانطوریکه در بخش ۲ ارائه شد، نوع تغییر شکل ستون و ایجاد نقطه عطف در فاصله ی $0.7L$ از تکیه گاه مفصلی می باشد. حد اکثر بار نهایی برای ستون هایی که با یک و دو لایه CFRP مقاوم سازی شده بودند زمانی اتفاق می افتد که پوشش کامپوزیت در آنها کامل باشد. همچنین نتایج نشان داد، برای ستون هایی که با یک و دو لایه و ۳۰٪ پوشش CFRP مقاوم سازی شده بودند، حداکثر بار نهایی زمانی اتفاق می افتد که فاصله کامپوزیت از تکیه گاه مفصلی ستون در حدود ۷۰۰ میلی متر باشد. مقایسه ی منحنی های پوش لنگر خمشی-نیروی محوری دو نمونه از ستون های مقاوم سازی شده و نمونه شاهد نشان داد که CFRP باعث افزایش مقاومت ستون ها ی تحت بار گذاری مشترک لنگر خمشی-نیروی محوری می شود. این افزایش در ستون هایی که پوشش کامپوزیت در آنها کامل است، بیشتر مشاهده گردید. بیشترین درصد افزایش بار نهایی ستون ها، مربوط به ستون مقاوم سازی شده با دو لایه و پوشش ۱۰۰٪ CFRP به مقدار ۲۹/۴۵۴٪ بدست آمد (برای نمونه ی C2-100-D0).

مراجع

- [1] ACI Committee 440, (2002). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. ACI440.2R-02, Farmington Hills, MI, American Institute.
- [2] Teng, J. G., Hu, Y. M. (2007). Behavior of FRP jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under compression. *International Journal of Construction and Building Materials*, 21, 827-838.
- [3] Kalavagunta, S., Naganathan, S., Bin Mustapha K. N. (2013). Proposal for design rules of axially loaded CFRP strengthened cold formed lipped channel steel sections. *Thin-Walled Structures*, 72, 1-14.
- [4] Jiao, H., Zhao, X. L. (2004). CFRP strengthened butt-welded very high strength (VHS) circular steel tubes. *Thin-Walled Structures*, 42(7), 963-78.
- [5] Tao, Z., Han, L. H., Wang, L. L. (2007). Compressive and flexural behavior of CFRP-repaired concrete-filled steel tubes after exposure to fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 63, 1116-1126.
- [6] Kalavagunta, S., Naganathan, S., Bin Mustapha K. N. (2013). Proposal for design rules of axially loaded CFRP strengthened cold formed lipped channel steel sections. *Thin-Walled Structures*, 72, 1-14.
- [7] Gao, X. Y., Balendra, T., Koh, C. G. (2013). Buckling strength of slender circular tubular steel braces strengthened by CFRP. *Engineering structures*, 46, 547-556.
- [8] Shaat, A., Fam, A. (2006). Axial loading tests on CFRP-retrofitted short and long HSS steel columns. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(4), 458-70.
- [9] Haedir, J., Zhao, X. L. (2011). Design of short CFRP-reinforced steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 67, 497-509.
- [10] Bambach, M. R., Elchalakani, M. (2007). Plastic mechanism analysis of steel SHS strengthened with CFRP under large axial deformation. *Thin-Walled Structures*, 45, 159-170.
- [11] Sundararaja, M. C., Sivasankar, S. (2013). Experimental investigation on FRP confined HSS tubular members under compression. *Journal of structural Engineering*, 40, 298-304.
- [12] Sundararaja, M. C., Ganesh Prabhu, G. (2012). Experimental study on CFST members strengthened by CFRP composites under compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 72, 75-83.
- [13] Tao, Z., Han, L. H., Wang, L. L. (2007). Compressive and flexural behavior of CFRP-repaired concrete-filled steel tubes after exposure to fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 63, 1116-1126.
- [14] Feng, P., Zhang, Y., Bai, Y., Ye, L. (2013). Strengthening of steel members in compression by mortar-filled FRP tubes. *Thin-Walled Structures*, 64, 1-12.
- [15] Keykha, A. H., Nekooei, M. and Rahgozar, R. (2015). Experimental and theoretical analysis of hollow steel columns strengthening by CFRP. *Civil Engineering Dimension*, 17 (2), 101-107.
- [16] Keykha, A. H., Nekooei, M., Rahgozar, R. (2016). Numerical and experimental investigation of hollow steel columns strengthened with carbon fiber reinforced polymer. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 3 (1), 49-58.
- [17] Keykha, A. H., Nekooei, M. and Rahgozar, R. (2016). ANALYSIS AND STRENGTHENING OF SHS STEEL COLUMNS USING CFRP COMPOSITE MATERIALS. *Composites: Mechanics, Computations, Applications. An International Journal*, 7 (4), 275-290.