یازدهمین کنگره ملّی مهندسی عمران

۱۱ و ۱۲ اردیبهشت ۱۳۹۸

دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

بررسی آزمایشگاهی ستون‌های فولادی پر شده با بتن دارای مقطع شش‌ضلعی منتظم تحت بار محوری فشاری با خروج از مرکزیت اولیه

نوید مهدوی، منصور قلعه‌نوی

۱- کارشناس ارشد سازه، دانشگاه فردوسی، Navid.Mahdavi@mail.um.ac.ir

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهدGhalehnovi@um.ac.ir

Ghalehnovi@um.ac.ir

پژوهش حاضر با رویکرد آزمایشگاهی به مطالعه‌ی رفتار ستون‌های فولادی پر شده با بتن (CFT)[1] تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت پرداخته است. در این پژوهش ۶ نمونه ستون CFT با مقطع شش‌ضلعی و با طول ۱۵۰ سانتی‌متر تحت آزمایش قرارگرفته است. بتن مورداستفاده به‌عنوان هسته‌ی مقطع از نوع بتن ساده و بتن الیافی بوده است. تغییر مکان‌ها در دو راستای محور طولی و تغییر مکان جانبی ناشی از لنگر خمشی برداشت شده و نمودار نیرو – تغییر مکان برای تمامی نمونه‌ها و در هر دو جهت رسم شده است. ظرفیت باربری و میزان جذب انرژی محاسبه شده و مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته است. همچنین برای نمونه‌هایی که تحت بار فشاری خالص قرارگرفته‌اند، مدول کشسان و سختی الاستیک نیز به دست آورده شده است. افزایش مقاومت هسته‌ی بتنی به‌طور قابل‌توجهی ظرفیت باربری نمونه‌ها را افزایش می‌دهد به‌طوری‌که افزایش حدوداً ٪۵۰ مقاومت هسته‌ی بتنی سبب افزایش حدوداً ٪۲۰ ظرفیت باربری نمونه می‌شود؛ اما با ایجاد لنگر و افزایش آن از تأثیر مقاومت هسته‌ی بتنی به‌شدت کاسته می‌شود. همچنین بر اساس نتایج مشخص گردید نمونه‌های پر شده با بتن الیافی دارای جذب انرژی بیشتری نسبت به بتن نمونه‌های پر شده با بتن ساده می‌باشند.

کلمات کلیدی: نمودار نیرو-تغییر مکان، ظرفیت باربری، جذب انرژی، خروج از مرکزیت بار

۱- مقدمه

ستون‌های مختلط ترکیبی است از بتن و فولاد که به‌صورت هم‌زمان و با عملکرد کامپوزیتی رفتار می‌کنند. ستون‌های مختلط به دودسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند. دسته اول مقاطع فولادی محاط در بتن هستند که به آن‌ها بتن مسلح با پروفیل فولادی (Steel Reinforced Concrete) یا به‌اختصار SRC گفته می‌شوند و دسته دوم مقاطع توخالی پر شده با بتن (Concrete Filled Tube) می‌باشد که به‌اختصار CFT نامیده می‌شوند. ستون‌های CFT نزد مهندسان سازه ستون‌هایی با ظرفیت باربری بالا و شکل‌پذیری مناسب شناخته می‌شوند. ظرفیت بالای مقاطع CFT به علت محصورشدگی بتن توسط جدار فولادی می‌باشد.

بر اساس پژوهش‌های گذشته می‌توان گفت ظرفیت باربری نمونه‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تحت تأثیر ضخامت جدار فولادی و شکل مقطع می‌باشد. پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد در مقاطع دایره‌ای اثر محصورشدگی قابل‌توجه بوده و به‌طور مؤثری بر ظرفیت باربری تأثیرگذار است اما در مقطع مربعی اثر محصورشدگی کمتر بوده و لذا تأثیر آن برافزایش ظرفیت باربری نسبت به مقطع دایره‌ای شکل کمتر می‌باشد.

بتن ماده‌ای ترد می‌باشد و تحت کشش به‌سرعت دچار ترک‌خوردگی می‌گردد. راهکارهای بسیار متعددی برای حذف و یا کاهش این ضعف بتن ارائه شده است که در این بتن یکی از راهکارهای نسبتاً مناسب، استفاده از الیاف فولادی می‌باشد. الیاف فولادی، مقاومت ترک‌خوردگی و طاقت بتن را افزایش می‌دهد.

درزمینه‌ی ستون‌های CFT پژوهش‌های متعدد و ارزشمندی انجام شده است. در سال ۲۰۱۰ تُک گُر و داندر پژوهشی آزمایشگاهی و عددی را بر روی مقاطع مربعی CFT با بتن الیافی تحت بار خارج از محور انجام دادند[۱]. چنگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ به تحلیلی عددیِ ستون‌های فولادی پر شده با بتن الیافی تحت اثر بار سیکلی پرداختند و بیان داشتند افزودن الیاف فولادی سبب افزایش حداکثر بار جانبی قابل‌تحمل، سختی و شکل‌پذیری بیشتر می‌شود[۲]. در سال ۲۰۱۳ در پژوهشی مین یو و همکاران رابطه‌ی واحدی را برای به دست آوردن ظرفیت باربری مقاطع CFT دایره‌ای و

[1] Concrete Filled Tube

چندضلعی (به‌صورت تو پر و توخالی) تحت بار محوری فشاری ارائه کردند. همچنین در سال ۲۰۱۳ جمال‌الدین و همکاران در پژوهشی آزمایشگاهی، با آزمایش ۲۶ نمونه با ابعاد مقطع و طول متفاوت به بررسی مقاطع بیضی‌شکل پرداختند و اولین ضوابط را برای طراحی این‌گونه مقاطع بر مبنای ضوابط بیان‌شده برای طراحی ستون‌های دایره‌ای در یورو کد ارائه کردند[۳]. لو و همکاران در سال ۲۰۱۵ با ساخت ۳۶ نمونه‌ی آزمایشگاهی ستون‌های CFT بر روی تأثیر بتن الیافی بر پارامترهایی نظیر مود شکست، ظرفیت باربری شکل‌پذیری و پدیده‌ی باریک شدگی نمودارهای چرخه‌ای پرداختند[۴]. لانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ با رویکرد تئوری و بر اساس روش انرژی کمانش موضعی ورق فولادی را تحت بارگذاری خارج از مرکز موردبررسی قرار داده و کمانش موضعی الاستیک را رابطه سازی کردند. رابطه‌ی ارائه‌شده توسط این محققین با نتایج آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی قرارگرفته و درستی آن تائید شده است[۵]. در سال ۲۰۱۶ دینگ و همکاران بر روی مقاطع شش‌ضلعی و هشت‌ضلعی به‌صورت آزمایشگاهی و عددی به مطالعه پرداختند و همچنین رابطه‌ی کاربردی جهت به دست آوردن ظرفیت باربری ارائه دادند[۶, ۷]. الچلکانی و همکاران در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی با رویکرد آزمایشگاهی و نظری حد لاغری تسلیم و پلاستیک را برای ستون‌های CFT با قرار دادن نمونه‌ها تحت خمش محض به دست آورند[۸]. در سال ۲۰۱۸ دینگ و همکاران تأثیر استفاده از CFRPها را در ستون‌های CFT موردبررسی قرار داده و با استفاده از معادلات تعادل در حالت‌های حدی و بهره بردن از روش تحلیل الاستوپلاستیک، رابطه‌ی ساده‌سازی شده‌ای را برای محاسبه مقاومت نهایی این مقاطع پیشنهاد داده‌اند[۹].

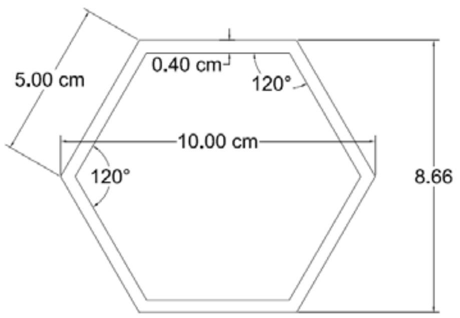
در پژوهش‌های گذشته تأکید بر بارگذاری‌های محوری بوده است و تحقیقات کمی درزمینه‌ی ستون‌های CFT تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت انجام شده است. از سویی تحقیقات انجام شده بیشتر به مقاطعی با اشکال هندسی متعارف نظیر دایره، مربع و مستطیل پرداخته‌اند. این در حالی است که در اکثر موارد ستون‌ها به علت‌های گوناگون ازجمله عدم بارگذاری‌های متقارن، اتصالات گیردار تیر به ستون و قرارگیری ستون‌ها در گوشه‌ها، علاوه بر بار محوری تحت لنگر خمشی نیز قرار دارند. همچنین امروزه استفاده از ستون‌هایی با شکل مقاطع غیرمتعارف نظیر چندضلعی‌های منتظم به علت ضرورت‌های معماری متداول‌تر از سابق گردیده و لذا بررسی رفتار این‌گونه از مقاطع لازم به نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر مقطع انتخابی به‌صورت شش‌ضلعی منتظم می‌باشد. همچنین جهت در نظرگیری لنگر خمشی از بار با خروج از مرکزیت که هم‌ارز با لنگر خمشی می‌باشد بهره‌جویی شده است. در ادامه به پارامترهای موردبررسی و همچنین خصوصیات نمونه‌ها پرداخته شده است.

۲. صورت‌مسئله و شرح آزمایش

در پژوهش حاضر ۶ نمونه ستون CFT مورد آزمایش قرار گرفته است. پارامترهای موردبررسی شامل مقاومت هسته‌ی بتنی و خروج از مرکزیت بار می‌باشد. همچنین در نیمی از نمونه‌ها از بتن الیافی استفاده شده است. طول تمامی نمونه‌ها ۱۵۰۰ میلی‌متر بوده و شرایط تکیه‌گاهی نمونه‌ها به‌صورت یکسر گیردار می‌باشد. در جدول ۱ مشخصات نمونه‌ها آورده شده است. برای نام‌گذاری نمونه‌ها از حروف لاتین استفاده شده است. PC برای نمونه‌هایی که با بتن ساده پر شده است مورد استفاده قرار گرفته و نمونه‌هایی که با بتن الیافی پر شده‌اند با حروف PSR نام‌گذاری شده‌اند. خروج از مرکزیت‌های بار نیز به‌صورت (عدد-e) مشخص شده است. در شکل ۱ نیز جزییات مربوط به مقطع نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایش

Sample	L×B×t (cm)	e (cm)
PC-0	150×5×0.4	0
PC-5	150×5×0.4	5
PC-10	150×5×0.4	10
PSR-0	150×5×0.4	0
PSR-5	150×5×0.4	5
PSR-10	150×5×0.4	10



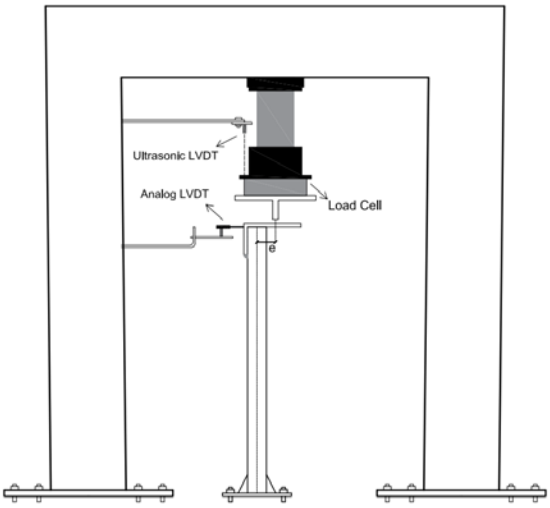
شکل ۱: جزییات مقطع ساخت شده

در جدول ۱، L طول نمونه‌ها، B طول ضلع نمونه‌ها و t ضخامت جدار فولادی می‌باشد.

میانگین مقاومت نهایی بتن ساده بر اساس آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد برای بتن ساده برابر با ۲۲/۴ مگا پاسکال و برای بتن الیافی برابر با ۳۴/۱ مگا پاسکال به دست آمد. همچنین برای مشخص کردن مقاومت تسلیم فولاد دو تسمه‌ی دمبلی شکل بر اساس ضوابط بیان‌شده در ASTM E8 ساخته‌شده و مورد آزمایش قرار گرفت[۱۰]. بر اساس نتیجه آزمون کشش میانگین مقاومت تسلیم فولاد برابر با ۲۴۵ مگا پاسکال حاصل گردید.

لازم به ذکر است برای ساخت بتن الیافی از الیاف فولادی دو سر قلاب بانام تجاری KX-CSF با قطر ۰/۷ تا ۰/۸، طول ۶ سانتی‌متر و ضریب لاغری ۸۵ استفاده شده است. بر اساس اطلاعات بیا شده توسط سازنده مقاومت کششی الیاف‌ها در بازه‌ی ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ مگا پاسکال بود.

برای ثبت تغییر شکل‌های محوری و جانبی از تغییر مکان‌سنج[۱] استفاده شده است. همچنین ب ثبت میزان بار واردشده با استفاده از لودسل ۵۰ تنی انجام شده است. همچنین برای دریافت اطلاعات و خوانش اعداد در رایانه، از دستگاه داده نگار[۲] استفاده شده است. در شکل ۲ به‌صورت شماتیک، سیستم بارگذاری نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳ تصویری واقعی از نمونه‌های آماده‌ی بارگذاری نمایش داده شده است.

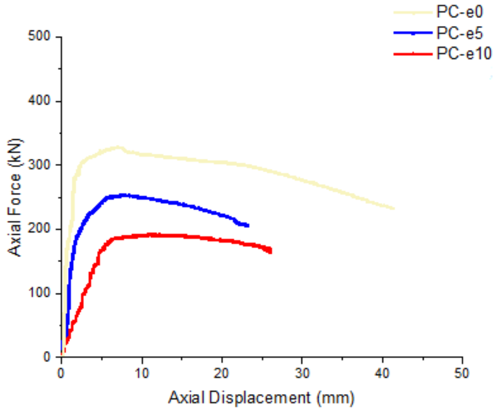


شکل ۲: تصویر شماتیک سیستم بارگذاری

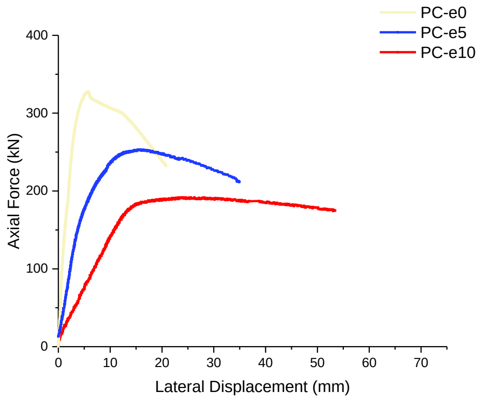
شکل ۳: نمونه در حال آماده‌سازی جهت بارگذاری

۳. بررسی نتایج حاصل از آزمایش

نتایج حاصل از آزمایش به‌صورت نمودارهای تنش-کرنش می‌باشد. در شکل ۴ نمودار نیروی- تغییر مکان و در شکل ۵ نمودار نیرو- تغییر مکان جانبی برای تمامی نمونه‌های پر شده با بتن ساده آورده است.



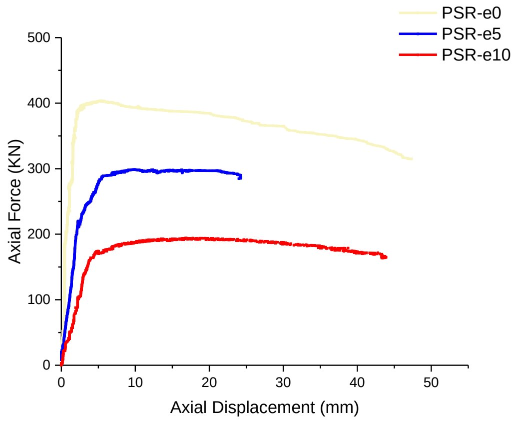
شکل ۴: نمودار نیرو-تغییر محوری برای نمونه‌های پر شده با بتن ساده



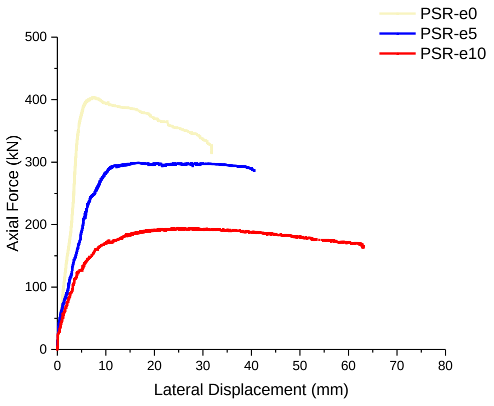
شکل ۵: نمودار نیرو-تغییر جانبی برای نمونه‌های پر شده با بتن ساده

در شکل ۶ و ۷ نیز نمودارهای نیرو- تغییر مکان برای نمونه‌های پر شده با بتن الیافی آورده شده است.

[1] Linear variable differential transformer (LVDT)
[2] Data lagger



شکل ۶: نمودار نیرو- تغییر محوری برای نمونه‌های پر شده با بتن الیافی



شکل ۷: نمودار نیرو- تغییر محوری برای نمونه‌های پر شده با بتن الیافی

۱.۳. ظرفیت باربری

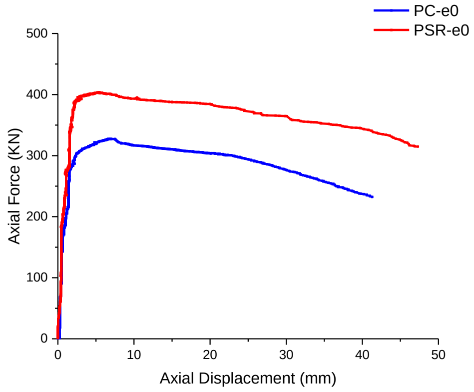
در این به بخش به مقایسه ظرفیت باربری نمونه‌ها پرداخته می‌شود. در جدول ۲ نتایج حاصل از آزمایش آورده شده است. بر اساس جدول ۲ کاملاً مشخص است که افزایش مقاومت هسته‌ی بتنی به مقدار بسیار زیادی سبب افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها تحت بار فشاری خالص می‌گردد؛ اما با افزایش خروج از مرکزیت بار، ظرفیت باربری نمونه‌های پر شده با بتن ساده و نمونه‌های پر شده با بتن الیافی به یکدیگر نزدیک می‌گردد. این امر احتمالاً به علت ترک‌خوردگی بتن براثر تنش کششی ایجادشده ناشی از لنگر خمشی می‌باشد.

جدول ۲: ظرفیت باربری نمونه‌ها

نمونه‌ها	مقاومت فشاری بتن (مگا پاسکال)	درصد افزایش مقاومت بتن (٪)	درصد افزایش خروج از مرکزیت (٪)	ظرفیت باربری (کیلو نیوتن)	درصد افزایش باربری بر اساس نوع بتن (٪)	درصد کاهش ظرفیت باربری بر اساس افزایش خروج از مرکزیت (٪)
PC-e0	۲۲/۴	-	-	۳۲۷/۷	-	-
PSR-e0	۳۴/۱	۵۲/۰۹	-	۴۰۳/۷	۲۳/۰۴	-
PC-e5	۲۲/۴	-	-	۲۵۳	-	۲۲/۷۹
PSR-e5	۳۴/۱	۵۲/۰۹	-	۲۹۸/۵	۱۷/۹۸	۲۵/۹۷
PC-e10	۲۲/۴	-	۱۰۰	۱۹۱/۶	-	۴۱/۵۳
PSR-e10	۳۴/۱	۵۲/۰۹	۱۰۰	۲۱۶/۵	۱۲/۹۹	۴۶/۳

۲.۳. بررسی نمونه‌ها تحت بار فشاری خالص

به‌طورمعمول ستون‌ها تحت بار فشاری خالص قرار ندارند اما به علت سادگی در تحلیل رفتار ابن گونه ستون‌ها و همچنین امکان مقایسه، پرداختن به این بارگذاری حائز اهمیت است. در این بخش به بررسی و مقایسه رفتار نمونه‌ها تحت بار فشاری خالص پرداخته می‌شود. در شکل ۸ آورده شده است. لازم به ذکر است در نمونه‌ها تحت بار فشاری خالص، ازلحاظ تئوری سازه‌ها تا لحظه‌ی رسیدن به بار بحرانی نباید هیچ‌گونه تغییر مکان جانبی مشاهده شود و پس از رسیدن به بار بحرانی تغییر مکان‌های جانبی به‌یک‌باره ایجاد شده و افزایش می‌یابد. در آزمایشگاه رسیدن به شرایط ایده آل مشکل بوده و لذا در نتایج مقداری تغییر مکان جانبی قبل از رسیدن به بار بحرانی مشهود است. باید توجه داشت که تغییر مکان مذکور جزو خطای آزمایش بوده و لذا نمودار نیرو- تغییر مکان جانبی برای نمونه‌های تحت بار فشاری بدون خروج از مرکزیت فاقد اعتبار می‌باشد و از آوردن آن خودداری شده است.



شکل ۸: نمودار نیرو–تغییر مکان محوری برای نمونه‌ها تحت بار فشاری خالص

همان‌طور که مشخص است افزایش مقاومت بتن سبب بهبود قابل‌توجه ظرفیت باربری نمونه شده است.

سختی محوری به‌صورت نیروی متناظر با تغییر مکان واحد تعریف می‌گردد. با توجه به در دست بودن نمودار به‌سادگی می‌توان مقدار سختی محوری را برای نمونه‌هایی که تحت بار فشاری خالص قرار گرفته‌اند به دست آورد. در جدول ۳ مقدار سختی این نمونه‌ها آورده شده است.

جدول ۳: سختی محوری نمونه‌ها

نمونه‌ها	تغییر مکان (mm)	نیروی متناظر با تغییر مکان (N)
PC-e0	۱	۱۹۷۵۷۰
PSR-e0	۱	۲۳۵۱۹۷

با استفاده از تئوری مقدماتی سازه‌ها و همچنین مشخص بودن سختی محوری نمونه به‌سادگی می‌توان مدول کشسان نمونه‌ها (مدول الاستیسته‌ی فولاد و بتن در عملکرد کامپوزیت) را به دست آورد. در جدول ۴ مدول الاستیسیته‌ی نمونه‌ها آورده شده است.

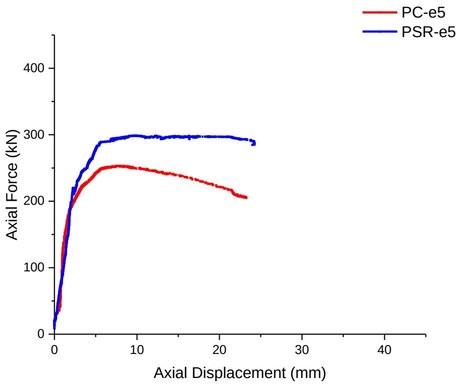
جدول ۴: مدول کشسان نمونه‌ها

نمونه‌ها	$f_c^{'}(MPa)$	$\gamma(kgf/cm^3)$	$E_{st}(MPa)$	$E_c\,(MPa)$	$E_{sample}(MPa)$
PC-e0	۲۲/۴	۲۴۰۰	۲۰۰۰۰۰	۲۴۱۱۵	**۴۱۷۶۹**
PSR-e0	۳۴/۱	۲۴۰۰	۲۰۰۰۰۰	۲۹۷۴۰	**۴۹۷۲۴**

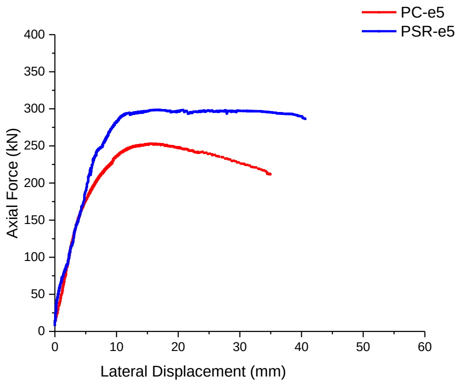
در جدول ۴، $f_c^{'}$ برابر با مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن استفاده شده، γ وزن مخصوص بتن مورداستفاده، E_{st} مدول کشسان فولاد، E_c مدول کشسان بتن و E_{sample} مدول کشسان نمونه‌ها با عملکرد کامپوزیت فولاد و بتن می‌باشد. همان‌طور که مشخص است مدول کشسان نمونه‌ها عددی بین مدول کشسان فولاد و بتن می‌باشد. البته مدول کشسان نمونه‌ها بیشتر به سمت مدول کشسان بتن تمایل داشته که این امر به علت مساحت بیشتر بتن نسبت به فولاد است.

۳.۳. بررسی نمونه‌ها با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر

با ایجاد خروج از مرکزیت به مقدار ۵ سانتی‌متر و همچنین با توجه هسته‌ی مرکزی مقطع، قسمتی از مقطع تحت کشش قرار می‌گیرد. بتن درکشش دارای عملکرد ضعیفی بوده و قسمتی از بتن مقاومت خود را از دست می‌دهد. با ترک‌خوردگی بتن، اثر محصورشدگی جدار فولادی از بین رفته و لذا رفتار نمونه‌ها به سمت رفتار ستون بتن مسلح متمایل می‌گردد. در شکل ۹ و ۱۰ نمودارهای نیرو – تغییر مکان محوری و جانبی برای نمونه‌های تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر آورده شده است.



شکل ۹: نمودار نیرو-تغییر مکان محوری برای نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر



شکل ۱۰: نمودار نیرو-تغییر مکان جانبی برای نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر

همان‌طور که مشخص است همچنان ظرفیت باربری نمونه‌ی پر شده با بتن الیافی که دارای مقاومت فشاری بالاتری می‌باشد نسبت به نمونه‌ی پر شده با بتن ساده، بیشتر است. همچنین نکته‌ی قابل‌توجه در این نمودارها این است که در نمونه‌های پر شده با بتن ساده پس از رسیدن به بیشترین بار قابل‌تحمل، نمودار دچار افت شده است اما نمونه‌های پر شده با بتن الیافی تقریباً روند ثابتی را ادامه می‌دهد. این مطلب احتمالاً به خاطر کنترل گسترش ترک‌ها به‌وسیله الیاف‌ها می‌باشد.

بر اساس تئوری مقدماتی سازه‌ها، سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان برابر با انرژی جذب‌شده توسط عضو می‌باشد. انرژی جذب‌شده بیشتر برای نیروهایی که سبب تغییر مکان جانبی می‌گردد تعریف می‌شود. در این بخش انرژی جذب‌شده توسط نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر در جدول ۵ آورده شده بود.

جدول ۵: انرژی جذب‌شده توسط نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر

نمونه‌ها	انرژی جذب‌شده (ژول)	درصد افزایش انرژی جذب‌شده نسبت به بتن ساده
PC-e5	۷۴۵۰	-
PSR-e5	۱۰۷۸۹	۴۴/۸

همان‌طور که مشخص است بتن الیافی سبب افزایش جذب انرژی شده است.

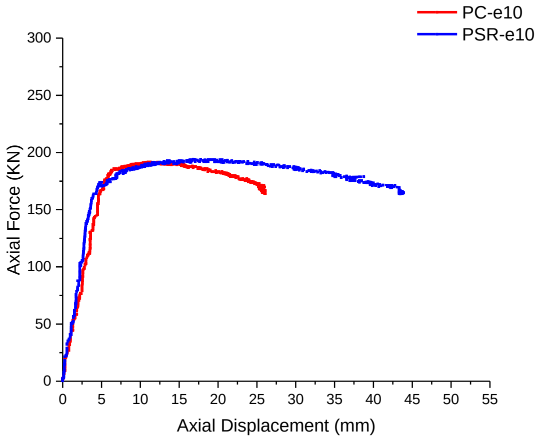
۴.۳. بررسی نمونه‌های تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر

در این بخش به بررسی نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر پرداخته شده است. در خروج از مرکزیت ۱۰سانتی‌متر لنگر وارده بسیار بزرگ بوده و قسمت زیادی از مقطع تحت کشش قرار می‌گیرد. در شکل ۱۱ و ۱۲ نمودارهای مربوط نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر آورده شده است.

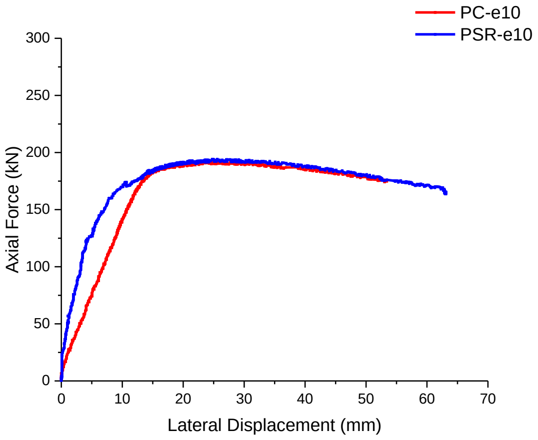
همان‌طور که مشخص است ازلحاظ ظرفیت باربری نمونه‌ها به مقدار بسیار زیادی نزدیک به یکدیگر می‌باشند که به علت از بین رفتن مقدار زیادی از بتن به علت قرارگیری در کشش است؛ اما تمایز میان رفتار بتن ساده و بتن الیافی در این مقدار از خروج از مرکزیت واضح‌تر می‌باشد. نمونه‌ی پر شده با بتن ساده سختی جانبی خود را بهتر حفظ کرده است که به علت وجود الیاف‌ها می‌باشد. همچنین این نمونه‌ها توانسته‌اند به مقدار بسیار بیشتری ادامه پیدا کنند. این رفتار به‌خصوص در تغییر مکان جانبی به علت جذب انرژی بیشتر بسیار مطلوب می‌باشد. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، جذب انرژی برای نمونه‌ها به‌صورت کمّی در جدول ۶ مقایسه شده است.

جدول ۶: انرژی جذب‌شده توسط نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر

نمونه‌ها	انرژی جذب‌شده (ژول)	درصد افزایش انرژی جذب‌شده نسبت به بتن ساده
PC-e10	۸۷۲۵	-
PSR-e10	۱۰۹۴۳	۲۵/۴



شکل ۱۱: نمودار نیرو- تغییر مکان محوری برای نمونه‌های تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر



شکل ۱۲: نمودار نیرو- تغییر مکان جانبی برای نمونه‌های تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر

۵.۳. مقایسه‌ی جذب انرژی نمونه‌ها

در این بخش به‌صورت خلاصه به مقایسه‌ی انرژی جذب‌شده توسط نمونه‌ها پرداخته شده است. مقادیر مربوط به جذب انرژی در جدول ۷ آورده شده است. بر اساس نتایج مشخص است استفاده از بتن الیافی می‌تواند سبب بهبود رفتار نمونه‌های CFT گردد.

نمونه‌ها	جذب انرژی (ژول)	درصد تغییرات جذب انرژی بر اساس نوع بتن نسبت به بتن ساده (٪)	درصد تغییرات جذب انرژی بر اساس افزایش خروج از مرکزیت نسبت به بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر (٪)
PC-e5	۷۴۵۰	-	-
PSR-e5	۱۰۷۸۹	۴۴/۸	-
PC-e10	۸۷۲۵	-	+۱۷/۱
PSR-e10	۱۰۹۴۳	۲۵/۴	+۱/۴

۴. خلاصه و نتایج

در این پژوهش شش نمونه ستون CFT با مقطع شش‌ضلعی و طول ۱۵۰۰ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفته است. بارگذاری به‌صورت فشاری بدون خروج از مرکزیت و با خروج از مرکزیت اولیه بوده است. همچنین شرایط تکیه‌گاهی به‌صورت یکسر گیردار و یکسر آزاد بوده است. ظرفیت باربری و جذب انرژی برای نمونه‌ها به دست آورده شده است. بر اساس کارهای انجام شده نتایج زیر قابل‌بیان است:

- افزایش مقاومت بتن در بار فشاری بدون خروج از مرکزیت سبب افزایش قابل‌توجهی در افزایش ظرفیت باربری می‌گردد. با افزایش ۵۰ درصدی مقاومت بتن، افزایش ظرفیت باربری به میزان ۲۰ درصد مشاهده گردید.

- با افزایش خروج از مرکزیت بار، ظرفیت باربری نمونه‌ها به یکدیگر نزدیک شده است. در حقیقت در ستون‌هایی که تحت لنگر خمشی نسبتاً بزرگی قرار دارند، افزایش مقاومت هسته‌ی بتنی تأثیر کمی در ظرفیت باربری ایفا خواهد کرد.
- افزودن الیاف فولادی سبب می‌شود سختی جانبی نمونه‌ها نسبت به بتن ساده بهتر حفظ گردد. این امر به علت آن است که الیاف‌ها با بستن ترک‌ها و جلوگیری از رشد آن‌ها سبب می‌شوند کاهش سختی جانبی نمونه که به علت افزایش بار محوری و افزایش خروج از مرکزیت رخ می‌دهد، نسبت به بتن ساده، آهسته‌تر صورت گیرد.
- افزودن الیاف سبب رفتار شکل‌پذیرتر و درنتیجه جذب انرژی بالاتر می‌گردد. این موضوع در خصوص بارهای جانبی همانند زلزله می‌تواند بسیار مطلوب باشد.

مراجع

[1] S. Tokgoz, C. Dundar, Experimental study on steel tubular columns in-filled with plain and steel fiber reinforced concrete, Thin-Walled Structures, 48(6) (2010) 414-422.
[2] X. Chang, Y.-Y. Wei, Y.-C. Yun, Analysis of steel-reinforced concrete-filled-steel tubular (SRCFST) columns under cyclic loading, Construction Building Materials, 28(1) (2012) 88-95.
[3] M. Yu, X. Zha, J. Ye, Y. Li, A unified formulation for circle and polygon concrete-filled steel tube columns under axial compression, Engineering structures, 49 (2013) 1-10.
[4] Y. Lu, N. Li, S. Li, H. Liang, Behavior of steel fiber reinforced concrete-filled steel tube columns under axial compression, Construction and Building Materials, 95 (2015) 74-85.
[5] Y.-L. Long, J. Wan, J. Cai, Theoretical study on local buckling of rectangular CFT columns under eccentric compression, Journal of Constructional Steel Research, 120 (2016) 70-80.
[6] F.-x. Ding, Z. Li, S. Cheng, Z.-w. Yu, Composite action of hexagonal concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading, Thin-Walled Structures, 107 (2016) 502-513.
[7] F.-x. Ding, Z. Li, S. Cheng, Z.-w. Yu, Composite action of octagonal concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading, Thin-Walled Structures, 107 (2016) 453-461.
[8] M. Elchalakani, A. Karrech, M. Hassanein, B. Yang, Plastic and yield slenderness limits for circular concrete filled tubes subjected to static pure bending, Thin-Walled Structures, 109 (2016) 50-64.
[9] F.-x. Ding, D.-r. Lu, Y. Bai, Y.-z. Gong, Z.-w. Yu, M. Ni, W. Li, Behaviour of CFRP-confined concrete-filled circular steel tube stub columns under axial loading, Thin-Walled Structures, 125(1) (2018) 107-118.
[10] A.S.f.T. Materials, Standard test methods for tension testing of metallic materials, ASTM international, 2016.