


بررسی آزمایشگاهی ستون‌های جدار فولادی پر شده با بتن ساده و الیافی با مقطع شش ضلعی منتظم تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت

مقالات آماده انتشار، پذیرفته شده، انتشار آنلاین از تاریخ 27 بهمن 1397 

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22060/ceej.2019.15365.5896

نویسندگان

نوید مهدوی¹؛ میلاد سلیمی¹؛ منصور قلعه‌نوی² 

¹فارغ التحصیل رشته مهندسی سازه، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه عمران

²عضو هیئت علمی و دبیر گرایش مهندسی و مدیریت ساخت/ دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

به علت مزایای مناسب سازه‌های ستون‌های فولادی پر شده با بتن (CFT)، توجه به آن‌ها به صورت روزافزون در حال افزایش است. با وجود تحقیقات بسیار زیاد انجام شده در رابطه با این مقاطع همچنان در برخی موارد همانند شکل مقاطعی که کمتر متداول هستند و یا استفاده از انواع مختلف بتن، نیاز به پژوهش‌هایی در جهت تکمیل ضوابط و دستورالعمل‌های طراحی ضروری به نظر می‌رسد. پژوهش حاضر با رویکرد آزمایشگاهی به مطالعه رفتار ستون‌های فولادی پر شده با بتن تحت بار خارج از مرکز پرداخته است. در این پژوهش 8 نمونه ستون CFT با مقطع شش‌ضلعی و با طول 150 سانتی‌متر تحت آزمایش قرار گرفته است. بتن مورد استفاده به عنوان هسته‌ی مقطع از نوع بتن ساده و الیافی بوده است. تغییر مکان‌ها در دو راستای محوری و جانبی ثبت شده و نمودار نیرو - تغییر مکان برای تمامی نمونه‌ها رسم شده است. پارامترهایی نظیر ظرفیت باربری، شاخص شکل‌پذیری، جذب انرژی و سختی مؤثر مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته است. بر اساس مقایسه‌ی نتایج مشخص شد در ستون‌هایی که تنها تحت بار محوری خالص می‌باشند، افزایش مقاومت هسته‌ی بتنی به طور قابل توجهی ظرفیت باربری نمونه‌ها را افزایش می‌دهد به طوری که افزایش حدوداً 50% مقاومت هسته‌ی بتنی سبب افزایش حدوداً 20% ظرفیت باربری می‌شود؛ اما با ایجاد لنگر و افزایش آن از تأثیر مقاومت بتن به شدت کاسته می‌شود. بر اساس نتایج نمونه‌های پر شده با بتن الیافی توانایی بیشتری در حفظ سختی مؤثر از خود نشان می‌دهند. همچنین به نظر می‌رسد وجود الیاف در بتن بر شاخص‌های شکل‌پذیری و جذب انرژی تأثیرگذار است

کلیدواژه‌ها

نمودار نیرو- تغییر مکان؛ خروج از مرکزیت بار محوری؛ ظرفیت باربری؛ ضریب شکل‌پذیری؛ میزان جذب انرژی

موضوعات

مصالح مختلف ساختمانی؛ مصالح نوین جهت اصلاح خواص بتن

عنوان مقاله [English]

Experimental Investigation on Hexagonal Steel Tubular Columns Filled with Plain and Fiber Reinforced Concrete under Eccentric Compression Load

نویسندگان [English]

Navid Mahdavi¹؛ milad salimi¹؛ Mansour Ghalehnovi²

¹Civil Structural Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

²Faculty member and Secretary of Construction Management / Ferdowsi University of Mashhad

چکیده [English]

Due to the advantages of Concrete Filled Tube (CFT), attention to them is increasingly on the rise. In spite of the extensive research done in these sections, in some cases, as in the case of less frequent sections or using different types of concrete, the need for research to complete the design rules and guidelines seems necessary. The present study was conducted with an experimental approach to the study of CFT under Eccentric load. In this study, 8 CFT columns with a hexagonal cross section of 150 cm in length were tested. Concrete used as the core of the samples was plain and fiber concrete. The displacements in two directions been recorded and the force - displacement diagram for all samples has been drawn. Parameters such as bearing capacity, ductility index, energy dissipation and effective hardness have been analyzed and compared. Based on the comparison of the results, it was found that in columns that are only under axial load, the increase in concrete core strength significantly increases the bearing capacity of the specimens, so that an increase of about 50% of the concrete core strength causes an increase of about 20% of the loaded capacity of the specimen; However, by increasing the bending moment, the effect of concrete

core resistance is greatly reduced. Also it was found that specimens filled with fiber concrete have greater ability to maintain effective hardness. It also seems that the presence of fibers in concrete affects the ductility and energy dissipation parameters

کلیدواژه‌ها [English]

Force-Displacement Diagram, Eccentric Axial Load, Bearing Capacity, Ductility Ratio, Energy Absorption

آمار

تعداد مشاهده مقاله: 22

بررسی آزمایشگاهی ستون‌های فولادی شش ضلعی پر شده با بتن ساده و الیافی تحت بار

فشاری خارج از مرکز

نوید مهدوی^۱، میلاد سلیمی^۱، منصور قلعه‌نوی^{۲*}

۱- فارغ التحصیل مهندسی عمران-سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران،

Salami.milad@mail.um.ac.ir, Navid.mahdavi@mail.um.ac.ir

۲- دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، Ghalehnovi@um.ac.ir

به علت مزایای مناسب سازه‌ای ستون‌های فولادی پر شده با بتن^۱ (CFT)، توجه به آن‌ها به صورت روزافزون در حال افزایش است. با وجود تحقیقات بسیار زیاد انجام شده در رابطه با این مقاطع همچنان در برخی موارد همانند شکل مقطعی که کمتر متداول هستند و یا استفاده از انواع مختلف بتن، نیاز به پژوهش‌هایی در جهت تکمیل ضوابط و دستورالعمل‌های طراحی ضروری به نظر می‌رسد. پژوهش حاضر با رویکرد آزمایشگاهی به مطالعه رفتار ستون‌های فولادی پر شده با بتن تحت بار خارج از مرکز پرداخته است. در این پژوهش ۸ نمونه ستون CFT با مقطع شش ضلعی و با طول ۱۵۰ سانتی‌متر تحت آزمایش قرار گرفته است. بتن مورد استفاده به عنوان هسته‌ی مقطع از نوع بتن ساده و الیافی بوده است. تغییر مکان‌ها در دو راستای محوری و جانبی ثبت شده و نمودار نیرو - تغییر مکان برای تمامی نمونه‌ها رسم شده است. پارامترهایی نظیر ظرفیت باربری، شاخص شکل‌پذیری، جذب انرژی و سختی مؤثر مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته است. بر اساس مقایسه‌ی نتایج مشخص شد در ستون‌هایی که تنها تحت بار محوری خالص می‌باشند، افزایش مقاومت هسته‌ی بتنی به طور قابل توجهی ظرفیت باربری نمونه‌ها را افزایش می‌دهد به طوری که افزایش حدوداً ۵۰٪ مقاومت هسته‌ی بتنی سبب افزایش حدوداً ۲۰٪ ظرفیت باربری می‌شود؛ اما با ایجاد لنگر و افزایش آن از تأثیر مقاومت بتن به شدت کاسته می‌شود. بر اساس نتایج نمونه‌های پر شده با بتن الیافی توانایی بیشتری در حفظ سختی مؤثر از خود نشان می‌دهند. همچنین به نظر می‌رسد وجود الیاف در بتن بر شاخص‌های شکل‌پذیری و جذب انرژی تأثیرگذار است.

واژگان کلیدی: نمودار نیرو- تغییر مکان، خروج از مرکزیت بار محوری، ظرفیت باربری، ضریب شکل‌پذیری، میزان جذب انرژی

^۱ Concrete Filled Tube

*عهده‌دار مکاتبات ، Ghalehnovi@um.ac.ir

ستون‌های مختلط ترکیبی است از بتن و فولاد که به صورت کلی می‌توان گفت دارای برخی مزایای فولاد و بتن می‌باشند. ستون‌های مختلط دارای دو نوع کلی هستند که در زیر به توضیح اجمالی آن‌ها پرداخته می‌شود:

الف- مقاطع فولادی محاط در بتن که به آن‌ها بتن مسلح با پروفیل فولادی (Steel Reinforced Concrete) یا به اختصار SRC گفته می‌شوند.

ب- مقاطع توخالی پر شده با بتن (Concrete Filled Tube) که به اختصار CFT نامیده می‌شوند. با توجه به اینکه در این پژوهش مقاطع توخالی پر شده با بتن مورد بررسی قرار می‌گیرد در ادامه به توضیح بیشتر این نوع مقاطع پرداخته می‌شود.

ستون‌های CFT نزد مهندسان سازه به صورت ستون‌هایی با ظرفیت باربری بالا و دارای مقاطع نسبتاً کوچک شناخته می‌شوند. این امر به علت محصورشدگی بتن توسط جدار فولادی می‌باشد. البته باید توجه داشت که پدیده‌ی محصورشدگی در ستون‌های CFT به بهبود رفتار فیزیکی بتن محدود نشده و می‌تواند بر اندرکنش فولاد و بتن نیز تأثیرگذار باشد [۱].

بر اساس مطالعات انجام شده می‌توان بیان کرد ظرفیت باربری نمونه‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تحت تأثیر ضخامت جدار فولادی و شکل هندسی مقطع می‌باشد. پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد در مقاطع دایره‌ای اثر محصورشدگی چشمگیر بوده و به‌طور مؤثری بر ظرفیت باربری تأثیرگذار است اما در مقطع مربعی میزان افزایش ظرفیت باربری در اثر تنش سه محوری به‌مراتب کمتر از مقطع دایره‌ای می‌باشد [۲].

بتن مصالحی ترد می‌باشد و در کشش ضعیف عمل می‌کند. در سال‌های اخیر برای بهبود این ضعف، استفاده از الیاف فولادی به‌عنوان یک راهکار سودمند پیشنهاد شده است؛ الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت ترک‌خوردگی و طاقت^۱ می‌گردد [۳]. به علت مقاومت بالای فولاد در اکثر موارد مقاطع فولادی دارای ضخامت‌های بسیار کمی هستند که این امر سبب کنترل‌کننده شدن کمانش موضعی می‌گردد. یکی از مهم‌ترین تأثیرات حضور هسته‌ی فولادی به تأخیر افتادن کمانش موضعی در جدار فولادی می‌باشد [۴].

مقاطع CFT به‌صورت عمده در ساختمان‌های بلندمرتبه کاربرد دارد و مزایای آن‌ها در این‌گونه سازه‌ها بیشتر نمود پیدا می‌کند [۴]. با توجه به تراکم جمعیت رو به افزایش شهرهای کشور نیاز به بلندمرتبه‌سازی امری اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. باین‌حال به نظر می‌رسد تا امروز مقاطع CFT در داخل کشور و نزد مهندسان داخلی چندان مورد توجه نبوده که علت آن را می‌توان عدم وجود فناوری ساخت این مقاطع به‌صورت صنعتی و گسترده و همچنین عدم وجود ضوابط کامل و روشن برای طراحی این مقاطع در آیین‌نامه‌های طراحی دانست.

از لحاظ پژوهشی تحقیقات بسیاری در مورد ستون‌های CFT در زمینه‌های متفاوت صورت گرفته است. حالت‌های بارگذاری متنوع بر روی شکل مقاطع مختلف مورد آزمایش و بررسی‌های عددی قرار گرفته و نتایج ارزشمندی از این تحقیقات حاصل شده است. مقاطع مستطیلی، مربعی و دایره‌ای از مقاطع بسیار متداول می‌باشند و رفتار مکانیکی آن‌ها به میزان مناسبی مشخص شده به‌طوری‌که ضوابط و دستورالعمل‌های طراحی آن‌ها در آیین‌نامه‌های معتبر دنیا و همچنین مبحث دهم مقررات ملی آورده شده است؛ اما تحقیقات صورت گرفته بر روی مقاطع با شکل‌های هندسی دیگر مانند چند وجهی‌های منظم چندان کافی نبوده و برای ارائه‌ی ضوابط و دستورالعمل‌های طراحی این نوع مقاطع نیاز به تحقیقات و بررسی‌های بیشتری است. ستون‌هایی با مقاطع چندوجهی ممکن است به علت‌های گوناگون از جمله ضرورت‌های معماری و سازه‌ای مورداستفاده قرار گیرند. برای ارائه‌ی روابط کلی که بتواند رفتار کلیه‌ی مقاطع CFT را با هر شکل مقطعی به دست دهد نیاز است تا رفتار مقاطع مختلف مورد بررسی قرار گیرد. همچنین به نظر می‌رسد در آینده، استفاده از این مقاطع به علت مزایای سازه‌ای مطلوب آن‌ها، نزد مهندسان طراح مورد توجه قرار گیرد که این امر مستلزم تکمیل ضوابط آیین‌نامه‌ای و انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه و با تمرکز بر امر تحلیل و طراحی این مقاطع می‌باشد.

¹ Toughness

در سال ۲۰۱۰ تک گز و داند پژوهشی آزمایشگاهی و عددی را بر روی مقاطع مربعی CFT با بتن الیافی تحت بار خارج از محور انجام دادند [۵]. چنگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ به تحلیلی عددی ستون‌های فولادی پر شده با بتن الیافی تحت اثر بار سیکلی پرداختند و بیان داشتند افزودن الیاف فولادی سبب افزایش حداکثر بار جانبی قابل تحمل، سختی و شکل‌پذیری بیشتر می‌شود [۶]. در سال ۲۰۱۳ در پژوهشی قابل‌تقدیر مین یو و همکاران رابطه‌ی واحدی را برای به دست آوردن ظرفیت باربری مقاطع CFT دایره‌ای و چندضلعی (به‌صورت تو پر و تو خالی) تحت بار محوری فشاری ارائه کردند [۷]. 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 [۸]. در سال ۲۰۱۵ تک گز همانند پژوهش قبلی خود در سال ۲۰۱۰ به بررسی ستون‌های CFT پر شده با بتن الیافی تحت بار خروج از محور پرداخت. تفاوت این پژوهش با پژوهش سابق، استفاده از فولادهای ضدزنگ برای جدار مقطع بوده است [۹]. 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 باریک‌شدگی نمودارهای چرخه‌ای پرداختند [۱۰]. لانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ با رویکرد تئوری و بر اساس روش انرژی کم‌انرژی کم‌انرژی موضعی ورق فولادی را تحت بارگذاری خارج از مرکز مورد بررسی قرار داده و کم‌انرژی موضعی الاستیک را رابطه‌ی سازی کردند. رابطه‌ی ارائه‌شده توسط این محققین با نتایج آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی قرار گرفته و درستی آن تأیید شده است [۱۱]. 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 [۱۲، ۱۳]. الجلکانی 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 آوردند [۱۴]. همچنین لیو و همکاران در سال ۲۰۱۶ با روش آنالیز مستقیم به تحلیل ستون‌های CFT پرداختند. در این پژوهش برای ستون‌ها، بتن پر مقاومت و شکل مقطع دایره‌ای و هشت‌ضلعی در نظر گرفته شده است. برای نشان دادن اثر محصورشدگی بر مقاومت و شکل‌پذیری، نمودار تنش-کرنش در حالت محصور شده و محصور نشده ارائه شده است [۱۵]. در سال ۲۰۱۷ مهگوب و همکاران پژوهشی آزمایشگاهی را بر روی ۱۰ نمونه ستون CFT که دارای مقاطع بیضی‌شکل و با ارتفاع و مقاومت بتن‌های مختلف بودند، انجام دادند. در این آزمایش‌ها از بتن خود متراکم استفاده شده و تأثیر ضریب لاغری بزرگ را بر رفتار کم‌انرژی مورد ارزیابی قرار دادند [۱۶]. در سال ۲۰۱۸ دینگ و همکاران تأثیر استفاده از CFRP‌ها را در ستون‌های CFT مورد بررسی 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 [۱۷].

۲- صورت مسئله و شرح آزمایش

در این پژوهش پارامترهای متغیر شامل خروج از مرکزیت بار و نوع هسته‌ی بتنی می‌باشد. برای هسته‌ی بتنی از بتن ساده و بتن الیافی استفاده شده است که در ادامه به‌صورت مبسوط به خصوصیات بتن مورد استفاده و همچنین جزئیات بارگذاری پرداخته می‌شود.

۲-۱ مشخصات نمونه‌ها

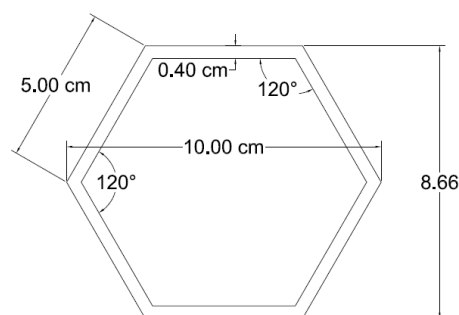
در این پژوهش در مجموع ۸ نمونه ستون CFT با مقطع شش‌ضلعی مورد آزمایش قرار گرفته است. نیمی از نمونه‌ها با بتن ساده و نیمی دیگر با بتن الیافی پر شده‌اند.

شکل مقاطع به‌صورت شش‌ضلعی منتظم با طول ضلع ۵ سانتی‌متر بوده و ضخامت جدار فولادی برابر با ۴ میلی‌متر انتخاب شده است. در انتخاب ضخامت جدار فولادی دو چالش اصلی وجود داشت. اولین چالش مربوط به ظرفیت کم جک‌های فشاری آزمایشگاه بوده که نهایتاً قادر به ایجاد نیروی فشاری به میزان ۸۰ تن می‌باشند. از سویی همان‌طور که بیان شد ظرفیت باربری ستون‌های CFT به علت محصورشدگی بتن و همچنین به تأخیر افتادن کم‌انرژی در جدار فولادی نسبت به مقاطع ساخته‌شده از هر یک از این مواد به‌صورت جدا از هم بسیار بیشتر بوده و لذا دقت در انتخاب ضخامت جدار فولادی جهت دستیابی به نقطه‌ی گسیختگی امری ضروری

به نظر می‌رسید. چالش دوم مربوط به شکل مقطع و امکان ساخت مقطع بوده است. با توجه به شکل مقطع، ساخت آن به صورت یکپارچه امکان‌پذیر نبوده و استفاده از جوش امری اجتناب‌ناپذیر بوده است. از طرفی استفاده از جوش سبب ایجاد تنش‌های حرارتی و در نتیجه ایجاد اعوجاج در ورق می‌شود که این امر می‌تواند درستی نتایج را تحت شعاع قرار دهد؛ بنابراین استفاده از ورق‌هایی با ضخامت بسیار کم برای ساخت مقاطع، ایجاد خطا در شکل مقطع و نتایج آزمایش را به همراه داشته و امکان استفاده از آن‌ها نبوده است. لذا با انجام فرآیند سعی و خطا در ساخت و همچنین محاسبه‌ی ظرفیت باربری ستون‌ها به روش‌های مختلف، ضخامت ۴ میلی‌متر برای ساخت نمونه‌ها مناسب تشخیص داده شد. طول نمونه‌ها برابر با ۱۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. در شکل ۱ جزئیات مقطع ساخته‌شده نشان داده شده است. برای تمایز نتایج، نمونه‌های ساده با علامت اختصاری PC و نمونه‌های PSR نام‌گذاری شده‌اند. همچنین میزان خروج از مرکزیت بار نیز با علامت اختصاری (عدد موردنظر - e) نشان داده شده است. به‌طور مثال PC-e10 مشخص‌کننده‌ی نمونه‌ی پر شده با بتن ساده و تحت بار با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. در جدول ۱ مشخصات تمامی نمونه‌ها آورده شده است. در این جدول ۱، L طول ستون، B طول هر وجه جدار هشت‌ضلعی، t ضخامت جدار فولادی و e میزان خروج از مرکزیت برحسب سانتی‌متر می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایش

Sample	LxBxt (cm)	e (cm)
PC-0	150×5×0.4	0
PC-5	150×5×0.4	5
PC-10	150×5×0.4	10
PC-15	150×5×0.4	15
PSR-0	150×5×0.4	0
PSR-5	150×5×0.4	5
PSR-10	150×5×0.4	10
PSR-15	150×5×0.4	15

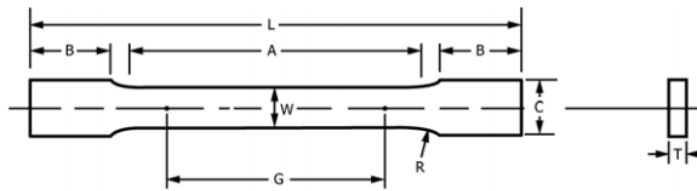


شکل ۱: جزئیات مقطع ساخت شده

شرایط تکیه‌گاهی نمونه‌ها به صورت یکسر گیردار و یکسر آزاد می‌باشد. انتهای نمونه‌ها با استفاده از ورق‌های سخت‌کننده مقید شده و ممان گیر بوده است. در حقیقت سعی شده با جلوگیری کردن از چرخش پای ستون و اتصال آن به زمین، شرایط تکیه‌گاهی انتهای ستون تا حد زیادی به تکیه‌گاه گیردار تئوری نزدیک شود.

۲-۲ مشخصات فولاد مصرفی

هدف از انجام این پژوهش مشخص کردن رفتار فولاد و بتن به صورت ترکیبی می‌باشد و بنابراین به صورت اختصاصی نیازی به مشخص نمودن رفتار مکانیکی فولاد نیست و تنها مقدار مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی می‌تواند کافی باشد؛ اما برای کامل بودن اطلاعات مصالح مورد استفاده و همچنین در جهت به دست آوردن مقاومت‌های تسلیم و نهایی، دو نمونه‌ی فولادی استاندارد به شکل دمبلی (استخوانی) بر اساس دستورالعمل ASTM E8 تهیه شده و در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه فردوسی مشهد تحت آزمایش کشش تک محوره قرار گرفت است [۱۸]. مشخصات هندسی نمونه‌های فولادی مورد آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است. نمودار تنش - کرنش نمونه‌های حاصل از آزمون کشش نیز در شکل ۳ آورده شده است. همچنین در شکل ۴ نمونه‌ی فولادی ساخته‌شده تحت آزمایش کشش مشاهده می‌گردد.



	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide	6 mm [0.250 in.] Wide
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gauge length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003]
W—Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25 [1]	12.5 [0.500]	6 [0.250]
L—Overall length, min (Note 2, Note 7, and Note 8)	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A—Length of reduced parallel section, min	225 [9]	57 [2.25]	32 [1.25]
B—Length of grip section, min (Note 9)	75 [3]	50 [2]	30 [1.25]
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50 [2]	20 [0.750]	10 [0.375]

شکل ۲: مشخصات نمونه‌ی استاندارد فولادی ساخته شده جهت آزمایش کشش [۱۸]

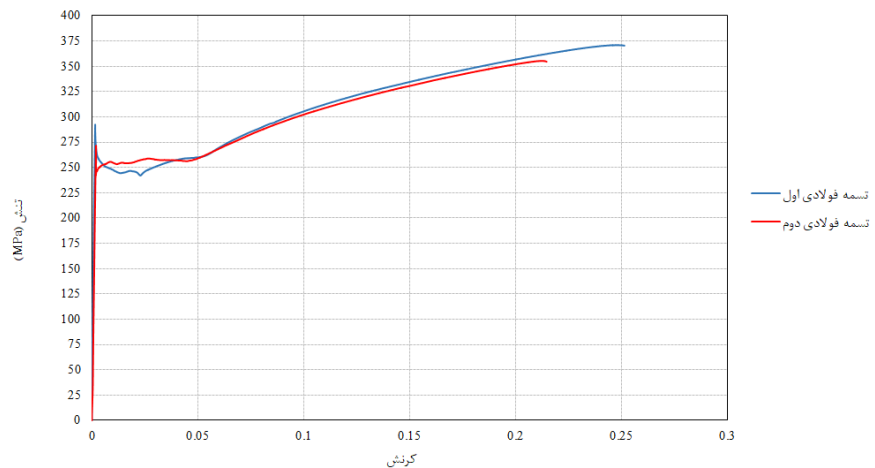
جدول ۲: خصوصیات مکانیکی فولاد مصرف شده جهت ساخت جدار نمونه‌ها

نمونه‌ها	تنش تسلیم (MPa)	کرنش تسلیم	تنش نهایی (MPa)	کرنش نهایی
تسمه‌ی فولادی اول	≈۲۴۰	۰/۰۱۹	۳۷۱	۰/۲۵
تسمه‌ی فولادی دوم	≈۲۵۰	۰/۰۱۹۵	۳۵۴	۰/۲۱۵
میانگین	۲۴۵	۰/۰۱۹۲۵	۳۶۲/۵	۰/۲۳۲۵

در جدول ۲ خصوصیات مکانیکی فولادها به صورت کمی آورده شده است. با توجه به جدول ۲ برای محاسبات و مقایسه‌های صورت گرفته که در ادامه آورده شده، تنش تسلیم فولاد برابر با ۲۴۵ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است.



شکل ۴: نمونه‌ی فولادی استخوانی شکل استاندارد تحت آزمایش کشش تک‌محوره



شکل ۳: نمودار تنش - کرنش تسمه‌های فولادی

۳-۲ مشخصات بتن مورد استفاده

همان طور که در قسمت معرفی نمونه‌ها بیان شد در این پژوهش از دو نوع بتن ساده و الیافی استفاده شده است. در این قسمت ابتدا به بتن ساده پرداخته شده و سپس بتن الیافی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۳-۱ طرح اختلاط بتن ساده

با توجه به اینکه برای ساخت بتن ساده با مقاومت بالا به میزان سیمان زیادی احتیاج است که سبب غیراقتصادی شدن طرح می‌شود و همچنین اساس فلسفه استفاده از ستون‌های CFT که بهره‌جویی از پدیده‌ی محصورشدگی بتن و ظرفیت اضافی ایجاد شده در اثر آن است، لذا برای بتن ساده در این پژوهش، مقاومتی منطقی و قابل دسترس ۲۰ تا ۲۵ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است. گزارش طرح اختلاط معمولاً به صورت وزن مصالح برای ۱ مترمکعب حجم بتن ارائه می‌شود. در جدول ۳ طرح اختلاط استفاده شده برای ساخت بتن معمولی بر اساس مقاومت ۲۸ روزه ۲۰ تا ۲۵ مگا پاسکال آورده شده است. لازم به ذکر است برای نمونه به طور تقریبی به ۱۵ لیتر بتن احتیاج بوده است. همچنین ظرفیت ترکیب‌کننده‌ی مورد استفاده حدوداً برابر با ۳۰ لیتر بوده و لذا در جدول مقدار مورد نیاز برای ساخت ۳۰ لیتر بتن نیز گزارش شده است.

جدول ۳: طرح اختلاط بتن ساده‌ی مورد استفاده

$V(m^3)$	$\frac{W}{C}$	$W(kg)$	$C(kg)$	$G(kg)$	$S(kg)$
۱	۰/۵۳	۲۴۸/۵	۴۷۰	۱۰۷۰	۷۲۰
۰/۰۳	۰/۵۳	۷,۴۶	۱۴/۱	۳۲/۱	۲۱/۶

در جدول ۳:

V (Volume): حجم برحسب مترمکعب

W (Water): آب برحسب کیلوگرم

C (Cement): سیمان برحسب کیلوگرم

G (Gravel): شن (سنگ‌دانه‌ی درشت) برحسب کیلوگرم

S (Sand): ماسه (سنگ‌دانه‌ی ریز) برحسب کیلوگرم

W/C: نسبت آب به سیمان که بدون بعد می‌باشد

لازم به ذکر است مصالح سنگی درشت‌دانه از نوع بادامی موجود در آزمایشگاه با قطر بزرگ‌ترین دانه برابر با ۲,۵ سانتی‌متر، مصالح سنگی ریزدانه از نوع ماسه‌ی ساختمانی موجود در بازار، سیمان پرتلند تیپ ۲ کیسه‌ای با برند تجاری سیمان مشهد و آب‌لوله‌کشی شهری، برای ساخت بتن ساده در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۳-۲ طرح اختلاط بتن الیافی

همان طور که بیان شد در این پژوهش نیمی از نمونه‌ها دارای هسته با بتن الیافی می‌باشند. الیاف موجود در این نوع بتن، کارایی بتن را به شدت کاهش می‌دهد لذا به طور معمول برای بتن الیافی از بتن خود تراکم استفاده می‌شود. ساخت بتن خود تراکم دارای جزییات و پیچیدگی بیشتری نسبت به بتن ساده می‌باشد و بنابراین برای حصول نتیجه مورد انتظار نیاز به عملیات سعی و خطای بسیار بیشتری می‌باشد. همچنین نکته‌ی قابل ذکر دیگر این است که به طور معمول از بتن‌های الیافی انتظار مقاومت بیشتری نسبت به بتن‌های ساده وجود دارد و ساخت بتن الیافی با مقاومت‌های پایین نظیر ۲۰ تا ۳۰ مگا پاسکال رایج نیست. البته در این پژوهش با توجه به محدودیت جک‌های فشاری آزمایشگاه، مقاومتی بین ۳۵ تا ۴۰ مگا پاسکال برای بتن الیافی در نظر گرفته شده است. در ادامه به طرح اختلاط مورد نظر و همچنین معرفی اجزای سازنده‌ی بتن الیافی پرداخته شده است.

جدول ۴: طرح اختلاط بتن الیافی مورد استفاده

$V(m^3)$	W/C	W(kg)	C(kg)	G(kg)	S(kg)	SP(g)	L (kg)	VMA (g)	F (kg)
۱	۰/۴۶	۱۸۳/۵	۴۰۰	۵۲۵	۹۷۵	۷۰۰۰	۱۰۰	۳۰۰۰	۵۵
۰/۰۳	۰/۴۶	۵/۵	۱۲	۱۵/۷۵	۲۹/۲۵	۲۴۰	۳	۹۰	۱/۶۵

در جدول ۴:

- W (Water): آب برحسب کیلوگرم
- C (Cement): سیمان برحسب کیلوگرم
- G (Gravel): شن (سنگدانه‌ی درشت) برحسب کیلوگرم
- S (Sand): ماسه (سنگدانه‌ی ریز) برحسب کیلوگرم
- W/C: نسبت آب به سیمان که بدون بعد می‌باشد
- SP (Super Plasticizer): فوق روان کننده برحسب گرم
- L (Lime): پودر سنگ برحسب کیلوگرم
- VMA (Viscosity Modifying Admixtures): لزجت دهنده برحسب گرم
- F (Fiber): الیاف برحسب کیلوگرم

شایان ذکر است مصالح سنگی درشت‌دانه از نوع نخودی با قطر بزرگ‌ترین دانه برابر با ۱,۵ سانتی‌متر، مصالح سنگی ریزدانه از نوع ماسه‌ی ساختمانی موجود در بازار، سیمان پرتلند تیپ ۲ کیسه‌ای با برند تجاری سیمان مشهد و آب‌لوله‌کشی شهری برای ساخت بتن ساده در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین فوق روان کننده بانام تجاری P10-3R محصول شرکت شیمی ساختمانی و پودر لزجت دهنده‌ی شرکت ژیکاوا مورد استفاده قرار گرفته است.

الیاف مورد استفاده از نوع الیاف فولادی دو سر قلاب بانام تجاری KX-CSF و دارای مشخصات فیزیکی و مکانیکی زیر بوده است: جنس الیاف‌ها از نوع فولاد کم‌کربن (شکل‌پذیر)، مقطع آن‌ها به صورت دایره‌ای شکل با قطر ۰,۷ تا ۰,۸ میلی‌متر و طول ۶ سانتی‌متر، دارای مقاومت کششی بین ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ مگا پاسکال و ضریب لاغری الیاف‌ها نیز برابر با ۸۵ بوده است. الیاف‌ها به صورت اتفاقی در حین ترکیب شدن بتن در ترکیب کننده به سایر مصالح اضافه شده است. همچنین مقدار استفاده از آن به میزان حدوداً ۱۳ تا ۱۵ درصد وزنی سیمان انتخاب شده است.

۳-۳-۲ مقاومت فشاری

برای پر کردن هر دو نمونه‌ی جدار فولادی با مقطع نشان داده شده، یک بار اختلاط بتن به حجم ۳۰ لیتر لازم بوده و از هر بتن ساخته شده دو قالب استوانه‌ای استاندارد آزمایش مقاومت فشاری پر شده است لذا در مجموع ۱۶ نمونه‌ی استوانه‌ای مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته که نتایج حاصل از آن در جدول ۵ و جدول ۶ آورده شده است. لازم به ذکر است بتن ساده با حروف اختصاری^۱ PC و بتن الیافی با حروف اختصاری^۲ FRC نشان داده شده است.

^۱ Plain concrete

^۲ Fiber reinforcement concrete

جدول ۵: مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ساده به دست آمده برای تمامی اختلاط‌های انجام شده

نمونه‌ها	PC1	PC2	PC3	PC4
نمونه‌ی ۱ (مگا پاسکال)	۲۴	۲۲/۳	۲۰/۷	۲۴/۵
نمونه‌ی ۲ (مگا پاسکال)	۲۲/۴	۲۱/۸	۲۰/۱	۲۳/۵
میانگین	۲۳/۲	۲۲/۰۵	۲۰/۴	۲۴

بر اساس نتایج مندرج در جدول ۵، میانگین کلی نتایج برای بتن‌های ساده برابر ۲۲,۴ مگا پاسکال می‌باشد. همچنین انحراف معیار آزمایش‌ها برابر با ۱,۳۵ به دست می‌آید.

در جدول ۶ نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای بتن خود متراکم الیافی آورده شده است. بر اساس نتایج میانگین کل داده‌ها برابر با ۳۴,۱ مگا پاسکال و همچنین انحراف از معیار برابر با ۱,۵۴ حاصل می‌گردد. لازم به ذکر است انحراف از معیار شاخصی از پراکندگی نتایج می‌باشد و معمولاً در صورتی که انحراف معیار برای داده‌های آماری از عدد ۲ کمتر حاصل گردد نتایج قابل قبول فرض می‌شود. همان‌طور که مشخص است برای هر دو طرح اختلاط ساده و الیافی میزان انحراف معیار از ۲ کمتر بوده و نتایج قابل قبول می‌باشند. همچنین لازم به توضیح است در ادامه برای محاسبات و مقایسه‌های صورت گرفته از مقاومت میانگین استفاده شده است.

جدول ۶: مقاومت فشاری نمونه‌های بتن الیافی به دست آمده برای تمامی اختلاط‌های انجام شده

نمونه‌ها	FRC1	FRC2	FRC3	FRC4
نمونه‌ی ۱ (مگا پاسکال)	۳۶/۳۵	۳۳/۶۵	۳۲/۷۵	۳۵/۴۵
نمونه‌ی ۲ (مگا پاسکال)	۳۵/۸۵	۳۲/۴۵	۳۱/۶۵	۳۴/۵۵
میانگین	۳۶/۱	۳۳/۰۵	۳۲/۲	۳۵

۲-۴ بارگذاری نمونه‌ها و نحوه‌ی قرارگیری تغییر مکان سنج‌ها (سیستم بارگذاری نمونه‌ها)

بارگذاری در نظر گرفته شده برای آزمایش نمونه‌ها به صورت بار فشاری با خروج از مرکزیت اولیه مشخص می‌باشد. در حقیقت با ایجاد خروج از مرکزیت بار به نمونه‌ها علاوه بر نیروی فشاری، لنگر خمشی نیز به مقطع اعمال می‌گردد. برای نمونه‌ها خروج از مرکزیت‌هایی مطابق آنچه در **Error! Reference source not found.** آورده شده در نظر گرفته شده و اعمال گردید.

جدول ۷: مقدار خروج از مرکزیت‌های در نظر گرفته شده برای بار

پارامترها	بتن ساده				بتن الیافی			
	۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴
شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴
خروج از مرکزیت (میلی‌متر)	۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰

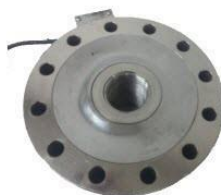
برای بارگذاری از جک فشاری با ظرفیت اسمی ۱۰۰ تنی آزمایشگاه که نیروی پیشران آن با استفاده از فشار روغن تأمین می‌شود استفاده شده است. برای ثبت بار اعمالی از لودسل ۵۰ تنی استفاده شده است. برای ثبت تغییر مکان محوری از حسگر آلتراسونیک و برای ثبت تغییر مکان جانبی از تغییر مکان سنج^۱ الکتریکی - مکانیکی استفاده شده است. برای ثبت لحظه به لحظه‌ی تغییر مکان‌ها و بار

¹ Linear variable differential transformer (LVDT)

وارده توسط جک از داده نگار^۱ استفاده شده است. در شکل‌های ۵ تا ۹ دستگاه‌های مورد استفاده در انجام آزمایش به صورت مجزا نشان داده است.



شکل ۷ : داده نگار



شکل ۶ : لودسل ۵۰ تنی



شکل ۵ : حسگر آلتراسونیک

یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر دقت آزمایش‌ها نحوه چیدمان تغییر مکان‌سنج‌ها و اعمال بار می‌باشد. به مجموعه‌ی چیدمان تغییر مکان‌سنج‌ها و نحوه اعمال و ثبت بارگذاری سیستم بارگذاری گفته می‌شود. با توجه به خروج از مرکزیت بار ایجاد تغییر مکان‌های جانبی اجتناب‌ناپذیر بوده و لذا یکی از تغییر مکان‌سنج‌ها برای ثبت تغییر مکان‌های جانبی جانمایی گردید.



شکل ۹ : تغییر مکان‌سنج الکترونیکی - مکانیکی



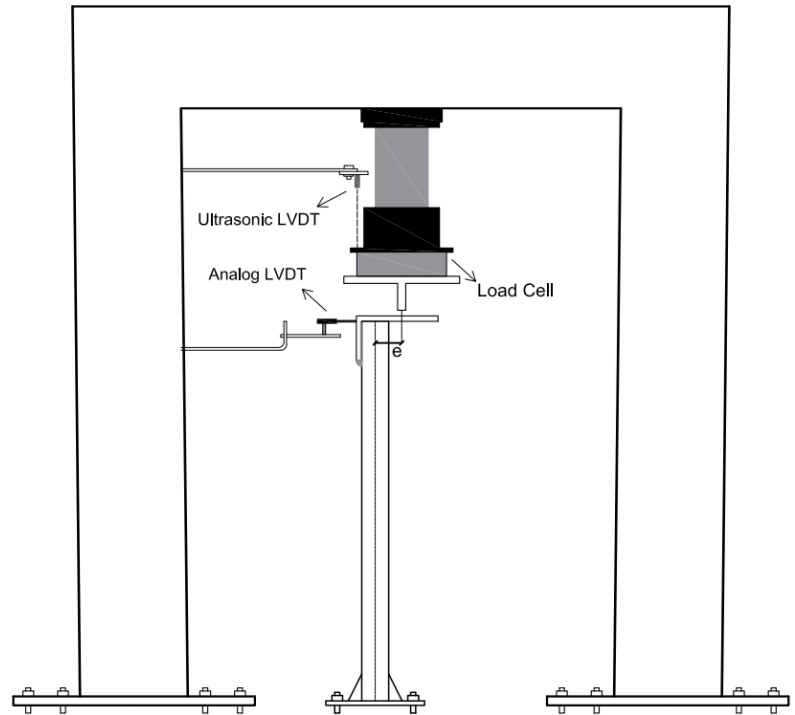
شکل ۸ : جک با ظرفیت اسمی ۱۰۰ تن

محل قرارگیری اجزای سیستم بارگذاری نمونه‌ها که در بالا به آن اشاره شد در شکل ۱۰ که به کمک نرم‌افزار اتوکد کشیده شده به صورت کامل نشان داده شده است. همچنین تصویری واقعی از سیستم بارگذاری و نمونه‌ی قرار گرفته زیر بار در شکل ۱۱ آورده شده است.

^۱ Data logger



شکل ۱۱: نمونه در حال آماده‌سازی جهت بارگذاری



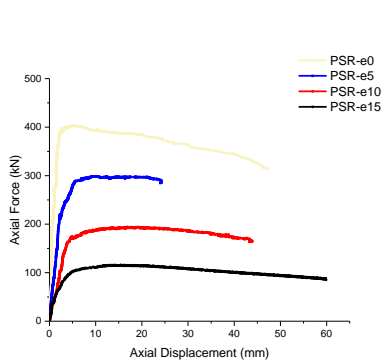
شکل ۱۰: تصویر شماتیک سیستم بارگذاری

۳- نتایج آزمایش و تحلیل آن‌ها

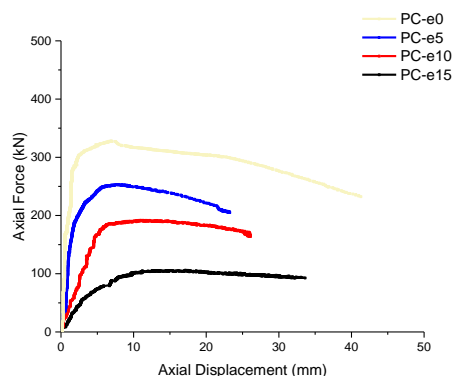
با انجام آزمایش شرح داده‌شده، نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل می‌گردد. همان‌طور که در قسمت‌های قبلی نیز ذکر گردید جابه‌جایی برای نمونه‌ها در دو جهت مورد توجه قرار گرفته است. در حالت ایده آل ستون‌ها تحت بار محوری خالص تا رسیدن به بار بحرانی تغییر شکل جانبی ندارند. از سویی در واقعیت دستیابی به شرایط ایده آل (ستون کاملاً مستقیم و اعمال بار در مرکز سطح) امکان‌پذیر نیست و لذا در بار فشاری خالص تا قبل از رسیدن به بار بحرانی تغییر مکان‌های جانبی کوچکی مشهود است. با رسیدن بار به مقدار بار بحرانی کمانش در ستون اتفاق افتاده و ستون متحمل تغییر شکل‌های بزرگ می‌شود. در سایر موارد بارگذاری با توجه به حضور لنگر خمشی، تغییر شکل جانبی و محوری به صورت هم‌زمان اتفاق می‌افتد. در ادامه نمودار نیرو - تغییر مکان برای تغییر شکل محوری و جانبی برای تمامی نمونه‌ها آورده شده است. لازم به توضیح است نمونه‌ها تا مقاومت نهایی و در نهایت گسیختگی مورد بارگذاری قرار گرفته‌اند و نمودارهای حاصل شده بر اساس مقاومت نهایی و حداکثر میزان تغییر شکل قابل تحمل می‌باشند. در حقیقت بعد از آخرین نقطه در نمودارهایی که در ادامه آورده شده است نمودار نیرو - تغییر مکان به یک‌باره روند نزولی بسیار شدیدی را طی می‌کند که مشخص‌کننده‌ی پایان ظرفیت مقطع می‌باشد؛ لذا نمودارها دقیقاً تا رسیدن به نقطه‌ی قبل از پایان ظرفیت مقطع، قطع شده‌اند.

۳-۱ نمودارهای نیرو-تغییر مکان برای تمامی نمونه‌ها

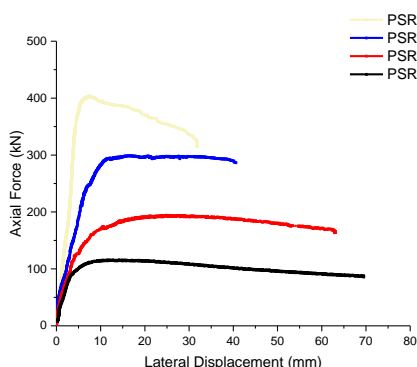
در این قسمت تمامی نمودارهای حاصل از آزمایش به تفکیک نوع هسته‌ی بتنی آورده شده است تا روند کلی نتایج مشخص گردد. در ادامه به بررسی جداگانه‌ی نمونه‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف پرداخته شده است.



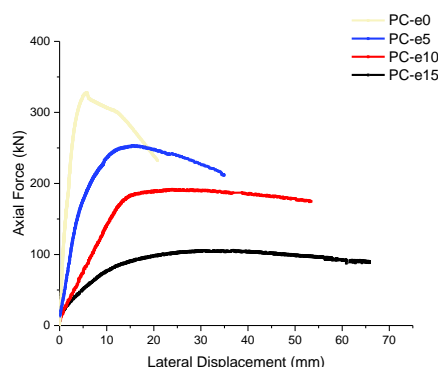
شکل ۱۳: نمودار نیرو-تغییر محوری برای نمونه‌های پر شده با بتن الیافی



شکل ۱۲: نمودار نیرو-تغییر محوری برای نمونه‌های پر شده با بتن ساده



شکل ۱۵: نمودار نیرو-تغییر جانبی برای نمونه‌های پر شده با بتن الیافی



شکل ۱۴: نمودار نیرو-تغییر جانبی برای نمونه‌های پر شده با بتن ساده

با توجه به نمودارهای فوق مشخص است با افزایش خروج از مرکزیت به مقدار بسیار زیادی از ظرفیت باربری نمونه‌ها کاسته می‌شود. در حقیقت قسمتی از ظرفیت مقطع صرف تحمل لنگر خمشی شده و از سویی دیگر با قرارگیری بتن در کشش، اثر محصورشدگی از بین می‌رود که این موضوع در قسمت‌های بعد بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از نتایج به دست آمده به سادگی می‌توان ظرفیت باربری نمونه‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد که این مقایسه در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸: مقایسه‌ی ظرفیت باربری نمونه‌ها تحت بارگذاری‌های متفاوت

پارامترها	PC-e0	PC-e5	PC-e10	PC-e15	PSR-e0	PSR-e5	PSR-e10	PSR-e15
بیشترین نیروی قابل تحمل (کیلو نیوتن)	۳۲۷/۷	۲۵۳	۱۹۱/۶	۱۰۵/۸	۴۰۳/۷	۲۹۸/۵	۲۱۶/۵	۱۱۵/۷
درصد کاهش مقاومت نسبت به بار فشاری خالص (%)	-	۲۲/۷۲	۴۱/۴۸	۶۷/۶۹	-	۳۳/۴۴	۵۶/۷۲	۷۴/۲۰

همچنین می‌توان ظرفیت باربری را برای نمونه‌های دارای هسته‌ی بتنی ساده و هسته‌ی بتنی الیافی تحت یک بارگذاری مشخص مورد مقایسه قرار داد. شایان ذکر است با توجه به عدم یکسان بودن مقاومت‌های فشاری دو نوع بتن لازم است مقدار مقایسه با توجه به افزایش مقاومت فشاری بتن صورت گیرد. نتایج این مقایسه در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹: مقایسه‌ی ظرفیت باربری نمونه‌ها با جنس هسته‌های بتنی متفاوت تحت بارگذاری یکسان

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 (%)	میزان لنگر نهایی قابل تحمل (نیوتن - متر)
PC-e0	۲۲/۴	-	-	۳۲۷/۷	-	-	-
PSR-e0	۳۴/۱	۵۲/۰۹	-	۴۰۳/۷	۲۳/۰۴	-	-
PC-e5	۲۲/۴	-	-	۲۵۳	-	۲۲/۷۹	۱۲۶۵۰۰
PSR-e5	۳۴/۱	۵۲/۰۹	-	۲۹۸/۵	۱۷/۹۸	۲۵/۹۷	۱۴۹۲۵۰
PC-e10	۲۲/۴	-	۱۰۰	۱۹۱/۶	-	۴۱/۵۳	۱۹۱۶۰۰
PSR-e10	۳۴/۱	۵۲/۰۹	۱۰۰	۲۱۶/۵	۱۲/۹۹	۴۶/۳	۲۱۶۵۰۰
PC-e15	۲۲/۴	-	۲۰۰	۱۰۵/۸	-	۶۷/۷۱	۱۵۸۷۰۰
PSR-e15	۳۴/۱	۵۲/۰۹	۲۰۰	۱۱۵/۷	۹/۳۶	۷۱/۳	۱۷۳۵۵۰

در ادامه‌ی این بحث، ظرفیت باربری حاصل از کار پژوهش‌های گذشته در جدول ۱۰ آورده شده است. در این جدول سعی شده تا حد امکان نمونه‌های انتخاب‌شده دارای مشخصات هندسی و مکانیکی نزدیک به نمونه‌های این پژوهش باشند. همچنین لازم به ذکر است که شرایط تکیه‌گاهی برای تمامی نمونه‌های آورده شده در جدول ۱۰ به‌غیر از نمونه‌های مربوط به این پژوهش، دارای شرایط تکیه‌گاهی دوسر مفصل می‌باشند.

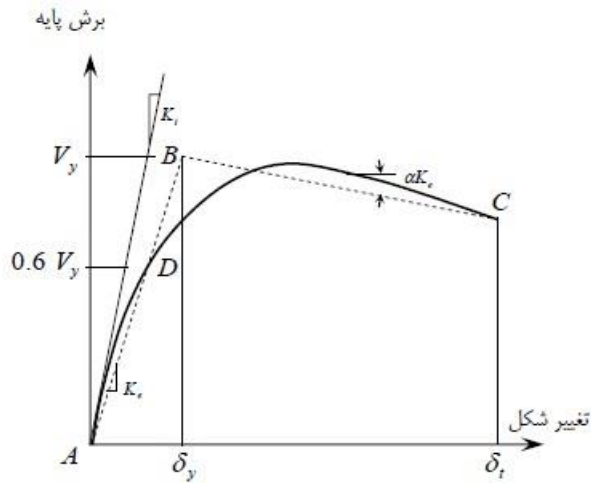
نمودارهای نیرو - تغییر مکان حاصل از آزمایش به‌صورت منحنی می‌باشد و مقایسه‌ی پارامترهایی نظیر سختی مؤثر و ضریب شکل‌پذیری به علت مشخص نبودن نقطه‌ی تسلیم امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ بنابراین لازم است بر اساس روشی نمودارهای حاصل به‌صورت دوخطی تقریب زده شوند. برای تقریب نمودار نیرو-تغییر مکان جانبی از دستورالعمل ارائه‌شده در نشریه‌ی ۳۶۰ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور استفاده شده است [۱۹]. در بند ۳-۳-۳-۳ این آیین‌نامه معادل‌سازی رفتار دوخطی بر اساس نمودار نیرو - تغییر مکان واقعی سیستم به صورتی که در زیر آورده شده مشروح کرده است:

رفتار غیرخطی سازه که ارتباط بین برش پایه و تغییر مکان نقطه‌ی کنترل را مطابق شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مشخص می‌نماید به‌منظور محاسبه‌ی سختی جانبی مؤثر (Ke) و برش تسلیم مؤثر (Vy) باید با یک مدل رفتار دوخطی ساده جایگزین شود. برای ساده‌سازی مدل رفتار غیرخطی، نقطه‌ی B باید چنان انتخاب شود که سطح زیر مدل رفتار دوخطی برابر سطح زیر منحنی رفتار غیرخطی باشد و همچنین طول پاره‌خط AD برابر $0/6AB$ باشد. در آن صورت نیروی مربوط به نقطه‌ی B، برش تسلیم مؤثر (Vy) بوده و برای برش پایه‌ی $0/6Vy$ در منحنی رفتار غیرخطی، مدول سکانت بیان‌گر سختی جانبی مؤثر (Ke) می‌شود. در مدل ساده‌شده باید دقت شود که Vy بزرگ‌تر از بیشینه برش پایه در منحنی رفتار غیرخطی نشود. در سازه‌هایی که پس از تسلیم دارای سختی مثبت هستند ($\alpha > 0$) مدل رفتاری مطابق شکل ۱۶ است و در سازه‌هایی که پس از تسلیم دارای سختی منفی هستند ($\alpha < 0$) مدل رفتار مطابق شکل ۱۷ می‌باشد [۱۹].

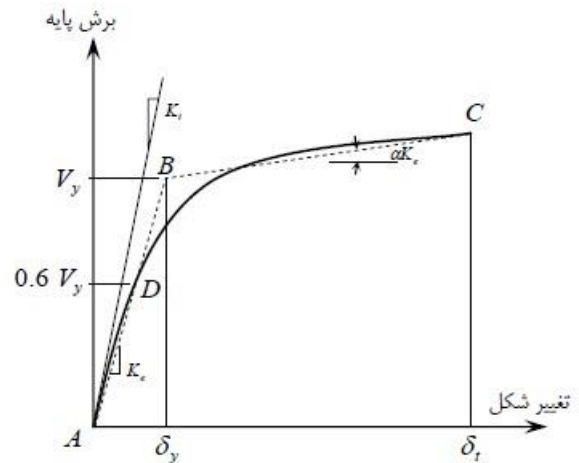
جدول ۱۰: مقایسه‌ی ظرفیت باربری ستون‌های CFT با مقاطع مختلف

شکل مقطع	طول ستون (mm)	طول ضلع (تا) مقطع (قطر) (mm)	ضخامت جدار (mm)	مقاومت بتن (MPa)	مقاومت فولاد (MPa)	خروج از مرکزیت بار (mm)	ظرفیت باربری نمونه (kN)
دایره [۲۰]	ستون کوتاه*	۱۴۹	۲/۹۶	۲۵/۴	۳۰۸	۰	۹۴۱
	ستون کوتاه	۱۴۹	۲/۹۶	۴۰/۵	۳۰۸	۰	۱۰۸۰
	ستون کوتاه	۱۴۹	۲/۹۶	۷۷	۳۰۸	۰	۱۷۸۱
مربع [۲۰]	ستون کوتاه*	۱۴۸	۴/۳۸	۲۵/۴	۲۶۲	۰	۱۱۵۳
	ستون کوتاه	۱۴۸	۴/۳۸	۴۰/۵	۲۶۲	۰	۱۴۱۴
	ستون کوتاه	۱۴۸	۴/۳۸	۷۷	۲۶۲	۰	۲۱۰۸
شش ضلعی [۱۲]	۱۲۰۰	۱۹۶	۳/۷۳	۳۹/۳	۳۱۱	۰	۴۹۴۷
	۱۲۰۰	۱۹۶	۵/۷۸	۳۹/۳	۳۲۱	۰	۶۰۰۱
	۱۲۰۰	۱۹۷	۳/۷۲	۵۷/۴	۳۱۱	۰	۶۸۲۷
	۱۲۰۰	۱۹۹	۵/۸۹	۵۷/۴	۳۲۱	۰	۷۰۷۹
هشت ضلعی [۱۳]	۱۵۰۰	۲۰۱	۳/۸۵	۳۹/۳	۳۱۱	۰	۹۲۹۷
	۱۵۰۰	۲۰۰	۶/۰۲	۳۹/۳	۳۲۱	۰	۱۰۵۰۲
	۱۵۰۰	۲۰۰	۳/۹۲	۵۷/۴	۳۱۱	۰	۱۲۳۶۲
	۱۵۰۰	۱۹۸	۵/۹۸	۵۷/۴	۳۲۱	۰	۱۳۲۶۳
بیضی [۱۶]	۱۵۰۰	۱۵۰=قطر بزرگ تر ۷۵=قطر کوچک تر	۶/۸۸	۵۵/۱۷	۴۳۱/۴	۰	۹۴۹/۸۵
	۱۵۰۰	۲۵۰=قطر بزرگ تر ۱۲۵=قطر کوچک تر	۶/۳	۴۷/۵	۳۸۸/۹	۰	۷۶۲/۹۳
مستطیل [۲۱]	۲۱۳۵	۱۰۰×۱۵۰	۴	۳۰/۷	۳۱۲/۳	۲۰	۵۳۵/۸
	۲۱۳۵	۱۰۰×۱۵۰	۴	۳۱/۴	۳۶۲/۷	۵۰	۳۵۶
دایره [۲۲]	۲۱۳۵	۱۰۰	۳	۳۲/۷	۳۲۲	۲۰	۱۸۱/۵۶
	۲۱۳۵	۱۰۰	۳	۳۴/۵	۳۲۲	۵۰	۱۱۷/۴۹
شش ضلعی	۱۵۰۰	۵۰	۴	۲۲/۴	۲۴۵	۰	۳۲۷/۷
	۱۵۰۰	۵۰	۴	۲۲/۴	۲۴۵	۵۰	۲۵۳
	۱۵۰۰	۵۰	۴	۲۲/۴	۲۴۵	۱۰۰	۱۹۱/۶
	۱۵۰۰	۵۰	۴	۲۲/۴	۲۴۵	۱۵۰	۱۰۵/۸
	۱۵۰۰	۵۰	۴	۳۴/۱	۲۴۵	۰	۴۰۳/۷
	۱۵۰۰	۵۰	۴	۳۴/۱	۲۴۵	۵۰	۲۹۸/۵
	۱۵۰۰	۵۰	۴	۳۴/۱	۲۴۵	۱۰۰	۲۱۶/۵
	۱۵۰۰	۵۰	۴	۳۴/۱	۲۴۵	۱۵۰	۱۱۵/۷

* در این مقاله طول نمونه‌ها ذکر نگردیده است اما با توجه به اینکه بیان شده است که ستون‌ها کوتاه می‌باشد بنابراین طول نمونه‌ها در ظرفیت باربری آن‌ها تأثیرگذار نمی‌باشد.



شکل ۱۷: منحنی ساده‌شده‌ی نیرو-تغییر مکان برای $\alpha < 0$

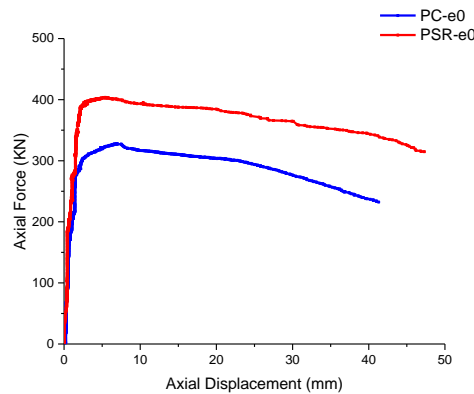


شکل ۱۶: منحنی ساده‌شده‌ی نیرو-تغییر مکان برای $\alpha > 0$

لازم به توضیح است که مطالب بیان‌شده برای بار جانبی می‌باشد اما موارد ذکرشده به تمام بارگذاری‌ها قابل تعمیم است. پارامترهای جذب انرژی و ضریب شکل‌پذیری بیشتر در رابطه با نیروی جانبی و یا بارگذاری که سبب ایجاد تغییر مکان جانبی می‌گردد همانند اعمال لنگر، مطرح می‌شود و لذا در این پژوهش نیز این پارامترها برای نمونه‌های تحت بار دارای خروج از مرکزیت مورد مقایسه قرار گرفته است. در ادامه به بررسی نمونه‌ها به صورت مجزا پرداخته شده است.

۲-۳ بررسی نمونه‌ها تحت بار فشاری خالص

همان‌طور که در قسمت‌های قبل نیز به آن اشاره شد نمونه‌ها تحت بار فشاری خالص تا رسیدن به بار محوری بحرانی نباید تغییر مکان جانبی از خود نشان دهند که البته این موضوع تنها در شرایط ایده آل امکان رخداد دارد و دسترسی به آن در محیط آزمایشگاه امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ لذا تا قبل از رسیدن به بار بحرانی مقدار تغییر مکان جانبی مشهود بوده که البته ارزش بررسی نداشته و قطعاً جزو خطای آزمایش می‌باشد. نمودار نیرو-تغییر مکان محوری وقوع کمانش را تصریح می‌کند زیرا با رسیدن به مقدار بار مشخصی به یک‌باره تغییر شکل‌های ایجادشده در نمونه افزایش یافته است. در شکل ۱۸ نمودار نیرو-تغییر مکان محوری برای نمونه‌های دارای هسته بتنی ساده و الیافی آورده شده است.



شکل ۱۸: نمودار نیرو-تغییر مکان محوری برای نمونه‌ها

همان‌طور که در جدول ۹ نیز مشخص است در نمونه‌هایی که تنها تحت بار فشاری خالص قرار دارند، افزایش مقاومت هسته به مقدار بسیار زیادی بر روی مقاومت نهایی مقطع مؤثر است. این به علت آن است که بتن در فشار عملکرد مناسبی داشته و با توجه به

اینکه هسته‌ی بتنی مساحت بیشتری از مقطع را به خود اختصاص داده است، لذا تأثیرگذاری قابل توجهی در ظرفیت باربری مقطع خواهد داشت.

کمانش پدیده‌ی نامطلوبی است که ظرفیت مقطع را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد به‌طور مثال می‌توان ظرفیت باربری نمونه را بدون در نظر گرفتن پدیده‌ی کمانش و بر اساس روابط مقاومت مصالح به‌صورت زیر به دست آورد:

$$N_0 = A_s f_y + A_c f_c' \quad (1)$$

$$A_c = 58.59 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 12 \text{ cm}^2$$

حال برای نمونه ساده می‌توان نوشت:

$$N_0 = 1200 \times 240 + 5895 \times 22.4 = 425300.2 (N) = 425.3 (kN)$$

نیروی نهایی حاصل از آزمایش برای نمونه‌ی ساده برابر با $327/7$ کیلو نیوتن حاصل شده بود. اختلاف این دو عدد حدوداً 100 کیلو نیوتن می‌باشد که مقدار بسیار قابل توجهی است.

برای نمونه‌های الیافی می‌توان نوشت:

$$N_0 = 1200 \times 245 + 5895 \times 34.1 = 493791.9 (N) = 493.79 (kN)$$

نیروی نهایی حاصل از آزمایش برای نمونه‌ی ساده برابر با $403/7$ حاصل شده بود. اختلاف این دو عدد حدوداً 90 کیلو نیوتن می‌باشد. همان‌طور که مشخص است پدیده کمانش، ظرفیت باربری نمونه را به‌صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

۳-۳ بررسی نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر

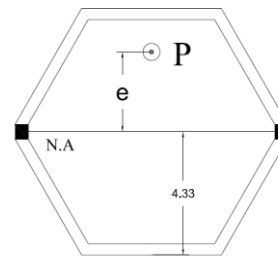
با ایجاد لنگر خمشی در مقطع، ممکن است قسمتی از مقطع ستون به کشش بیفتد. به بیان دقیق‌تر با استفاده از علم مقاومت مصالح می‌توان گفت در صورتی که نیروی فشاری دارای خروج از مرکزیت در داخل هسته‌ی مرکزی مقطع قرار بگیرد تمامی نقاط مقطع در فشار می‌باشند و در صورت قرارگیری بار فشاری در خارج از این محدوده، قطعاً قسمتی از مقطع به کشش می‌افتد. با به کشش افتادن قسمتی از مقطع، بتن ناحیه کششی دچار ترک‌خوردگی می‌گردد و در عمل مقاومت خود را از دست می‌دهد. با حذف قسمت کششی بتن، تنش‌های کششی ناشی از لنگر توسط فولاد تحمل می‌گردد. با توجه به بالا بودن ظرفیت کششی فولاد و همچنین عدم امکان ایجاد کمانش در بار کششی، می‌توان از حداکثر ظرفیت فولاد در کشش استفاده کرد. همچنین قرارگیری فولاد در انتهای‌ترین قسمت مقطع سبب می‌شود لنگر حاصل از کوپل نیروی کششی- فشاری تا حد امکان افزایش یابد که این مورد یکی از برتری‌های ستون‌های CFT نسبت به اعضای بتن مسلح در بحث ظرفیت باربری می‌باشد. اما از سوی دیگر با ایجاد ترک در بتن به علت قرارگیری در کشش، جداشدگی بتن و فولاد اتفاق افتاده و در عمل اثر محصورشدگی فولاد به مقدار بسیار زیادی کاهش می‌یابد. در حقیقت می‌توان بیان کرد ایجاد کشش در مقطع سبب می‌شود اثر بسیار مطلوب محصورشدگی که می‌تواند سبب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری و شکل‌پذیری بتن گردد، از بین رفته و بتن مورد استفاده در هسته‌ی مقطع همانند بتن معمولی عمل کند.

با توجه به توضیحات فوق در ادامه‌ی محاسبات مربوط به هسته‌ی مرکزی برای مقطع نمونه‌ها آورده شده است. با توجه به شکل مقطع و خروج از مرکزیت یک‌طرفه مطابق با شکل ۱۹ می‌توان نوشت:

$$I = 11567400 \text{ cm}^4$$

$$A = 7095 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{My}{I} \rightarrow \sigma = \frac{P}{A} + \frac{P.e.y}{I}$$



شکل ۱۹: نحوه‌ی در نظرگیری بار محوری جهت به دست آوردن هسته‌ی مرکزی مقطع

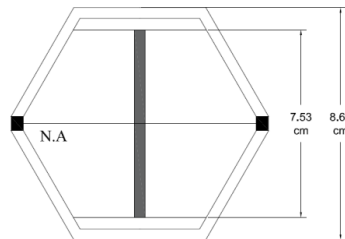
حال اگر هدف آن باشد که کل مقطع در فشار قرار بگیرد باید تنش کششی برابر با صفر قرار داده شود:

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{P.e.y}{I}$$

$$\sigma_T = \frac{P}{A} - \frac{P.e.y}{I} \rightarrow 0 = \frac{P}{A} - \frac{P.e.y}{I} \rightarrow \frac{P}{A} = \frac{P.e.y}{I} \rightarrow e = \frac{I}{A.y}$$

$$e = \frac{11567400}{7095 \times 43.3} = 37.65 \text{ mm}$$

با توجه به محاسبات فوق مشخص است که برای خروج از مرکزیت بار در راستای y ، حداکثر میزان خروج از مرکزیت برای اینکه مقطع در هیچ قسمتی به کشش نیفتد برابر با ۳,۷۶۵ سانتی‌متر می‌باشد. در حقیقت هسته‌ی مرکزی مقطع نمونه‌ها برای خروج از مرکزیت یک‌طرفه در راستای y همانند شکل ۲۰ می‌باشد.

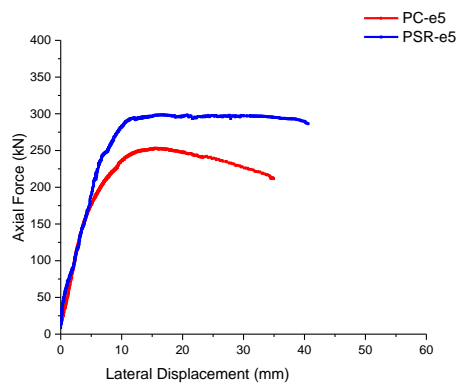


شکل ۲۰: هسته‌ی مرکزی مقطع نمونه‌ها برای خروج از مرکزیت یک‌طرفه در راستای y

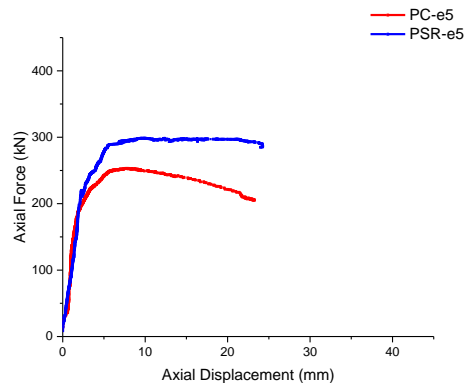
با توجه به مطالب عنوان شده در بالا می‌توان این نتیجه‌گیری را انجام داد که خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر در راستای y در هسته‌ی مرکزی مقطع قرار نمی‌گیرد و بنابراین قطعاً قسمتی از مقطع به کشش می‌افتد. با علم به اینکه قسمتی از مقطع به کشش می‌افتد به‌طور صحیح‌تری می‌توان نتایج را تحلیل کرد. در ادامه نتایج حاصل از آزمایش برای بار محوری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ آورده شده است. همچنین در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ مدل ساده‌سازی شده‌ی دوخطی نیز برای دو نمونه‌ی تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر آورده شده است. بر اساس شکل ۲۳ و ۲۴ می‌توان سختی مؤثر، ضریب شکل‌پذیری و جذب انرژی را برای این دو نمونه به دست آورد. ابتدا لازم است توضیحاتی در رابطه با ضریب شکل‌پذیری و جذب انرژی بیان شود.

۳-۱ محاسبه‌ی انرژی جذب‌شده برای نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر

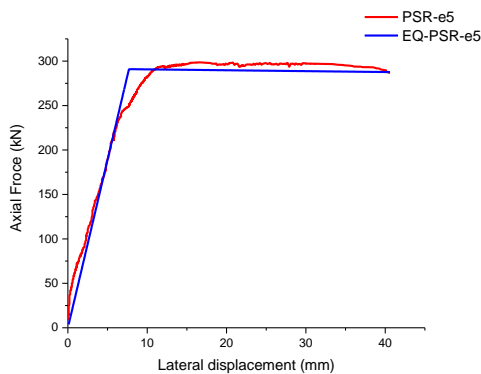
بر اساس تئوری مقدماتی سازه، سطح زیر نمودار نیرو - تغییر مکان برابر با انرژی جذب‌شده می‌باشد. در حقیقت برای محاسبه‌ی انرژی جذب‌شده به منحنی‌های چرخه‌ای نیاز است اما سطح زیر نمودار در جهت رفت بارگذاری نیز شاخصی از جذب انرژی را مشخص می‌کند.



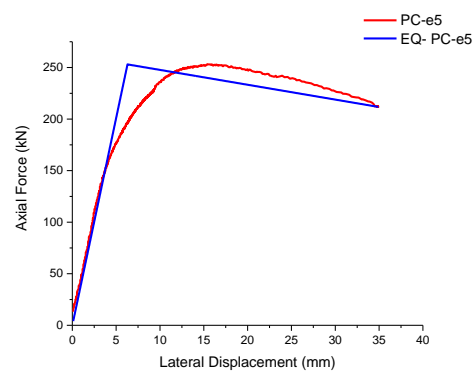
شکل ۲۲: نمودار نیرو-تغییر مکان جانبی مکان تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر



شکل ۲۱: نمودار نیرو-تغییر مکان محوری تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر



شکل ۲۴: مدل ساده‌سازی شدهی دوخطی برای نمونهی پر شده با بتن الیافی تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر



شکل ۲۳: مدل ساده‌سازی شدهی دوخطی برای نمونهی پر شده با بتن ساده تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر

با مقایسه‌ی شکل‌های ۲۳ و ۲۴ می‌توان دریافت نمونه‌ی پر شده با بتن الیافی پس از رسیدن به حداکثر ظرفیت باربری، روند ثابتی را طی کرده و افتی مشاهده نمی‌گردد، اما برخلاف نمونه‌ی پر شده با بتن ساده افت قابل توجهی مشهود است.

میزان جذب انرژی برای هر دو نمونه‌ی پر شده با بتن ساده و الیافی در جدول ۱۱ آورده شده است.

جدول ۱۱: مقایسه جذب انرژی در بارگذاری فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر

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

۳-۲ محاسبه‌ی ضریب شکل‌پذیری

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که امروزه در طراحی سازه‌ها مورد توجه می‌باشد بحث شکل‌پذیری است. بر اساس مراجع طرح لرزه‌ای سازه‌ها ضریب شکل‌پذیری به صورت رابطه‌ی ۲ تعریف می‌گردد:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2)$$

که در رابطه‌ی فوق Δ_y و Δ_u به ترتیب برابر با تغییر مکان متناظر با تنش تسلیم و تنش نهایی می‌باشد. با توجه به مدل ساده‌سازی شده‌ی دوخطی به‌راحتی Δ_y قابل تعیین است. Δ_u نیز تغییر مکان نهایی نمونه است که در رابطه با آن توضیحاتی ارائه گردید.

برای نمونه‌ی پر شده با بتن ساده:

PC-e5:

$$\Delta_y = 6.3 \text{ mm}$$

$$\Delta_u = 34.92 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{34.92}{6.3} = 5.54$$

برای نمونه‌ی پر شده با بتن ساده:

PSR-e5:

$$\Delta_y = 7.69 \text{ mm}$$

$$\Delta_u = 40.6 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{40.6}{7.69} = 5.28$$

۳-۳-۳ سختی مؤثر نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر

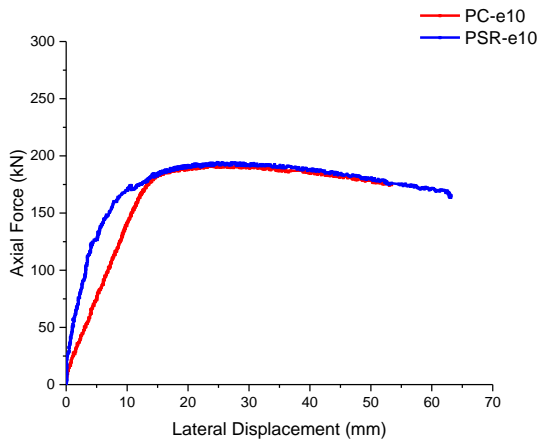
سختی مؤثر پارامتر بسیار حائز اهمیت می‌باشد که بر اساس بند ذکر شده برابر با مدول سکانت در $0/6$ نیروی تسلیم می‌باشد. بر این اساس سختی مؤثر به‌راحتی قابل محاسبه می‌باشد که نتایج آن در جدول ۱۲ آورده شده است.

جدول ۱۲: سختی مؤثر نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر

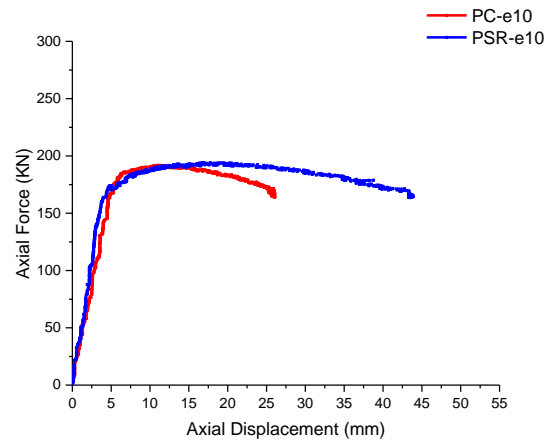
نمونه‌ها	سختی مؤثر (N/mm)
PC-e5	۴۰۱۰۰
PSR-e5	۳۷۸۰۰

۴-۳ بررسی نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر

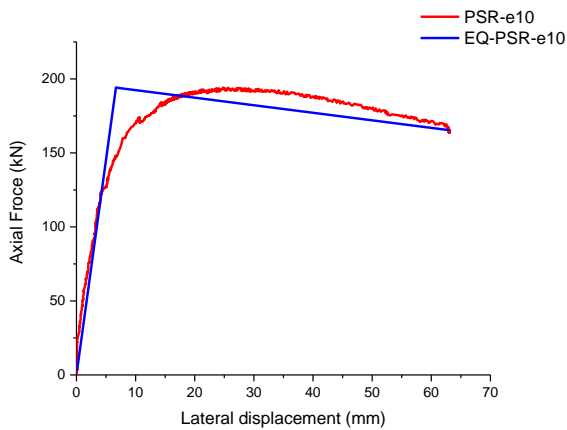
خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر لنگر قابل توجهی به مقطع اعمال می‌کند و کشش ایجاد شده در مقطع بزرگ است لذا انتظار می‌رود از نقش بتن در ظرفیت باربری کاسته شود. نمودارهای حاصل شده در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ آورده شده است. با توجه به نمودارها کاملاً مشخص شود که ظرفیت باربری نمونه‌ها به یکدیگر نزدیک شده و طبق انتظار بتن نقش زیادی را در ظرفیت باربری ایفا نمی‌کند. همچنین مدل دوخطی ساده‌سازی شده نیز در شکل‌های ۲۷ و ۲۸ آورده شده است.



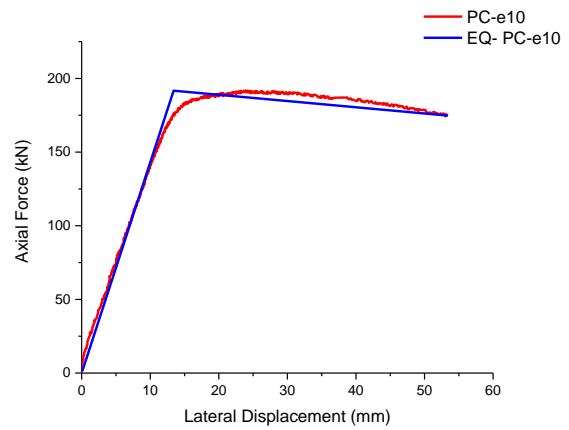
شکل ۲۶: نمودار نیرو-تغییر مکان جانبی تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر



شکل ۲۵: نمودار نیرو-تغییر مکان محوری تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر



شکل ۲۸: مدل ساده‌سازی شده‌ی دوخطی برای نمونه‌ی پر شده با بتن الیافی تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر



شکل ۲۷: مدل ساده‌سازی شده‌ی دوخطی برای نمونه‌ی پر شده با بتن ساده تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر

۳-۴-۱ محاسبه‌ی انرژی جذب‌شده برای نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر بر اساس نمودارهای ساده‌سازی شده می‌توان مساحت زیر نمودار نیرو - تغییر مکان را که برابر با انرژی جذب‌شده می‌باشد برای نمونه‌های تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر به دست آورد. نتایج در جدول ۱۳ آورده شده است. همان‌طور که از جدول ۱۳ مشخص است در خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر میزان جذب انرژی برای هر دو نمونه بیشتر شده است. علت این امر احتمالاً به سبب اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی می‌باشد. در حقیقت احتمالاً ترکیب لنگر ناشی از خروج از مرکزیت ۱۰ و نیروی فشاری افزاینده در این حالت ترکیب بهینه‌تری را نسبت به بارگذاری با خروج از مرکزیت ۵ سانتی‌متر ایجاد کرده است. علیرغم افزایش میزان جذب انرژی در نمونه‌ها، درصد افزایش جذب انرژی به علت استفاده از بتن الیافی کاهش یافته است که این امر به علت کاهش تأثیر بتن در باربری و نزدیک شده دو نمودار به یکدیگر می‌باشد.

جدول ۱۳: مقایسه جذب انرژی در بارگذاری فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر

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

۳-۴-۲ محاسبه‌ی ضریب شکل‌پذیری برای بارگذاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر

بر اساس تعریف بیان شده در قسمت ۳-۲-۲ ضریب شکل‌پذیری برای نمونه‌های تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر محاسبه شده است.

برای نمونه‌ی پر شده با بتن ساده:

PC - e10:

$$\Delta_y = 12.17 \text{ mm}$$

$$\Delta_u = 53.41 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{53.41}{12.17} = 4.39$$

برای نمونه پر شده با بتن الیافی:

PSR - e10:

$$\Delta_y = 6.67 \text{ mm}$$

$$\Delta_u = 63.1 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{63.1}{6.67} = 9.46$$

همان‌طور که مشخص است ضریب شکل‌پذیری برای نمونه‌ی پر شده با بتن ساده کاهش را نشان می‌دهد درحالی‌که مقدار ضریب شکل‌پذیری برای نمونه‌ی پر شده با بتن الیافی افزایش قابل‌توجهی داشته است. این امر مشخص می‌کند بتن الیافی تحت لنگر توانسته است سختی ناحیه‌ی الاستیک را بهتر از نمونه‌ی پر شده با بتن ساده حفظ کند. در قسمت بعد که مربوط به سختی می‌باشد می‌توان مقایسه دقیق‌تری در این زمینه انجام داد.

۳-۴-۳ سختی مؤثر نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر

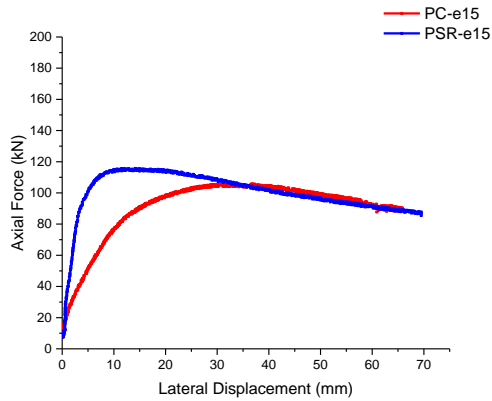
با توجه به شیب قسمت اول نمودار ساده‌سازی شده می‌توان سختی مؤثر نمونه‌ها را تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر به دست آورد. نتایج در جدول ۱۴ آورده شده است.

همان‌طور که مشخص است سختی نمونه‌های پر شده با بتن ساده به مقدار بسیار زیادی کاهش یافته است. سختی نمونه‌های پر شده با بتن الیافی نیز دچار کاهش سختی شده‌اند اما مقدار کاهش آن نسبت به نمونه‌های پر شده با بتن ساده کمتر می‌باشد.

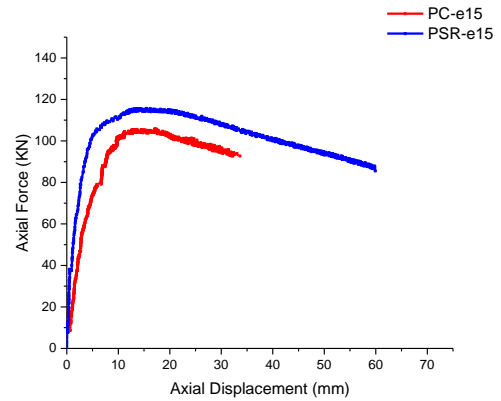
جدول ۱۴: سختی مؤثر نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر

نمونه‌ها	سختی مؤثر (N/mm)
PC-e10	۱۵۷۵۰
PSR-e10	۲۹۱۰۰

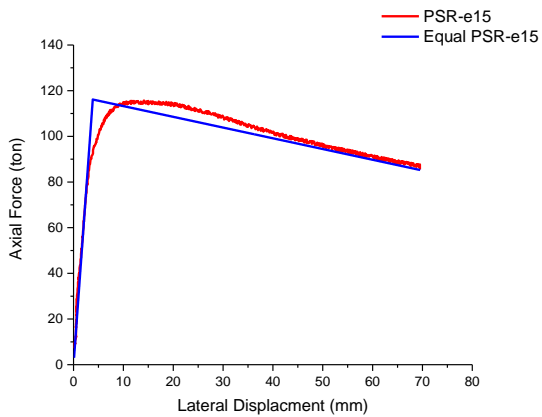
۳-۴-۵ بررسی نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر در این بارگذاری نمودارها در شکل‌های ۲۹ و ۳۰ و مدل ساده‌سازی شده نیز در شکل‌های ۳۱ و ۳۲ آورده شده است.



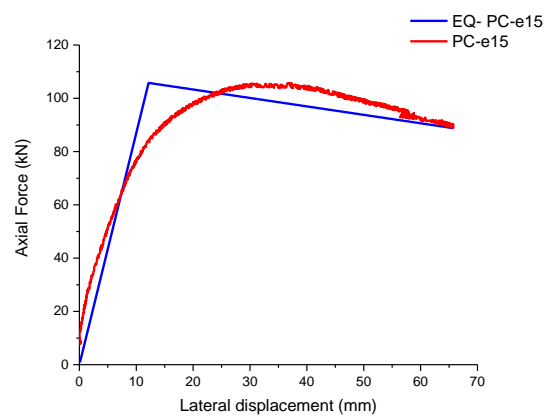
شکل ۳۰: نمودار نیرو-تغییر مکان جانبی تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر



شکل ۲۹: نمودار نیرو-تغییر مکان محوری تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر



شکل ۳۲: مدل ساده‌سازی شده دوخطی برای نمونه‌ی پر شده با بتن ییافی تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر



شکل ۳۱: مدل ساده‌سازی شده دوخطی برای نمونه‌ی پر شده با بتن ساده تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر

۳-۵-۱ محاسبه‌ی انرژی جذب‌شده برای نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر نتایج مربوط به جذب انرژی برای نمونه‌هایی که تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر می‌باشند در جدول ۱۴ آورده شده است.

جدول ۱۵: مقایسه جذب انرژی در بارگذاری فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر

نمونه‌ها	انرژی جذب‌شده (ژول)	درصد افزایش انرژی جذب‌شده نسبت به بتن ساده (%)
PC-e15	۵۵۲۰	-
PSR-e15	۶۸۳۵	۲۳/۸

۳-۵-۲ محاسبه‌ی ضریب شکل‌پذیری برای بارگذاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر
 ضریب شکل‌پذیری برای نمونه‌های تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر به صورت زیر محاسبه می‌شود:
 برای نمونه‌ی پر شده با بتن ساده:

PC-e15:

$$\Delta_y = 12.16 \text{ mm}$$

$$\Delta_u = 65.8 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{65.8}{12.16} = 5.41$$

برای نمونه‌ی پر شده با بتن الیافی:

PSR-e15:

$$\Delta_y = 3.84 \text{ mm}$$

$$\Delta_u = 69.5 \text{ mm}$$

$$\mu = \frac{69.54}{3.85} = 18.06$$

۳-۵-۳ محاسبه‌ی سختی مؤثر برای بارگذاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر
 سختی مؤثر برای نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر در جدول ۱۶ آورده شده است.

جدول ۱۶: سختی مؤثر نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر

نمونه‌ها	سختی مؤثر (N/mm)
PC-e15	۸۶۸۷/۵
PSR-e15	۲۹۱۰۰

۳-۶-۲ مود خرابی

بعد از اعمال بار و به پایان رسیدن ظرفیت، نمونه‌ها از زیر جک آزاد شده و مورد بررسی قرار گرفت. هیچ‌گونه اثری از کمانش موضعی ورق در نمونه‌ها دیده نشد. تغییر شکل نمونه‌ها و بررسی کمی نتایج مبین مود کمانش خمشی بود. لازم به ذکر است به علت وجود خروج از مرکزیت اولیه منظور از کمانش به معنای افزایش سریع تغییر مکان جانبی می‌باشد. در حقیقت به علت وجود خروج از مرکزیت بار از ابتدای بارگذاری تغییر مکان جانبی رخ می‌دهد اما در این حالت با رسیدن بار به مقدار بار بحرانی، تغییر مکان جانبی بدون افزایش بار به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. با جداسازی جدار فولادی بتن نمونه‌ها در حالت نهایی به صورت کاملاً ترک‌خورده و بدون ازهم‌پاشیدگی رؤیت شد. در شکل ۳۳ و ۳۴ نمونه‌ها پس از بارگذاری نشان داده شده است.



شکل ۳۴: نمونه‌های پر شده با بتن الیافی بعد از بارگذاری با خروج از مرکزیت ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر



شکل ۳۳: نمونه‌های پر شده با بتن ساده و الیافی بعد از بارگذاری بدون خروج از مرکزیت

۷-۳ خلاصه نتایج به‌دست‌آمده برای جذب انرژی، ضریب شکل‌پذیری و جذب انرژی در این بخش نتایج به‌دست‌آمده برای نمونه‌ها تحت بارگذاری‌های متفاوت در جدول ۱۷ به‌صورت خلاصه آورده شده است.

جدول ۱۷: جذب انرژی، ضریب شکل‌پذیری، سختی مؤثر برای نمونه‌ها تحت بار با خروج از مرکزیت

نمونه‌ها	μ	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 (%)	سختی مؤثر (N/mm)
PC-e5	۵/۵۴	۷۴۵۰	-	-	۴۰۱۰۰
PSR-e5	۵/۲۸	۱۰۷۸۹	۴۴/۸	-	۳۷۸۰۰
PC-e10	۴/۳۹	۸۷۲۵	-	+۱۷/۱	۱۵۷۵۰
PSR-e10	۹/۴۶	۱۰۹۴۳	۲۵/۴	+۱/۴	۲۹۱۰۰
PC-e15	۵/۴۱	۵۵۲۰	-	-۲۵/۹	۸۶۸۷/۵
PSR-e15	۱۸/۰۶	۶۸۳۵	۲۳/۸	-۳۶/۶	۲۹۷۵۰

۸-۳ محاسبه‌ی ظرفیت باربری نمونه‌ها با استفاده از مبحث دهم مقررات ملی و مقایسه با نتایج آزمایش

هدف از انجام پژوهش‌های علمی ایجاد بسترهای مناسب جهت کاربردهای صنعتی است. در حقیقت یافته‌های علمی بعد از صحت‌سنجی و ساده‌سازی‌های مناسب در آیین‌نامه‌ها و نشریات جهت استفاده‌ی مهندسان قرار می‌گیرند تا در کاربردهای صنعتی نظیر تحلیل، طراحی و اجرا مورد استفاده قرار بگیرند. آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌های فولادی که مبحث دهم از مقررات ملی ساختمان‌ها می‌باشد در آخرین ویرایش خود قسمت مجزایی را برای طراحی ستون‌های مختلط فولاد-بتن چه به‌صورت فولاد محاط شده در بتن و چه به‌صورت فولاد پر شده با بتن اختصاص داده است [۲۳]. لازم به ذکر است تمامی روابط ارائه‌شده در مبحث دهم مقررات ملی عیناً در آیین‌نامه فولاد آمریکا AISC360-10 نیز آمده است. روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه به‌صورت عمومی بوده و برای تمامی مقاطع قابل کاربرد است. تنها، پارامتری که در آیین‌نامه با C_2 مشخص شده است و برای در نظرگیری محصورشدگی بتن می‌باشد برای دو مقطع دایره‌ای و مستطیلی ارائه شده است که برای سایر مقاطع با توجه به میزان شباهت مقطع به یکی از این دو مقطع و قضاوت مهندسی می‌توان عددی را بین ۰٫۸۵ و ۰٫۹۵ در نظر گرفت. با توجه به توضیحات فوق می‌توان بر اساس آیین‌نامه ظرفیت باربری نمونه‌ها را هم

در حالت بار فشاری خالص و هم اثر هم‌زمان لنگر خمشی و نیروی محوری فشاری به دست آورد. در این بخش ظرفیت نمونه‌ها با استفاده از بندهای ۲-۲-۸-۲-۱۰، ۲-۲-۸-۲-۱۰، ۲-۸-۲-۱۰ و ۵-۳-۸-۲-۱۰ و همچنین جداول ۱-۸-۲-۱۰ و ۲-۸-۲-۱۰ برای تمامی نمونه‌ها محاسبه گردیده و با نتایج آزمایش مقایسه شده است. نتایج و مقایسه در جدول ۱۸ آورده شده است.

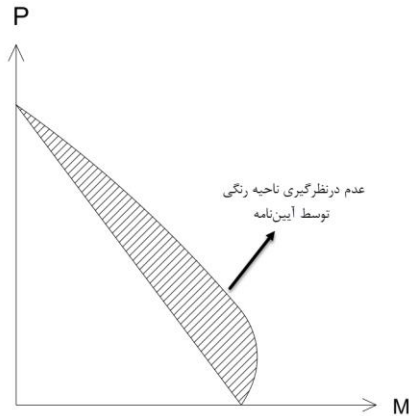
جدول ۱۸: مقایسه بار به‌دست‌آمده از آیین‌نامه و آزمایش برای نمونه‌های ساده

نمونه‌ها	بار حداکثر بر اساس آیین‌نامه (کیلو نیوتن)	بار حداکثر بر اساس نتایج آزمایش (کیلو نیوتن)	درصد کاهش ظرفیت بار آیین‌نامه نسبت به آزمایش (%)
PC-e0	۱۹۱	۳۲۸	۴۱/۸
PC-e5	۸۹	۲۵۳	۶۴/۸
PC-e10	۵۸	۱۹۲	۷۰
PC-e15	۴۳	۱۰۶	۵۹/۴
PSR-e0	۲۰۷	۴۰۴	۴۸/۸
PSR-e5	۱۱۲	۲۹۸/۵	۶۲،۵
PSR-e10	۷۷	۲۱۶/۵	۶۴/۴
PSR-e15	۵۸	۱۱۶	۵۰

همان‌طور که مشخص است اختلاف نتایج به‌دست‌آمده از آیین‌نامه و آزمایش بسیار زیاد می‌باشد. به نظر می‌رسد حداقل دو پارامتر به‌طور مستقیم در این اختلاف نقش ایفا می‌کند. اولین پارامتر که می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در نتایج داشته باشد تفاوت رفتار فولاد در آیین‌نامه و واقعیت می‌باشد. آیین‌نامه رفتار فولاد را به‌صورت دوطرفی در نظر گرفته و بیشترین تنش آن را برابر با تنش تسلیم در نظر می‌گیرد؛ اما با توجه به جدول ۲ مشخص است که میانگین تنش نهایی برای فولاد حدوداً ۱/۴۸ برابر تنش تسلیم میانگین آن می‌باشد. دومین پارامتری که می‌توان در جهت تفاوت نتایج به آن اشاره کرد بحث مربوط به نحوه‌ی در نظرگیری اندرکنش نیروی محوری- لنگر خمشی می‌باشد. ستون‌های CFT همانند ستون‌های بتن مسلح عمل می‌کنند، به معنای دیگر نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی بر یکدیگر تأثیرگذار هستند. برای در نظرگیری این اندرکنش نیاز به منحنی نیروی محوری- لنگر خمشی^۱ می‌باشد؛ اما در آیین‌نامه سازه‌های فولادی رویکرد متفاوتی در این رابطه اتخاذ شده است. در آیین‌نامه میزان لنگر خمشی قابل‌تحمل بدون توجه به بار فشاری موجود و تنها بر اساس مشخصات مقطع محاسبه می‌شود. همچنین رابطه‌ی کنترلی ارائه‌شده برای در نظرگیری اثر هم‌زمان نیروی فشاری و لنگر خمشی که در بند ۱۰-۲-۷-۲-۱۰ ارائه شده است نیز اندرکنش بارها را در نظر نمی‌گیرد [۲۳]. در حقیقت مقدار بار فشاری و لنگر خمشی به‌صورت مجزا با مقادیر مجاز مقایسه می‌گردد. به نظر می‌رسد این دیدگاه مقداری محافظه‌کارانه می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است علاوه بر موارد فوق، ضرایب کاهش مقاومت نیز سبب افزایش اختلاف نتایج می‌گردد. در ادامه به بررسی دقیق‌تر بند ذکرشده پرداخته شده و ناحیه‌ی در نظر گرفته نشده توسط آیین‌نامه به‌صورت شماتیک در شکل ۳۵ نشان داده شده است.

^۱ P-M Interaction

بر اساس بند ۱۰-۲-۷-۱ می‌توان نوشت:



شکل ۳۵: شکل شماتیک ناحیه در نظر گرفته شده توسط آیین‌نامه و ناحیه‌ی دقیق بر اساس اندرکنش نیروی فشاری - لنگر خمشی

$$\frac{P_u}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{u_x}}{M_{c_x}} + \frac{M_{u_y}}{M_{c_y}} \right) \leq 1$$

$$P_c = c_1, P_u = x$$

$$\frac{9}{8} M_{c_x} = c_2, M_{u_x}$$

$$\rightarrow \frac{x}{c_1} + \frac{y}{c_2} = 1$$

همان‌طور در شکل ۳۵ مشخص است آیین‌نامه در رابطه با ترکیب لنگر خمشی - نیروی محوری محافظه‌کارانه عمل می‌کند. سایر عوامل اشاره شده نیز سبب افزایش اختلاف نتایج می‌گردد.

۴- خلاصه و نتیجه‌گیری

گزارش حاصل بر اساس پژوهش آزمایشگاهی انجام شده بر روی ستون‌های فولادی پر شده با بتن با مقطع شش ضلعی نوشته شده است. هدف از انجام این پژوهش تحلیل رفتار و خصوصیات ستون‌های CFT تحت اثر توأم نیروی محوری و لنگر خمشی بوده است. برای تحقق اهداف فوق، ۸ نمونه ستون فولادی پر شده با بتن دارای مقطع شش ضلعی ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است. چهار نمونه دارای هسته‌ای با بتن ساده و با مقاومت میان رده بوده است. جهت مقایسه‌ی نتایج، بارگذاری‌ها برای هر دو نوع ستون با بتن ساده و الیافی به صورت یکسان انجام شده است. بارگذاری انتخاب شده جهت آزمایش نمونه‌ها به صورت بار فشاری بدون خروج از مرکزیت و بار فشاری با خروج از مرکزیت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متری انتخاب شده است. تغییر مکان‌ها در دو راستای اصلی ستون یکی در راستای طولی ستون و دیگری در جهتی که لنگر خمشی وارده تغییر شکل جانبی ایجاد می‌کند برداشت شده است.

با انجام آزمایش‌ها نتایج ثبت گردیده و نمودارهای نیرو-تغییر-مکان برای تمامی نمونه‌ها و در دو جهت رسم شده است. با استفاده از داده‌ها، ظرفیت باربری، ضریب شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی برای تمامی نمونه‌ها به دست آورده شد است. در انتها با استفاده از آیین‌نامه‌ی طراحی سازه‌های فولادی مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، مقدار حداکثر بار وارده با خروج از مرکزیت مشخص نیز محاسبه گردیده و با نتایج آزمایش مقایسه شده است. با انجام کارهای ذکر شده نتایج به دست آمده را می‌توان در چند مورد به صورت زیر خلاصه کرد:

تحت بار فشاری خالص با توجه به اینکه هسته‌ی بتنی در تحمل نیروی محوری فشاری سهم قابل توجهی دارد، افزایش مقاومت هسته‌ی بتنی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ظرفیت باربری کلی نمونه خواهد داشت لذا برای ستون‌هایی که تحت بار محوری بزرگ و لنگر خمشی کوچکی قرار دارند، استفاده از هسته‌ی بتنی پر مقاومت می‌تواند مطلوب باشد. به‌طور عددی می‌توان بیان کرد با افزایش حدود ۵۰ درصدی مقاومت هسته‌ی بتنی در بار فشاری خالص، ظرفیت باربری نمونه‌ها ۲۰٪ افزایش می‌یابد.

بر اساس مقایسه‌ی نتایج برای انرژی جذب شده می‌توان بیان کرد مقدار جذب انرژی متأثر از نوع بارگذاری بوده و در حالت‌های مختلف بارگذاری متفاوت می‌باشد، اما در تمامی موارد، میزان جذب انرژی برای ستون‌های پر شده با بتن الیافی از ستون‌های پر شده با بتن ساده بیشتر است. همچنین از نتایج مشخص است با افزایش خروج از مرکزیت بار (افزایش لنگر) اختلاف بین جذب انرژی نمونه‌ها به یکدیگر نزدیک می‌شود.

بر اساس بررسی صورت گرفته بر روی سختی مؤثر نمونه‌ها مشخص است که در بار فشاری خالص و یا خروج از مرکزیت‌های نسبتاً کوچک سختی مؤثر برای نمونه‌های پر شده با بتن الیافی و بتن ساده بسیار به یکدیگر نزدیک است اما با افزایش میزان خروج از مرکزیت، نمونه‌های پر شده با بتن الیافی توانایی بیشتری در حفظ سختی مؤثر از خود نشان داده و کمتر از نمونه‌های پر شده با بتن ساده دچار کاهش سختی می‌شود. علت این امر احتمالاً به علت کنترل ترک‌ها بر اثر وجود الیاف‌های فولادی می‌باشد. در حقیقت وجود الیاف سبب جلوگیری از رشد و گسترش ترک‌ها می‌شود.

در هیچ‌یک از نمونه‌ها تا آخرین مراحل از بارگذاری اثری از کماتش موضعی در جدار فولادی مشاهده نگردید. در بررسی نمونه‌ها با استفاده از روابط آیین‌نامه، بر اساس محدودیت‌های ارائه‌شده مقطع فشرده محسوب شده و عدم کماتش موضعی پیش‌بینی شده بود. لازم به ذکر است روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه تنها برای مقاطع رایج آورده شده است اما در رابطه با مقاطعی نظیر مقطع شش‌ضلعی که مورد بحث در این پژوهش می‌باشد، ضابطه‌ای ارائه نشده است. با این حال با توجه به نتایج آزمایشگاهی می‌توان بیان کرد در صورت اقتناع محدودیت‌های فشرده‌گی می‌توان از احتمال ایجاد کماتش موضعی صرف‌نظر کرد.

بر اساس نتایج آزمایش و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج به‌دست‌آمده از روابط آیین‌نامه به نظر می‌رسد مقدار ظرفیت باربری نمونه‌های CFT با مقطع شش‌ضلعی در آزمایشگاه بیشتر از نتایج پیش‌بینی شده توسط آیین‌نامه حاصل می‌شود.

۵- علائم

A	مساحت کل مقطع (mm^2)
A_c	مساحت هسته‌ی بتنی (mm^2)
A_s	مساحت جدار فولادی (mm^2)
E	خروج از مرکزیت بار (mm)
I	ممان اینرسی کل مقطع (mm^4)
K_e	سختی مؤثر (N/mm)
N_0	ظرفیت باربری نهایی تئوری مقطع (kN)
Δ_u	تغییر مکان نهایی نمونه‌ها (mm)
Δ_y	تغییر مکان متناظر با نیروی تسلیم (mm)
μ	ضریب شکل‌پذیری نمونه
α	شیب قسمت دوم نمودار ساده‌سازی شده‌ی دوخطی (N/mm)

۶- مراجع

[1] L.-H. Han, G.-H. Yao, Influence of concrete compaction on the strength of concrete-filled steel RHS columns, Journal of Constructional Steel Research, 59(6) (2003) 751-767.

- [2] T. Fujimoto, A. Mukai, I. Nishiyama, K. Sakino, Behavior of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns, *Journal of Structural Engineering*, 130(2) (2004) 203-212.
- [3] G. Zhao, M. Di Prisco, L. Vandewalle, Experimental investigation on uniaxial tensile creep behavior of cracked steel fiber reinforced concrete, *Materials and Structures*, 48(10) (2015) 3173-3185.
- [4] G. Giakoumelis, D. Lam, Axial capacity of circular concrete-filled tube columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 60(7) (2004) 1049-1068.
- [5] S. Tokgoz, C. Dunder, Experimental study on steel tubular columns in-filled with plain and steel fiber reinforced concrete, *Thin-Walled Structures*, 48(6) (2010) 414-422.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] N. Jamaluddin, D. Lam, X. Dai, J. Ye, An experimental study on elliptical concrete filled columns under axial compression, *Journal of Constructional Steel Research*, 87 (2013) 6-16.
- [9] S. Tokgoz, Tests on plain and steel fiber concrete-filled stainless steel tubular columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 114 (2015) 129-135.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] S.-W. Liu, T.-M. Chan, S.-L. Chan, D.K.-L. So, Direct analysis of high-strength concrete-filled-tubular columns with circular & octagonal sections, *Journal of Constructional Steel Research*, 129 (2017) 301-314.
- [16] M. Mahgub, A. Ashour, D. Lam, X. Dai, Tests of self-compacting concrete filled elliptical steel tube columns, *Thin-Walled Structures*, 110 (2017) 27-34.
- [17] 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.
- [18] A.S.f.T. Materials, Standard test methods for tension testing of metallic materials, ASTM international, 2016.
- [19] Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings Office of Deputy for Technical Affairs Technical Criteria Codification & Earthquake Risk Reduction Affairs Bureau ,Islamic Republic of Iran Management and Planning Organization, Tehran 2007.
- [20] K. Sakino, H. Nakahara, S. Morino, I. Nishiyama, Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns, *Journal of Structural Engineering*, 130(2) (2004) 180-188.
- [21] D. Hernández-Figueirido, M.L. Romero, J. Bonet, J. Montalvá, Ultimate capacity of rectangular concrete-filled steel tubular columns under unequal load eccentricities, *Journal of constructional steel research*, 68(1) (2012) 107-117.
- [22] J. Portolés, M.L. Romero, J. Bonet, F. Filippou, Experimental study of high strength concrete-filled circular tubular columns under eccentric loading, *Journal of constructional steel research*, 67(4) (2011) 623-633.
- [23] The tenth chapter of the national building regulations: Design and Construction of Steel Structures, Tehran, 2013.

Experimental investigation on hexagonal steel tubular columns filled with plain and fiber reinforced concrete under eccentric compression load

Navid Mahdavi^a, Milad Salimi^b, Mansour Ghalehnovi^{c3}

^a Civil Structural Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran Email: Navid.Mahdavi@mail.um.ac.ir

^b Civil Structural Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran Email: Salimi.Milad@mail.um.ac.ir

^c Civil Structural Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran Email: ghalehnovi@mail.um.ac.ir

Abstract

Due to the advantages of Concrete Filled Tube (CFT), attention to them is increasingly on the rise. In spite of the extensive research done in these sections, in some cases, as in the case of less frequent sections or using different types of concrete, the need for research to complete the design rules and guidelines seems necessary. The present study was conducted with an experimental approach to the study of CFT under Eccentric load. In this study, 8 CFT columns with a hexagonal cross section of 150 cm in length were tested. Concrete used as the core of the samples was plain concrete and fiber concrete. The displacements in two directions of the longitudinal and lateral has been recorded and the force - displacement diagram for all samples in both directions has been drawn. Parameters such as bearing capacity, ductility index, energy dissipation and effective hardness have been analyzed and compared. Based on the comparison of the results, it was found that in columns that are only under axial load, the increase in concrete core strength significantly increases the bearing capacity of the specimens, so that an increase of about 50% of the concrete core strength causes an increase of about 20% of the loaded capacity of the specimen; However, by increasing the bending moment, the effect of concrete core resistance is greatly reduced. Also it was found that specimens filled with fiber concrete have greater ability to maintain effective hardness. It also seems that the presence of fibers in concrete affects the ductility and energy dissipation parameters.

Keywords: Force-Displacement Diagram, Eccentric Axial Load, Bearing Capacity, Ductility Ratio, Energy Absorption