



## بررسی آزمایشگاهی ستون‌های فولادی شش ضلعی پر شده با بتن ساده و الیافی تحت بار فشاری خارج از مرکز

نوید مهدوی، میلاد سلیمی، منصور قلعه‌نوی\*

دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۹-۰۸  
بازنگری: ۱۳۹۷-۱۱-۱۹  
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۲۱  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۲۷

### کلمات کلیدی:

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

**خلاصه:** 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 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 شش‌ضلعی 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 تأثیر گذار است.

### ۱- مقدمه

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<sup>۱</sup> یا به اختصار SRC گفته می‌شوند.

ب- مقاطع توخالی پر شده با بتن<sup>۲</sup> 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

1 Steel Reinforced Concrete

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghalehnovi@um.ac.ir

2 Concrete Filled Tube



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 مطالعه‌های انجام‌شده 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<sup>۱</sup> 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 موردتوجه 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

1 Toughness

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 مورد استفاده 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.

در سال ۲۰۱۰ تک گز و داندر 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 قابل تقدیر مین یو و همکاران رابطه‌ی واحدی را برای به دست آوردن ظرفیت باربری مقاطع CFT دایره‌ای و چندضلعی (به‌صورت تو پر و توخالی) 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،

## 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 به صورت 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 کمانش در جدار فولادی نسبت به مقاطع ساخته شده از هر یک از این مواد به صورت 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 ساخته شده 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.

ظرفیت باربری شکل‌پذیری و پدیده‌ی باریک شدن نمودارهای چرخه‌ای پرداختند [۱۰]. لانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ با رویکرد تئوری و بر اساس روش انرژی کمانش موضعی ورق فولادی را تحت بارگذاری خارج از مرکز مورد بررسی قرار داده و کمانش موضعی الاستیک را رابطه سازی کردند. رابطه‌ی ارائه شده 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 به صورت آزمایشگاهی و عددی به مطالعه پرداختند و همچنین رابطه‌ی کاربردی جهت به دست آوردن ظرفیت باربری ارائه دادند [۱۲ و ۱۳]. الچکانی 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 کمانشی مورد ارزیابی قراردادند [۱۶]. در سال ۲۰۱۸ دینگ و همکاران تأثیر استفاده از CFRP ها 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].

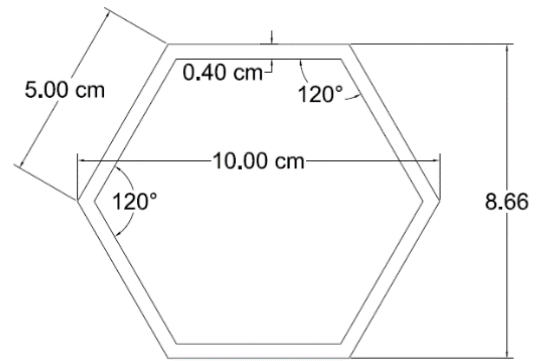
## ۲- صورت مسئله و شرح آزمایش

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 به صورت مبسوط به خصوصیات بتن مورد استفاده و همچنین جزئیات بارگذاری پرداخته می‌شود.

جدول ۱. مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایش

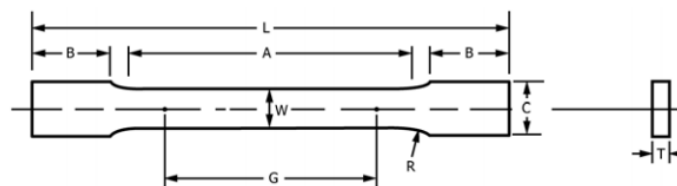
Table 1. Geometric characteristics of test specimens

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
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

Fig. 1. Structured section details



	Dimensions		
	Standard Specimens	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]

Fig. 2. Specifications of a standard steel specimen made for tensile testing

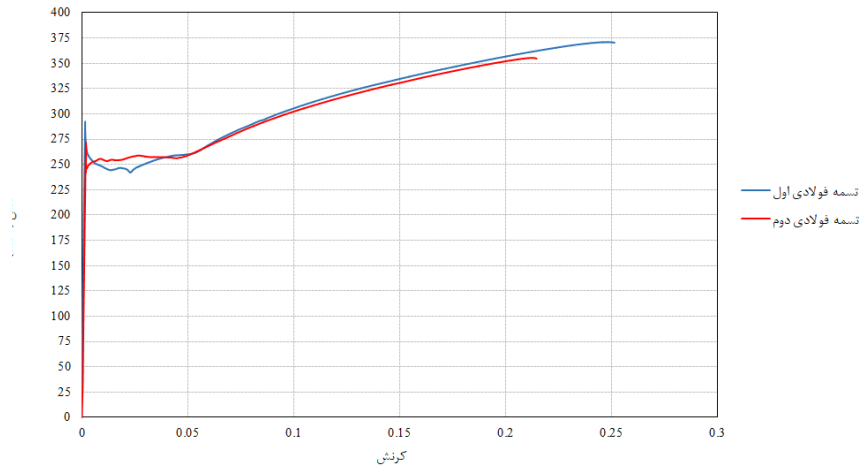
اطلاعات مصالح مورد استفاده و همچنین در جهت به دست آوردن مقاومت‌های تسلیم و نهایی، دو نمونه‌ی فولادی استاندارد به شکل دمبلی (استخوانی) بر اساس دستورالعمل ASTM E8 تهیه شده و در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه فردوسی مشهد تحت آزمایش کشش تک محوره قرار گرفت است [۱۸]. مشخصات هندسی نمونه‌های فولادی مورد آزمایش 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 ساخته شده تحت آزمایش کشش مشاهده می‌گردد.

در جدول ۲ خصوصیات مکانیکی فولادها به صورت کمی آورده شده است. با توجه به جدول ۲ برای محاسبات و مقایسه‌های صورت

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



شکل ۳. نمودار تنش- کرنش تسمه‌های فولادی  
Fig. 3. Strain-stress diagram of steel belts



شکل ۴. نمونه‌ی فولادی استخوانی شکل استاندارد تحت آزمایش کشش تک‌محوره  
Fig. 4. Standard shaped bony steel specimen under uniaxial tensile test

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

Table 2. Mechanical properties of the steel used to make the tubes of the specimens

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

به بتن ساده پرداخته شده و سپس بتن الیافی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

گرفته که در ادامه آورده شده، تنش تسلیم فولاد برابر با ۲۴۵ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است.

### ۳-۲-۱- 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

### ۳-۲-۳- مشخصات بتن مورد استفاده

همان‌طور که در قسمت معرفی نمونه‌ها بیان شد در این پژوهش از دو نوع بتن ساده و الیافی استفاده شده است. در این قسمت ابتدا

جدول ۳. طرح اختلاط بتن ساده‌ی مورد استفاده

Table 3. plain concrete Design mix ratio

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

جدول ۴. طرح اختلاط بتن الیافی مورد استفاده

Table 4. Fiber reinforced concrete mix design ratio

$V(m^3)$	$W/C$	$W(kg)$	$C(kg)$	$G(kg)$	$S(kg)$	$SP(g)$	$L(kg)$	$VMA(g)$	$F(kg)$
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

شهری، برای ساخت بتن ساده در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۲-۳-۲ طرح اختلاط بتن الیافی

همان‌طور 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 به‌طور معمول برای بتن الیافی از بتن خود تراکم استفاده می‌شود. ساخت بتن خود تراکم دارای جزئیات 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 قابل‌ذکر دیگر این است که به‌طور 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.

در جدول ۴:

$W$  (retaW): آب برحسب کیلوگرم

$C$  (tnemeC): سیمان برحسب کیلوگرم

$G$  (levarG): شن (سنگ‌دانه‌ی درشت) برحسب کیلوگرم

و همچنین اساس فلسفه استفاده از ستون‌های CFT که بهره‌جویی از پدیده‌ی محصورشدگی بتن و ظرفیت اضافی‌ی ایجادشده در اثر آن است، لذا برای بتن ساده در این پژوهش، مقاومتی منطقی و قابل‌دسترس ۲۰ تا ۲۵ مگا پاسکال در نظر گرفته شده است. گزارش طرح اختلاط معمولاً به‌صورت وزن مصالح برای ۱ مترمکعب حجم بتن ارائه می‌شود. در جدول ۳ طرح اختلاط استفاده‌شده برای ساخت بتن معمولی بر اساس مقاومت ۲۸ روزه‌ی ۲۰ تا ۲۵ مگاپاسکال آورده شده است. لازم به ذکر است برای نمونه به‌طور تقریبی به ۱۵ لیتر بتن احتیاج بوده است. همچنین ظرفیت ترکیب‌کننده‌ی مورد استفاده حدوداً برابر با ۳۰ لیتر بوده و لذا در جدول مقدار موردنیاز برای ساخت ۳۰ لیتر بتن نیز گزارش شده است.

در جدول ۳:

$V$  (emuloV): حجم برحسب مترمکعب

$W$  (retaW): آب برحسب کیلوگرم

$C$  (tnemeC): سیمان برحسب کیلوگرم

$G$  (levarG): شن (سنگ‌دانه‌ی درشت) برحسب کیلوگرم

$S$  (dnaS): ماسه (سنگ‌دانه‌ی ریز) برحسب کیلوگرم

$C/W$ : 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

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

Table 5. Compressive strength of plain concrete specimens obtained for all mixtures performed

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

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

Table 6. Compressive strength of fiber reinforced concrete samples obtained for all mixtures performed

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

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 داد 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 PC<sup>۲</sup> و بتن الیافی با حروف اختصاری FRC<sup>۳</sup> نشان داده شده است.

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.

S (dnaS): ماسه (سنگ‌دانه‌ی ریز) بر حسب کیلوگرم

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

PS (rezicitsalP repuS): فوق روان کننده بر حسب گرم

L (emiL): پودر سنگ بر حسب کیلوگرم

AMV<sup>۱</sup>: لزجت دهنده بر حسب گرم

F (rebiF): الیاف بر حسب 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 مورداستفاده قرار گرفته است. همچنین فوق روان کننده بانام تجاری 3R-P10 محصول شرکت شیمی ساختمان و پودر لزجت دهنده‌ی شرکت ژیکاو مورداستفاده قرار گرفته است.

الیاف مورداستفاده 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 کم کربن (شکل پذیر)، 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

2 Plain concrete  
3 Fiber reinforcement concrete

1 Viscosity Modifying Admixtures



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

Table 7. The amount of eccentricity intended for the load

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



شکل ۷. داده نگار  
Fig. 7. data logger



شکل ۶. لودسل ۵۰ تنی  
Fig. 6. Load cell 50 tons



شکل ۵. حسگر آلتراسونیک  
Fig. 5. Ultrasonic sensor



شکل ۹. تغییر مکان‌سنج الکتریکی - مکانیکی  
Fig. 9. Mechanical-electrical LVDT



شکل ۸. جک با ظرفیت اسمی ۱۰۰ تن  
Fig. 8. Jack with a nominal capacity of 100 tons

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 محور از حسگر آلتراسونیک و برای ثبت تغییر مکان جانبی از تغییر مکان‌سنج<sup>۱</sup> الکتریکی - مکانیکی استفاده شده است. برای ثبت لحظه به لحظه تغییر مکان‌ها و بار وارده توسط جک از داده نگار<sup>۲</sup> استفاده شده است. در شکل‌های ۵ تا ۹ دستگاه‌های مورد استفاده در انجام آزمایش به صورت مجزا نشان داده است. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر دقت آزمایش‌ها نحوه

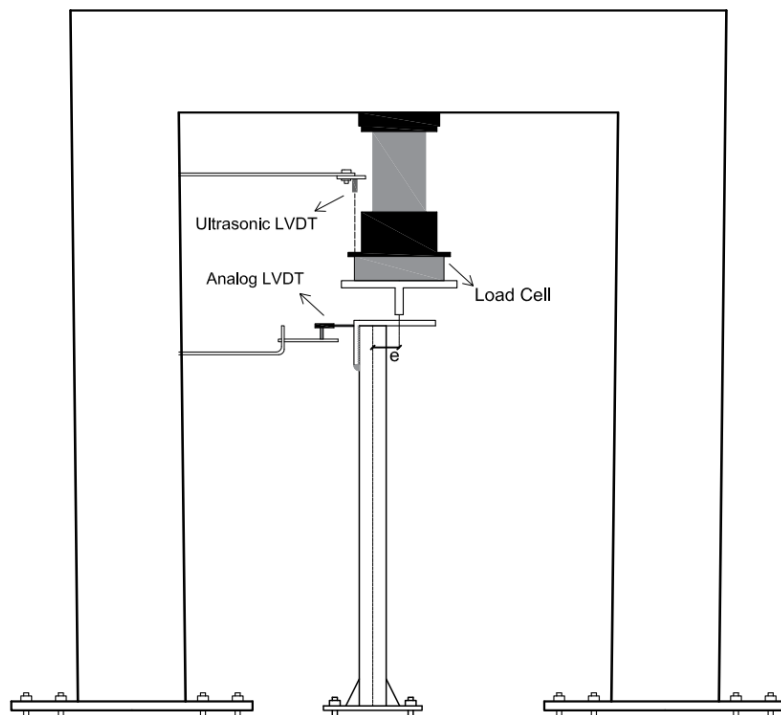
همچنین لازم به توضیح است در ادامه برای محاسبات و مقایسه‌های صورت گرفته از مقاومت میانگین استفاده شده است.

## ۲-۴- بارگذاری نمونه‌ها و نحوه‌ی قرارگیری تغییر مکان‌سنج‌ها (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 جدول ۷ آورده شده در نظر گرفته شده و اعمال گردید.

1 Linear variable differential transformer (LVDT)  
2 Data logger





شکل ۱۰. تصویر شماتیک سیستم بارگذاری

Fig. 10. Schematic figure of the loading system



شکل ۱۱. نمونه در حال آماده‌سازی جهت بارگذاری  
Fig. 11. Sample being prepared for loading

چیدمان تغییر مکان‌سنج‌ها و اعمال بار می‌باشد. به مجموعه‌ی چیدمان تغییر مکان‌سنج‌ها و نحوه‌ی 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.

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.

### 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)

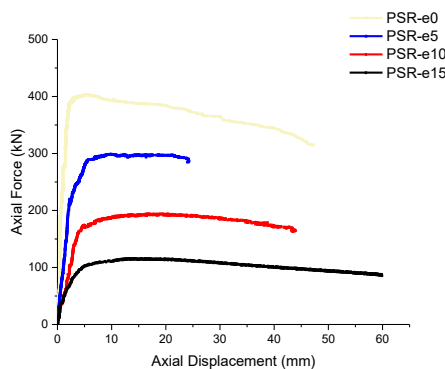
### ۳-۱ نمودارهای نیرو-تغییر مکان برای تمامی نمونه‌ها

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.

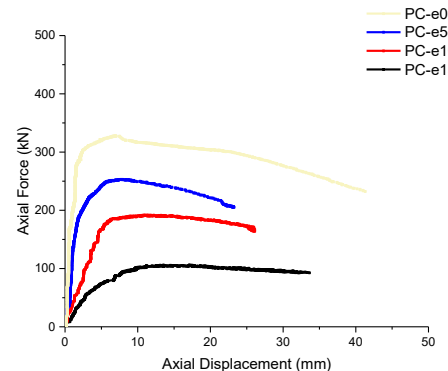
با توجه به نمودارهای فوق مشخص است با افزایش خروج از مرکزیت به مقدار بسیار زیادی از ظرفیت باربری نمونه‌ها کاسته می‌شود. در حقیقت قسمتی از ظرفیت مقطع صرف تحمل لنگر خمشی شده و از سویی دیگر با قرارگیری بتن در کشش، اثر محصورشدگی از بین می‌رود که این موضوع در قسمت‌های بعد بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است. با 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.

همچنین می‌توان ظرفیت باربری را برای نمونه‌های دارای هسته‌ی

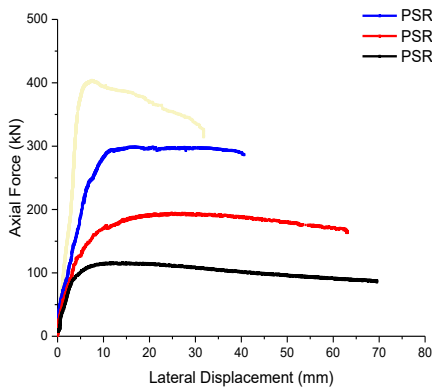
امکان‌پذیر نیست و لذا در بار فشاری خالص تا قبل از رسیدن به بار بحرانی تغییر مکان‌های جانبی کوچکی مشهود است. با رسیدن بار به مقدار بار بحرانی کمانش در ستون اتفاق افتاده و ستون متحمل تغییر شکل‌های بزرگ می‌شود. در سایر موارد بارگذاری با توجه به حضور لنگر خمشی، تغییر شکل جانبی و محوری به صورت هم‌زمان اتفاق 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.



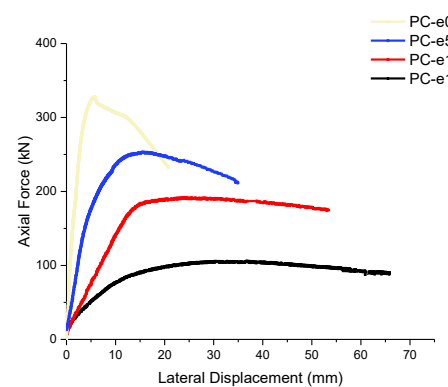
شکل ۱۳. نمودار نیرو-تغییر محوری برای نمونه‌های پر شده با بتن الیافی  
Fig. 13. Axial displacement-force diagram for samples filled with fiber reinforced concrete



شکل ۱۲. نمودار نیرو-تغییر محوری برای نمونه‌های پر شده با بتن ساده  
Fig. 12. Axial displacement-force diagram for samples filled with plain concrete



شکل ۱۵. نمودار نیرو-تغییر جانبی برای نمونه‌های پر شده با بتن ساده  
Fig. 15. Lateral displacement-force diagram for samples filled with fiber reinforced concrete



شکل ۱۴. نمودار نیرو-تغییر محوری برای نمونه‌های پر شده با بتن الیافی  
Fig. 14. Lateral displacement-force diagram for samples filled with plain concrete

جدول ۸. مقایسه‌ی ظرفیت باربری نمونه‌ها تحت بارگذاری‌های متفاوت

Table 8. Comparison of bearing capacity of samples under different loadings

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

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

Table 9. Comparison of bearing capacity of specimens with different types of concrete cores under the same load

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

دوسر مفصل می‌باشند.

نمودارهای نیرو - تغییر مکان حاصل از آزمایش به صورت 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 به صورت 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 این آیین‌نامه معادل‌سازی رفتار دوخطی بر اساس نمودار نیرو - تغییر مکان واقعی سیستم به صورتی که در زیر آورده شده مشروح کرده است:

بتنی ساده و هسته‌ی بتنی الیافی تحت یک بارگذاری مشخص مورد مقایسه قرار داد. شایان‌ذکر 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.

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 به‌غیراز نمونه‌های مربوط به این پژوهش، دارای شرایط تکیه‌گاهی

جدول ۱۰. مقایسه‌ی ظرفیت باربری ستون‌های CFT با مقاطع مختلف

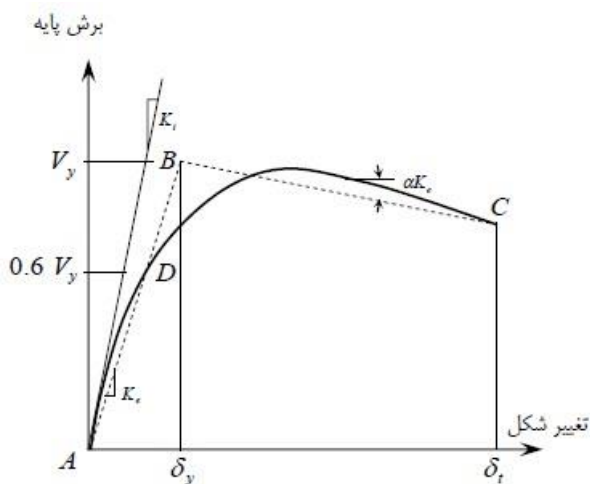
Table 10. Comparison of bearing capacity of CFT columns with different sections

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	۳۰.۸	۰	۹۴۱
	ستون کوتاه	۱۴۹	۲/۹۶	۴۰/۵	۳۰.۸	۰	۱۰۸۰
	ستون کوتاه	۱۴۹	۲/۹۶	۷۷	۳۰.۸	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
شش‌ضلعی [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
هشت‌ضلعی [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 بزرگ‌تر ۷۵=قطر کوچک‌تر	۶/۸۸	۵۵/۱۷	۴۳۱/۴	۰	۹۴۹/۸۵
	۱۵۰۰	۲۵۰=قطر بزرگ‌تر ۱۲۵=قطر کوچک‌تر	۶/۳	۴۷/۵	۳۸۸/۹	۰	۷۶۳/۹۳
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
شش‌ضلعی	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.

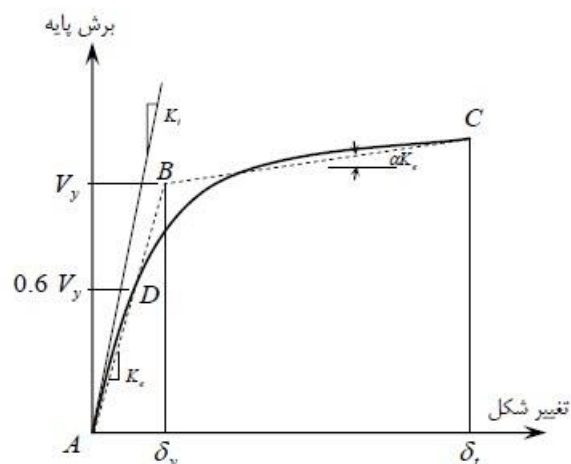
زیر مدل رفتار دوخطی برابر سطح زیر منحنی رفتار غیرخطی باشد و همچنین طول پاره‌خط AD برابر  $0.7AB$  باشد. در آن صورت نیروی مربوط به نقطه‌ی B، برش تسلیم مؤثر ( $V_y$ ) بوده و برای برش پایه‌ی  $0.7Vy$  در منحنی رفتار غیرخطی، مدول سکانت بیان‌گر سختی جانبی مؤثر ( $Ke$ ) می‌شود. در مدل ساده‌شده باید دقت

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 ( $V_y$ ) باید با یک مدل رفتار دوخطی ساده جایگزین شود. برای ساده‌سازی مدل رفتار غیرخطی، نقطه‌ی B باید چنان انتخاب شود که سطح



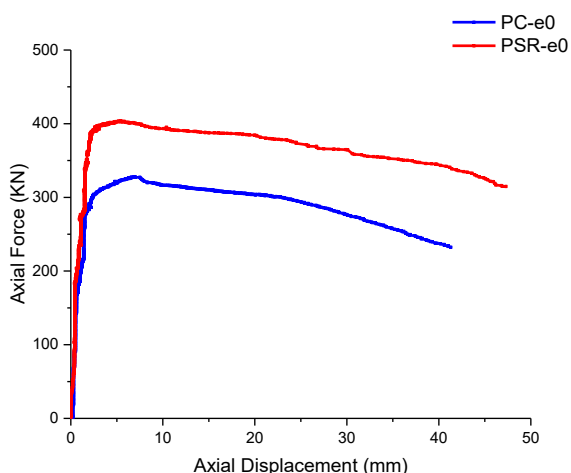
شکل ۱۷. منحنی ساده‌شده نیرو - تغییر مکان برای  $\alpha < 0$

Fig. 17. Simplified force - displacement curve for  $\alpha < 0$



شکل ۱۶. منحنی ساده‌شده نیرو - تغییر مکان برای  $\alpha > 0$

Fig. 16. Simplified force - displacement curve for  $\alpha > 0$



شکل ۱۸. نمودار نیرو-تغییر مکان محوری برای نمونه‌ها

Fig. 18. Axial displacement force-diagram for specimens

وقوع کمانش را تصریح می‌کند زیرا با رسیدن به مقدار بار مشخصی به یک باره تغییر شکل‌های ایجادشده در نمونه افزایش یافته است. در شکل ۱۸ نمودار نیرو - تغییر مکان محوری برای نمونه‌های دارای هسته‌ی بتنی ساده و الیافی آورده شده است.

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

شود که  $V_y$  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].

لازم به توضیح است که مطالب بیان شده برای بار جانبی می‌باشد اما موارد ذکرشده به تمام بارگذاری‌ها قابل‌تعمیم 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

کمانش در بار کششی، می‌توان از حداکثر ظرفیت فولاد در کشش استفاده کرد. همچنین قرارگیری فولاد در انتهایی‌ترین 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.

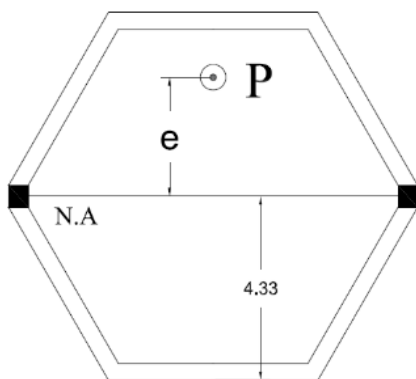
با توجه به توضیحات فوق در ادامه‌ی محاسبات مربوط به هسته‌ی مرکزی برای مقطع نمونه‌ها آورده شده است. با توجه به شکل مقطع و خروج از مرکزیت یک‌طرفه مطابق با شکل ۱۹ می‌توان نوشت:

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

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

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

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



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

Fig. 19. How to consider the axial load to obtain the cross-sectional core

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:

$$N_0 = A_s f_y + A_c f_c'$$

$$A_c = 58.59 \text{ cm}^2 \quad (1)$$

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

حال برای نمونه ساده می‌توان نوشت:

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

نیرو نهایی حاصل از آزمایش برای نمونه ی ساده برابر با ۳۲۷/۷ کیلو نیوتن حاصل شده بود. اختلاف این دو عدد حدوداً ۱۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد که مقدار بسیار قابل توجهی است.

برای نمونه های الیافی می‌توان نوشت:

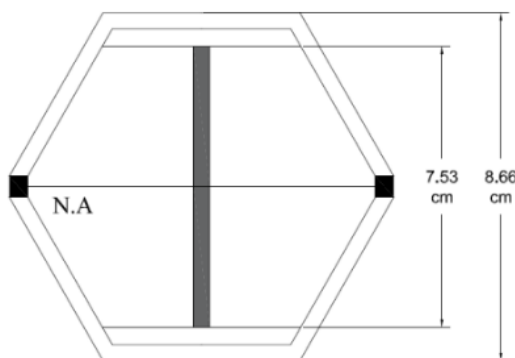
$$N = 1200 \times 245 + 5895 \times 34.1 = 493791.9 \text{ (N)} = 493.79 \text{ (kN)}$$

نیرو نهایی حاصل از آزمایش برای نمونه ی ساده برابر با ۴۰۳/۷ حاصل شده بود. اختلاف این دو عدد حدوداً ۹۰ 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

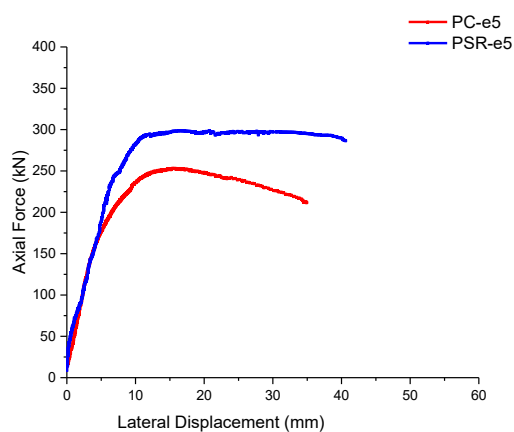
با ایجاد لنگر خمشی در مقطع، ممکن است قسمتی از مقطع ستون به کشش بیفتد. به بیان دقیق‌تر با استفاده از علم مقاومت مصالح می‌توان گفت در صورتی که نیروی فشاری دارای خروج از مرکزیت در داخل هسته‌ی مرکزی مقطع قرار بگیرد تمامی نقاط مقطع در فشار می‌باشند و در صورت قرارگیری بار فشاری در خارج از این محدوده، قطعاً 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





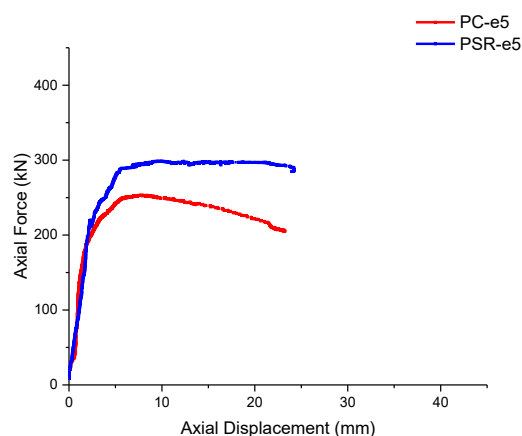
شکل ۲۰. هسته‌ی مرکزی مقطع نمونه‌ها برای خروج از مرکزیت یک‌طرفه در راستای  $y$

Fig. 20. The central core of the cross section of the specimens to deviate unilaterally from the center in the  $y$  direction



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

Fig. 22. Lateral displacement-force diagram under compressive load with an eccentricity of 5 cm



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

Fig. 21. Axial displacement-force diagram under compressive load with an eccentricity of 5 cm

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.

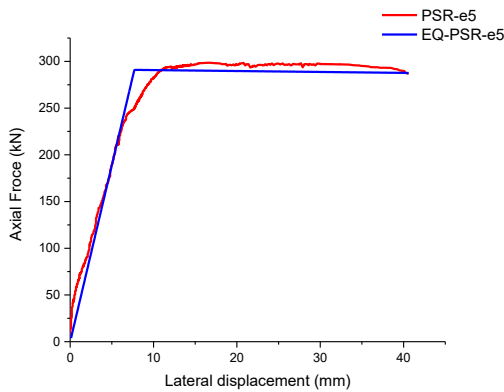
$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{P.e.y}{I}$$

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

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

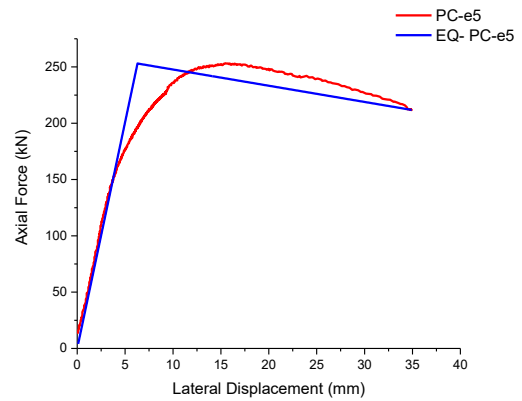
با توجه به محاسبات فوق مشخص است که برای خروج از مرکزیت بار در راستای  $y$ ، حداکثر میزان خروج از مرکزیت برای اینکه مقطع در هیچ قسمتی به کشش نیفتد برابر با ۳/۷۶۵ سانتی‌متر می‌باشد. در حقیقت هسته‌ی مرکزی مقطع نمونه‌ها برای خروج از مرکزیت یک‌طرفه در راستای  $y$  همانند شکل ۲۰ می‌باشد.

با توجه به مطالب عنوان‌شده در بالا می‌توان این نتیجه‌گیری را



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

Fig. 24. Simplified two-line model for a sample filled with fiber reinforced concrete under compressive load with a centrifugation of 5 cm



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

Fig. 23. Simplified two-line model for a sample filled with plain concrete under compressive load with an eccentricity of 5 cm

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

Table 11. Comparison of energy absorption in compressive loading with 5 cm eccentricity

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

موردتوجه 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  $\Delta_u$  و  $\Delta_y$  به ترتیب برابر با تغییر مکان متناظر با تنش تسلیم و تنش نهایی می‌باشد. با توجه به مدل ساده‌سازی شده‌ی دوخطی به راحتی  $\Delta_y$  قابل تعیین است.  $\Delta_u$  نیز تغییر مکان نهایی نمونه است که در رابطه با آن توضیحاتی ارائه گردید.

برای نمونه‌ی پر شده با بتن ساده:

PC-e5:

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

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

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

۳-۳-۱- محاسبه‌ی انرژی جذب شده 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 جذب شده می‌باشد. در حقیقت برای محاسبه‌ی انرژی جذب شده به منحنی‌های چرخه‌ای نیاز است اما سطح زیر نمودار در جهت رفت بارگذاری نیز شاخصی از جذب انرژی را مشخص می‌کند.

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 افقی مشاهده نمی‌گردد، اما برخلاف نمونه‌ی پر شده با بتن الیافی، در 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.

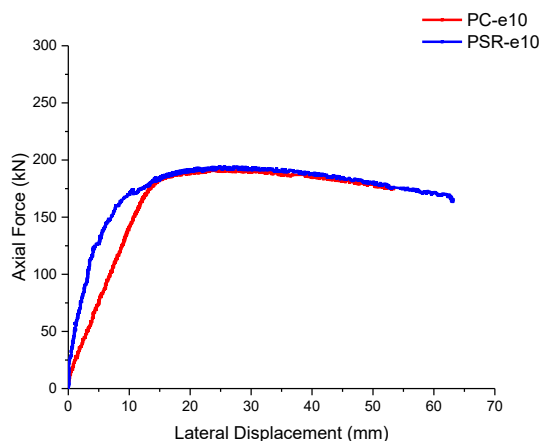
۳-۳-۲- محاسبه‌ی ضریب شکل‌پذیری

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که امروزه در طراحی سازه‌ها

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

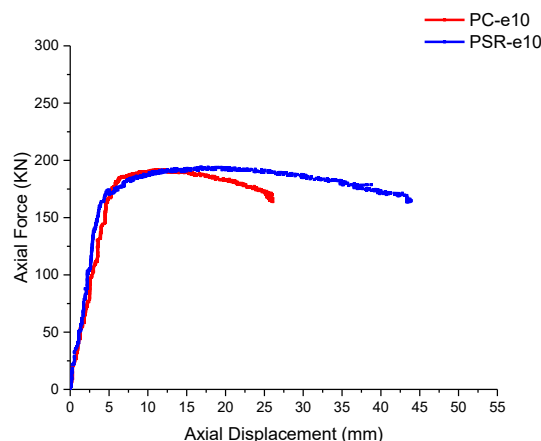
Table 12. Effective stiffness of specimens under compressive load with a centrifugal displacement of 5 cm

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



شکل ۲۶. نمودار نیرو-تغییر مکان جانبی تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر

Fig. 26. Lateral displacement-force diagram under compressive load with an eccentricity of 10 cm



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

Fig. 25. Axial displacement-force diagram under compressive load with an eccentricity of 10 cm

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.

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

برای نمونه‌ی پر شده با بتن ساده:

$PSR - e5$ :

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

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

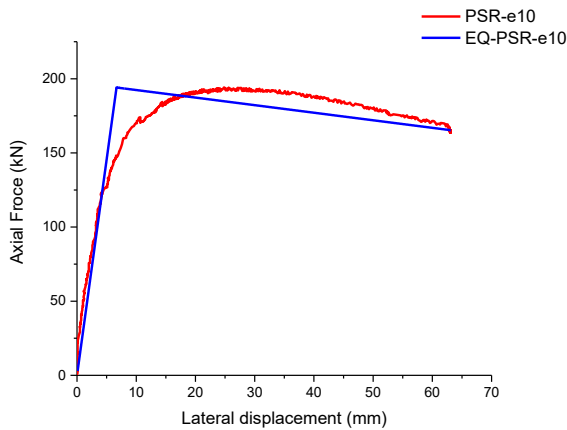
$$\mu = \frac{40.6}{7.69} = 5.28$$

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 ذکرشده برابر با مدول سکانت در  $0/6$  نیروی تسلیم می‌باشد. بر این اساس سختی مؤثر به راحتی قابل محاسبه می‌باشد که نتایج آن در جدول ۱۲ آورده شده است.

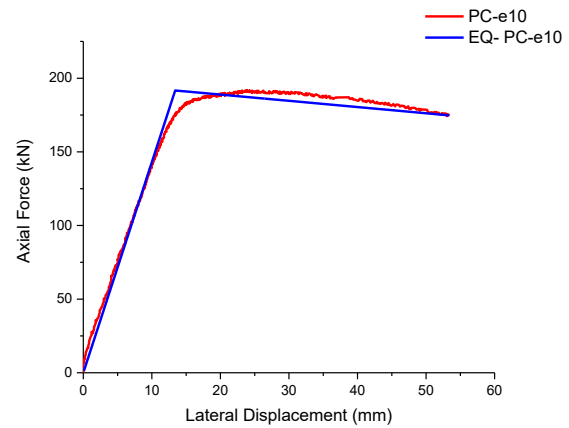
۳-۴- بررسی نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر

خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر لنگر قابل توجهی به مقطع اعمال می‌کند و کشش ایجادشده در مقطع بزرگ است لذا انتظار می‌رود



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

Fig. 28. Simplified two-line model for a sample filled with fiber reinforced concrete under compressive load with a centrifugation of 10 cm



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

Fig. 27. Simplified two-line model for a sample filled with plain concrete under compressive load with an eccentricity of 10 cm

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

Table 13. Comparison of energy absorption in compressive loading with 10 cm eccentricity

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

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

مرکزیت ۱۰ و نیروی فشاری افزایش یافته 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.

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:

جدول ۱۴. سختی مؤثر نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۰ سانتی‌متر  
Table 14. Effective stiffness of specimens under compressive load with a centrifugation of 10 cm

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

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.

۳-۶- 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

شکل‌پذیری برای نمونه‌ی پر شده با بتن الیافی افزایش قابل توجهی 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.

۳-۴-۵- بررسی نمونه‌ها تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر

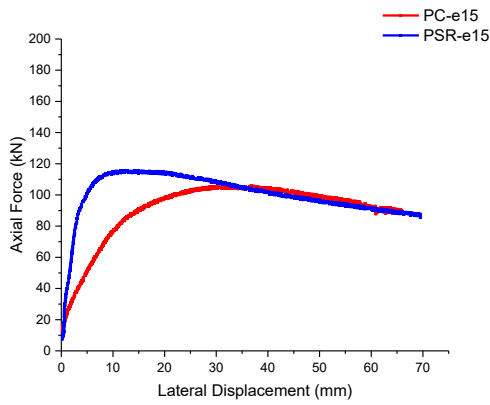
در این بارگذاری نمودارها در شکل‌های ۲۹ و ۳۰ و مدل ساده‌سازی شده نیز در شکل‌های ۳۱ و ۳۲ آورده شده است.

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.

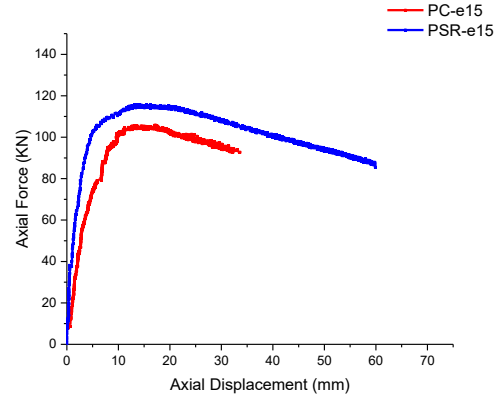
۳-۵-۲- محاسبه‌ی ضریب شکل‌پذیری برای بارگذاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر

ضریب شکل‌پذیری برای نمونه‌های تحت بار فشاری با خروج از



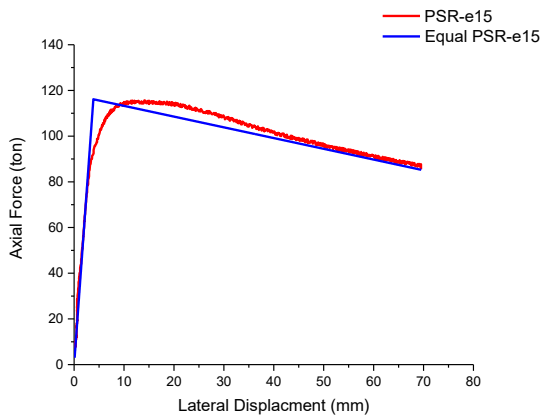
شکل ۳۰. نمودار نیرو-تغییر مکان جانبی تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر

Fig. 30. Lateral displacement-force diagram under compressive load with an eccentricity of 15 cm



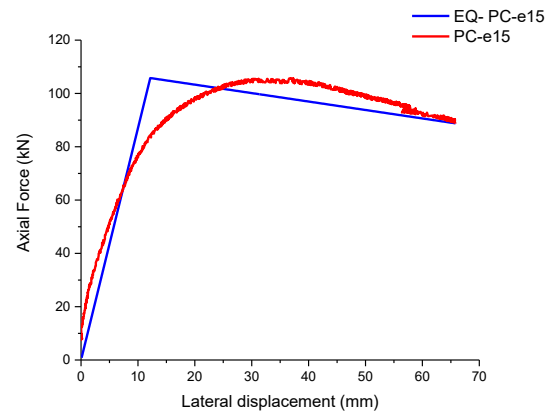
شکل ۲۹. نمودار نیرو-تغییر مکان محوری تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر

Fig. 29. Axial displacement-force diagram under compressive load with an eccentricity of 15 cm



شکل ۳۲. مدل ساده‌سازی شده‌ی دوخطی برای نمونه‌ی پر شده با بتن الیافی تحت بار فشاری با خروج از مرکزیت ۱۵ سانتی‌متر

Fig. 32. Simplified two-line model for a sample filled with fiber reinforced concrete under a compressive load with an eccentricity of 15 cm



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

Fig. 31. Simplified two-line model for a sample filled with plain concrete under compressive load with an eccentricity of 15 cm

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

Table 15. Comparison of energy absorption in compressive load with 15 cm eccentricity

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

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

Table 16. Effective stiffness of specimens under compressive load with a deviation of 15 cm from the center

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





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

Fig. 34. Samples filled with fiber reinforced concrete after loading with eccentricity of 5, 10 and 15 cm



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

Fig. 33. Samples filled with plain and fiber reinforced concrete after loading with central force

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

Table 17. Energy absorption, ductility coefficient, effective stiffness for samples under load with decentralization

نمونه‌ها	$\mu$	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

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 به صورت فولاد محاط شده در بتن و چه به صورت 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 10-AISC360 نیز آمده است. روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه به صورت عمومی بوده و برای تمامی مقاطع

از هم‌پاشیدگی رؤیت شد. در شکل ۳۳ و ۳۴ نمونه‌ها پس از بارگذاری نشان داده شده است.

۳-۷- خلاصه نتایج به دست آمده برای جذب انرژی، ضریب شکل‌پذیری و جذب انرژی

در این بخش نتایج به دست آمده برای نمونه‌ها تحت بارگذاری‌های متفاوت در جدول ۱۷ به صورت خلاصه آورده شده است.

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

هدف از انجام پژوهش‌های علمی ایجاد بسترهای مناسب

جدول ۱۸. مقایسه بار به دست آمده از آیین نامه و آزمایش برای نمونه های ساده  
Table 18. Compare the load obtained from the code and test for simple samples

نمونه ها	بار حداکثر بر اساس آیین نامه (کیلو نیوتن)	بار حداکثر بر اساس نتایج آزمایش (کیلو نیوتن)	درصد کاهش ظرفیت بار آیین نامه 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

معنای دیگر نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی بر یکدیگر تأثیرگذار هستند. برای در نظرگیری این اندرکنش نیاز به منحنی نیروی محوری- لنگر خمشی<sup>۱</sup> می باشد؛ اما در آیین نامه سازه های فولادی رویکرد متفاوتی در این رابطه اتخاذ شده است. در آیین نامه میزان لنگر خمشی قابل تحمل بدون توجه به بار فشاری موجود و تنها بر اساس مشخصات مقطع محاسبه می شود. همچنین رابطه ی کنترلی ارائه شده برای در نظرگیری اثر هم زمان نیروی فشاری و لنگر خمشی که در بند ۱۰-۲-۷-۲-۱۰ ارائه شده است نیز اندرکنش بارها را در نظر نمی گیرد [۲۳]. در حقیقت مقدار بار فشاری و لنگر خمشی به صورت مجزا با مقادیر مجاز مقایسه می گردد. به نظر می رسد این دیدگاه مقداری محافظه کارانه می باشد. همچنین لازم به ذکر است علاوه بر موارد فوق، ضرایب کاهش مقاومت نیز سبب افزایش اختلاف نتایج می گردد. در ادامه به بررسی دقیق تر بند ذکر شده پرداخته شده و ناحیه ی در نظر گرفته نشده توسط آیین نامه به صورت شماتیک در شکل ۳۵ نشان داده شده است.

بر اساس بند ۱۰-۲-۷-۲-۱۰ می توان نوشت:

$$\frac{P_u}{P_c} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{ux}}{M_{cx}} + \frac{M_{uy}}{M_{cy}} \right) \leq 1$$

$$P_c = c_1, P_u = x$$

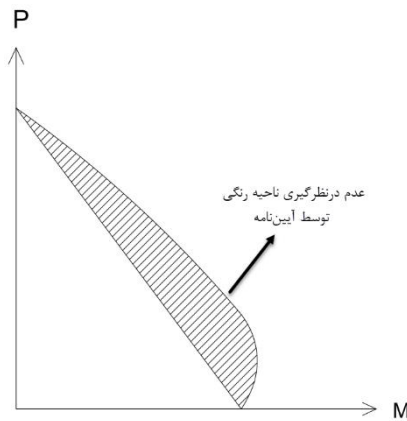
$$\frac{9}{8} M_{cx} = c_2, M_{ux}$$

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

1 P-M Interaction

قابل کاربرد است. تنها، پارامتری که در آیین نامه با  $C_p$  مشخص شده است و برای در نظرگیری محصورشدگی بتن می باشد برای دو مقطع دایره ای و مستطیلی ارائه شده است که برای سایر مقاطع با توجه به میزان شباهت مقطع به یکی از این دو مقطع و قضاوت مهندسی می توان عددی را بین ۰/۸۵ و ۰/۹۵ در نظر گرفت. با توجه به توضیحات فوق می توان بر اساس آیین نامه ظرفیت باربری نمونه ها را هم در حالت بار فشاری خالص و هم اثر هم زمان لنگر خمشی و نیروی محوری فشاری به دست آورد. در این بخش ظرفیت نمونه ها با استفاده از بندهای ۱۰-۲-۸-۲-۱۰، ۱۰-۲-۸-۲-۱۰، ۱۰-۲-۸-۲-۱۰ و ۱۰-۲-۸-۲-۱۰-۵ و همچنین جداول ۱۰-۸-۲-۱۰ و ۱۰-۸-۲-۱۰ برای تمامی نمونه ها محاسبه گردیده و با نتایج آزمایش مقایسه شده است. نتایج و مقایسه در جدول ۱۸ آورده شده است.

همان طور که مشخص است اختلاف نتایج به دست آمده از آیین نامه و آزمایش بسیار زیاد می باشد. به نظر می رسد حداقل دو پارامتر به طور مستقیم در این اختلاف نقش ایفا می کند. اولین پارامتر که می تواند تأثیر قابل توجهی در نتایج داشته باشد تفاوت رفتار فولاد در آیین نامه و واقعیت می باشد. آیین نامه رفتار فولاد را به صورت دوخطی در نظر گرفته و بیشترین تنش آن را برابر با تنش تسلیم در نظر می گیرد؛ اما با توجه به جدول ۲ مشخص است که میانگین تنش نهایی برای فولاد حدوداً ۱/۴۸ برابر تنش تسلیم میانگین آن می باشد. دومین پارامتری که می توان در جهت تفاوت نتایج به آن اشاره کرد بحث مربوط به نحوه ی در نظرگیری اندرکنش نیروی محوری- لنگر خمشی می باشد. ستون های CFT همانند ستون های بتن مسلح عمل می کنند، به



شکل ۳۵. شکل شمانیک ناحیه در نظر گرفته شده توسط آیین نامه و ناحیه‌ی دقیق بر اساس اندرکنش نیروی فشاری - لنگر خمشی

Fig. 35. Schematic diagram of the area considered by the code and the exact area based on the interaction of the compressive force of the flexural anchor

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. به طور 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

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

### ۳- 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 معمول کارهای مهندسی و چهار نمونه دارای هسته‌ای با بتن الیافی و با مقاومتی 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

- 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. Dundar, 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

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. باین‌حال 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.

#### ۴- 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 ( $kN$ )
$\Delta_u$	تغییر مکان نهایی نمونه‌ها ( $mm$ )
$\Delta_y$	تغییر مکان متناظر با نیروی تسلیم ( $mm$ )
$\mu$	ضریب شکل‌پذیری نمونه
$\alpha$	شیب قسمت دوم نمودار ساده‌سازی شده‌ی دوخطی ( $N/mm$ )

#### مراجع

- [1] L.-H. Han, G.-H. Yao, Influence of concrete compaction on the strength of concrete-filled steel RHS columns,

- [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.
- 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.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Mahdavi, M. Salimi, M. Ghalehnovi, *Experimental investigation on hexagonal steel tubular columns filled with plain and fiber reinforced concrete under eccentric compression load*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(6) (2020) 1379-1404.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15365.5896](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15365.5896)



