

## بررسی رفتار ستون‌های مرکب دو لایه تحت اثر متقابل نیروی محوری و لنگر خمشی

محمد علی لطف‌اللهی یقین<sup>۱\*</sup> و مجتبی ضیائیون<sup>۲</sup>

### چکیده

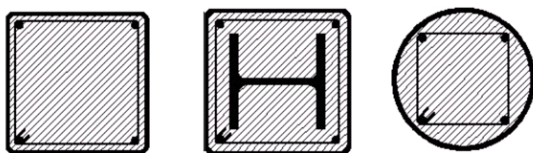
### اطلاعات مقاله

ستون‌های مرکب دولایه فولادی که با بتن پر می‌شوند از خانواده ستون‌های CFT به شمار می‌روند که از دو جداره فولادی با مقطع مربع یا گرد تشکیل شده و به صورت هم مرکز مونتاژ می‌شوند و بین دو جداره آن با بتن پر می‌گردد. ستون‌های مرکب دو لایه دارای مزایایی از قبیل عدم نیاز به قالب‌بندی برای بتن‌ریزی، حمل و مونتاژ سریع و حفاظت سطح بتن از آسیب می‌باشند. این ستون‌ها در سازه‌های فرا ساحلی، پایه پل‌هایی با دهانه‌های بزرگ، مجراهای هسته‌ای در نیروگاه‌ها مورد استفاده قرار گرفته و اخیراً نیز در اسکلت‌سازه‌های بلند مرتبه در ژاپن به کار رفته است. در مطالعه حاضر، رفتار این نوع جدید از ستون‌ها با استفاده از روش اجزا محدود و به کمک نرم‌افزار ABAQUS تحت نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی بررسی شده است. جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی اجزای محدود، نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی ستون‌های CFT با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده و از درستی مدل‌سازی، اطمینان حاصل شده است. در این تحقیق اثر پارامترهایی از قبیل مشخصات هندسی مقطع، لاغری ستون و مشخصات مقاومتی مصالح به کار رفته در ستون‌های مرکب دولایه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که این ستون‌ها نسبت به ستون‌های CFT دارای ظرفیت تحمل بار بیشتری بوده و نسبت به ستون‌های CFT سبک‌تر و نسبت به ستون‌های فولادی و بتنی اقتصادی‌تر می‌باشد.

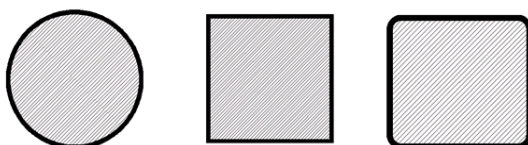
### واژگان کلیدی:

محصورشدگی بتن،  
ستون مرکب دولایه،  
ظرفیت باربری نهایی،  
مقاومت فشاری بتن،  
شکل‌پذیری،  
لاغری.

### ۱- مقدمه



شکل ۱- ستون‌های SRC



شکل ۲- ستون‌های CFT

رواج استفاده از ستون‌های مرکب به سال‌های خیلی دور بر می‌گردد. بسته به نحوه ترکیب دو ماده فولاد و بتن، ستون‌های مرکب به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- ۱- ستون‌های بتنی مسلح شده با میلگرد SRC (شکل ۱)
- ۲- ستون‌های فولادی پر شده با بتن CFT (شکل ۲) [۱].

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول lotfollahi@tabrizu.ac.ir

۱. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز  
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد، واحد مراغه

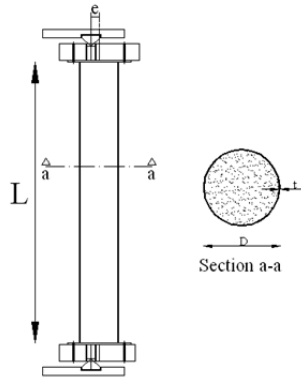
و به‌صورت هم مرکز مونتاژ می‌گردد و بین این دو جداره با بتن پر می‌گردد. در این نوع از ستون‌ها اثر مهم بتن این است که کمانش موضعی جداره فولادی را به تأخیر می‌اندازد و خود بتن در حالت محصور شدگی قادر است کرنش‌ها و تنش‌های بالاتری را نسبت به حالت غیر محصور شدگی تحمل کند. از مزایای ستون‌های مرکب دو لایه نسبت به ستون‌های مرکب تک لایه می‌توان به وزن کمتر ستون‌های مرکب دو لایه، شکل‌پذیری بیشتر و تحمل نیروهای محوری بیشتر اشاره کرد. آنچه در اکثر مسائل عملی برای یک عضو فشاری بتن‌آرمه اتفاق می‌افتد، وجود همزمان بار محوری و لنگر خمشی است. در قاب‌های بتن‌آرمه با بتن‌ریزی درجا حتی اگر دهانه‌های طرفین یک ستون مساوی باشند، به‌دلیل تغییرات بار زنده، لنگر خمشی در ستون ایجاد خواهد شد. حتی در حالت استفاده از ستون‌های پیش‌ساخته نیز بارهای افقی ناشی از افت و خیزش تیرها، باعث ایجاد لنگر در ستون می‌شوند. با توجه به این واقعیات است که آیین‌نامه‌ها حتی در حالتی که به‌صورت تئوری بار محوری خالص بر یک ستون بتن‌آرمه وارد می‌شود، اعمال یک لنگر خمشی، به‌صورت منظورکردن یک حداقل خروج از مرکزیت در کنار بار محوری لازم می‌دانند [۶]. با توجه به این‌که بیشتر تحقیقات انجام یافته در مورد ستون‌های مرکب تنها مربوط به بررسی رفتار این ستون‌ها تحت بار محوری خالص می‌باشد لذا بررسی رفتار ستون‌های مرکب دو لایه تحت اثر بار محوری و لنگر خمشی برای بررسی رفتار نزدیک به واقعیت این ستون‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

## ۲- روند مطالعه

در سال‌های اخیر به‌دلیل پیشرفت‌های چشمگیر صورت‌گرفته در زمینه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی المان محدود، این زمینه فراهم شده تا کارهای آزمایشگاهی به‌راحتی در محیط نرم‌افزارهای تخصصی

ابتدایی‌ترین مطالعاتی که بر روی ستون‌های مرکب انجام گرفته توسط (Burr) در سال ۱۹۱۲ بوده، پس از آن افراد بسیاری در این زمینه مطالعات و آزمایشات زیادی را انجام داده‌اند و به نتایج تئوری متفاوتی دست یافته‌اند. تقویت ستون‌ها با جداره فولادی با استفاده از ورق به‌طور تجربی اولین بار در سال ۱۹۹۰ انجام گرفت و آزمایشات افزایش ظرفیت باربری و لرزه‌ای قابل‌توجهی را نشان داد بنابراین از این فناوری به‌طور گسترده، به‌ویژه در کاربری‌های لرزه‌ای استفاده می‌شود [۲]. در سال‌های اخیر مقالات زیادی در مورد تکنولوژی ستون‌های مرکب پر شده با بتن انتشار یافته است. نتایج نشان می‌دهد که در مورد ستون‌های مرکب پر شده با بتن با مقاومت بالا (HSC) به تحقیقات آزمایشگاهی بیشتری احتیاج می‌باشد [۳]. در میان تحقیقات آزمایشگاهی و عددی، جانسون (Johunsson) و گیلنافت (Gylltoft) وزگیش (Zeghiche) و چا اوی (Chaoui) نشان دادند که امکان استفاده از بتن با مقاومت بالا و ایجاد شکل‌پذیری سازه‌ای در ستون وجود دارد. اگر ستون تحت نیرویی با خروج از مرکزیت قرار گیرد واضح است مقدار کرنش سطح مقطع ستون افزایش یافته و افزایش انحنا به مقاومت بتن و تاثیرات محصور شدگی خسارت وارد می‌کند [۳]. اوشی (Oshea) و بریج (Bridge) در سال ۲۰۰۰ میلادی نشان دادند که افزایش خروج از مرکزیت نیرو، شکل‌پذیری ستون‌های کوتاه را بهبود می‌بخشد. البته باید این نظریه‌ها در مورد ستون‌های لاغر تقویت می‌شد و تحقیقات زیادی در مورد ستون‌های CFT با مصالحی کارا، که در مورد کمانش ستون‌های سراسری تمرکز کند وجود نداشت [۴]. هان (Han) در سال ۲۰۰۰ میلادی مطالعاتی در مورد ستون‌های مرکب با نسبت لاغری بالا اما با مقاومت نرمال (NSC) انجام داده است و نشان داده است که مقاومت بتن تاثیر بسیار کمی بر ظرفیت نهایی این نوع از ستون‌ها می‌گذارد [۵]. ستون‌های مرکب دو لایه CFDST نیز از خانواده ستون‌های مرکب تک لایه CFT می‌باشد که از دو جداره فولادی گرد یا مربع تشکیل شده

در جدول ۱ مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ستون‌های مورد آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۳- نمایی از ستون‌های آزمایشگاهی

شبیه‌سازی شود. در این تحقیق به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی نرم‌افزاری، نتایج با کار آزمایشگاهی J.M.Portoles و همکارانش در سال 2010 مقایسه شد [۳]. پس از حصول اطمینان از صحت مدل‌سازی از جمله بارگذاری، شرایط تکیه‌گاهی، مصالح و اندرکنش مصالح اقدام به طراحی و مدل‌سازی ستون‌های مرکب دو لایه و بررسی رفتار این ستون‌ها تحت نیروی محوری و لنگر خمشی گردید. شش نمونه آزمایشگاهی در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شد. شکل مقطع تمامی این شش ستون، گرد و قطر آن‌ها برابر 10cm می‌باشد (شکل ۳).

جدول ۱- مشخصات ستون‌های مورد آزمایش [۳]

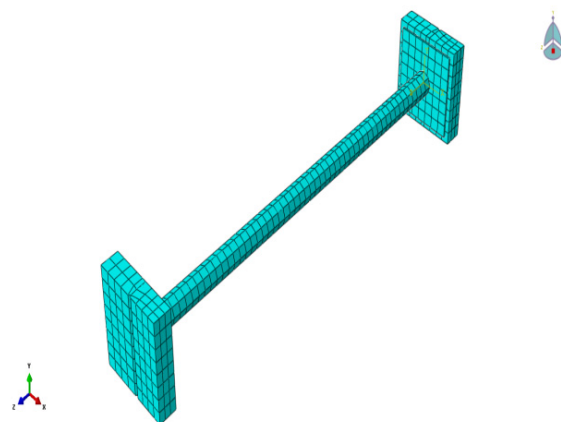
Id	D(cm)	t(cm)	e(cm)	$f_{yk}(kg/cm^2)$	$f_{ck}(kg/cm^2)$
C1	10	0.3	2	3220	327
C2	10	0.3	5	3220	345
C3	10	0.3	2	3220	657
C4	10	0.3	5	3220	716
C5	10	0.3	2	3220	956
C6	10	0.3	5	3220	430

### ۳- مدل‌سازی

#### ۳-۱- مدل‌سازی بتن

برای مدل‌سازی بتن در نرم‌افزار ABAQUS از مدل بتن آسیب دیده پلاستیک<sup>۱</sup> استفاده گردید. این مدل در محیط نرم‌افزار ABAQUS جهت مدل‌کردن بتن و دیگر مواد شبه شکننده در انواع سازه‌ها (تیر، خرپا، پوسته و اجسام توپر) تعبیه شده است. این مدل از مفهوم آسیب‌دیدگی همسانگرد در محدوده خطی و با ترکیب کشش ایزوتروپ و فشار پلاستیک جهت نمایش رفتار غیرخطی بتن استفاده می‌کند. همچنین این مدل قادر به مدل‌سازی شرایط بارگذاری دلخواه مانند بارگذاری چرخه‌ای بوده و کاهش سختی الاستیک با در نظر گرفتن کرنش پلاستیک هم در کشش و هم در فشار توجیه می‌گردد. مدل معرفی شده برای بتن در حالت آسیب‌دیده یک مدل پیوسته بر اساس رفتار پلاستیک بوده و در مکانیزم اصلی

در جدول شماره ۱ ستون‌های اول تا ششم به ترتیب نشان‌دهنده شماره ستون، قطر ستون، ضخامت جداره فولادی، خروج از مرکزیت نیرو، حد تسلیم فولاد و مقاومت فشاری بتن می‌باشد. در شکل ۴ نمایی از یک ستون شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار مشاهده می‌شود.



شکل ۴- نمایی از ستون‌های مدل‌سازی شده در نرم‌افزار

<sup>1</sup> Concrete Damaged Plasticity

بتن را ارضاء می‌کند. در بارگذاری‌های دوره‌ای، رفتارهای کاهندگی بسیار پیچیده‌تر می‌شود که شامل باز و بسته شدن ترک‌های مویی که قبلاً تشکیل شده‌اند و نیز اندر کنش‌ها آن‌ها با یکدیگر می‌باشد. به‌طور تجربی مشاهده شده‌است که با عوض شدن جهت بارگذاری مقداری به سختی الاستیک افزوده می‌شود که این اثر به‌عنوان تاثیر یک سویه شناخته می‌شود که یک خصوصیت مهم رفتار بتن در حالت بارگذاری رفت و برگشت می‌باشد. اثر این رفتار زمانی نمود بیشتری دارد که بارگذاری از حالت کششی به فشاری تبدیل می‌شود که باعث بسته شدن ترک‌ها و بازیابی سختی فشاری می‌گردد. در این مدل از مدول الاستیسیته کاهش یافته استفاده می‌شود. مشخصات اساسی مصالح بتن مطابق جدول ۲ به نرم‌افزار معرفی می‌گردید.

جدول ۲- مشخصات بتن

$\gamma_c = 2400 (\text{kg/m}^3)$	$\Psi = 36^\circ$
$E_c = 3220\sqrt{f'_c} + 6900 (\text{Mpa})$	$\varepsilon = 0.1$
$\nu = 0.2$	$K_c = 0.666$

### ۳-۳- مدل اندرکنش بین فولاد و بتن

یکی از نکات مهم و بحث برانگیز در مورد ستون‌های مرکب وجود تماس بین فولاد و بتن می‌باشد. هنگامی که ستون‌های مرکب به‌طور گسترده در ساختمان‌ها و پل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند موضوع انتقال نیرو بین فولاد و بتن مورد توجه ویژه قرار گرفت. در این ستون‌ها انتقال نیرو بین فولاد و بتن از طریق تماس بین این دو مصالح صورت می‌گیرد و عملکرد آن در تعیین رفتار ستون بسیار تاثیرگذار است. پارامترهای به‌کار رفته برای اعمال تماس بین فولاد و بتن به‌شرح زیر می‌باشد.

۱- رفتار نرمال (تماس سخت): با در نظر گرفتن تماس سخت، نفوذ سطح بتن به سطح فولاد در محل‌های مقید شده به حداقل می‌رسد و اجازه انتقال تنش کششی را در طول بخش اندرکنش نمی‌دهد. از سوی دیگر تماس بین فولاد و بتن صفحه به صفحه در نظر گرفته شده‌است.

خرابی در این مدل ترک‌های ناشی از کشش و خرد شدگی در قسمت فشاری می‌باشد. در مدل مذکور فرض می‌شود که پاسخ به کشش و فشار تک محوره منفی تنش کرنش تا نقطه تنش، خرابی به‌صورت خطی تغییر می‌کند که این تنش با شروع و گسترش ترک‌های ریز در بتن، متقارن می‌باشد. پس از عبور از نقطه مذکور، خرابی‌ها به‌صورت ترک‌های قابل مشاهده در می‌آیند که به‌صورت منحنی نرم‌شدگی در فضای تنش-کرنش نمایش داده می‌شوند. تحت فشار تک‌محوره، پاسخ تا رسیدن به نقطه جاری‌شدگی به‌صورت الاستیک خواهد بود و در ناحیه پلاستیک رفتار عموماً به‌وسیله منحنی سخت‌شدگی بیان می‌شود که در نهایت با رسیدن به نقطه تنش نهایی منحنی‌ها به‌صورت منحنی نرم‌شدگی در می‌آیند. این مدل معرفی شده با وجود سادگی نسبی، خصوصیات اصلی

### ۳-۲- مدل سازی فولاد

در ستون‌های مدل‌سازی شده از فولاد S275JR آئین‌نامه فولاد اروپا استفاده شده‌است. در مدل‌سازی ستون‌های مورد آزمایش برای در نظر گرفتن خصوصیات پلاستیک فولاد، مدل سخت‌شدگی سینماتیکی در نظر گرفته شده‌است. در این مدل سطح تسلیم فولاد در فضای تنش جابجا می‌شود و به‌عنوان ایده اساسی مدل یاد شده مطرح می‌باشد. همچنین اثر بوشینگر<sup>۱</sup> در مدل سخت‌شدگی سینماتیکی لحاظ شده‌است. مشخصات فولاد مصرفی در تحقیق حاضر مطابق با جدول ۳ به نرم‌افزار معرفی گردید.

جدول ۳- مشخصات فولاد

$\gamma_s$	$7850 \text{ kg/m}^3$
$f_y$	$3220 \text{ kg/cm}^2$
$E_s$	$210000 \text{ kg/cm}^2$
$\nu$	0.3

<sup>1</sup> Bauschinger effect

افزایش مقاومت فشاری بتن، ظرفیت باربری نهایی ستون افزایش پیدا می‌کند اما در محدوده مقاومت فشاری 700 تا 900 کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع افزایش مقاومت فشاری بتن تاثیر چشمگیری بر افزایش ظرفیت باربری ستون‌ها ندارد. به‌خصوص زمانی که مقدار خروج از مرکزیت نیرو بیشتر باشد این اثر بسیار کمتر خواهد بود. لذا استفاده از بتن گران‌قیمت HSC در ستون‌های مرکب تک لایه به خصوص زمانی که مقدار خروج از مرکزیت نیرو زیاد باشد چندان توصیه نمی‌شود. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد مقدار حداکثر نیروی محوری فشاری محاسبه شده برای نمونه‌های C1 و C2 به ترتیب 8.01 و 10.3 درصد بیشتر از نمونه‌های آزمایشگاهی مشابه خود و برای نمونه‌هایی C3، C4، C5 و C6 به ترتیب 1.17، 1.4، 7.58 و 2.77 درصد کمتر از نمونه‌های آزمایشگاهی مشابه خود است. با مقایسه نتایج بدست‌آمده از مدل آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار ABAQUS اختلاف جزئی مشاهده می‌گردد که می‌تواند ناشی از خصوصیات یک مسئله با تقریب‌سازی عددی، ناکاملی‌های موجود در نمونه آزمایشگاهی، اختلاف در مقاومت اسمی و رفتار مصالح در عمل باشد.

جدول ۴- نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی

شماره نمونه	نیروی محوری		درصد خطا
	نیروی محوری حاصل از نتایج آزمایشگاهی (kg)	نیروی محوری حاصل از تحلیل عددی (kg)	
C1	18156	19612	8.01
C2	11749	12963	10.3
C3	24858	24569	-1.17
C4	15159	14146	-1.4
C5	27104	25047	-7.58
C6	15424	14996	-2.88

#### ۵- بررسی رفتار ستون‌های مرکب دو لایه

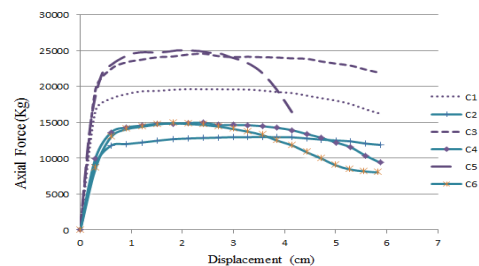
##### ۵-۱- معرفی نمونه‌ها

پس از اطمینان از صحت مدل‌سازی نرم‌افزاری، چهار عدد ستون مرکب دو لایه C7، C8، C9 و C10 در نرم‌افزار

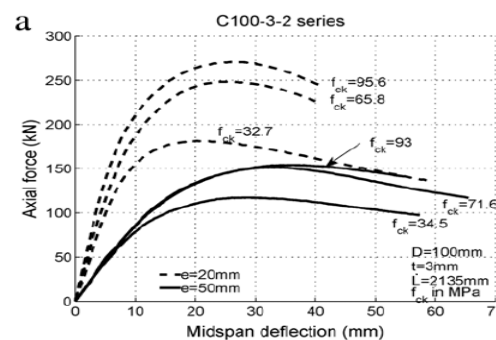
۲- رفتار تانژانت (پنالتی): در این بخش از مدل اصطکاکی کلمب استفاده شده‌است که تنش برشی بحرانی را از رابطه  $\tau_{crit} = \mu P$  تعیین می‌کند که در این معادله  $\mu$  ضریب اصطکاک و P فشار تماسی است. ضریب اصطکاک در نظر گرفته شده بین فولاد و بتن 0.3 می‌باشد.

#### ۴- مقایسه نتایج تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی

نتایج حاصل از شش نمونه ستون مرکب تک لایه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد تا میزان صحت و دقت شبیه‌سازی عددی مشخص گردد. نتایج این مقایسه در نمودارهای شکل ۵ و ۶ و جدول ۴ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۵- منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی حاصل از تحلیل عددی



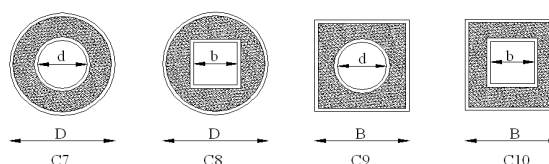
شکل ۶- منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی حاصل از نتایج

آزمایشگاهی [۳]

در تمامی این شش نمونه پس از این که نیروی محوری فشاری به حداکثر مقدار خود رسید به‌علت ادامه فشار، جداره فولادی دچار کمانش موضعی شده و ظرفیت باربری ستون کاهش یافته است. مطابق شکل ۵ و ۶ با

شبهه‌سازی شد تا اثر شکل هندسی مقاطع، مقاومت فشاری بتن و اثر لاغری نسبی در این ستون‌ها تحت نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی بررسی گردد. در شکل ۷ نمای شماتیک سطح مقطع ستون‌های طراحی شده نشان داده شده‌است.

شبهه‌سازی شد تا اثر شکل هندسی مقاطع، مقاومت فشاری بتن و اثر لاغری نسبی در این ستون‌ها تحت نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی بررسی گردد. در شکل ۷ نمای شماتیک سطح مقطع ستون‌های طراحی شده نشان داده شده‌است.



شکل ۷- ستون‌های مرکب دو لایه طراحی شده

جدول ۵- مشخصات هندسی و خواص مکانیکی ستون‌های مرکب دو لایه

Id	D(cm)	d(cm)	$t_{out}$ (cm)	$t_{in}$ (cm)	L(cm)	e(cm)	$f_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$N_u$ (kg)
C7	16	8	0.5	0.5	300	2	3220	900	100055
C8	16	7.09	0.5	0.44	300	2	3220	900	84543
C9	14.18	8	0.44	0.5	300	2	3220	900	103995
C10	14.18	7.09	0.44	0.44	300	2	3220	900	95368
C11	16	-	0.5	-	300	2	3220	900	65099

مطابق شکل منحنی‌هایی که با خط ممتد رسم شده منحنی نیرو-جابجایی ستون‌های مرکب دو لایه می‌باشد. تغییر در شکل هندسی مقاطع موجب تغییر زیاد در ظرفیت باربری نهایی ستون‌های مرکب دو لایه نشده‌است. در ایده‌آل‌ترین حالت ستون مرکب C9 با جداره بیرونی مربع و جداره داخلی گرد با نیروی محوری 103995 kg دارای بالاترین ظرفیت باربری نسبت به ستون‌های دیگر می‌باشد. در شکل ۸ منحنی نیرو، جابجایی ستون مرکب تک لایه C11 با خط چین نشان داده شده‌است. از روی شکل می‌توان به تفاوت ظرفیت باربری ستون‌های مرکب تک لایه با دو لایه پی‌برد. به نظر می‌رسد بیشترین تاثیر هندسی مقاطع بر شکل‌پذیری ستون‌های مرکب دو لایه باشد. ستون‌های مرکب C8، C9 با مقاطع ترکیبی بیشترین شکل‌پذیری را از خود نشان داده‌اند.

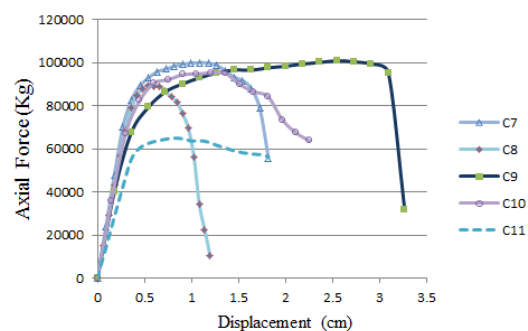
### ۵-۳- اثر مقاومت فشاری بتن

مطابق جدول ۵ نمونه‌های شبهه‌سازی شده در نرم‌افزار دارای بتن از نوع HSC و مقاومت فشاری 900kg/cm<sup>2</sup>

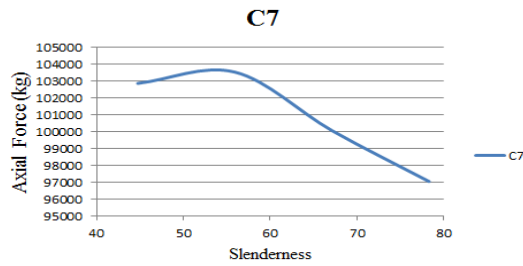
مطابق جدول ۵ ستون C11 یک ستون مرکب تک لایه گرد می‌باشد که برای مقایسه رفتار ستون‌های مرکب تک لایه و دو لایه در نرم‌افزار شبهه‌سازی شده‌است.

### ۵-۲- اثر شکل هندسی مقطع بر ظرفیت باربری ستون‌های مرکب دو لایه

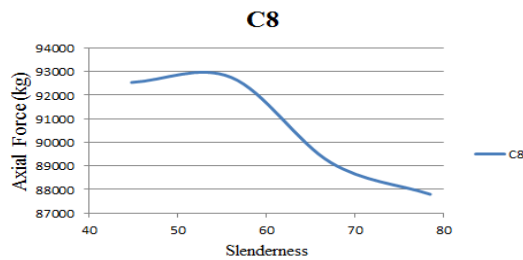
پس از شبهه‌سازی ستون‌های مرکب دو جداره معرفی شده در بخش قبل، نتایج بدست آمده از آنالیز نمونه‌ها به صورت منحنی نیرو-جابجایی در شکل ۸ رسم شده‌است.



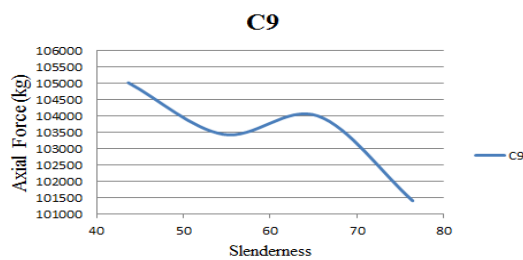
شکل ۸- منحنی‌های نیرو-جابجایی ستون‌های مرکب دو لایه



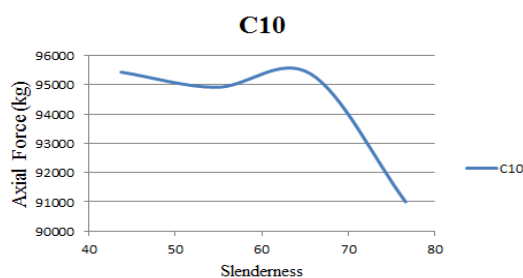
شکل ۱۰- اثر لاغری بر ظرفیت باربری ستون C7



شکل ۱۱- اثر لاغری بر ظرفیت باربری ستون C8



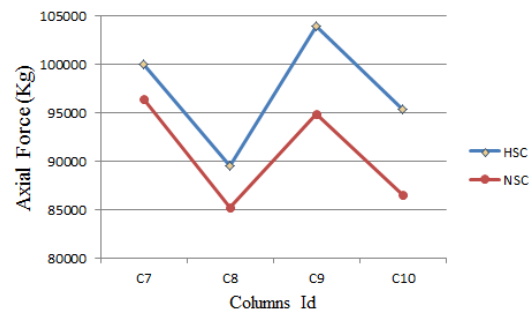
شکل ۱۲- اثر لاغری بر ظرفیت باربری ستون C9



شکل ۱۳- اثر لاغری بر ظرفیت باربری ستون C10

مطابق شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ برای لاغری‌های کمتر میزان افت ظرفیت باربری کم، ولی پس از یک حد مشخصی از نسبت لاغری که خرابی ستون بر اثر پدیده کمناش رخ داده است ظرفیت باربری ستون‌های مرکب به صورت ناگهانی کاهش یافته است. در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ اثر لاغری بر میزان جذب انرژی کرنشی ستون‌های مرکب نشان داده شده است. در تمامی نمونه‌ها با افزایش نسبت

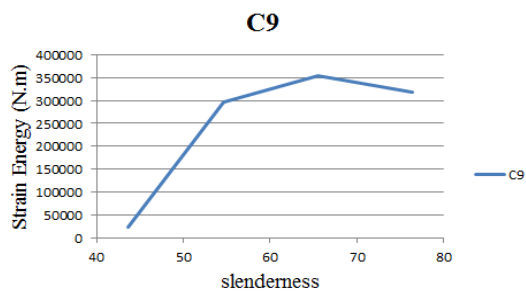
می‌باشند. برای بررسی اثر مقاومت فشاری بتن، بار دیگر در نمونه‌های شبیه‌سازی شده از بتن با مقاومت نرمال NSC با مقاومت فشاری  $650\text{kg/cm}^2$  استفاده شد. در شکل ۹ بیشترین نیروی محوری ستون‌های مرکب در دو حالت استفاده از بتن HSC و NSC مقایسه شده است. مطابق شکل با کم شدن مقاومت فشاری بتن ظرفیت باربری نهایی ستون‌ها کاهش می‌یابد اما این کاهش نسبت به میزان کاهش مقاومت فشاری بتن چندان چشمگیر نمی‌باشد. به نظر می‌رسد در ستون‌های مرکب دو لایه نیز مانند ستون‌های مرکب تک لایه افزایش مقاومت فشاری بتن موجب افزایش زیاد ظرفیت باربری ستون نمی‌گردد. بنابراین استفاده از بتن گران قیمت HSC در ستون‌های مرکب دو لایه چندان توصیه نمی‌گردد.



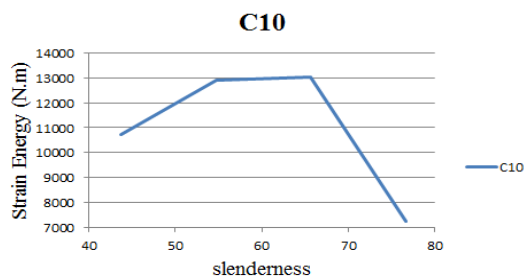
شکل ۹- مقایسه ظرفیت باربری ستون‌های مرکب

#### ۵-۴- بررسی اثر لاغری بر میزان انرژی کرنشی جذب شده

ستون‌های معرفی شده در بخش ۵-۱ بار دیگر با لاغری‌های مختلف تحت بارگذاری محوری با خروج از مرکزیت معین قرار گرفتند. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ اثر افزایش لاغری بر ظرفیت باربری ستون‌های شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. در تمامی نمونه‌های شبیه‌سازی شده با افزایش لاغری، میزان ظرفیت باربری نهایی ستون‌ها کاهش یافته است.



شکل ۱۶- منحنی میزان جذب انرژی ستون C9



شکل ۱۷- منحنی میزان جذب انرژی ستون C10

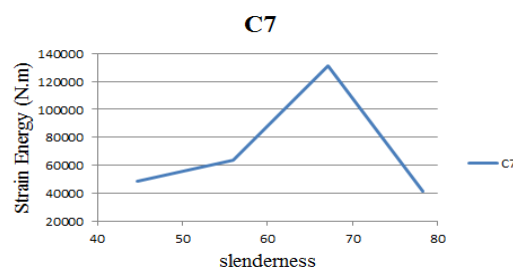
## ۶- نتیجه‌گیری

۱- به‌طور کلی ظرفیت باربری ستون‌های مرکب دو لایه بیشتر از ستون‌های مرکب تک لایه می‌باشد. با توجه به این که فولاد عامل اصلی در تحمل بار ستون‌های مرکب می‌باشد وجود یک جداره فولادی بیشتر در ستون‌های مرکب دو لایه باعث تحمل بارهای محوری بیشتر می‌گردد.

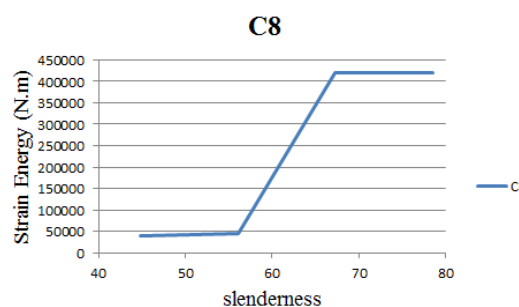
۲- در ستون‌های مرکب دو لایه مانند ستون‌های مرکب تک لایه افزایش مقاومت فشاری بتن تاثیر چندانی بر افزایش باربری ستون‌های مرکب دو لایه ندارد لذا استفاده از بتن گران‌قیمت HSC در ستون‌های مرکب دو لایه توصیه نمی‌گردد.

۳- در ستون‌های مرکب دو لایه برای سطح مقطع‌هایی برابر، تغییر شکل هندسی مقاطع موجب تغییر زیاد در ظرفیت باربری ستون نمی‌گردد. اما در ایده‌آل‌ترین حالت ستون مرکب دو لایه با جداره بیرونی مربع و جداره داخلی گرد دارای بیشترین ظرفیت باربری نهایی بود.

لاغری مقدار انرژی جذب شده ستون‌های مرکب دو لایه افزایش یافته و پس از یک مقدار مشخصی از لاغری که خرابی ستون بر اثر پدیده کمانش رخ داده، میزان جذب انرژی ستون‌های مرکب کاهش یافته است. مطابق شکل‌های ۱۴ و ۱۷ برای ستون‌های مرکب دو لایه C7 و C10 به ترتیب با جداره بیرونی و داخلی گرد و مربع روند افت انرژی جذب شده به‌صورت ناگهانی اتفاق افتاده است درحالی‌که برای ستون‌های C8 و C9 با مقاطع ترکیبی روند افت انرژی جذب شده به آهستگی اتفاق می‌افتد (شکل ۱۵ و ۱۶). به‌نظر می‌رسد در این مورد نیز عملکرد ستون‌های مرکب با مقاطع ترکیبی بهتر از ستون‌های مرکب با مقاطع متحدالشکل می‌باشد. با مقایسه منحنی‌های جذب انرژی ستون‌های مرکب مشخص می‌شود ستون‌های C8 و C9 با مقاطع ترکیبی نسبت به ستون C7 و C10 با مقاطع متحدالشکل انرژی کرنشی زیادی را جذب کرده‌اند. که با توجه به اختلاف زیاد انرژی جذب شده در ستون‌های یاد شده مشخص می‌شود ستون‌های مرکب با مقاطع ترکیبی از پتانسیل بالایی جهت جذب انرژی برخوردار هستند.



شکل ۱۴- منحنی میزان جذب انرژی ستون C7



شکل ۱۵- منحنی میزان جذب انرژی ستون C8



بزرگتر که خرابی ستون بر اثر پدیده کمانش رخ می‌دهد این مقدار بیشتر است.

۶- ستون‌های مرکب دو لایه با مقاطع ترکیبی از پتانسیل بالایی جهت جذب انرژی کرنشی برخوردار می‌باشد.

۷- برای ستون‌های مرکب دو لایه با مقاطع ترکیبی نسبت به ستون‌های مرکب دو لایه با مقاطع متحدالشکل، با افزایش لاغری روند کاهش جذب انرژی آهسته‌تر اتفاق می‌افتد.

۴- شکل هندسی مقاطع مرکب دو لایه تاثیر فراوانی بر شکل‌پذیری ستون‌های مرکب دو لایه دارد. ستون‌های مرکب دو لایه با مقاطع ترکیبی شکل‌پذیری بهتری از خود نشان دادند.

۵- در ستون‌های مرکب دولایه با افزایش لاغری، میزان ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. برای لاغری‌های کوچکتر میزان افت ظرفیت باربری کمتر ولی برای لاغری‌های

## مراجع

- [1] Giakoumelis, G., Lam, D. (2004). "Axial capacity of circular concrete-filled tube columns". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, No. 7, pp. 1049-1068.
- [2] Li, Y.F., Chen, S.H., Chang, K.C., Liu, K.Y. (2005). "A constitutive model of concrete confined by steel reinforcements and steel jackets". *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 279-288.
- [3] Portolés, J.M., Romero, M.L., Bonet, J.L., Filippou, F.C. (2011). "Experimental study of high strength concrete-filled circular tubular columns under eccentric loading". *Journal of constructional steel research*, Vol. 67, No. 4, pp. 623-633.
- [4] O'Shea, M.D., Bridge, R.Q. (2000). "Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes". *Journal of Structural Engineering-ASCE Engineering*, Vol. 126, No. 11, pp.1295-303.
- [5] Han, L.H. (1990). "Test on concrete filled steel tublar columns with high slenderness ratio". *Advances in Structural Engineering*, Vol. 68, No. 20, pp. 405-13.

[۶] طاحونی، ش. (۱۳۸۳). "طراحی ساختمان‌های بتن مسلح (بر مبنای آیین‌نامه ایران)". انتشارات دانشگاه تهران.