

## Effect of Internal Stiffeners on the Vertical and Lateral Performance of Concrete-filled L- and T-Shaped Steel Columns

Mohammadreza Oliaei

Department Of Civil Engineering, Ramsar Branch, Islamic Azad University, Ramsar, Iran

Mohammadreza Jorabchi\*

Department Of Civil Engineering, Ramsar Branch, Islamic Azad University, Ramsar, Iran

mohammadrezajorabchi414@gmail.com

doi: 10.30495/CIVIL.2022.697904

### Keywords:

Axial and shear performance, CFST, L-shaped section, T-shaped section, internal stiffener

### Abstract

Steel columns filled with concrete with a special shape, mainly L-shaped, T-shaped and cross-shaped columns, are used as single columns or as boundary members of the shear wall, and in terms of structural design especially architecture, have been considered by many researchers and designers. Owing to their proper implementation in beam joints, they are receiving increasing attention in the world. These columns are often utilized in the residential and formal structures, however, due to heavy loads, such as those that may occur during severe earthquakes, they do not meet the requirements of high-rise buildings. There should always be more studies on the increasing of their performance. In this research, cold-rolled steel sections have been utilized for hardening, strengthening and straightening of the axial and shear performance of L-shaped and T-shaped steel columns filled with concrete. The research variables in this study are the internal stiffeners between the column sections, and the main purpose of this research is to numerically investigate the axial and shear performance of the concrete-filled steel columns with L-shaped and T-shaped cross-sections using Abaqus software. Also, in this study, it is determined that by adding steel sheets in the space between the columns, what kind of changes do axial and shear resistance, hardness, and ductility take? In the first stage, five L-shaped steel columns filled with concrete and five T-shaped columns by internal steel plates of different lengths and steel pipes under axial loading were analyzed numerically, and in the second stage, the same columns were loaded laterally and analyzed. The results indicate that the steel column filled with concrete in the T-shaped cross-section has a higher performance than the similar L-shaped cross-section, in addition, the percentage of growth or loss of performance of the samples compared to the base sample in the L-shaped and T-shaped sections is almost similar to each other. Also, the results exhibit that creating a hardener inside the section increases the stiffness and axial and lateral strength of the steel column filled with concrete. The hardening steel section has a great effect on the performance of L- and T-shaped steel columns filled with concrete so that reinforcing concrete filled steel columns with this method leads to an increase in load bearing capacity, increase in thrust ratio, ductility, prevention of local buckling in the steel wall and energy loss increases.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license:

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

# تأثیر سخت‌کننده‌های داخلی در عملکرد قائم و جانبی ستون‌های فولادی L و T شکل پرشده از بتن

محمد رضا اولیایی

گروه مهندسی عمران - سازه، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران

محمد رضا جورابچی\*

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران - سازه، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران

mohammadrezajourabchi414@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۰۲ شهریور ۱۴۰۱

تاریخ دریافت: ۰۵ اردیبهشت ۱۴۰۱

## چکیده

ستون‌های فولادی پرشده از بتن با شکل خاص، به طور عمده ستون‌های L شکل، T شکل و شکل متقاطع، به عنوان ستون‌های منفرد یا به عنوان اعضای مرزی دیوار برشی استفاده شده و از نظر طراحی سازه‌ای و به خصوص معماری مورد توجه بسیاری از محققان و طراحان قرار گرفته و به دلیل اجرای مناسب خود در اتصالات تیر، جدیداً در دنیا مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته‌اند، با این حال این ستون‌ها با توجه به بارهای سنگین جانبی، شرایط ساختمان‌های مرتفع را برآورده نمی‌کنند که جای مطالعات بیشتر در خصوص افزایش عملکرد آن‌ها همواره وجود دارد. در این تحقیق از مقاطع فولادی با نورد سرد جهت سخت‌کنندگی، تقویت و یکسوسازی عملکرد محوری و برشی ستون‌های فولادی پرشده از بتن L شکل و T شکل استفاده شده است. متغیرهای تحقیق در این مطالعه سخت‌کننده‌های داخلی بین مقاطع ستون است که هدف اصلی این تحقیق بررسی عددی عملکرد محوری و برشی ستون فولادی پرشده از بتن با مقطع L شکل و T شکل با نرم‌افزار آباکوس می‌باشد، همچنین در این مطالعه مشخص می‌گردد که با اضافه کردن ورق‌های فولادی در فضای بین ستون‌ها، مقاومت، سختی و شکل‌پذیری محوری و برشی چه تغییری می‌کند. در مرحله اول، پنج ستون فولادی پرشده از بتن L شکل و پنج ستون T شکل که توسط صفحات فولادی داخلی طولی مختلف و لوله‌های فولادی تحت بارگذاری محوری، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته و در مرحله دوم، همان ستون‌ها به صورت جانبی تحت بارگذاری قرار می‌گیرند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که ستون فولادی پرشده از بتن در مقطع T شکل، عملکرد بالاتری نسبت به مقطع مشابه L شکل دارند، ضمناً درصد رشد یا افت عملکرد نمونه‌ها نسبت به نمونه مینا در مقاطع L و T شکل تقریباً مشابه یکدیگر است. همچنین نتایج تحقیق نشان می‌دهد که ایجاد سخت‌کننده در داخل مقطع باعث افزایش سختی و مقاومت محوری و جانبی ستون فولادی پرشده از بتن می‌شود و بخش فولاد سخت‌کننده تأثیر زیادی در عملکرد ستون‌های فولادی پرشده از بتن L و T شکل دارد به طوری که تقویت ستون‌های فولادی پرشده از بتن با این روش منجر به افزایش ظرفیت تحمل بار، افزایش نسبت رانش، شکل‌پذیری، جلوگیری از کماتش موضعی در دیوار فولادی و افزایش اتلاف انرژی می‌شود.

کلید واژگان: عملکرد محوری و برشی، ستون CFST، مقطع L شکل، مقطع T شکل، سخت‌کننده داخلی.

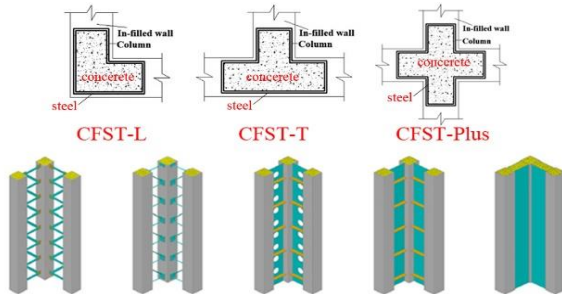
## ۱- مقدمه

یک سازه فولادی با ستون CFST پر شده از بتن، مزایای ساختاری بی شماری، از جمله مقاومت محوری و جانبی بالا و مقاومت در برابر آتش، شکل پذیری مطلوب و ظرفیت جذب انرژی بالا را دارا می باشد. علاوه بر این، قالب سازی و خاموت بستن در هنگام ساخت بتن مورد نیاز نیست که باعث کاهش هزینه و زمان ساخت می شود. مطالعات نشان داده اند که اثر محدود کننده ستون های تا حد زیادی در گوشه و کنار آن ها متمرکز شده و این اثر به سرعت در خارج از گوشه کاهش می یابد به طوری که قابل اغماض است.

ستون های فولادی پر شده با بتن<sup>۱</sup> با مقطع دایره ای، مربعی و مستطیلی شکل، به طور گسترده در ساختارهای مهندسی به دلیل عملکرد و هم افزایی عالی کامپوزیت بین لوله های فولادی و بتن تزریقی، مورد استفاده قرار گرفته است، علاوه بر این، در سال های اخیر ستون های CFST با شکل خاص (L شکل، T شکل و شکل متقاطع - شکل ۱) در مقایسه با ستون های CFST مربعی یا مستطیلی به صورت کلی رضایت بهتر از نظر برآورده کردن نیازهای سازه و معماری از خود برخوردار هستند زیرا ستون هایی با سطح مقطع مستطیل در سازه هایی با قاب سستی منجر به کاهش فضای داخلی قابل استفاده و آسفتگی در محیط داخلی می شود، در حالی که ستون های CFST دارای فرم خاص را می توان در دیوارها جا سازی کرد و در نتیجه از برآمدگی ستون ها جلوگیری کرد و این ویژگی از نظر طراحی معماری آن ها را سودمند می کند، اتصال صاف بین ستون ها با شکل خاص و دیوارهای مجاور باعث افزایش بهره وری از فضای داخلی و در دسترس بودن مبلمان می شود. در حالت کلی در ستون های CFST L شکل یا T شکل می توانند به شکل های مختلفی (با استفاده از رابط) به هم متصل شوند که در شکل ۱ انواع مختلفی از ستون های L شکل نشان داده شده است، ایده کلی این ستون ها این بود که در عوض اینکه یک ستون قطور CFST وجود داشته باشد و تمام آسیب به آن ستون منعطف شود، می توان سه یا چهار ستون لاغرتر ولی با عملکرد بهتر داشت.

در CFST دارای فرم خاص به دلیل جدا سازی بین لوله های فولادی و بتن در گوشه های داخلی مقطع، تنش یکنواختی را برای بتن، مانند CFST مدولار به دست نمی آید و وقتی آن ها در معرض بار جانبی و یا فشار محوری قرار می گیرند، لوله فولادی مستعد کماتش محلی زودرس و کاهش همبستگی لوله فولادی روی بتن می شود که این مسئله عملکرد کاربرد چنین ستون هایی را در مهندسی محدود می کند. به همین دلیل، محققان مطالعات گسترده ای در مورد رفتار ستون های CFST به شکل خاص با فرم های که سخت کننده مختلف دارند را انجام داده اند. مطالعات نشان داده است که سخت کننده ها یا میله های اتصال می توانند در مهار یا به تأخیر انداختن کماتش موضعی، مقاومت و انعطاف پذیری نهایی ستون ها

تأثیرگذار باشد، همچنین به کارگیری سخت کننده ها، منجر به افزایش اثر محصور کنندگی ستون های CFST می شود [۱].



شکل ۱ - معرفی ستون های پر شده از بتن با شکل L شکل.

مطالعات محققین در خصوص استفاده از سخت کننده ها در ستون CFST مطابق با جدول ۱ نشان می دهد که نتایج تأثیر نوع، تعداد و محل کاربرد دو نوع برشگیر در پایه پل در خصوص رفتار خمشی، کماتشی و میزان شکل پذیری محوری ستون های فولادی پر شده از بتن، با مقاطع مرکب در مطالعات احمدی و همکاران حاکی از افزایش میزان شکل پذیری، جذب انرژی، مقاومت و بار بحرانی کماتشی در ستون های مرکب با برشگیر نسبت به نوع بدون برشگیر می باشد. این ناحیه بحرانی تنش حدوداً در محدوده یک پنجم در طرف ابتدا و انتهای ستون می باشد [۱]. همچنین ژبانگانگ لیو<sup>۲</sup> و همکاران فرمول های برای محاسبه ظرفیت تحمل مقطع و ظرفیت تحمل پایداری ستون های CFST با فرم های خاص در راستای استفاده از سخت کننده های داخلی پیشنهاد کردند [۲].

کوینگینگ سیونگ<sup>۳</sup> و همکاران رفتار باربری محوری و جانبی قسمت های غیر معمول ستون CFST، L شکل (به علت هندسه نامتقارن)، حالت های شکست، روابط تغییر شکل، توزیع کرنش، شکل پذیری و شاخص مقاومت ستون ها را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمون آن ها نشان داد که در مقایسه با نمونه بدون بتن، کماتش محلی صفحات فولادی عمودی با پر کردن بتن به تأخیر و ظرفیت باربری و نسبت شکل پذیری افزایش یافته است. به طوری که افزایش استحکام محوری متأثر از سخت کننده عرضی بر روی ظرفیت باربری قابل چشم پوشی بوده و رفتار ستون های L شکل بین دو صفحه فولادی عمودی، بدون سخت کننده عرضی، مطلوب تر از ستون های L شکل با سخت کننده عرضی می باشد [۳، ۴، ۵]. یوینگینگ ژنگ<sup>۴</sup> و همکاران طراحی ستون های فولادی L شکل و T شکل پر شده با بتن تحت فشار محوری مورد ارزیابی قرار دادند و مدل های المان محدود برای شبیه سازی رفتار محوری L و T شکل ایجاد کردند. پیش بینی ها در مورد مقاومت نهایی با استفاده از Eurocode ۴ و یک فرمول طراحی با نتایج المان محدود مقایسه شد که در آن ها انحرافات، قابل چشم پوشی بود [۶، ۷].

<sup>3</sup> Qingqing Xiong

<sup>4</sup> Yongqian Zheng

<sup>1</sup> CFST

<sup>2</sup> Xianggang Liu



جدول ۱- مطالعات محققین در خصوص بارگذاری محوری و جانبی ستون‌های CFST و استفاده از سخت‌کننده‌های داخلی.

	Loading		STIFFNER	References
	P	L		
CFST	*			Zhi-Liang Zuo (2018)... Yi Sui (2019)...Hassam Muhammad (2019)
CFST		*		Lin Hi (2016)... Lian (2016)...Yongqian Zheng (2020)
CFST	*	*		Tam Biratnam (2015)
CFST	*		*	Ahmadi (2010)... Lin & Shen (2007)...Yang & Wang (2009)...Xianggang Liu (2018)
CFST-L	*			Wang Zhang (2018)...Yifei Xiao (2020)...Longshithung Patton (2017)
CFST-L		*		Guofeng Du (2019)
CFST-L	*	*		Bingzhen Zhao (2017)
CFST-L	*		*	Qingqing Xiong (2017)...Yongqian Zheng (2020)
CFST-L		*	*	Qingqing Xiong (2017)
CFST-T	*			Li (2008)...Chen (2010)...Zho (2013)...Chen Qiguang (2017)...Longshithung Patton (2017)
CFST-T	*	*		Yong-Qing Tu (2014)
CFST-T	*		*	Yongqian Zheng (2020)

\* Loading = P : Use Axial Loading in Model

\* Loading = L : Used Lateral Loading in Model

\* STIFFNER: Use STIFFNER in Model

Very Studies Related to This Research



خصوصیات مصالح مربوط به تنش تسلیم، تنش نهایی و مدول الاستیسیته بتن و فولاد در جدول ۳ نشان داده شده است.

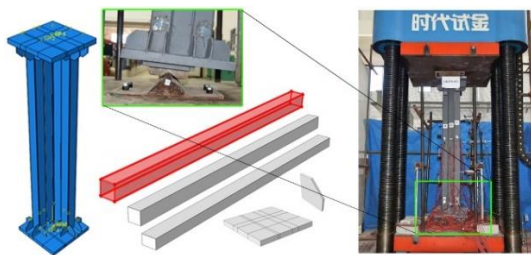
جدول ۲- نحوه انتخاب نمونه LSJ1Y+0 از بین ۵ نمونه آزمایشگاهی [۹].

Specimen	$L_t$ (mm)	$t_s$ (mm)	$L_p$ (mm)	$t_p$ (mm)	$H$ (mm)	$e$ (mm)
LSJ1Y+0	100	6	100	6	2,000	0
LSJ1Y+60	100	6	100	6	2,000	60
LSJ1Y+120	100	6	100	6	2,000	120
LSJ1Y-60	100	6	100	6	2,000	-60
LSJ1Y-120	100	6	100	6	2,000	-120

Note:  $L_t$  = length of monocolumn;  $t_s$  = thickness of monocolumn;  $L_p$  = length of steel plate;  $t_p$  = thickness of steel plate;  $H$  = calculated height of specimen; and  $e$  = eccentricity of specimen.

جدول ۳- خصوصیات مصالح بکار رفته در آزمایش [۹].

	Material Properties		Elastic modulus (Gpa)
	Yield strength (Mpa)	Ultimate strength (Mpa)	
Steel - Plate	450	600	0.196
Steel - Tube	370	464	0.189
Concrete	Average Compressive strength (Mpa)		Elastic modulus (Mpa)
	43.58		27,578



شکل ۲- مدل آزمایشگاهی ژیاوو چن [۹] و عددی جهت صحت سنجی.

ستون‌های CFST، L شکل انتخاب شده دارای ۳ مقطع قوطی و ۲ رابط با دو ابعاد  $L_t$  و  $L_p$  به یکدیگر جوش داده شده‌اند، همچنین ارتفاع تمام نمونه‌ها 2 متر و ضخامت آن‌ها ۶ میلی‌متر می‌باشد که درون تمام این مقاطع بتن ریخته شده که جزئیات آن در جدول ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل ۲ نحوه بارگذاری محوری ستون CFST، L شکل که توسط

در این مطالعه به ارزیابی و مقایسه تأثیر سخت‌کننده‌های داخلی، ستون‌های L شکل و T شکل، فولادی پر شده از بتن پرداخته می‌شود به طوری که این ارزیابی در مورد بارگذاری محوری و جانبی ستون فولادی پر شده از بتن با مقاطع L شکل و T شکل به صورت تقویت شده با سخت‌کننده‌های داخلی، توسط نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS [۸] انجام می‌شود. این تحقیق به صورت مفهومی محور بررسی شده و با ارزیابی نمودارهای بار- جابه‌جایی انجام می‌گردد. تحلیل انجام گرفته شده از نوع شبیه استاتیکی غیرخطی می‌باشد، به طوری که در خصوص متغیرهای تحقیق یعنی حالت‌های مختلف سخت‌کننده داخلی بین مقاطع ستون در عملکرد محوری و برشی ستون CFST با مقطع L شکل و T شکل انجام خواهد شد و در گام‌های مرتبط زمانی تحلیل گام‌های قبل به گام‌های بالاتر انتقال یافته و در نتیجه تغییر شکل‌های بزرگ قابل مدل‌سازی و تحلیل می‌باشد. ضمناً با دوخطی کردن هر نمودار پوش آور مربوط به ستون فولادی پر شده از بتن با مقاطع L شکل و T شکل، می‌توان در مورد رفتار محوری و لرزه‌ای آن‌ها به صورت جداگانه بحث نمود؛ بنابراین عملکرد محوری و لرزه‌ای شامل مقاومت، سختی، شکل‌پذیری در این تحقیق به خوبی قابل بحث می‌باشد.

## ۲- صحت سنجی مدل

در این قسمت از پژوهش، مدلسازی عددی جهت صحت سنجی به صورت المان محدود با نرم افزار آباکوس [۸] انجام می‌شود، تمام مدل‌های مربوط به ایجاد قطعه به قطعه اعضاء ستون در ماژول پارت<sup>۱</sup> ایجاد شده و در ماژول اسمبلی<sup>۲</sup> نرم‌افزار آباکوس تمام قطعه‌ها در کنار یکدیگر و در نقاط پیش‌بینی شده قرار می‌گیرند. نوع تحلیل به کار گرفته شده برای بارگذاری از نوع دینامیکی صریح<sup>۳</sup> (شبه استاتیکی<sup>۴</sup>) می‌باشد که در ماژول استپ<sup>۵</sup> (گام تحلیلی) در نظر گرفته شده است.

جهت اینکه صحت مدل‌سازی و ارائه اعداد مدل با موارد اجرایی اثبات شود به صحت سنجی یک کار آزمایشگاهی نیاز می‌باشد. برای ارزیابی صحت مدل‌سازی عناصر محدود، نمونه LSJ1Y+0 از بین 5 نمونه آزمایشگاهی ستون CFST، L شکل که توسط ژیاوو چن<sup>۶</sup> و همکاران در دانشگاه تیانجین کشور چین در سال ۲۰۲۰ [۹] تحت بارگذاری استاتیکی قائم آزمایش شده است، استفاده می‌شود. (شکل ۲ و جدول ۲) همچنین

<sup>4</sup> Quasi-static

<sup>5</sup> Step

<sup>6</sup> Zhihua Chen

<sup>1</sup> PART

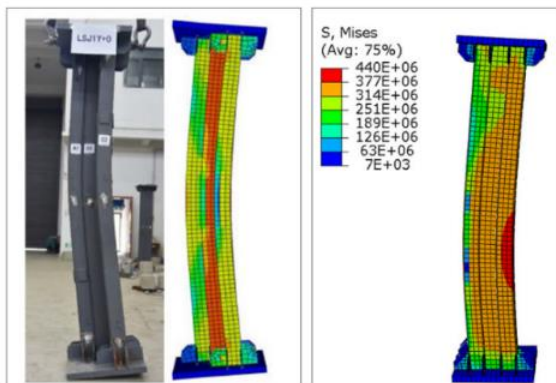
<sup>2</sup> ASSEMBLY

<sup>3</sup> Dynamic, Implicit



ستون CFST با مقطع L شکل و T شکل کنترلی اختصاص داده می‌شود. همچنین روابط تماسی بین بتن و فولاد، شرایط مرزی گیردار در قسمت تحتانی ستون و مش بندی ستون به ترتیب ماژول اینتراکشن، بارگذاری و مش انجام شده است. ضمناً المان مقاطع ستون در تمام حالات از نوع C3D8R (المان مکعبی با تابع درجه یک و انتگرال گیری کاهش یافته) می‌باشد. همچنین المان مقاطع فولادی به کاررفته از نوع توپر S4R (المان پوسته‌ای ۴ گره‌ای دوطرفه‌ای منحنی نازک یا ضخیم با انتگرال گیری کاهش یافته و کرنش غشایی محدود) می‌باشد و نوع فولاد بکار گرفته شده برای ورق فولادی ستون کنترلی از نوع ورق با تنش تسلیم به میزان ۳۷۰ مگاپاسکال می‌باشد.

بعد از اعمال بارگذاری می‌توان در شکل ۳ کانتورهای رنگی تنش و تغییر شکل ستون CFST با فرم تغییر شکل یافته نمونه آزمایشگاهی، مقایسه شوند، نتایج نیز نشان می‌دهد که مقایسه بین کار آزمایشگاهی و نتایج عددی مقاله ژیاوو چن و همکاران با مطالعه عددی تحقیق حاضر از نظر شکلی نزدیک یکدیگر می‌باشند.



شکل ۳ - مقایسه بین کار آزمایشگاهی و نتایج عددی مقاله ژیاوو چن و همکاران [9] با مطالعه عددی تحقیق حاضر.

اگر نقطه مینا قسمت فوقانی را به عنوان جابه‌جایی قائم و عکس العمل‌های تکیه‌گاهی را میزان بار تحملی محوری نمونه عددی فرض شود با استخراج این دو متغیر می‌توان نمودار بار-جابه‌جایی محوری را به صورت نمودار پوش داون ترسیم نمود. (شکل ۴)

جک هیدرولیکی به قسمت فوقانی ستون وارد می‌گردد که شرایط مرزی مفصلی ابتدا و انتهای نمونه‌ها مشخص می‌باشد.

در قسمت فوقانی ستون جهت اینکه بار محوری و جانبی به صورت درست اعمال گردد می‌بایست در ماژول اینتراکشن سطح یکپارچه فوقانی ایجاد و به یک نقطه مینا اختصاص داده شود که به صورت قید کوپلی می‌باشد. جهت ارتباط و ایجاد کنش و واکنش اعضا نسبت به یکدیگر، بین چهار قسمت ستون فولادی می‌بایست در ماژول اینتراکشن قیود ارتباط گیرداری کامل ایجاد کرد، بنابراین قید Tie برای این ارتباط مشخص شده و اعمال می‌گردد. البته ارتباط تماسی بین بتن و فولاد از نوع تماس سطح به سطح تعریف شده است. اعمال شرایط مرزی و بارگذاری محوری در ماژول بارگذاری<sup>۱</sup> صورت می‌گیرد. جهت تعریف بارگذاری ابتدا بارگذاری ثقلی با تعریف شتاب ثقلی زمین به کل نمونه اختصاص داده می‌شود سپس در نقاطی که قبلاً بر روی ستون در ماژول Interaction به صورت سطوح یکپارچه پیش‌بینی شده بود بارگذاری محوری اعمال می‌شود. شرایط مرزی در ستون CFST بدین صورت است که در ماژول بارگذاری در قسمت تحتانی ستون به علت اینکه اتصال را گیردار فرض می‌شود، لذا تمامی درجات آزادی حرکتی و دورانی به طور کامل مقید شده و گیردار کامل می‌باشد. همچنین جهت بارگذاری درون صفحه‌ای ستون در ماژول بارگذاری از حرکت به سمت جانبی مقید می‌شود.

در مرحله آخر از آماده‌سازی مدل ستون کنترلی در آنالیز عددی می‌بایست تمام اعضاء تعریفی را برای تحلیل با تقسیم‌بندی به صورت مش آماده ساخت. بدین منظور در ماژول Mesh تمام اعضاء به صورت مناسب تقسیم می‌شود زیرا با تقسیم بیشتر از حد، زمان تحلیل زیاد می‌شود و با تقسیم کمتر از حد لازمه نتیجه‌ای مناسب دریافت نمی‌شود بنابراین با توجه به پیش‌بینی‌ها از تک‌تک اعضاء از نظر درجه اهمیت و احتمال به وجود آمدن ناحیه پلاستیک احتمالی مش بندی انجام می‌شود. بعد از اینکه صحت اطلاعات ورودی به نرم‌افزار مورد بازبینی قرار گرفت، در ماژول انجام تحلیل<sup>۲</sup> نمونه تحلیلی مورد آنالیز و نتیجه تحلیل بعد از صرف زمان تحلیل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بعد از اعمال آنالیز و تحلیل نتایج قابل توجهی در ماژول تجسم نتایج<sup>۳</sup> به دست می‌آید که تمامی نتایج نشان دهنده صحت سنجی مناسب بین نمونه آزمایشگاهی و نمونه کنترلی عددی می‌باشد.

نوع بتن بکار گرفته شده برای ستون کنترلی از نوع بتن با مقاومت مشخصه ۳۴ مگاپاسکال می‌باشد که در ماژول خصوصیات<sup>۴</sup> نرم‌افزار آباکوس به

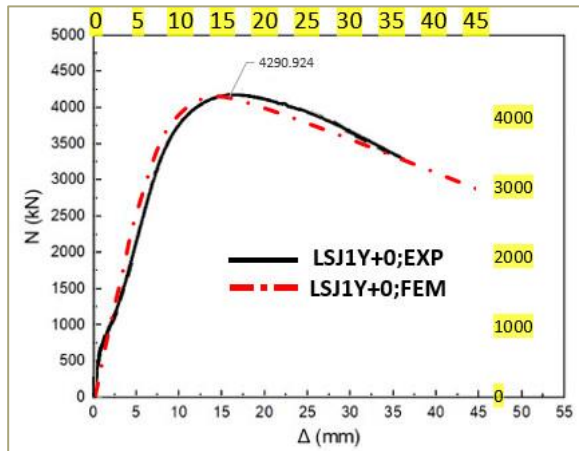
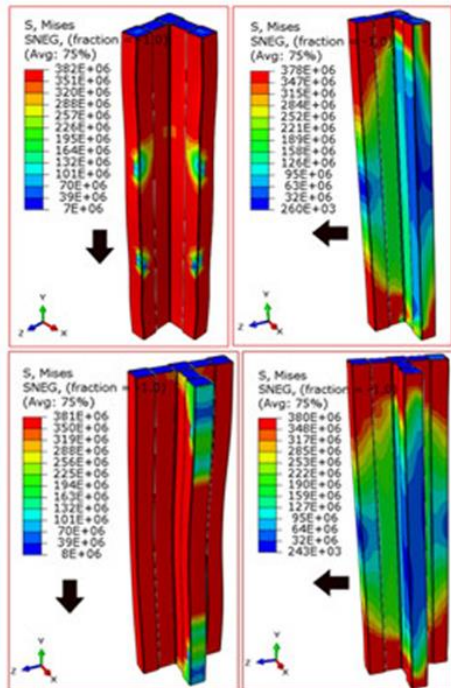
<sup>3</sup> Visualization

<sup>4</sup> PROPERTY

<sup>1</sup> Load

<sup>2</sup> Job

در جهت اعمال بار در پایه‌های مقید شده ثبت می‌شود، بدین صورت با ترسیم نمودار بار-جابجایی ستون می‌توان مقاومت محوری و جانبی ستون را در حالت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه نمود.



شکل ۴ - مقایسه و صحت سنجی بین دو نمودار بار - جابجایی آزمایشگاهی [9] و نمونه عددی این تحقیق.

با توجه به شکل ۴ تطبیق نسبتاً خوبی بین نمودار حاصله از تحلیل المان محدود با نتایج آزمایشگاهی دیده می‌شود به طوری که درصد خطای موجود نتایج صحت سنجی در بخش ماکزیمم نیرو شامل ۰/۴٪ و در بخش سختی اولیه ۲/۵٪ می‌باشد.

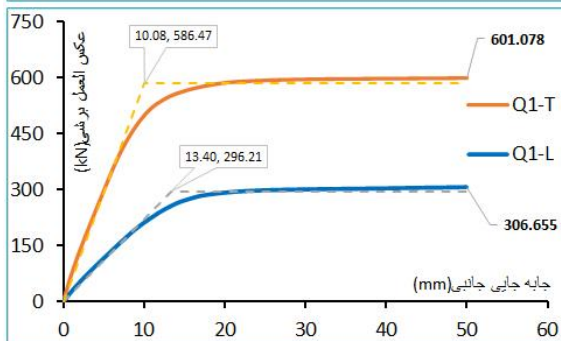
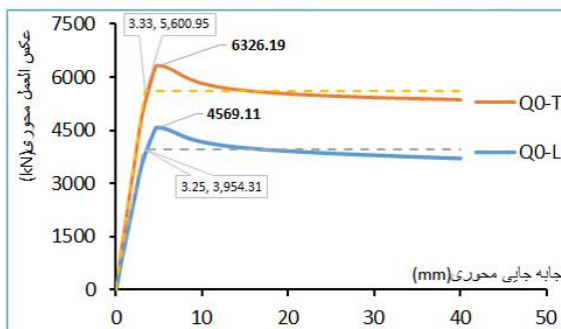
### ۳- مطالعات پارامتریک

شروع مطالعات پارامتریک با محاسبه عملکرد محوری و جانبی ستون CFST با مقطع L شکل و T شکل، بدون تقویت داخلی و بدون تغییر نمونه مینا (نمونه LSJ1Y+0 صحت سنجی شده در بخش ۲ این مقاله) انجام می‌شود. (شکل ۵)

طبق بررسی اولیه مشخص گردید که در نمونه مینا عملکرد مقاومت، سختی و شکل‌پذیری محوری مقطع T شکل نسبت به مقطع L شکل به ترتیب ۳۸،۵٪، ۳۸،۴٪ و منفی ۲٪ می‌باشد و مقاومت، سختی و شکل‌پذیری جانبی مقطع T شکل نسبت به مقطع L شکل به ترتیب ۶۵،۶٪ و ۹،۱٪ می‌باشد که به عبارتی مقطع T شکل عملکردی بالاتری نسبت به مقطع L شکل دارد.

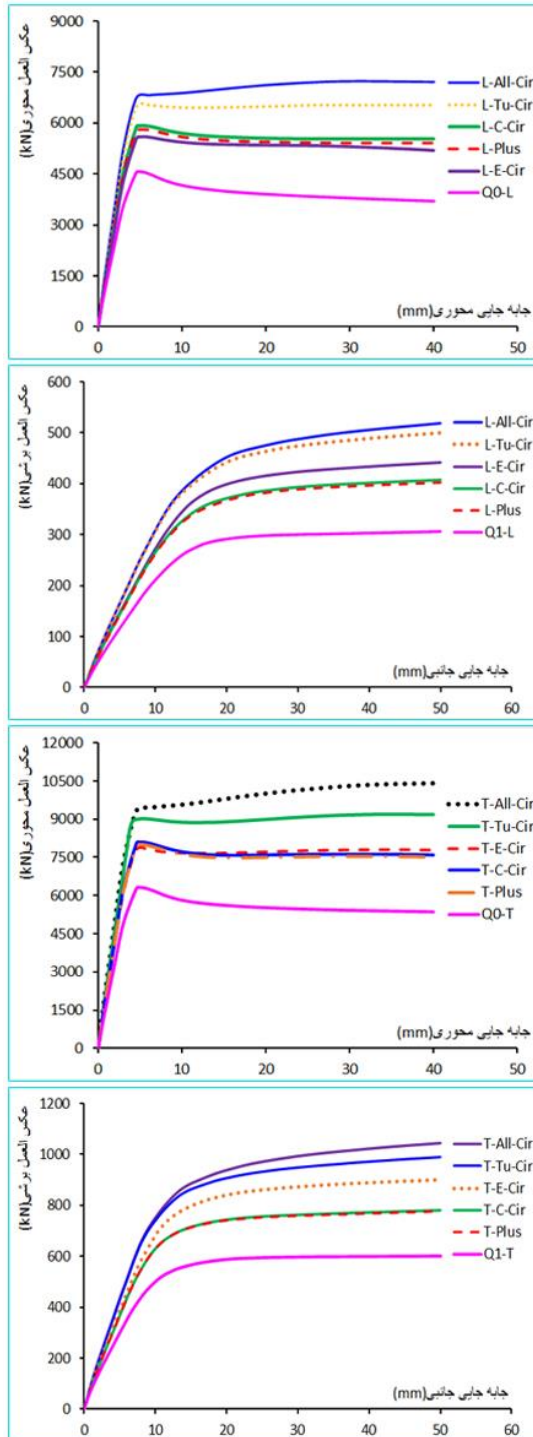
در ادامه تحقیق می‌توان به این ایده متمرکز شد که اگر در داخل ستون CFST با مقطع L شکل و مقطع T شکل، سخت‌کننده‌های داخلی با اشکال مختلف نصب شود، به چه میزان عملکرد محوری و جانبی آن‌ها تغییر می‌کند، لذا در این راستا، ابتدا می‌بایست نمونه‌های مختلف نشان داده شده در شکل ۶ را معرفی نمود.

همچنین تمام بررسی‌های این بخش به صورت بار محوری و جانبی به بالای ستون مهارشده انجام می‌شود، بار اعمالی به صورت شبه استاتیکی (به صورت کنترل جابجایی) و افزایشی می‌باشد و مجموع عکس‌العمل نیز

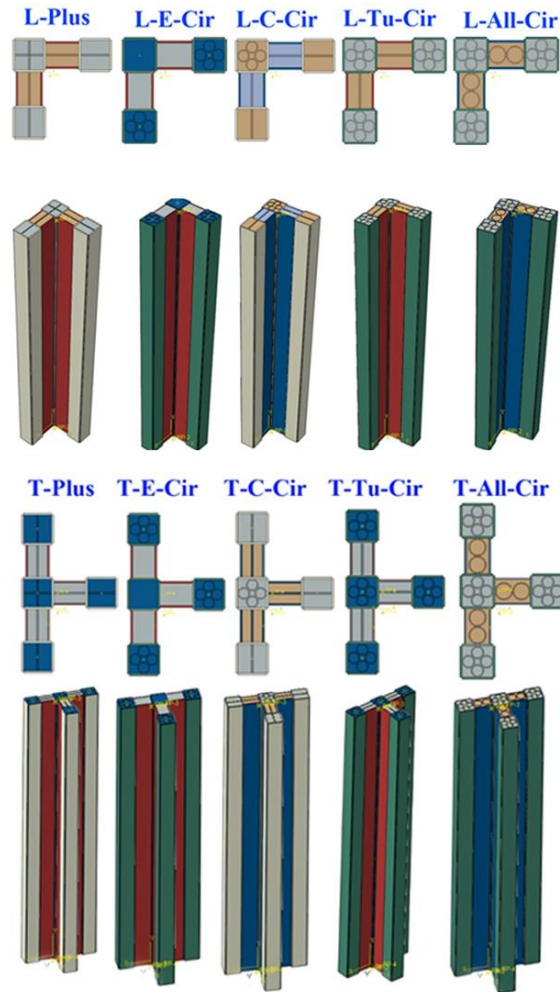


شکل ۵ - تنش‌ها و نمودار بار-جابجایی حاصل از بارگذاری محوری و جانبی ستون CFST با مقطع L شکل و T شکل.

و مقطع T شکل در موارد جدید نتایج نمودار بار-جابجایی مطابق شکل ۷ به دست می‌آید.



شکل ۷- نمودار بار-جابجایی بارگذاری محوری و جانبی نمونه‌های پارامتریک ستون CFST با مقاطع L شکل و T شکل.



شکل ۶- معرفی نمونه‌های پارامتریک ستون CFST با مقاطع L شکل و T شکل.

با توجه به شکل ۶ نمونه‌های ستون CFST با مقطع L شکل و مقطع T شکل که در داخل با انواع سخت‌کننده‌ها تقویت شده‌اند، به گونه‌ای معرفی شده‌اند که در این معرفی واژه "Cir" به معنی ۴ عدد دایره‌ای می‌باشد که در داخل ستون‌ها نصب شده است. همچنین واژه "E"، "C" و "Tu" به ترتیب به معنای دایره‌ها در محیطی، دایره‌ها در مرکز مقطع و دایره‌ها در کل تیوب می‌باشد. همچنین واژه "Plus" نمونه با ورق‌های داخلی به شکل "+" می‌باشد و واژه "All" نمونه ستون CFST دایره‌های داخلی در تمام مقطع می‌باشد.

جهت توضیح باید گفت که هیچ کدام از دایره‌ها به هم جوش یا به داخل مقطع جوش داده نمی‌شود و فقط در هنگام بتن‌ریزی در داخل مقطع قرار می‌گیرند؛ بنابراین با اعمال بارگذاری محوری و جانبی در دو مقطع L شکل



سختی اولیه محوری (K0) و جانبی (K1) در نمونه های مورد بررسی به ترتیب از تقسیم مقاومت نقطه جاری شدن بر جابه جایی نقطه جاری شدن در نمودار های بار-جابه جایی دوخطی محوری و برشی بدست آمده است. ضمناً نحوه محاسبه عملکرد شکل پذیری اولیه محوری ( $\mu_0$ ) و جانبی ( $\mu_1$ ) در نمونه های مورد بررسی به ترتیب از تقسیم جابه جایی نقطه نهایی بارگذاری بر جابه جایی نقطه جاری شدن در نمودار های بار-جابه جایی دوخطی محوری و برشی بدست آمده است. رنگ آبی موجود در جدول ۴ نیز به معنای بالاترین عملکرد و رنگ قرمز موجود در جدول ۴ به معنای پایین ترین عملکرد را نشان می دهد؛ بنابراین در اکثر موارد بالاترین عملکرد مقاطع L شکل و T شکل در نمونه All-Cir و کمترین عملکرد در نمونه مینا - Q اتفاق می افتد.

#### 4- نتایج عملکرد محوری و جانبی ستون CFST با مقاطع L و T شکل

در ادامه تحقیق جهت درک بهتر عملکردهای محوری و جانبی نمونه ستون های CFST با مقطع L و T شکل می بایست به صورت درصد رشد یا افت نسبت به نمونه مبنای محوری و جانبی خود، بررسی شود و نشان داده شود که هر نمونه به چه میزان عملکرد دارد؛ بنابراین شکل ۸ جزئیات عملکرد نمونه ها را بر اساس درصد رشد یا افت نسبت به نمونه مبنای محوری و جانبی خود نشان می دهد. در حالت کلی از مقایسه عملکرد نمونه های L و T شکل در کنار یکدیگر می توان نتیجه گرفت که اگر به جای نمونه ورق های سخت کننده داخلی از لوله های دایره ای استفاده شود، عملکرد محوری و جانبی آن به مراتب بهتر می شود. با دقت در شکل ۸ می توان دو نتیجه زیر را مشاهده نمود:

۱. ستون فولادی CFST در مقطع T شکل، دارای عملکرد محوری و جانبی بالاتری نسبت به عملکرد ستون فولادی CFST در مقطع L شکل برخوردار است و فقط شکل پذیری محوری مقطع L شکل کمی بالاتر از مقطع T شکل می باشد.
۲. در مقایسه ای که بین ستون CFST مقطع L با مقطع T شکل، در جزئیات عملکرد نمونه ها بر اساس درصد رشد یا افت نسبت به نمونه مبنای محوری و جانبی خود انجام گردید، مشخص شد که در هر تقویت سخت کننده داخلی در مقطع L شکل و مقطع T شکل، درصد رشد یا افت (نسبت به نمونه مینا) عملکردهای محوری و جانبی تقریباً مشابه یکدیگر است.

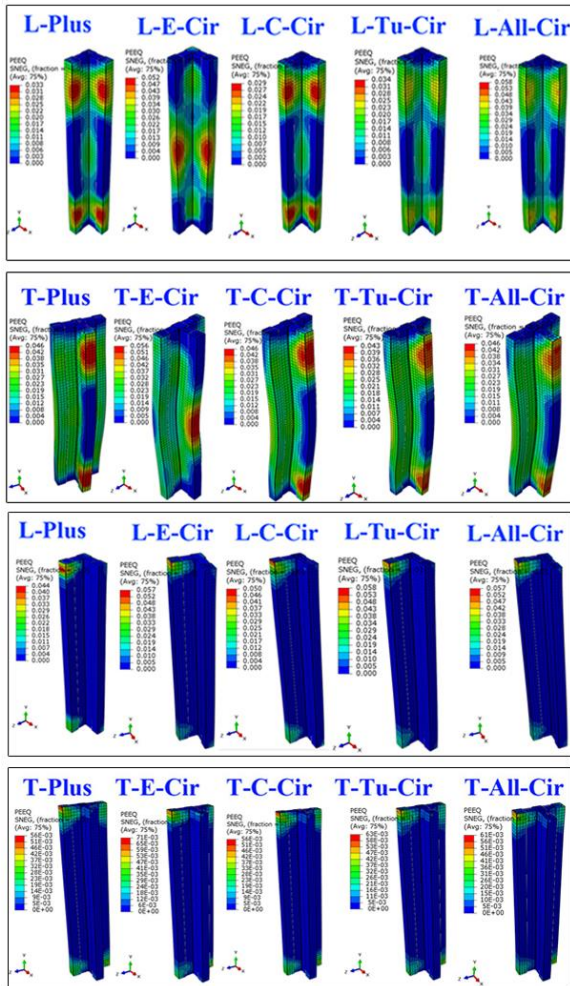
با بررسی تمامی نمودارهای بار-جابه جایی ستون های پارامتریک CFST با مقطع L شکل و T شکل در حالات بارگذاری محوری و جانبی مشخص گردید که در جابه جایی محوری (به سمت پایین) و جانبی به ترتیب در حدود ۵ و ۱۵ میلی متر مقطع جاری می گردد که پس از آن مقاومت تقریباً ثابت و یا نزولی می گردد.

با کنار هم قرار دادن تمام اطلاعات مربوط به عملکردهای محوری و جانبی نمونه های مورد بحث ستون CFST با مقطع L شکل و مقطع T شکل، همراه با تقویت سخت کننده های داخلی، می توان در خصوص آن ها اظهار نظر نمود. در هر صورت جهت پی بردن دقیق به عملکرد ستون ها نیاز است که تمام نمودارها طبق الگوی انرژی معادل دوخطی شوند و در ادامه عملکردها در تمامی نمونه ها همراه با تقویت سخت کننده های داخلی آن ها در جدول ۴ نشان داده می شود.

جدول ۴- نمایش عملکرد محوری و جانبی نمونه های مورد مطالعه مقاطع ستون CFST با مقاطع L شکل و T شکل.

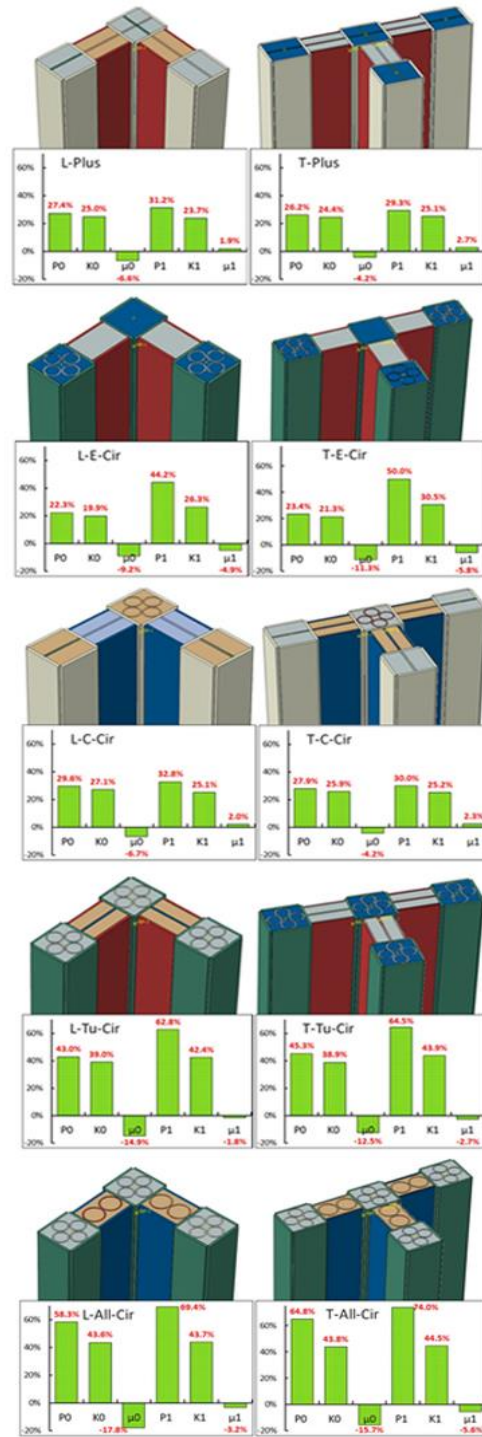
	مقاومت محوری	اولیه سختی محوری	پذیرش شکل محوری	مقاومت جانبی	اولیه سختی جانبی	پذیرش شکل جانبی
	P0 (kN)	K0 (kN/mm)	$\mu_0$	P1 (kN)	K1 (kN/mm)	$\mu_1$
Q-L	4569	1216	12.30	306.7	22.1	3.73
L-Plus	5820	1520	11.50	402.4	27.3	3.80
L-C-Cir	5923	1546	11.48	407.2	27.7	3.81
L-Tu-Cir	6532	1690	10.48	499.3	31.5	3.66
L-All-Cir	7232	1747	10.11	519.4	31.8	3.61
L-E-Cir	5587	1458	11.17	442.2	27.9	3.55
	مقاومت محوری	اولیه سختی محوری	پذیرش شکل محوری	مقاومت جانبی	اولیه سختی جانبی	پذیرش شکل جانبی
	P0 (kN)	K0 (kN/mm)	$\mu_0$	P1 (kN)	K1 (kN/mm)	$\mu_1$
Q-T	6326	1684	12.03	601.1	58.2	4.96
T-Plus	7987	2094	11.51	777.3	72.8	5.09
T-C-Cir	8090	2120	11.52	781.3	72.8	5.07
T-Tu-Cir	9193	2339	10.52	988.6	83.7	4.83
T-All-Cir	10423	2422	10.13	1046	84.1	4.68
T-E-Cir	7808	2043	10.66	901.9	75.9	4.67

مطابق جدول ۴ عملکردهای مقاومت، سختی و شکل پذیری با دو اندیس ۰ و ۱ در خصوص نمونه های مورد بررسی عنوان شده اند که به ترتیب نمایانگر عملکرد محوری و جانبی می باشد. لازم به ذکر است که نحوه محاسبه عملکرد مقاومت محوری (P0) و جانبی (P1) در نمونه های مورد بررسی به ترتیب از ماکزیمم مقاومت ثبت شده در نمودار های بار-جابه جایی محوری و برشی بدست می آید. همچنین نحوه محاسبه عملکرد



شکل ۹ - جزئیات عملکرد نمونه‌ی مقطع L و T شکل نسبت به نمونه مبنای محوری و جانبی خود.

در نرم‌افزار آباکوس کرنش (موثر) معادل پلاستیک ماندگار را با آرابه PEEQ<sup>۱</sup> نشان می‌دهند که پارامتر اسکالر است و این پارامتر میزان پلاستیسیته شدن سازه‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۹ کرنش معادل پلاستیک ماندگار ستون‌های فولادی پرشده از بتن با مقاطع L و T شکل تحت بارگذاری محوری و فشاری را نشان می‌دهد، رفتار تقریباً مشابه ستون‌ها فولادی پرشده از بتن مورد مطالعه در بارگذاری جانبی کرنش‌های ماندگاری را در ابتدا و انتهای ستون‌ها را نشان می‌دهد و در مورد بارگذاری محوری این کرنش‌ها متفاوت بوده و بیشتر در دو ناحیه یک سوم ابتدایی و انتهایی و یک ناحیه میانی مشاهده می‌شود.



شکل ۸ - جزئیات عملکرد نمونه‌ی مقطع L و T شکل نسبت به نمونه مبنای محوری و جانبی خود.

<sup>۱</sup> Plastic Strain Equivalent

## ۵- نتیجه گیری

در این مطالعه مشخص می‌گردد که با اضافه کردن ورق‌های فولادی در فضای بین ستون‌ها، مقاومت، سختی و شکل‌پذیری محوری و برشی چه تغییری می‌کند. در مرحله اول، پنج ستون فولادی پر شده از بتن L شکل و پنج ستون T شکل که توسط صفحات فولادی داخلی طولی مختلف و لوله های فولادی تحت بارگذاری محوری سخت شده بودند، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته و در مرحله دوم، پنج ستون فولادی پر شده از بتن L شکل و پنج ستون T شکل که توسط صفحات فولادی داخلی طولی مختلف و لوله های فولادی تحت بارگذاری جانبی سخت شده بودند، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته. مقایسه کلی بین نتایج حاکی از این واقعیت است که موارد تقویت داخلی در دو مدل، رفتار و عملکرد بهتری از لحاظ محوری و جانبی دارند، بنابراین نتایج به صورت عددی با یکدیگر مقایسه گردید که در ادامه به شرح نتایج پرداخته می‌شود:

- طبق بررسی انجام شده محوری و جانبی ستون CFST با مقطع L شکل و T شکل کنترلی، مشخص گردیده است که میزان مقاومت و سختی و شکل‌پذیری محوری مقطع T شکل کنترلی به ترتیب ۳۸٫۵٪، ۳۸٫۴٪ و ۰٫۲٪ - نسبت به میزان مقاومت و سختی و شکل‌پذیری محوری مقطع L شکل کنترلی عملکرد دارد. همچنین مشخص گردید که میزان مقاومت و سختی و شکل‌پذیری جانبی مقطع T شکل کنترلی به ترتیب ۹۶٪، ۶۵/۶٪ و ۹/۱٪ نسبت به میزان مقاومت و سختی و شکل‌پذیری جانبی مقطع L شکل کنترلی عملکرد دارد.
- طبق تحقیقات به عمل آمده مشخص شد که فقط در دو نمونه Plus و C-Cir در دو مقطع L و T شکل درصد شکل‌پذیری جانبی مثبت شده است و در بقیه نمونه‌ها شکل‌پذیری جانبی از نمونه مبنای خود کمتر شده است.
- در مقایسه بین دو نمونه E-Cir و C-Cir یعنی به ترتیب نمونه ستونی که فقط در ستون‌های اطراف داخلی تقویت و نمونه ستونی که فقط در ستون مرکزی داخلی تقویت است، مشخص گردیده است که اگر ستون CFST در اطراف تقویت شود (E-Cir) عملکرد محوری ضعیف‌تری نسبت به ستونی CFST دارد که در مرکز (C-Cir) تقویت شود ولی عملکرد جانبی بالاتری دارند.
- نتایج نشان می‌دهد که بهترین نمونه از لحاظ محوری و جانبی در عملکردهای مقاومت، سختی محوری و جانبی نمونه All-Cir می‌باشد، نمونه مبنا بهترین عملکرد شکل‌پذیری محوری و نمونه C-Cir نیز بهترین عملکرد شکل‌پذیری جانبی را از خود نشان می‌دهد.

- همچنین نتایج نشان می‌دهد که بهترین نمونه‌ها به ترتیب نمونه All-Cir و نمونه Tu-Cir می‌باشد که دارای سختی و مقاومت محوری و جانبی بالاتری نسبت به دیگر نمونه‌ها برخوردار هستند.

## فهرست منابع

- [1] احمدی، م.، خیرالدین، ب.، ۱۳۹۸، بررسی رفتار و مقایسه آیین‌نامه‌های معتبر دنیا در زمینه ستون‌های مرکب بتنی و فولادی، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال هشتم، شماره ۲۲.
- [2] Liu X, Xu Ch, Liu J. Research on special-shaped concrete-filled steel tubular columns under axial compression. Journal of Constructional Steel Research. 2018; 203-223.
- [3] Xiong Q, Chen Zh, Zhang W, Du Y. Compressive behaviour and design of L-shaped columns fabricated using concrete-filled steel tubes. Engineering Structures. 2017; 152: 758-770.
- [4] Xiong Q, Chena Zh, Kang J. Experimental and finite element study on seismic performance of the LCFSTD columns. Journal of Constructional Steel Research. 2017; 137: 119-134.
- [5] Xiong Q, Zhang W, Chen Zh. Experimental Study of the Shear Capacity of Steel Beam-to-L-CFST Column Connections. International Journal of Steel Structures. 2019; 19(3): 704-718.
- [6] Zheng Y, Zeng Sh. Design of L-shaped and T-shaped concrete-filled steel tubular stub columns under axial compression. Engineering Structures. 2020; 207: 110262.
- [7] Zheng Y, Yang Sh, Lai P. Hysteretic behavior of multi-cell L-shaped concrete-filled steel tubular columns at different loading angles. Engineering Structures. 2020; 202: 109887.
- [8] ABAQUS-V6.16-1. Finite Element Analysis Software. Johnston, RI, USA. ABAQUS/Standard theory. Manual, Dassault Systèmes Simulia Corp. 2015.
- [9] Chen Zh, Liu J, Zhou T, Yan X. Uniaxial Eccentric-Compression Performance Analysis for Double-Plate Connected Concrete-Filled Steel-Tube Composite Columns. J. Struct. Eng. 2020; 146(8): 04020161

