

## بررسی عملکرد لرزه‌ای ستون‌های CFDST با هندسه منشوری

قاسم پاچیده<sup>۱</sup>، مجید قلهکی<sup>۲\*</sup>، امین مشتاق<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۲- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۳- مربی، مهندسی عمران، دانشگاه گرمسار، گرمسار

\* سمنان، صندوق پستی ۱۹۱۱۱-۳۵۱۳۱، [mgholhaki@semnan.ac.ir](mailto:mgholhaki@semnan.ac.ir)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۷)

### چکیده

در این مقاله به بررسی عملکرد لرزه‌ای ستون‌های فولادی دوجداره پرشده با بتن با هندسه منشوری پرداخته شده است. بدین منظور تعدادی ستون با هسته داخلی مربع، لوزی و دایره‌ای شکل و هندسه خارجی منشوری شکل با سطح مقطع مربعی که با شیب ۲/۱ درجه از بالا به پایین افزایش یافته است، ساخته شد. کلیه ستون‌ها تحت بار چرخه‌ای با پروتکل بارگذاری ATC-24 قرار گرفته و بارگذاری تا مرحله گسیختگی ستون ادامه یافت. نتایج حاکی از آن است که با وجود اینکه مود خرابی ستون‌های با مقطع داخلی مربع و لوزی مشابه یکدیگر بوده اما ستون‌های با مقطع داخلی دایره آثار تخریبی و گسیختگی نامناسب‌تری نسبت به ستون‌های با مقطع داخلی مربع و لوزی داشته‌اند. همچنین مود گسیختگی پای ستون‌ها پس از ۲۰ سیکل بصورت کمربند قطری با زاویه ۴۵ درجه گسترش پیدا کرده است. سختی اولیه و ضریب شکل‌پذیری ستون‌های با مقطع داخلی لوزی تا حدود ۲ برابر سایر ستون‌ها می‌باشند. نکته دیگر این است که بعلاوه نرم‌تر شکستن ستون با مقطع داخلی دایره نسبت به سایر ستون‌ها، افت انرژی آن به یکباره نبوده است.

### واژگان کلیدی

ستون فولادی دوجداره پرشده با بتن، هندسه منشوری، عملکرد لرزه‌ای

## Investigate the seismic performance of CFDST columns with prism geometry

Gh. Pachideh, M. Gholhaki, A. Moshtagh

### Abstract

In this paper, we investigate the seismic performance of concrete dome filled concrete columns with prism geometry. For this purpose, a number of pillars with a square core, rhomboid, circular, and prism external geometry with a square cross-section that was raised with a 2.5 degree gradient from above up was made. All columns were loaded under the ATC-24 loading protocol and loaded until the rupture of the column continued. The results show that despite the collapse of the columns with the inner section of the square and the rhizosphere, the columns with the inner section of the circle have less damaging effects and rupture more than the columns with the internal section of the square and the rhombus. Also, the rupture pattern of the pillars after 20 cycles has been expanded in diameter belts with a 45 degree angle. The initial hardness and coefficient of ductility of the columns with the interior of the rhizome is about 2 times greater than the other columns. Another point is that due to the softer breakdown of the column with the inner section of the circle than the other columns, its energy loss has not suddenly been.

### Keywords

Concrete-filled double skin steel column (CFDST), Prismatic geometry, Seismic performance

تعداد زیادی از آیین نامه‌های طراحی به بررسی عملکرد ستون‌های CFT پرداخته‌اند که از جمله می‌توان به Japanese code AIJ [۱]، Australian code AS 5100 [۲]، European code EN1994 [۳]، American codes AISC [۴]، ACI [۵] و Chinese code DBJ 13-51-2010 [۶] اشاره نمود. در سال‌های اخیر، استفاده از فولاد و بتن با مقاومت بالا در ستون‌های فولادی پر شده با بتن در ساخت اسکلت تعداد زیادی از ساختمان‌ها توسعه یافته است. به عنوان مثال ساختمان Latitude در شهر سیدنی از فولاد با گرید ۶۹۰ مگاپاسکال و بتن با مقاومت ۸۰ مگاپاسکال در ستون CFT با مقطع باکس شکل ساخته شده است [۷]. در ژاپن، در ساخت ساختمان اصلی موسسه تحقیقات فنی Obayashi از ستون‌های CFST با فولاد گرید ۷۸۰ مگاپاسکال و بتن با مقاومت فشاری ۱۶۰ مگاپاسکال استفاده شد [۸]. در بررسی‌ها و تحقیقات بر روی ستون‌های CFST تاکنون مطالعات زیادی بر روی مقاومت فشاری آن‌ها انجام شده است، اما توجه زیادی به سختی فشاری و ظرفیت تغییرشکل آن‌ها نشده است [۹ و ۱۰].

تحقیقات اخیر بر روی عملکرد استاتیکی ستون‌های فولادی پر شده با بتن (CFST) شامل آزمایش‌ها، مدل‌سازی و محاسبه ستون تحت بار فشاری [۱۸-۱۱]، خمش خالص [۲۳-۱۹] و ترکیب بارگذاری [۲۶-۲۴] می‌باشند.

Mao و Xiao در سال ۲۰۰۶ به بررسی و مقایسه رفتار لرزه‌ای ستون‌های فولادی محصور شده مربع شکل پر شده با بتن با ستون‌های فولادی پر شده با بتن پرداختند. نتایج نشان داد که محصورشدگی سبب بهبود عملکرد لرزه‌ای و شکل پذیری مناسب شده است. همچنین یک روش طراحی برای محصورشدگی‌های اضافی در ناحیه مفصل پلاستیک توسعه یافت [۲۷].

Yi Song و همکارانش در سال ۲۰۱۰ به بررسی اجزاء محدود عملکرد ستون‌های فولادی دوجداره پر شده با بتن تحت بارگذاری ترکیبی فشار-دما پرداختند. آزمایش دما طبق استاندارد ISO-834 انجام شد. در نهایت، نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و از دقت مناسبی برخوردار بوده و به مدل‌ها و بارگذاری‌های دیگر نیز توسعه یافتند [۲۸].

Sadeghi Balkanlou و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به بررسی رفتار ستون‌های کوتاه کامپوزیتی مختلف با مقطع هندسی منشوری تحت بار خمشی پرداختند. قسمت داخلی ستون‌ها از لوله فولادی کربنی و سطح خارجی از فولاد زد زنگ تشکیل

شده که بین لایه داخلی و خارجی از بتن پر شده است. نتایج حاصل شده با نتایج بدست آمده از نرم افزار آباکوس مقایسه و مقادیر مقاومت نهایی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند [۲۹].

Hsiao و همکارانش در سال ۲۰۱۵ به بررسی رفتار ستون‌های فولادی دوجداره پر شده با بتن با مقاومت بالا و مقایسه آن با ستون‌های فولادی پر شده با بتن پرداختند. بدین منظور هشت ستون مقیاس شده تحت بار ترکیبی محوری و خمشی قرار گرفتند. در نتیجه پارامترهای مختلفی بررسی شده و تأثیر مقاومت بتن هسته، بار محوری و لوله فولادی داخلی و خارجی بر رفتار لرزه‌ای اعضای ستون مورد ارزیابی قرار گرفته و با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داده شد [۳۰].

Wanga و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به ارزیابی مقاومت، سختی و شکل پذیری ستون‌های فولادی پر شده با بتن تحت بار محوری پرداختند. بدین منظور تعداد زیادی مدل از این نوع از ستون‌ها در نرم افزار اجزاء محدود مورد تحلیل قرار گرفته و روابطی جهت پیش بینی مقاومت نهایی، سختی، شکل پذیری و غیره ارائه شد [۳۱].

علت اصلی استفاده از ستون‌های با هندسه خارجی شیب‌دار این بوده است که تاکنون تحقیقات بسیار زیادی در رابطه با ستون‌های با هندسه خارجی بدون شیب انجام شده است اما شیب‌دار بودن ستون می‌تواند رفتار لرزه‌ای و گسیختگی متفاوتی نسبت به سایر ستون‌ها در بر داشته باشد با این دیدگاه که ظرفیت باربری ستون و به تبع ظرفیت خمشی پای ستون نیز افزایش خواهد یافت. در این مقاله با توجه به مطالعات انجام شده و خلأهای تحقیقاتی موجود، به بررسی عملکرد لرزه‌ای ستون‌های فولادی دوجداره پر شده با بتن با مقطع خارجی منشوری با شیب ۲/۱ درجه از بالای ستون تا پایین ستون و مقطع داخلی ستون‌ها به صورت مربع، لوزی و دایره پرداخته شد. در نهایت منحنی‌های هیستریزس و پوش چرخه‌های هیستریزس ستون‌ها و پارامترهای مختلف حاصل از آن (مقاومت تسلیم، ظرفیت باربری، تغییر مکان‌ها، ضریب شکل‌پذیری و انرژی جذب شده) با یکدیگر مقایسه شدند.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه تعدادی ستون فولادی دو جداره پر شده با بتن با هندسه منشوری بررسی شدند. شکل (۱) نمای شماتیک و جدول (۱) جزئیات هندسی مربوط به ستون‌ها با هندسه‌های مختلف را نشان می‌دهند. همانطور که ملاحظه می‌شود، مقطع داخلی ستون‌ها دایره، لوزی و مربع بوده و در تمامی طول ستون



پایین ستون، قطر داخلی لوله فولادی داخلی، بعد داخلی مربع و لوزی درونی و ضخامت ورق، پروفیل و لوله فولادی می باشد.

### ۳- مشخصات بتن مصرفی

در جدول (۲) مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت بتن و همچنین طرح اختلاط مورد آزمایش نشان داده شده است. با توجه به اینکه کلیه مراحل ساخت، عمل آوری و آزمایشات حرارتی و مقاومتی ستون‌ها در محل آزمایشگاه پژوهشی سازه دانشگاه سمنان انجام شده است، بنابراین سعی شده است تمامی مصالح مصرفی از کارخانجات و معادن استان سمنان تهیه شود. لازم به ذکر است که علت کلی استفاده از میکروسیلیس در ساخت بتن، افزایش دوام و مقاومت فشاری بتن می باشد.

جدول ۲- مشخصات مصالح مصرفی و طرح اختلاط بتن

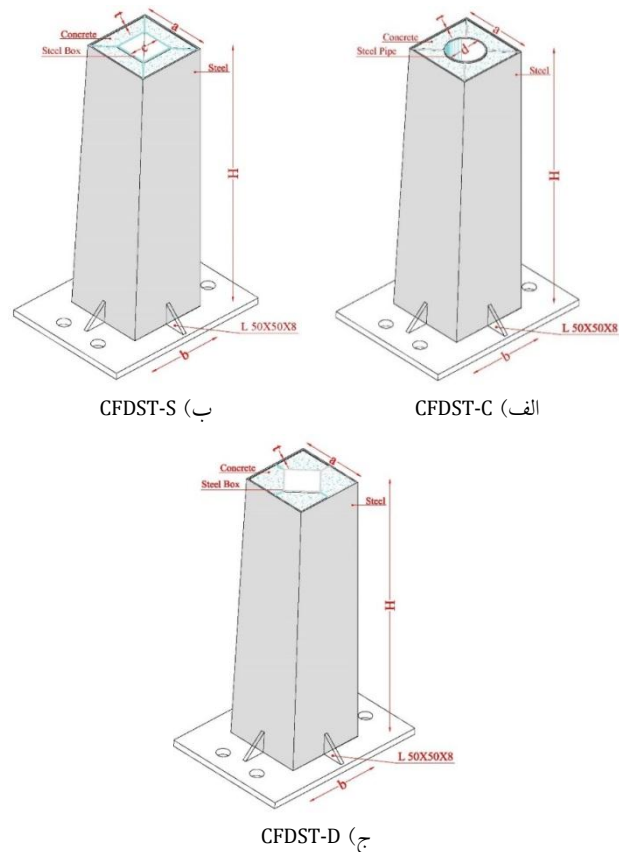
سیمان	تیپ ۲ (شاهرود)	$350 \text{ Kg/m}^3$
میکروسیلیس	کارخانه فورسیلیس سمنان	$50 \text{ Kg/m}^3$
شن ریزدانه (نخودی)	گوهر	$778 \text{ Kg/m}^3$
ماسه	طبیعی دوبارشور	$1085 \text{ Kg/m}^3$
آب	آب شرب شهر سمنان	$148 \text{ Kg/m}^3$
روان کننده	ابر روان ساز کربوکسیلاتی (C20)	۰.۳٪ وزنی سیمان

نحوه اختلاط مصالح برای ساخت بتن، طبق استاندارد ASTM C192 انجام شد. عمل آوری نمونه ها بر روی بتن با سن ۲۸ روزه انجام شد و با انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های استوانه ای استاندارد با ابعاد  $20 \times 10$  سانتی متر در زیر جک هیدرولیک تمام اتوماتیک شرکت Toni Technik با سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه بر طبق استاندارد EN-12390-13 [۳۲]، مقاومت فشاری بتن داخل ستون‌ها بدست آمد. بدین منظور تعداد ۵ عدد نمونه استوانه‌ای مشابه از طرح اختلاط مورد نظر ساخته شده و نتایج ۵ آزمون مورد نظر به ترتیب برابر  $34/48$ ،  $33/92$ ،  $32/49$ ،  $33/25$  و  $33$  مگاپاسکال حاصل شده است که با میانگین‌گیری، مقاومت فشاری بتن مصرفی در ساخت ستون‌ها برابر  $33/43$  مگاپاسکال در نظر گرفته شد.

### ۴- مراحل ساخت ستون‌ها

مقطع داخلی ستون‌ها که به صورت لوزی، مربع و دایره‌ای هستند، از شکل قوطی و لوله‌های فولادی بدون درز با مشخصات فولاد ST37 در آزمایشگاه مهندسی مواد دانشگاه

بدون تغییر ابعادی ادامه یافتند. اما مقطع بیرونی ستون‌ها متفاوت بوده، به طوری که مقطع فوقانی ستون با شیب  $2/1$  درجه افزایش و تا مقطع تحتانی ستون ادامه یافته است. همچنین لازم به ذکر است که ارتفاع عمودی ستون برابر  $64$  سانتی متر می باشد. یکی از ویژگی‌های مهم ستون‌ها با توجه به ابعاد مقطع داخلی ستون‌ها، سطح مقطع برابر مقاطع دایره، لوزی و مربع می باشد.



شکل ۱- جزئیات هندسی ستون‌ها

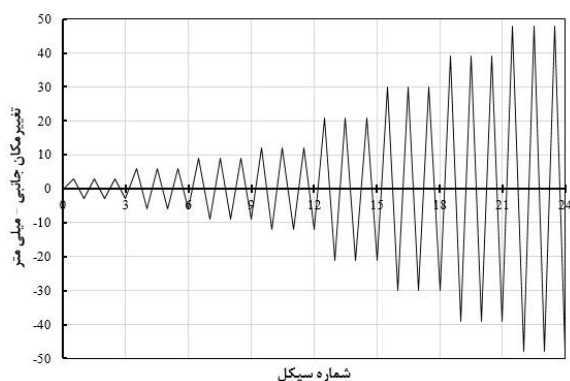
جدول ۱- جزئیات ابعادی ستون‌ها (سانتی متر)

نام ستون	$H$	$a$	$b$	$d$	$c$	$t$
CFDST-C	64	162	18/50	8/2	-	0/3
CFDST-S	64	162	18/50	-	7/25	0/3
CFDST-D	64	162	18/50	-	7/25	0/3

در جدول (۱) که در آن اسامی CFDST-S، CFDST-C و CFDST-D به ترتیب نشان‌دهنده ستون های فولادی دوجداره بر شده با بتن با مقطع داخلی دایره، مربع و لوزی می باشند. همچنین پارامترهای  $H$ ،  $a$ ،  $b$ ،  $d$ ،  $c$  و  $t$  به ترتیب نشانگر ارتفاع عمود ستون، بعد خارجی بالای ستون، بعد خارجی

## ۵- آزمایش ستون‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای

به منظور بررسی رفتار ستون‌ها و تأثیر هندسه داخلی مقطع ستون‌ها بر عملکرد آن، آزمایش چرخه‌ای بر اساس پروتکل بارگذاری ATC-24 بر روی کلیه ستون‌ها انجام شد. شکل (۳) پروتکل بارگذاری استفاده شده در آزمایش چرخه‌ای را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سیکل‌ها به صورت سه‌تایی تکرار شده و تا تغییر مکان ۴۸ میلی متر ادامه یافتند.



شکل ۳- پروتکل بارگذاری ATC-24

## ۵-۱- آماده سازی ستون‌ها جهت انجام تست

پس از ساخت ستون‌ها، کلیه ستون‌ها آماده انجام آزمایش چرخه‌ای شده‌اند. بدین منظور ورق‌های فولادی به ضخامت ۱/۵ سانتی متر و در ابعاد ۴۰×۳۰ سانتی متر فراهم شده و به همراه سخت کننده‌ها (لچکی به ابعاد قاعده و ارتفاع ۷ سانتی متر و ضخامت ۰/۸ سانتی متر) در دو پاس جوش، به ستون‌ها جوش داده شدند تا هنگام انجام آزمایش چرخه‌ای، ستون‌ها از محل اتصال با کف صلب آزمایشگاه جدا نشوند و شکستگی را صرفاً در مقاطع ستون مشاهده نمود.

کلیه ستون‌ها به کف صلب آزمایشگاه که با سوراخ‌هایی به قطر ۳ سانتی متر و فاصله مرکز به مرکز سوراخ‌ها برابر ۱۰ سانتی متر تعبیه شده‌اند، با پیچ نمره ۲۸ و مهره مناسب متصل شدند. ظرفیت اسمی جک بارگذاری استفاده شده برابر ۱۰۰ تن بوده که بار را به صورت رفت و برگشتی تحت نیروهای فشاری و کششی به ستون‌ها اعمال می‌کند. برای اعمال بار جانبی به انتهای ستون، دو ورق فولادی به ضخامت ۳ سانتی متر در دو طرف سمت راست و چپ ستون در نظر گرفته شده که با چهار میل‌مهار به قطر ۲/۸ سانتی متر به همدیگر متصل شدند. این ورق‌ها با پین به محرک نیروی افقی متصل شده‌اند و با اعمال تغییر مکان افقی به صورت متناوب و افزایش یابنده بار جانبی به انتهای نمونه وارد می‌شود.

سمنان تحت آزمایش کشش حاصل شده است (جدول (۳)) و با ضخامت ۰/۳ سانتی متر در طول مورد نظر برش خوردند. بنابراین مقطع داخلی ستون‌ها در کارخانه مطابق استانداردهای لازم ساخته شدند به طوری که در بازار آهن کشور ایران موجود بوده و به راحتی قابل تهیه کردن هستند. اما مقطع بیرونی ستون‌ها با توجه به اینکه از هندسه یکسانی برخوردار نبوده و به صورت شیب‌دار (شیب ۲/۱ درجه) از بالا به پایین افزایش می‌یابند، لذا چنین مقطعی در بازار موجود نبوده و بدین منظور از ورق‌های فولادی ST37 با ضخامت ۰/۳ سانتی متر استفاده شده و وجوه خارجی مقطع متشکل از چهار دوزنقه بوده، ورق‌ها به صورت مجزا برش خورده و به کمک جوش نفوذی در سرتاسر ارتفاع ستون به یکدیگر متصل شدند. لازم به ذکر است که با توجه به هندسه نامنظم مقطع بیرونی ستون، امکان خم کردن ورق و کاهش استفاده از جوش در گوشه‌ها وجود نداشته، به همین دلیل حتماً می‌بایست از ورق‌های برش خورده مجزا استفاده می‌شد.

به جهت اینکه هنگام بتن ریزی در مابین جدار ستون‌ها، فاصله بین مقطع داخلی و خارجی برهم نخورد در مقاطع بالا و پایین ستون‌ها در گوشه‌های آن میلگردهای آجدار به قطر ۱۰ میلی متر جوش داده شده تا جدارهای داخلی و خارجی به یکدیگر فیکس شوند، اما نقش باربری ندارند. شکل (۲) تصویر ستون‌های ساخته شده قبل از بتن ریزی را نشان می‌دهد.

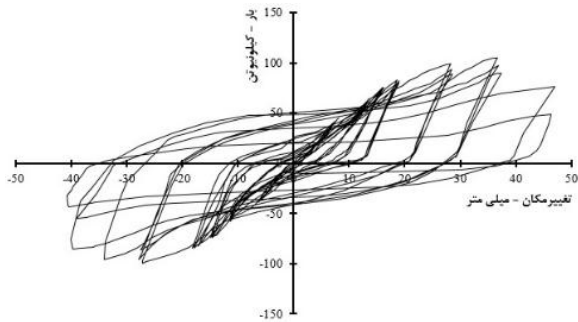
جدول ۳- مشخصات فولاد مصرفی طبق آزمایش کشش

مقاطع	داخلی ستون	خارجی ستون
تنش تسلیم، $F_y$ ، (مگاپاسکال)	۳۱۸	۳۳۰
تنش نهایی، $F_u$ ، (مگاپاسکال)	۴۱۵	۴۲۵
کرنش تسلیم، $\epsilon_y$	۰/۰۴۵	۰/۰۰۶
کرنش نهایی، $\epsilon_u$	۰/۲۱	۰/۲۳

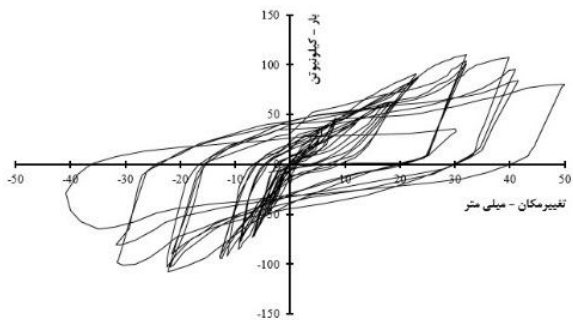


شکل ۲- ستون‌های ساخته شده قبل از بتن ریزی

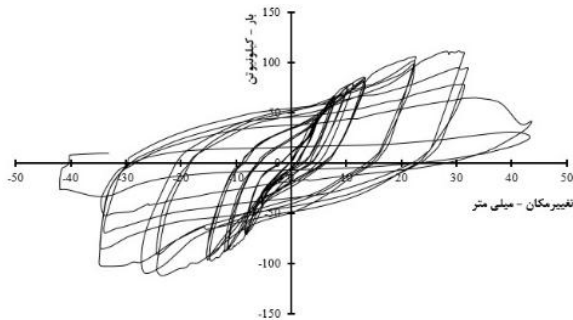
نتایج حاصل از تست ستون‌ها و همچنین مود گسیختگی هر کدام در شکل‌های (۶) تا (۸) ارائه شده است.



الف) CFST-C

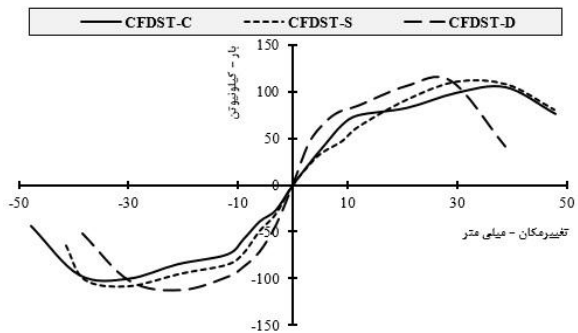


ب) CFST-S



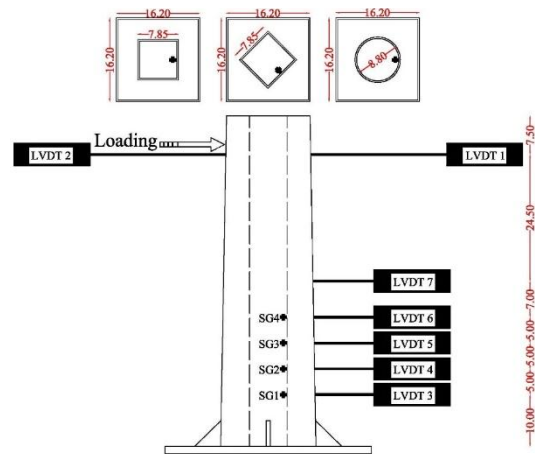
ج) CFST-D

شکل ۶- نمودار هیستریزس حاصل از تست ستون‌ها

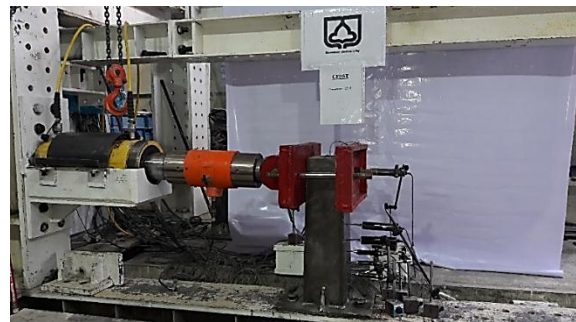


شکل ۷- نمودار پوش حاصل از منحنی هیستریزس ستون‌ها

به منظور بررسی کرنش‌ها و تغییر مکان‌های ستون در نقاط هدف، کرنش سنج‌ها (با قابلیت اندازه‌گیری کرنش‌های پلاستیک تا ۰/۵ درصد) و LVDT‌هایی (با قابلیت اندازه‌گیری تغییر مکان‌های تا ۲/۵، ۵ و ۱۰ سانتی متر) در قسمت‌های مختلف ستون تعبیه شدند. شکل (۴) و (۵) تصاویر شماتیک و فواصل قرارگیری کرنش سنج‌ها و LVDT‌ها و همچنین شکل کلی بارگذاری ستون‌ها در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، کرنش سنج‌ها صرفاً در مقطع درونی و LVDT‌ها در یک جهت و در مقطع بیرونی بکار رفتند. LVDT‌های شماره‌های ۱ تا ۷ به ترتیب قابلیت اندازه‌گیری جابجایی‌های تا ۱۰، ۱۰، ۲/۵، ۲/۵، ۲/۵، ۵ و ۵ سانتی متر را دارند.



شکل ۴- جانمایی قرارگیری کرنش سنج‌ها و LVDT‌ها



شکل ۵- نمای کلی بارگذاری ستون‌ها در آزمایشگاه

## ۲-۵- نتایج آزمایشات چرخه‌ای

پس از تنظیم Setup آزمایشگاه و قرارگیری ستون‌ها به صورت یک‌سرگردار در قاب صلب آزمایشگاه در محل اعمال جک بارگذاری، فرآیند اعمال نیرو به ستون‌ها آغاز شده و تا مرحله گسیختگی (حدود ۵۰ درصد افت نیرو) ادامه یافتند. بنابراین



CFDST-S (ب)



CFDST-C (ف)



CFDST-D (ج)

شکل ۸- مود گسیختگی ستون‌ها

شروع به گسیخته شدن نمودند. بنابراین می‌توان گفت به طور کلی تقریباً در تمامی ستون‌ها پس از ۱۵ سیکل، ظرفیت باربری ستون‌ها تا حدود ۵۰ درصد افت داشته و فرآیند بارگذاری متوقف شده است.

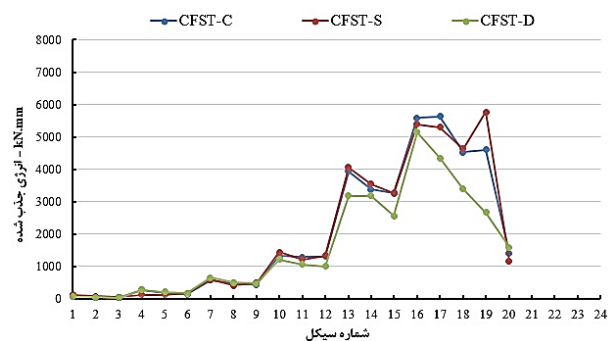
در جدول (۴) وضعیت ستون‌ها در لحظه آغاز گسیختگی طبق مشاهدات حین انجام تست آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد به طور کلی به ترتیب ستون‌های با مقطع داخلی لوزی، مربع و دایروی تحت بار بیشتری فرآیند آغازین گسیختگی را متحمل شده و در همه ستون‌ها پس از ۱۵ سیکل

جدول ۴- وضعیت ستون‌ها در لحظه آغاز گسیختگی

شماره سیکل	۱۵	۱۵	۱۵
بار (کیلو نیوتن)	۱۱۲	۱۱۰/۵	۱۰۰
تغییر مکان (میلی متر)	۲۱	۲۱	۲۱
دریفت (درصد)	۳/۵	۳/۵	۳/۵

### ۳-۵- انرژی جذب شده

مساحت داخلی حلقه‌های هیستریزیس بیانگر میزان انرژی جذب شده می‌باشد. بنابراین نمودارهای انرژی جذب شده ستون‌ها در شکل (۹) آورده شده است.



شکل ۹- انرژی جذب شده ستون‌ها

همانطور که از شکل (۹) مشاهده می‌شود، بارگذاری کلیه ستون‌ها تا ۲۰ سیکل ادامه داشته و سپس گسیخته شدند. میزان انرژی جذب شده تا ۱۰ سیکل برای تمامی ستون‌ها تقریباً با یکدیگر برابر بوده، چراکه هنوز تغییر مکان‌های زیاد به ستون‌ها اعمال نشده‌اند که بتوان عملکرد هر ستون را مقایسه نمود. از سیکل شماره ۱۰ تا ۲۰ مقدار انرژی جذب شده ستون با مقطع داخلی لوزی کمتر از سایر ستون‌ها (مربع - دایره) شده اما در ستون‌های با مقطع داخلی دایره و مربع، مقادیر انرژی اختلاف چندانی با یکدیگر نداشته‌اند. همچنین در ستون با مقطع لوزی، شیب کاهشی زیادی در مقدار جذب انرژی از سیکل شماره ۱۶ رخ داده است که علت را می‌توان به گسیختگی مقطع داخلی ستون در آن سیکل مرتبط دانست.

بنابراین با جمع‌بندی نتایج حاصل از شکل (۹) می‌توان بیان نمود که، به طور کلی هرچه توزیع و شکل هندسی مقطع میانی ستون مناسب‌تر و همگن‌تر باشد، خاصیت جذب انرژی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین مقدار جذب انرژی ستون‌های با مقطع داخلی دایره و مربع بهتر از ستون لوزی عمل کردند. همچنین ستون با مقطع داخلی دایره نرم‌تر از سایر ستون‌ها می‌شکند و

افت انرژی آن به یکباره نخواهد بود.

### ۶- جمع‌بندی نتایج

با جمع بندی کلی از نتایج حاصل از آزمایش چرخه‌ای شامل نمودارهای هیستریزیس و پوش ستون‌ها، مقادیر بدست آمده به طور خلاصه در جدول (۵) آورده شده است. پارامتر سختی اولیه ( $K_{initial}$ ) برابر نیروی نقطه اول در سیکل اول تقسیم بر جابجایی آن می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد، به طور کلی سختی اولیه ستون‌های با مقطع داخلی لوزی تا حدود دو برابر بیشتر از ستون‌های با مقطع مربع و دایره است. همچنین سختی اولیه ستون‌های با مقطع داخلی مربع و دایره به علت فرارگیری منظم در ارتفاع ستون، اختلاف زیادی با هم ندارند.

جدول ۵- جمع بندی نتایج حاصل از تست‌ها

نتایج	CFDST-C	CFDST-S	CFDST-D
سختی اولیه، $K_{initial}$ کیلو نیوتن بر میلی متر	۷/۶۱	۷/۰۳	۱۵/۰۷
مقاومت تسلیم، $P_y$ کیلو نیوتن	۹۱/۹۴	۱۰۶/۲۸	۱۰۱/۷۵
ظرفیت باربری، $P_{max}$ کیلو نیوتن	۱۰۵	۱۱۰/۵	۱۱۱/۵
تغییر مکان نظیر مقاومت تسلیم، $\Delta_y$ میلی متر	۱۳/۳۲	۲۲/۵۴	۱۰/۱۶
تغییر مکان نظیر ظرفیت باربری، $\Delta_{P_{max}}$ میلی متر	۳۸/۸۷	۲۹/۸۵	۲۸/۹۴
تغییر مکان نهایی، $\Delta_u$ میلی متر	۴۵/۵۵	۴۵/۱۳	۳۲/۱۰
ضریب شکل پذیری، $\mu$	۲/۱۲	۲/۰۰	۳/۱۶
انرژی جذب شده تجمعی کیلو نیوتن.میلی متر	۳۸۴۴۰/۸۷	۳۹۳۳/۴۸	۳۱۷۲۰/۵۶

مقاومت تسلیم ستون‌ها به کمک روش پاولی و پرسیلی برای دوخطی کردن نمودارها محاسبه شد. در ستون با مقطع داخلی دایره با وجود سختی تقریباً برابر با ستون با مقطع داخلی مربع، اما مقاومت تسلیم آن در حدود ۰/۸۷ ستون با مقطع داخلی مربع می‌باشد. اما ظرفیت باربری نهایی ستون‌ها تفاوت زیادی با هم نداشته که این مسأله نشان دهنده عدم وابستگی مقطع داخلی ستون‌ها در تعیین ظرفیت باربری می‌باشد. همچنین ظرفیت جذب انرژی ستون‌های با مقطع داخلی دایره و مربع تا حدود ۱/۲۳ برابر ستون‌های با مقطع داخلی لوزی می‌باشد

- [4] American Institute of Steel Construction (AISC), (2010), Specification for structural steel buildings, AISC 360-10, Chicago (IL).
- [5] American Concrete Institute, (2011), Building code requirements for structural concrete and commentary, ACI 318-11, Farmington Hills, MI.
- [6] DBJ 13-51-2010, (2010), Development of Fujian Province, the technical specification for concrete-filled steel tubular structures, Department of Housing and Urban.
- [7] Chaseling, C. (2004), "Star attraction", Modern Steel Construction, Vol. 37, pp. 36-42.
- [8] Liew, J.Y.R., Xiong, M.X. and Xiong, D.X. (2014), "Design of high strength concrete-filled tubular columns for tall buildings", International Journal of High-Rise Buildings, Vol. 3, pp. 215-221.
- [9] Han, L.H., Yao, G.H. and Zhao, X.L. (2005), "Tests and calculations of hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC)", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 61, pp. 1241-1269.
- [10] Ding, F.X., Yu, Z.W., Bai, Y. and Gong, Y.Z. (2011), "Elasto-plastic analysis of circular concrete-filled steel tube stub columns", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 67, pp. 1567-1577.
- [11] Yu, Z.W., Ding, F.X. and Cai, C.S. (2007), "Experimental behavior of circular concrete-filled steel tube stub columns", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 63, pp. 165-174.
- [12] Uy, B., Tao, Z., Liao, F.Y. and Han, L.H. (2009), "Behaviour of slender square concrete-filled stainless steel columns subject to axial load", The eleventh Nordic Steel Construction Conference, NSCC2009, Malmö, Sweden, pp. 359-366.
- [13] Tao, Z., Wang, Z. and Yu, Q. (2013), "Finite element, modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 89, pp. 121-131.
- [14] Choi, K.K. and Xiao, Y. (2010), "Analytical studies of concrete-filled circular steel tubes under axial compression", Journal of Structural Engineering, Vol. 136, pp. 565-573.
- [15] Dai, X. and Lam, D. (2010), "Numerical modelling of the axial compressive behaviour of short concrete-filled elliptical steel columns", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 66, pp. 542-555.
- [16] Ding, F., Li, Z., Cheng, S. and Yu, Z. (2016), "Composite action of octagonal concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading", Thin-Walled Structures, Vol. 107, pp. 453-461.
- [17] Yu, M., Zha, X., Ye, J. and She, C. (2010), "A unified formulation for hollow and solid concrete-filled steel tube columns under axial compression", Engineering Structures, Vol. 32, pp. 1046-1053.
- [18] Dai, X.H., Lam, D., Jamaluddin, N. and Ye, J. (2014), "Numerical analysis of slender elliptical concrete filled columns under axial compression", Thin-Walled Structures, Vol. 77, pp. 26-35.
- [19] Chitawadagi, M.V. and Narasimhan, M.C. (2009), "Strength deformation behaviour of circular concrete filled steel tubes subjected to pure bending", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, pp. 1836-1845.
- [20] Elchalakani, M., Zhao, X.L. and Grzebieta, R.H. (2001), "Concrete-filled circular steel tubes subjected to pure bending", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, pp. 1836-1845.

که این پدیده را می‌توان به مقادیر تغییر مکان نهایی آن‌ها مرتبط دانست. نتایج حاصل از تغییر مکان‌ها و ضریب شکل پذیری نیز متشابهاً در جدول (۵) قابل مشاهده است.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی عملکرد لرزه‌ای ستون‌های فولادی دوجداره پرشده با بتن با مقطع منشوری پرداخته شد. بدین منظور مقطع داخلی ستون‌ها به صورت دایره، مربع و لوزی بوده که نتایج ذیل حاصل شد:

- آغاز گسیختگی در کلیه ستون‌ها از پای ستون و در گوشه‌ها با زاویه ۴۵ درجه به صورت قطری و جداشدگی بتن از ناحیه فولادی ایجاد شده‌اند. همچنین شدت گسیختگی‌ها نشان داده است که ستون‌های با مقطع داخلی دایره خرابی شدیدتری نسبت به سایر ستون‌ها داشته‌اند.
- به طور کلی تقریباً در تمامی ستون‌ها پس از ۲۰ سیکل، ظرفیت باربری ستون‌ها تا حدود ۵۰ درصد افت داشته و فرآیند بارگذاری متوقف شد. در این بین، ستون‌های با مقطع داخلی دایره، زودتر از سایر ستون‌ها گسیخته شده و عملکرد مناسبی در این مسأله نداشتند. بنابراین با جمع‌بندی نتایج افت ظرفیت باربری ستون‌ها می‌توان دریافت که ستون‌های با مقطع داخلی مربع بهتر از سایر ستون‌ها می‌باشند.
- به علت نرم‌تر شکستن ستون با مقطع داخلی دایره نسبت به سایر ستون‌ها، افت انرژی آن به یکباره نبوده است.
- سختی اولیه ستون‌های با مقطع داخلی لوزی تا حدود ۲ برابر سختی اولیه ستون‌های با مقطع داخلی مربع و دایره می‌باشد.
- به طور کلی بیشترین مقاومت تسلیم و ظرفیت باربری مربوط به ستون‌های با مقطع داخلی لوزی، مربع و دایره است که بیشترین اختلاف در مقاومت تسلیم و ظرفیت باربری تا حدود ۲۰ درصد است.

## ۸- مراجع

- [1] Architectural Institute of Japan (AIJ), (1998), Recommendations for design and construction of concrete-filled steel tubular structures, Tokyo, Japan, AIJ.
- [2] Standards Australia. Bridge design, (2004), Part 6: steel and composite construction, AS5100.6-2004, Sydney, Australia.
- [3] European Committee for Standardization (CEN), (2004), Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1994- 1-1 Eurocode 4, Brussels.



- [21] Yu, Q., Tao, Z., Chen, Z.-B. and Wu, Y.-X. (2008), "Flexural behavior of steel tube confined concrete members under pure bending", *Engineering Mechanics*, Vol.25, pp. 187-193.
- [22] Moon, J., Roeder, C.W., Lehman, D.E. and Lee, H.-E. (2012), "Analytical modeling of bending of circular concrete-filled steel tubes", *Engineering Structures*, Vol. 42, pp. 349-361.
- [23] Fa-Xing, D. and Zhi-Wu, Y.U. (2006), "Pure bending properties of self-compacting concrete filled circular steel tube", *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, Vol. 6, pp. 63-68.
- [24] Nie, J., Wang, Y. and Fan, J. (2013), "Experimental research on concrete filled steel tube columns under combined compression-bending-torsion cyclic load", *Thin-Walled Structures*, Vol. 67, pp. 1-14.
- [25] Portolés, J.M., Romero, M.L., Bonet, J.L. and Filippou, F.C. (2011), "Experimental study of high strength concrete-filled circular tubular columns under eccentric loading", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, pp. 623-633.
- [26] Choi, Y., Foutch, D.A. and Lafave, J.M. (2006), "New approach to AISC P-M interaction curve for square concrete filled tube (CFT) beam-columns", *Engineering Structures*, Vol. 28, pp. 1586-1598.
- [27] Mao, X.Y. and Xiao, Y. (2006), "Seismic behavior of confined square CFT columns", *Engineering Structures*, Vol. 28, pp. 1378-1386.
- [28] Song, T.-Y., Han, L.-H. and Yu, H.-X. (2010), "Concrete filled steel tube stub columns under combined temperature and loading", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, pp. 369-384.
- [29] Sadeghi Balkanlou, V., Karimi, M.R. Hasanbakloo, A. and Bagheri Azar, B. (2014), "Study the behavior of different composite short columns (DST) with prismatic sections under bending load", *International Journal of Civil and Environmental Engineering* Vol:8, pp. 721-729.
- [30] Hsiao, P.-C., Hayashi, K., Nishi, R., Lin, X.-C. and Nakashima, M. (2015), "Investigation of concrete-filled double-skin steel tubular columns with ultrahigh-strength steel", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 141, pp. 1-8.
- [31] Wanga, Z.-B., Tao, Z., Han, L.-H., Uy, B., Lam, D. and Kang, W.-H. (2017), "Strength, stiffness, and ductility of concrete-filled steel columns under axial compression", *Engineering Structures*, Vol. 135, pp. 209-221.
- [32] NF EN 12390-13 AFNOR, (2013), Testing hardened concrete, in: Determination of Secant Modulus of Elasticity in Compression, pp. 418-455.