



Research Article

Numerical Assessment of the Cyclic Behavior of Concrete-Filled Steel Tubular Beam-Columns with Polygon Sections

Morteza Naghipour^{1*}, Arash Javadi Ashrafi²

1- Professor, Department of Structural and Earthquake Engineering, Noshirvani University of Technology | NIT, Babol, Iran

2- Master, Structural engineering, Shomal University, Amol, Iran

Received: 09 May 2022; Revised: 24 May 2022; Accepted: 14 June 2022; Published: 14 June 2022

Abstract

Concrete-filled steel pipes (CFSTs) are increasingly used in the construction industry due to their high bearing capacity, high ductility and energy dissipation capacity, as well as high toughness and toughness under cyclic loads compared to conventional hollow steel pipes. Have become common. In this research, numerical evaluation of cyclic behavior of steel columns filled with concrete polygon sections is the main direction of the article. The research method of this study was based on finite components using Abaqus software. For the accuracy of the numerical responses, a numerical sample was simulated in accordance with the laboratory sample and the results were validated. In the next step, parametric study was performed on the cyclic behavior of steel columns filled with polygon sections. The geometrical parameters of column cross section, steel wall thickness, concrete compressive strength and axial force ratio were investigated. The geometrical shape of the cross sections was 4, 6, 8, and 12 rectangular and circular. Steel wall thicknesses of 3, 4 and 5 mm, compressive strength of concrete 20, 30 and 40 MPa and axial force ratio above the column are considered 0.1, 0.3 and 0.5. Loading into concrete filled steel columns with two polygon sections was done in two stages, first in axial pressure load and in the second stage in cyclic load as control-displacement. The results showed that the geometric shape parameter of the column cross section when changing from circle to rectangle causes maximum increment of indices of stiffness, force the yield, ultimate strength, ductility and energy are 37%, 36%, 32%, 64% and 71%, respectively. The ratio of the axial force applied to the structure to the maximum lateral load utilization with respect to the values of 0.3 is recommended and the cross section geometry index has the greatest impact on the strength, ductility and energy dissipation without any change.

Keywords:

Concrete Filled Steel Tube Column, Polygon Steel Tube, Cyclic Load, Final Bearing Capacity, Finite Elements

Cite this article as: Naghipour M, Javadi Ashrafi A. (2022). Numerical Assessment of the Cyclic Behavior of Concrete-Filled Steel Tubular Beam-Columns with Polygon Sections. *Civ Proj J*, 4(2), 38–50. <https://doi.org/10.22034/cpj.2022.04.02.1130>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2022 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: m-naghi@nit.ac.ir



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

ارزیابی عددی رفتار چرخه ای ستون های فولادی پر شده با بتن با مقاطع چند ضلعی

مرتضی نقی پور*^۱، آرش جوادی اشرفی^۲

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

۲- کارشناس ارشد عمران-سازه، دانشکده فنی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شمال، آمل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۹ اردیبهشت ۱۴۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۰۳ خرداد ۱۴۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۲۴ خرداد ۱۴۰۱؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۲۴ خرداد ۱۴۰۱

چکیده

لوله های فولادی پر شده با بتن (CFSTs) به دلیل ظرفیت باربری خوب، قابلیت شکل پذیری بالا و ظرفیت اتلاف انرژی و همچنین مقاومت و سختی بالا تحت بارهای چرخه ای در مقایسه با لوله های توخالی فولادی معمولی در صنعت ساختمان سازی به طور فزاینده ای رایج شده اند. در این پژوهش ارزیابی عددی رفتار چرخه ای ستون های فولادی پر شده با بتن با مقاطع چند ضلعی راستای اصلی مقاله است. روش تحقیق این مطالعات بر اساس اجزای محدود و با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام شد. برای اطمینان از صحت پاسخ های عددی، در گام اول نمونه ای عددی مطابق با نمونه آزمایشگاهی شبیه سازی گردید و نتایج صحت سنجی شده است. در گام بعد مطالعه پارامتریک بر روی رفتار چرخه ای ستون های فولادی پر شده با بتن با مقاطع چند ضلعی انجام گرفت که پارامترهای شکل هندسی مقطع ستون، ضخامت جداره فولادی، مقاومت فشاری بتن، نسبت نیروی محوری مورد بررسی قرار گرفتند. شکل هندسی مقطع ستون ۴، ۶، ۸، ۱۲ ضلعی و دایره ای در نظر گرفته شد. ضخامت جداره فولادی ۳، ۴ و ۵ میلیمتر، مقاومت فشاری بتن ۲۰، ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال و نسبت نیروی محوری اعمالی به بالای ستون ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ نیروی گسیختگی در نظر گرفته شده است. بارگذاری وارد شده به ستون های فولادی پر شده با بتن با مقاطع چند ضلعی بصورت دو مرحله ایی و در مرحله اول بار محوری فشاری و در مرحله دوم بار چرخه ای بصورت کنترل-جابجایی انجام گرفت. بررسی نتایج نشان داد که پارامتر شکل هندسی مقطع ستون زمانیکه از ۴ ضلعی به دایره تغییر حالت دهد باعث افزایش حداکثری شاخص های سختی سکانتی، نیروی تسلیم، مقاومت نهایی، شکل پذیری و انرژی به مقدار ۳۷، ۳۶، ۳۲، ۶۴ و ۷۱ درصد می گردد. میزان نسبت نیروی محوری اعمالی به سازه برای استفاده از حداکثر ظرفیت جانبی با توجه به مقادیر بررسی شده ۰/۳ توصیه و شاخص هندسه سطح مقطع بیشترین تاثیر را در مقاومت و شکل پذیری و استهلاک انرژی بدون هیچ تغییری را به همراه دارد.

کلمات کلیدی:

ستون تیوبی پر شده با بتن، جداره فولادی چند ضلعی، بار چرخه ای، ظرفیت باربری نهایی، اجزای محدود

۱. مقدمه

لوله های فولادی پر شده از بتن (CFST) به دلیل ظرفیت باربری عالی خود، شکل پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی بالا و افت نسبتا کم مقاومت و سختی تحت بارگذاری چرخه‌ای در مقایسه با لوله‌های توخالی معمولی، در صنعت ساخت و ساز به طور فزاینده‌ای محبوب شده‌اند. در طول چند دهه گذشته، تحقیقات عددی و آزمایشگاهی گسترده‌ای در زمینه اعضای CFST مربع، مستطیل شکل و دایره‌ای برای پیشرفت دانش در زمینه رفتار سازه‌ای اعضای CFST، از جمله تستهای ستون کوتاه، تستهای تنش مرزی، تستهای خمش خالص و تستهای تیر-ستون انجام شده است که منجر به طراحی استانداردهایی مانند EN 1994-1-1 و AISC 360-16 شد. با این حال، تعدادی از تستهای چرخه‌ای برای بررسی میزان شکل پذیری و استهلاک انرژی جهت استفاده از اعضای CFST در مناطق لرزه‌ای انجام شده است. تا به امروز، بیشتر تحقیقات انجام شده در مورد اعضای CFST، بر روی مقاطع مربع، مستطیل و دایره‌ای متمرکز شده است و رفتارهای متمایزی برای اعضای CFST با شکل‌های هندسی مختلف در مقطع عرضی پیدا شده است. CFST با مقاطع عرضی بیضوی و یا چند ضلعی نیز ممکن است در ساختمان‌های کامپوزیتی برای مقاصد کاربردی یا معماری مورد استفاده قرار گیرد. امروزه کاربرد مقاطع عرضی چندضلعی مانند شش ضلعی، هشت ضلعی، ۱۲ ضلعی در سازه‌های مرکب نظر محققان را جلب کرده است و تحقیقاتی را در این زمینه شروع کرده‌اند.

۲. هدف تحقیق

هدف اصلی این پژوهش، که بر پایه تحقیقات آزمایشگاهی در زمینه ستون‌های مرکب با مقاطع عرضی چندضلعی است، بررسی عددی رفتار سازه‌ای ستونهای CFST با مقطع شش، هشت و دوازده ضلعی تحت بارگذاری چرخه‌ای است. پارامترهای مختلف، از جمله میزان نسبی بار محوری (n) و مقاومت فشاری استوانه‌ای بتن (f_c) تحت بار جانبی چرخه‌ای با یا بدون بار ثابت محوری مورد شبیه‌سازی عددی قرار می‌گیرد. میزان نسبی بار محوری از ۰ تا ۰/۵ متغیر است و مقاومت فشاری استوانه‌ای بتن در محدوده از ۲۰ MPa تا ۴۰ MPa انتخاب می‌گردد.

در پژوهش جاری به ارزیابی عددی رفتار چرخه‌ای ستون‌های فولادی پر شده با بتن با مقاطع چند ضلعی پرداخته خواهد شد.

اهداف مورد بررسی در این پژوهش به شرح زیر است:

- بررسی شاخص مقاومت نهایی در رفتار چرخه‌ای ستون‌های چند ضلعی
- بررسی شاخص سختی در رفتار چرخه‌ای ستون‌های چند ضلعی
- بررسی شاخص استهلاک انرژی در رفتار چرخه‌ای ستون‌های چند ضلعی
- بررسی شاخص شکل پذیری در رفتار چرخه‌ای ستون‌های چند ضلعی

۳. روش تحقیق و مدل سازی

امروزه از شبیه‌سازی می‌توان به‌عنوان ابزارهایی مناسب برای اندازه‌گیری کمیت‌هایی که اندازه‌گیری آن‌ها بسیار پرهزینه و در برخی موارد ناممکن است استفاده نمود. به‌عنوان مثال، تعیین منحنی توزیع تنش، کرنش، نمودارهای مختلف در طراحی و کاربرد سازه‌ها که نقش اساسی دارد. اکثر سنسورها و یا دوربین‌های سرعت بالا می‌توانند تغییرات کرنش را در یک نقطه و یا در یک زمان اندازه‌گیری کنند اما بسیار پرهزینه و یا تقریبا برای مقاطع داخلی غیر ممکن است. این در حالی است که با استفاده از شبیه‌سازی می‌توان این مقادیر و منحنی‌ها را با دقت بسیار بالا به‌دست آورد. همزمان با توسعه روش اجزای محدود، نرم‌افزارهای متعددی نیز بر اساس این روش محاسباتی پا به عرصه وجود نهاده‌اند که یکی از نرم‌افزارهای پرکاربرد در حوزه مهندسی آباکوس می‌باشد. آباکوس قابلیت‌های گسترده‌ای را برای شبیه‌سازی در کاربردهای خطی و غیرخطی فراهم می‌کند. مسایلی که دارای اجزای متعدد و مصالح مختلف هستند را می‌توان با تعریف هندسه هر جز و اختصاص دادن مصالح تشکیل‌دهنده آن و سپس

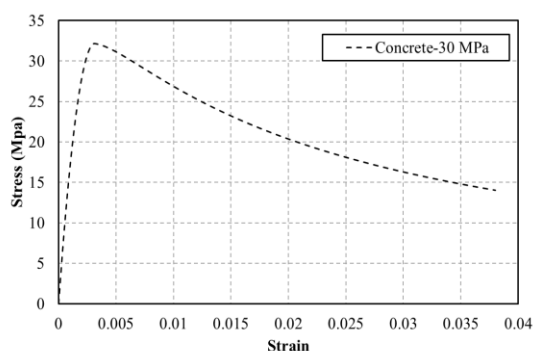
تعریف اندرکنش بین این اجزا شبیه‌سازی کرد. در تحلیل‌های غیرخطی آباکوس به صورت خودکار نمو دار بار و دامنه تغییرات همگرایی^۱ مناسب را انتخاب و به طور پیوسته در طول تحلیل این پارامترها را تنظیم می‌کند تا از بدست آمدن نتایج دقیق اطمینان حاصل شود. به علت قابلیت‌های بالای نرم افزار آباکوس نسبت به سایر نرم افزارهای اجزای محدود در این پژوهش از این نرم افزار برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. برای ایجاد یک مدل هندسی از ستون باید اعضای تشکیل دهنده ستون‌های فولادی پر شده با بتن با مقاطع چند ضلعی که شامل لوله فولادی با مقطع چهار، شش، هشت و دوازده ضلعی و دایره ای، صفحات بارگذاری، سخت کننده ها و بتن پرکننده مقطع فولادی می‌باشد، بصورت جداگانه ترسیم گردد.

در روند مدل‌سازی از المان Shell برای جداره ی فولادی ستون های چندضلعی و برای سخت کننده ها و بتن پر کننده از المان Solid استفاده شد.

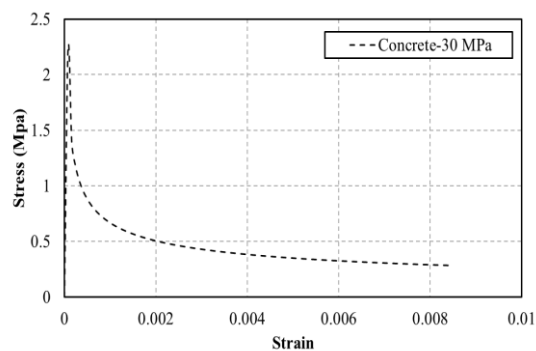
برای تعریف مدل رفتاری بتن آسیب دیده پلاستیک^۲ پارامترهای زاویه اتساع^۳، خروج از مرکزیت^۴، نسبت مقاومت فشاری دو محوره به یک محوره (F_{bo}/f_{co})، نسبت تنش جریان (k) و ویسکوزیته^۵ مورد نیاز است که مقادیر آن مطابق جدول (۱-۳) در نظر گرفته شده است. منحنی تنش-کرنش برای بتن محصور شده از مدل هان^۶ و همکاران استفاده گردید که نمودار تنش-کرنش آن در شکل (۱-۳) نشان داده شده است [۱]

جدول (۱-۳) پارامترهای مدل رفتاری Damage Plasticity

Dilation angle	Eccentricity	F_{bo}/f_{co}	K	Viscosity Parameter
20	0.1	1.16	0.66	0.001



(ب)



(الف)

شکل (۱-۳) نمودار تنش-کرنش بتن محصور (۳۰ مگاپاسکال)، (الف) تنش فشاری، (ب) تنش کششی

و همچنین مشخصات فولاد بکار رفته که مطابق مقاله ی صحت سنجی میباشد استفاده شده است (جدول ۲-۳)

جدول (۲-۳) مشخصات فولاد بکار رفته در مدل

ضریب پواسون	مدول الاستیسیته GPa	چگالی kg/m^3	مشخصه مکانیکی
۰/۳	۲۱۰	۷۸۵۰	مقدار

مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش در پنج گروه اصلی دسته بندی شده است. در گروه اول هندسه سطح مقطع ستون^۴ ضلعی، در گروه دوم ۶ ضلعی، در گروه سوم ۸ ضلعی، در گروه چهارم ۱۲ ضلعی و در گروه پنجم دایره‌ای در نظر گرفته شده

¹ Convergence Tolerance

² Concrete Damage Plasticity

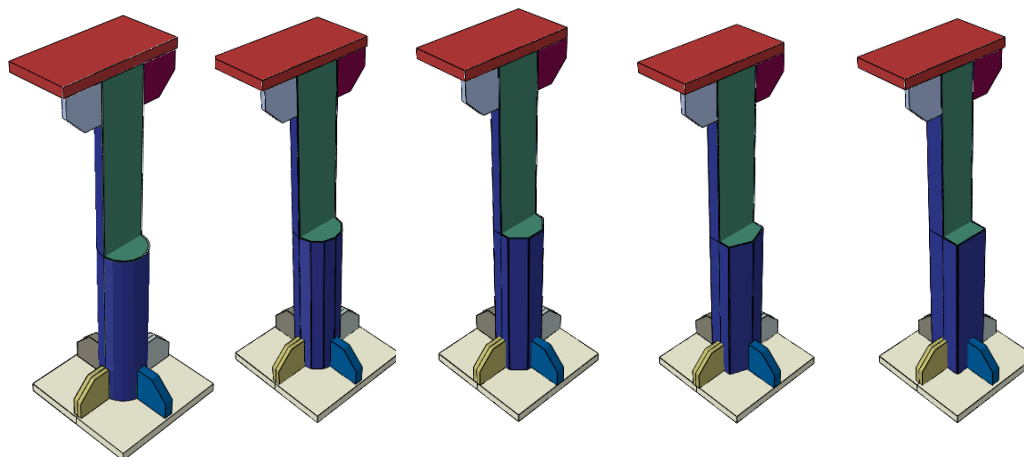
³ Dilation Angle

⁴ Eccentricity

⁵ Viscosity parameter

⁶ Han

است. متغیرهای مورد بررسی در هر گروه از نمونه ها شامل مقاومت فشاری بتن، ضخامت جداره فولادی و نسبت نیروی محوری اعمال شده به بالای ستون در نظر گرفته شده است. تعداد ستون‌های فولادی پر شده با بتن با مقاطع چند ضلعی مورد بررسی ۳۵ نمونه می‌باشد. بارگذاری اعمالی به هریک از نمونه ها به صورت بار محوری فشاری و بار جانبی می‌باشد که نحوه اعمال بار جانبی بصورت کنترل-جابجایی بوده است. مقاومت فشاری بتن در سه مقدار ۲۰، ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال، ضخامت جداره فولادی ۳، ۴ و ۵ میلیمتر و میزان نسبی نیروی محوری ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ فرض شده و رفتار تنش-کرنش فولاد در نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. در شکل (۲-۳) نمونه ای از ستون‌های فولادی پر شده با بتن با مقاطع چند ضلعی آورده شده است.



شکل (۲-۳) مقاطع هندسی بررسی شده در مقطع ستون

۴. صحت سنجی

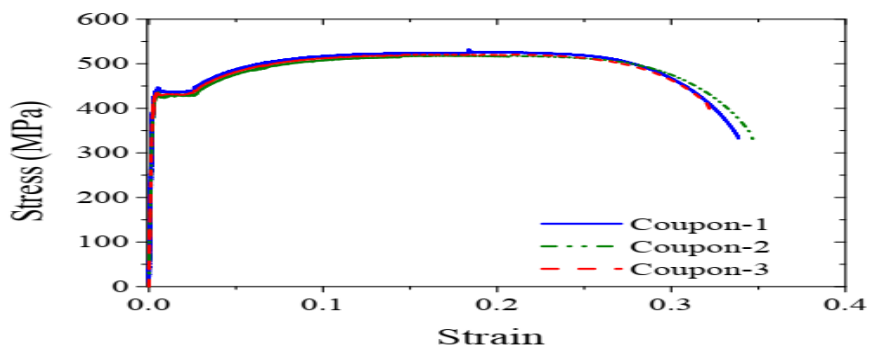
صحت سنجی در آباکوس به معنی مدل سازی دقیق یک مدل آزمایشگاهی در محیط اجزا محدود آباکوس و تحلیل آن و بدست آوردن نتایج مشابه نتایج آزمایشگاهی می باشد. برای شروع کار این مقاله مدلی مشابه آنچه در پژوهش چن^۱ و همکارانش انجام شد [۱۸]. در پژوهش چن و همکاران در سال ۲۰۱۹، ارزیابی آزمایشگاهی رفتار چرخه ای تیر-ستون های فولادی پر شده با بتن با مقاطع هشت ضلعی انجام شد که یک نمونه از ستون آزمایشگاهی این مقاله شبیه سازی و پس از مقایسه نتایج هیستریزس و صحت آنها به مدلسازی نمونه های این مقاله پرداخته شده است.

نمونه صحت سنجی شده در این پژوهش S2 نام دارد که مشخصات مصالح این نمونه در مقاله چن در شکل (۱-۴) و جدول (۱-۴) آورده شده است.

جدول (۱-۴) مشخصات مصالح فولادی تست شده در آزمایشگاه [18]

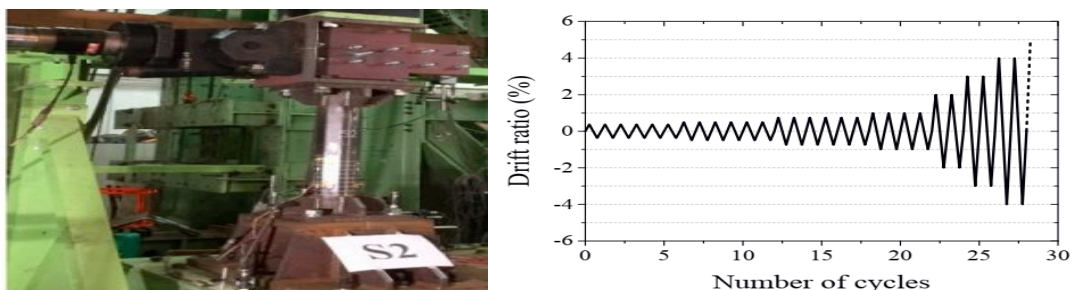
Coupon	E_s (GPa)	f_y (MPa)	ϵ_y ($\mu\epsilon$)	ϵ_{st} (-)	f_u (MPa)	ϵ_u (-)	ϵ_f (-)
1	209.0	433.9	2076	0.0256	523.8	0.1708	0.3385
2	206.3	430.2	2085	0.0265	518.9	0.1740	0.3468
3	212.8	430.8	2024	0.0232	520.8	0.1711	0.3219
Average	209.4	431.6	2062	0.0251	521.2	0.1720	0.3357

¹ chen



شکل (۴-۱) نمودار تنش کرنش جدول فولاد تست شده در آزمایشگاه [18]

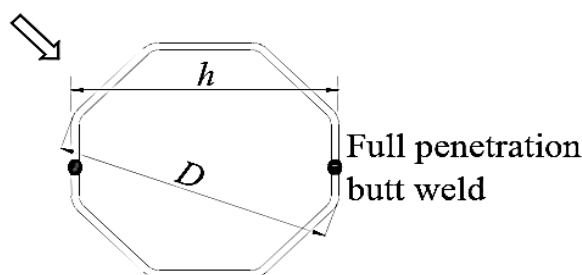
از نظر هندسه و بارگذاری نمونه S2 مطابق شکل (۴-۲) در آزمایشگاه ساخته شده و تست شده است. همچنین در شکل (۴-۳) پروتکل بارگذاری اعمالی به بالای ستون نیز ترسیم شده است که در سه مرحله اول ۶ سیکل با دامنه کمتر از دریافت تسلیم اعمال می گردد و در مرحله بعد دامنه افزایش و ۴ سیکلی می گردد و در ادامه نیز در مرحله پنجم و بعد از آن دامنه افزایش بیشتر یافته و تعداد تکرار ۲ سیکل می شود. همچنین مشخصات هندسی نمونه S2 در جدول (۴-۲) نشان داده شده است



شکل (۴-۲) شرایط مرزی و بارگذاری چرخه ایی نمونه S2 در پژوهش چن و همکاران [18]

جدول (۴-۲) مشخصات هندسی و ابعاد نمونه S2 [18]

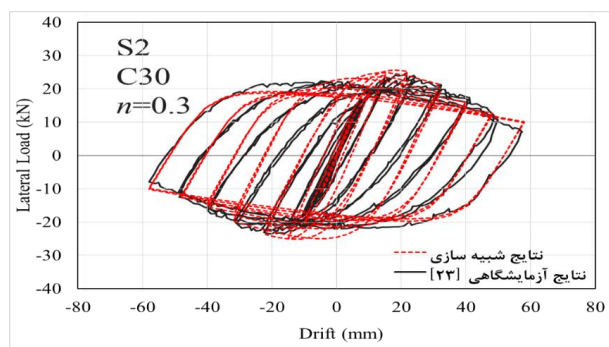
Specimen	D (mm)	h (mm)	t (mm)	E_s (GPa)	f_y (MPa)	E_c (MPa)	f_c' (MPa)
S2	129.10	121.08	3.00	209.4	431.6	25,054	32.1



شکل (۴-۳) شکل هندسی سطح مقطع نمونه S2 [18]

صحت سنجی برای اطمینان از نتایج خروجی نرم افزار آباکوس انجام می شود. [۱۷] زیرا در این نرم افزار گزینه‌های زیادی برای مدل سازی هندسه، تماس بین اجزا، روش بارگذاری و ... وجود دارد و تغییر هر کدام می تواند نتایج تحلیل را تغییر دهد. بنابراین با مقایسه نتایج مدل مشابه آزمایش شده با مدل عددی آباکوس و نشان دادن صحیح بودن روش مدل سازی با مقایسه یک نمودار آزمایش با نمودار بدست آمده از آباکوس یا خروجی یک سنسور آزمایشگاهی با خروجی تنش و کرنش همان نقطه در مدل آباکوس نشان می دهیم که مدل سازی ما صحیح بوده است. همچنین در مورد سائز مش باید توجه داشت که اگر از المان‌های بزرگ استفاده شود، پاسخها دقت کافی را نداشته و اگر از المان‌های بسیار کوچک استفاده شود، زمان انجام تحلیل

طولانی خواهد شد، بنابراین باید اندازه‌ی مناسبی برای المان‌ها با آنالیز حساسیت مش، انتخاب شود. برای این کار اعضای سیستم را با اندازه‌های مختلف مش مدل کرده و مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد المان‌ها، پاسخ‌های مربوط به نیرو به همگرایی می‌رسند. بنابراین اندازه المان تقریباً ۲۵ میلیمتر انتخاب شده است. در این صحت سنجی مدل S2 از تست آزمایشگاهی مورد شبیه سازی قرار گرفت و همان‌گونه که در شکل (۴-۴) مشاهده می‌شود، خروجی شبیه‌سازی و مدل آزمایشگاهی تطابق خوبی دارند و میزان اختلاف شاخص‌ها بین نتایج عددی و آزمایشگاهی قابل قبول و زیر ۱۵ درصد می‌باشند که در جدول (۴-۴) آورده شده است



شکل (۴-۴) خروجی شبیه‌سازی و مدل آزمایشگاهی

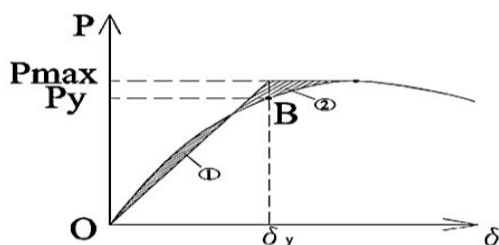
جدول (۴-۴) میزان اختلاف شاخص‌ها بین نتایج عددی و آزمایشگاهی

شاخص	آزمایشگاهی	عددی	اختلاف
مقاومت نهایی (کیلو نیوتن)	23.82	25.63	7.62
سختی (کیلو نیوتن بر میلیمتر)	1.95	2.09	7.18
انرژی (کیلو نیوتن در میلیمتر)	18.66	19.13	2.52

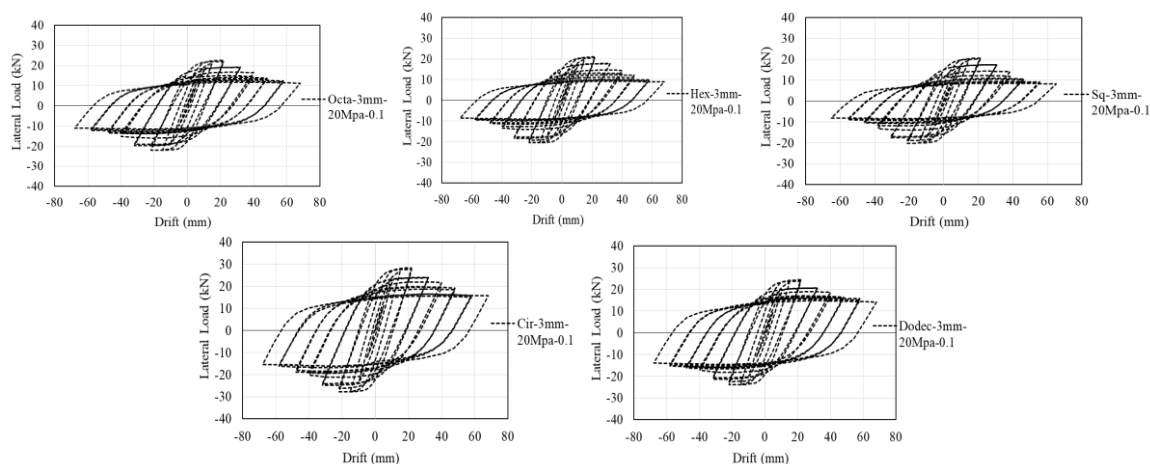
۵. تحلیل نتایج

برای مقایسه و بررسی رفتار چرخه ایی هر یک از مدل‌ها نمودارهای هیستریزس (نیرو-جابجایی بالای ستون) ترسیم شده است و بر اساس این نمودارها، منحنی پوش آور رسم و شاخص‌های سازه ای ستون در رفتار چرخه ایی که شامل سختی، نیروی تسلیم جانبی، مقاومت نهایی جانبی، شکل پذیری و انرژی اتلاف شده می‌باشد، محاسبه گردید. شاخص (K) سختی مؤثر سکانتی، نیروی تسلیم مؤثر و (P_{max}) مقاومت نهایی، (δ_y) جابجایی معادل نیروی تسلیم، (δ_u) جابجایی معادل ۸۵ درصد نیروی نهایی و (μ) شاخص شکل پذیری و (E) انرژی مستهلک شده ستون مورد بررسی می‌باشد. در این پژوهش هر یک از شاخص‌ها برای ۳۵ مدل محاسبه گردید و در بخش‌های بعدی به مقایسه نسبی تاثیر پارامترها پرداخته شده است. در تمامی نمونه‌ها شاخص (K) سختی مؤثر سکانتی از شیب اولیه نمودار ایده آل سازی شده، شاخص (P_y) نیروی تسلیم مؤثر از گره B در شکل (۵-۱) که تصویر محل شکست نمودار دوخطی روی نمودار واقعی، شاخص (P_{max}) مقاومت نهایی نمودار پوش آور که در شکل (۵-۱) نشان داده، شاخص (δ_y) جابجایی معادل نیروی تسلیم که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. همچنین برای محاسبه شاخص (μ) شکل پذیری از تقسیم شاخص (δ_u) جابجایی معادل ۸۵ درصد نیروی نهایی به (δ_y) جابجایی معادل نیروی تسلیم و (E) انرژی مستهلک شده نیز از جمع مساحت‌های نمودار هیستریزس در اکسل محاسبه شده است. در این بخش نتایج مربوط به نمودار چرخه‌ای مدل‌ها ۳۵ حالت ترسیم شده است. هر شکل از ۵ نمودار تشکیل شده است. هر یک از ۵ نمودار نماد یک شکل هندسی در سطح مقطع می‌باشد. در ادامه نمونه ای از نمودارهای هیستریزس مربوط به سطح مقطع چهارضلعی (Sq)، شش ضلعی (Hex)، هشت ضلعی (Oct)، دوازده ضلعی (Dodec) و دایره (Cir) برای ضخامت جداره ۳ میلیمتر و مقاومت فشاری ۲۰ مگاپاسکال و نسبت نیروی محوری به نیروی گسیختگی ستون ۰/۱ ترسیم شده است. نمودارهای هیستریزس ترسیمی دارای روند ارتجاعی و خطی در سیکل‌های اولیه می‌باشند که با افزایش جابجایی جانبی فولاد و بتن وارد فاز غیرخطی می‌شوند

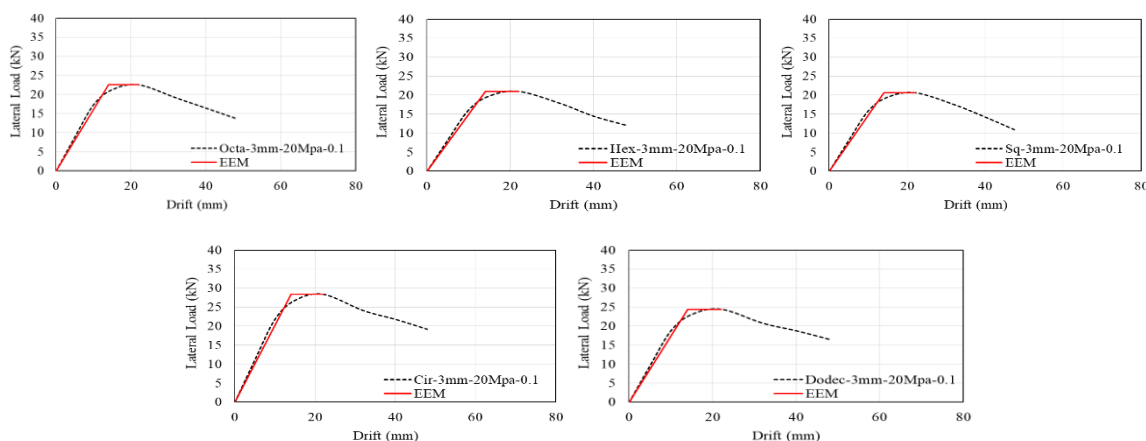
و نمودار دچار سخت شدگی می گردد و چرخه های هیستریزیس بازتر و با شیب کمتری تا مقاومت نهایی افزایش ظرفیت داده و مقاومت می کنند. در ادامه با آسیب بتن، جداشدگی بین فولاد و بتن و کماتش موضعی پای ستون نمودار هیستریزیس دچار نرم شدگی و کاهش مقاومت می گردد. در این لحظه فولاد دچار آسیب کماتشی و بتن دچار شکست خمشی می شود. میزان جذب انرژی و سطح زیر نمودار هیستریزیس در هر یک از حالات با تغییر هندسه تغییر کرده است و مقادیر هر یک از شاخص ها نیز بر اساس پوش اور محاسبه شده است



شکل ۵-۱- منحنی نیرو-جابجایی ایده آل بر اساس روش انرژی



شکل ۵-۲- منحنی هیستریزیس ستون های با شکل هندسی مختلف مقطع (3mm-20MPa-0.1)



شکل ۵-۳- منحنی پوش اور و ایده آل ستون های با شکل هندسی مختلف مقطع (3mm-20MPa-0.1)

۵-۱. تاثیر هندسه سطح مقطع ستون در رفتار چرخه‌ای

در این بخش به بررسی تاثیر سطح مقطع ستون در رفتار چرخه‌ای و رفتار پوش اور ستون مرکب چندضلعی پرداخته شده است. برای مقایسه نسبی تاثیر سطح مقطع ستون در رفتار چرخه‌ای، به دلیل متفاوت بودن سطح مقطع ستون در مدل‌های مختلف، میزان حجم فولاد مصرفی را ثابت گرفتیم و حجم بتن نیز تا حد ممکن ثابت فرض شده است، که با حجم ثابت فولاد و

بتن بتوان اثر سطح مقطع و محصورشدگی را در نتایج ملاحظه نمود. برای مقایسه نسبی و تعیین درصد تغییرات شاخص ها با تغییر پارامتر هندسه سطح مقطع ستون، شاخص های نمونه مربعی بعنوان شاخص نمونه شاهد در نظر گرفته شده است. مقایسه نمودارها و شاخص ها نشان می دهد که هر چه هندسه سطح مقطع از حالت چندضلعی به دایره نزدیک گردد افزایش شاخص ها را به دنبال دارد. این افزایش شاخص ها با ثابت نگه داشتن میزان حجم فولاد و بتن در سازه و مقاومت فشاری و نسبت نیروی محوری دلیل توزیع نیرویی در سطح ستون دارد. با انحنا دار شدن فولاد اطراف بتن از سطح مقطع صاف و چندضلعی در اطراف بتن کاسته و توزیع تنش و فشار جانبی و محیطی در اطراف بتن افزایش و سبب افزایش تنش و کرنش مقاوم و توزیع یکنواخت فشار روی بتن می شود. با توزیع پیوسته تنش و کرنش بر سطح جانبی بتن پراکننده رفتار ستون در برابر بار جانبی مقاومتر و ظرفیت بیشتری از انرژی را مستهلک کرده است.

جدول (۵-۱) تغییرات شاخص ها با تغییر هندسه مقاطع

ردیف	نام مدل عددی	تغییرات نسبی سختی	تغییرات نسبی نیروی تسلیم	تغییرات نسبی مقاومت نهایی	تغییرات نسبی شکل پذیری	تغییرات نسبی انرژی
1	Sq-3mm-20Mpa-0.1	0	0	0	0	0
2	Hex-3mm-20Mpa-0.1	2	4.2	3.77	7.11	10.16
3	Oct-3mm-20Mpa-0.1	9.69	9.69	9.69	14.7	29.2
4	Dodec-3mm-20Mpa-0.1	18.57	18.57	18.57	25.43	52.91
5	Cir-3mm-20Mpa-0.1	35.16	33.06	32.39	35.14	71.54
6	Sq-3mm-30Mpa-0.1	0	0	0	0	0
7	Hex-3mm-30Mpa-0.1	4.43	1.02	2.37	7.51	4.17
8	Oct-3mm-30Mpa-0.1	8.78	5.82	5.82	17.77	21.3
9	Dodec-3mm-30Mpa-0.1	16.34	13.18	13.18	25.87	29.74
10	Cir-3mm-30Mpa-0.1	27.97	24.49	24.49	35.93	40.27
11	Sq-3mm-30Mpa-0.3	0	0	0	0	0
12	Hex-3mm-30Mpa-0.3	19.39	2.75	2.93	18.02	2.99
13	Oct-3mm-30Mpa-0.3	25.36	4.37	4.68	23.64	20.78
14	Dodec-3mm-30Mpa-0.3	27.93	19.9	20.37	27.29	38.88
15	Cir-3mm-30Mpa-0.3	36.99	26.83	27.93	42.6	52.73
16	Sq-3mm-30Mpa-0.5	0	0	0	0	0
17	Hex-3mm-30Mpa-0.5	6.36	3.87	3.31	17.2	17.06
18	Oct-3mm-30Mpa-0.5	11.39	5.93	5.36	40.51	21.71
19	Dodec-3mm-30Mpa-0.5	14.81	22.37	21.71	51.18	40.59
20	Cir-3mm-30Mpa-0.5	24.07	31.25	30.54	64.45	49.66
21	Sq-3mm-40Mpa-0.1	0	0	0	0	0
22	Hex-3mm-40Mpa-0.1	1.91	1.54	4.09	6.65	2.97
23	Oct-3mm-40Mpa-0.1	7.38	7.38	7.38	18.46	23.91
24	Dodec-3mm-40Mpa-0.1	17.08	17.08	17.08	22.81	41.07
25	Cir-3mm-40Mpa-0.1	30.01	28.8	28.18	33.03	60.47
26	Sq-4mm-30Mpa-0.1	0	0	0	0	0
27	Hex-4mm-30Mpa-0.1	2.02	3.41	4.07	6.37	4.6
28	Oct-4mm-30Mpa-0.1	6.44	10.01	8.87	16.81	22.01
29	Dodec-4mm-30Mpa-0.1	16.02	15.02	18.02	25.29	32.99
30	Cir-4mm-30Mpa-0.1	29.18	27.11	26.18	44.39	45.55
31	Sq-5mm-30Mpa-0.1	0	0	0	0	0
32	Hex-5mm-30Mpa-0.1	1.97	5.45	3.68	4.55	6.21
33	Oct-5mm-30Mpa-0.1	13.81	9.81	10.81	17.5	25.88
34	Dodec-5mm-30Mpa-0.1	24.84	20.19	20.19	26.57	37.77
35	Cir-5mm-30Mpa-0.1	38.07	36.15	36.15	46.77	53.4

۲-۵. تاثیر ضخامت جداره فولادی ستون در رفتار چرخه‌ایی

برای مقایسه نسبی اثر ضخامت جداره فولادی ستون، برای هندسه دایره‌ای از نمونه Cir-3mm-30Mpa-0.1، برای هندسه ۱۲ ضلعی از نمونه Dodec-3mm-30Mpa-0.1، برای هندسه ۸ ضلعی از نمونه Oct-3mm-30Mpa-0.1، برای هندسه ۶ ضلعی از نمونه Hex-3mm-30Mpa-0.1 و برای نمونه ۴ ضلعی Sq-3mm-30Mpa-0.1 بعنوان شاهد در نظر گرفته شده است و میزان تغییرات نسبی آن صفر حاصل شده است و مابقی نمونه ها براساس شاخص های این نمونه تغییرات نسبی آن محاسبه

شده است. نتایج مقایسه نمودارهای هیستریزیس هر یک از ستون ها نشان داده است که با افزایش ضخامت جداره فولادی و کاهش نسبت بعد به ضخامت میزان فولاد جداره خارجی، سختی، نیروی تسلیم جانبی، نیروی مقاومت نهایی، شکل پذیری و انرژی مستهلک شده نمونه ها روند افزایشی پیدا کرده است که دلیل این موضوع افزایش ضخامت فولاد است. این افزایش ضخامت بر روی افزایش محصور شدگی جانبی تاثیرگذار و فشار اعمالی به بتن از سمت فولاد را بیشتر و افزایش شاخص ها را به همراه داشته است.

ردیف	نام مدل عددی	تغییرات نسبی سختی	تغییرات نسبی نیروی تسلیم	تغییرات نسبی مقاومت نهایی	تغییرات نسبی شکل پذیری	تغییرات نسبی انرژی
1	Sq-3mm-30Mpa-0.1	۰	۰	۰	۰	۰
2	Sq-4mm-30Mpa-0.1	22.84	20.05	19.5	2.15	19.5
3	Sq-5mm-30Mpa-0.1	۴۳,۴۷	۳۷,۰۶	۳۹,۵۸	۵,۷۵	۳۹,۵۸
4	Hex-3mm-30Mpa-0.1	0	0	0	0	0
5	Hex-4mm-30Mpa-0.1	20	22.88	21.49	1.07	20
6	Hex-5mm-30Mpa-0.1	40.09	43.07	41.37	2.84	42.32
7	Oct-3mm-30Mpa-0.1	0	0	0	0	0
8	Oct-4mm-30Mpa-0.1	۲۰,۲	۲۴,۸۱	۲۲,۹۵	۱,۳۲	۲۰,۲
9	Oct-5mm-30Mpa-0.1	50.12	42.23	44.84	5.51	44.84
10	Dodec-3mm-30Mpa-0.1	0	0	0	0	0
11	Dodec-4mm-30Mpa-0.1	22.5	23.06	22.5	1.68	22.5
12	Dodec-5mm-30Mpa-0.1	53.96	45.55	48.23	6.34	48.22
13	Cir-3mm-30Mpa-0.1	۰	۰	۰	۰	۰
14	Cir-4mm-30Mpa-0.1	24	24.57	24	8.5	24
15	Cir-5mm-30Mpa-0.1	54.8	49.89	52.64	14.18	52.64

۳-۵. تاثیر مقاومت فشاری بتن در رفتار چرخه‌ای

مقایسه نمودارهای هیستریزیس تاثیر مقاومت فشاری بتن ستون با مقطع دایره ای، ۱۲ ضلعی، ۸ ضلعی، ۶ ضلعی و ۴ ضلعی با تغییر مقدار مقاومت فشاری بتن برای مقاومت ۲۰، ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال با نیروی محوری نسبی ۰/۱ نشان داده شده است. از مقایسه نمودارها برای سه مقدار مقاومت فشاری بتن مشاهده می‌شود افزایش مقدار مقاومت فشاری بتن باعث افزایش شکل پذیری جانبی ستون فولادی پر شده با بتن با مقاطع چند ضلعی شده است. با افزایش مقاومت فشاری بتن پر کننده ستون، سختی سکانتی، نیروی تسلیم جانبی، انرژی و مقاومت نمونه ها روند افزایشی پیدا کرده است که دلیل این موضوع افزایش ظرفیت فشاری بتن است ولی شکل پذیری ستون بدلیل رفتار تردتر بتن در مقاومت‌های بالا کاهش یافته است.

جدول ۴-۱ درصد تغییرات شاخص‌های ستون ها با تغییر مقاومت فشاری بتن

ردیف	نام مدل عددی	تغییرات نسبی سختی	تغییرات نسبی نیروی تسلیم	تغییرات نسبی مقاومت نهایی	تغییرات نسبی شکل پذیری	تغییرات نسبی انرژی
1	Sq-3mm-20Mpa-0.1	0	0	0	0	0
2	Sq-3mm-30Mpa-0.1	7.85	9.85	10.86	-4.12	28.02
3	Sq-3mm-40Mpa-0.1	12.53	10.48	12.53	-8.55	47.4
4	Hex-3mm-20Mpa-0.1	0	0	0	0	0
5	Hex-3mm-30Mpa-0.1	10.43	6.5	9.36	-3.77	21.05
6	Hex-3mm-40Mpa-0.1	12.44	7.65	12.87	-8.95	37.78
7	Oct-3mm-20Mpa-0.1	0	0	0	0	0
8	Oct-3mm-30Mpa-0.1	6.95	5.97	6.95	-1.56	20.2
9	Oct-3mm-40Mpa-0.1	10.16	8.16	10.16	-5.55	41.36
10	Dodec-3mm-20Mpa-0.1	0	0	0	0	0
11	Dodec-3mm-30Mpa-0.1	5.82	4.85	5.82	-3.78	8.62
12	Dodec-3mm-40Mpa-0.1	11.11	9.09	11.11	-10.46	35.99
13	Cir-3mm-20Mpa-0.1	0	0	0	0	0
14	Cir-3mm-30Mpa-0.1	2.12	2.78	4.26	-3.55	4.68
15	Cir-3mm-40Mpa-0.1	8.25	7.95	10.51	-9.98	37.89

۵.۴. تاثیر نیروی محوری در رفتار چرخه‌ای

نتایج نمودارهای هیستریزیس با تغییر میزان نیروی محوری با نسبت ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ برای ستون با مقطع دایره ای، ۱۲ ضلعی، ۸ ضلعی، ۶ ضلعی و ۴ ضلعی با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال و ضخامت جداره ۳ میلیمتر مورد مقایسه قرار گرفته است. برای محاسبه تغییرات نسبی شاخص‌های سختی سکانتی، نیروی تسلیم جانبی، انرژی و مقاومت نهایی و شکل پذیری در هر گروه یک نمونه بعنوان نمونه شاهد انتخاب شده است که میزان تغییرات نسبی آن یک در نظر گرفته شده است و میزان تغییرات نسبی دو نمونه دیگر نسبت به آن محاسبه شده است. نمونه شاهد در تمامی هندسه‌ها نیروی معادل ۰/۱ انتخاب شد و نیروی محوری با نسبت ۰/۳ و ۰/۵ نسبت به آن محاسبه شده است. نتایج مقایسه نشان داد با افزایش میزان نیروی محوری انرژی و شکل پذیری نمونه‌ها روند کاهشی که دلیل آن آسیب ستون در نیروی بالاتر و جلوگیری از رفتار شکل پذیر است و سختی جانبی و نیروی تسلیم و مقاومت جانبی نهایی نمونه‌ها روند افزایشی پیدا کرده است که دلیل این موضوع اندرکنش بین نیروی محوری و لنگر جانبی ستون است که با افزایش نیروی محوری، نیروی بیشتری جهت مقابله با آن برای حرکت جانبی نیاز است.

جدول ۴-۲ درصد تغییرات شاخص‌های ستون‌ها با تغییر نیروی محوری

ردیف	نام مدل عددی	تغییرات نسبی سختی	تغییرات نسبی نیروی تسلیم	تغییرات نسبی مقاومت نهایی	تغییرات نسبی شکل پذیری	تغییرات نسبی انرژی
1	Sq-3mm-30Mpa-0.1	0	0	0	0	0
2	Sq-3mm-30Mpa-0.3	5.27	5.9	5.76	-25.44	7.84
3	Sq-3mm-30Mpa-0.5	27.85	13.53	14.01	-37.36	-78.43
4	Hex-3mm-30Mpa-0.1	0	0	0	0	0
5	Hex-3mm-30Mpa-0.3	20.34	7.71	6.35	-18.16	6.63
6	Hex-3mm-30Mpa-0.5	30.21	16.73	15.07	-31.71	-75.77
7	Oct-3mm-30Mpa-0.1	0	0	0	0	0
8	Oct-3mm-30Mpa-0.3	21.32	4.45	4.62	-21.73	7.38
9	Oct-3mm-30Mpa-0.5	30.92	13.65	13.51	-25.26	-78.36
10	Dodec-3mm-30Mpa-0.1	0	0	0	0	0
11	Dodec-3mm-30Mpa-0.3	15.75	12.19	12.48	-24.6	15.44
12	Dodec-3mm-30Mpa-0.5	26.17	22.75	22.61	-24.76	-76.63
13	Cir-3mm-30Mpa-0.1	0	0	0	0	0
14	Cir-3mm-30Mpa-0.3	12.69	7.89	8.68	-21.78	17.42
15	Cir-3mm-30Mpa-0.5	23.95	19.69	19.55	-24.21	-76.99

۶. نتیجه گیری

در این مقاله ارزیابی عددی رفتار چرخه‌ای ستون‌های فولادی پر شده با بتن با مقاطع چند ضلعی بصورت عددی انجام گرفت و نتایج این مطالعه عددی بصورت زیر حاصل شده است.

۱- پارامتر شکل هندسی مقطع ستون زمانیکه از ۴ ضلعی به دایره تغییر حالت دهد باعث افزایش حداکثری شاخص‌های سختی سکانتی، نیروی تسلیم، مقاومت نهایی، شکل پذیری و انرژی به مقدار ۳۷، ۳۶، ۳۲، ۶۴ و ۷۱ درصد می‌گردد.

۲- پارامتر مقاومت فشاری بتن پرکننده ستون زمانیکه از ۲۰ به ۳۰ و از ۳۰ به ۴۰ تغییر حالت دهد باعث افزایش حداکثری شاخص‌های سختی سکانتی، نیروی تسلیم، مقاومت نهایی و انرژی به مقدار ۱۳، ۱۰، ۱۳، ۴۷ درصد و کاهش شکل پذیری به میزان ۱۱ درصد می‌گردد.

۳- پارامتر ضخامت جداره فولادی زمانیکه از ۳ به ۴ و از ۴ به ۵ میلیمتر تغییر حالت دهد باعث افزایش حداکثری شاخص‌های سختی سکانتی، نیروی تسلیم، مقاومت نهایی، شکل پذیری و انرژی به مقدار ۵۵، ۵۰، ۵۳، ۱۴ و ۵۳ درصد می‌گردد.

۴- پارامتر نسبت نیروی محوری ستون زمانیکه از ۰/۱ به ۰/۳ و از ۰/۳ به ۰/۵ تغییر حالت دهد باعث افزایش حداکثری شاخص‌های سختی سکانتی، نیروی تسلیم، مقاومت نهایی به مقدار ۳۱، ۲۳، ۲۳ درصد و کاهش انرژی و شکل پذیری به میزان ۷۸ و ۳۷ درصد می‌گردد.

- ۵- میزان نسبت نیروی محوری اعمالی به سازه برای استفاده از حداکثر ظرفیت جانبی با توجه به مقادیر بررسی شده ۰/۳ توصیه می گردد.
- ۶- شاخص هندسه سطح مقطع بیشترین تاثیر را در مقاومت و شکل پذیری و استهلاک انرژی بدون هیچ تغییری را به همراه دارد.
- ۷- تعداد ضلع های ستون در حالت ۴ و ۶ ضلعی دارای تمرکز تنش بالا و کمانش موضعی شدیدتری نسبت به ۸ و ۱۲ ضلعی هستند.
- ۸- مود شکست و آسیب در تمامی ستون ها بصورت پافیلی و بالچ در پای ستون رخ داده است و با افزایش تعداد اضلاع از شدت آن کاسته شده است.

منابع

- [1]. Han, L. H., Li, W. and Bjorhovde, R. (2014). Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. 100: p. 211-228.
- [2]. Chen, C.-C., Li, J.-M., & Weng, C. (2005). Experimental behaviour and strength of concrete-encased composite beam-columns with T-shaped steel section under cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 863-881.
- [3]. Buick Davison, G. W. (2012). *Steel Designer's Manual*. Wiley- Blackwell.
- [۴]. Mandal, A., (2010). Concrete Filled Steel Tube under Axial Compression.
- [۵] K. Susantha, H. Ge, and T. J. E. S. Usami, "Uniaxial stress-strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes," vol. 23, no. 10, pp. 1331-1347, 2001.
- [۶] M. Yu, X. Zha, J. Ye, and Y. Li, "A unified formulation for circle and polygon concrete-filled steel tube columns under axial compression," *Engineering Structures*, vol. 49, pp. 1-10, 2013.
- [۷] B. Evirgen, A. Tuncan, and K. Taskin, "Structural behavior of concrete filled steel tubular sections (CFT/CFSt) under axial compression," *Thin-Walled Structures*, vol. 80, pp. 46-56, 2014.
- [۸] W. Xu, L.-H. Han, and W. Li, "Seismic performance of concrete-encased column base for hexagonal concrete-filled steel tube: experimental study," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 121, pp. 352-369, 2016.
- [۹] F.-x. Ding, Z. Li, S. Cheng, and Z.-w. Yu, "Composite action of hexagonal concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading," *Thin-Walled Structures*, vol. 107, pp. 502-513, 2016.
- [۱۰] F.-x. Ding, Z. Li, S. Cheng, and Z.-w. Yu, "Composite action of octagonal concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading," *Thin-Walled Structures*, vol. 107, pp. 453-461, 2016.
- [۱۱] S.-W. Liu, T.-M. Chan, S.-L. Chan, and D. K.-L. So, "Direct analysis of high-strength concrete-filled-tubular columns with circular & octagonal sections," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 129, pp. 301-314, 2017.
- [۱۲] J.-Y. Zhu and T.-M. Chan, "Behaviour of polygonal-shaped steel-tube columns filled with high-strength concrete," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, vol. 171, no. 2, pp. 96-112, 2018.

- [۱۳] J.-Y. Zhu and T.-M. Chan, "Experimental investigation on octagonal concrete filled steel stub columns under uniaxial compression," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 147, pp. 457-467, 2018.
- [۱۴]. Moon J, Lehman DE, Roeder CW, et al. Strength of circular concrete-filled tubes with and without internal reinforcement under combined loading. *J Struct Eng* 2012;139(12):04013012.
- [۱۵] Roeder CW, Lehman DE, Bishop E. Strength and stiffness of circular concrete-filled tubes. *J Struct Eng* 2010;136(12):1545-53.
- [۱۶] Silva A, Jiang Y, Castro JM, Silvestre N, Monteiro R. Experimental assessment of the flexural behaviour of circular rubberized concrete-filled steel tubes. *J Construct Steel Res* 2016;122:557-70.
- [۱۷]. ABAQUS, Version 6.14. (2011). Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- [۱۸]. Chen, J., Chan, T.M., Su, R.K.L. and Castro, J.M., 2019. Experimental assessment of the cyclic behaviour of concrete-filled steel tubular beam-columns with octagonal sections. *Engineering Structures*, 180, pp.544-560.
- [19]. Han, L. H., G.-H. Yao, and X. L. Zhao, (2005). Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC). *Journal of Constructional Steel Research*. 61(9): p. 1241-1269.