

تحلیل عددی ستون های CFST تحت بار سیکلی جانبی و تعیین تاثیر مقاومت فشاری بتن و ضخامت ورق فولادی

دریافت مقاله: ۱۳۹۷-۰۹-۲۵

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸-۰۴-۱۰

علیرضا خالو

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
khaloo@sharif.edu

ناهید خدابخشی*

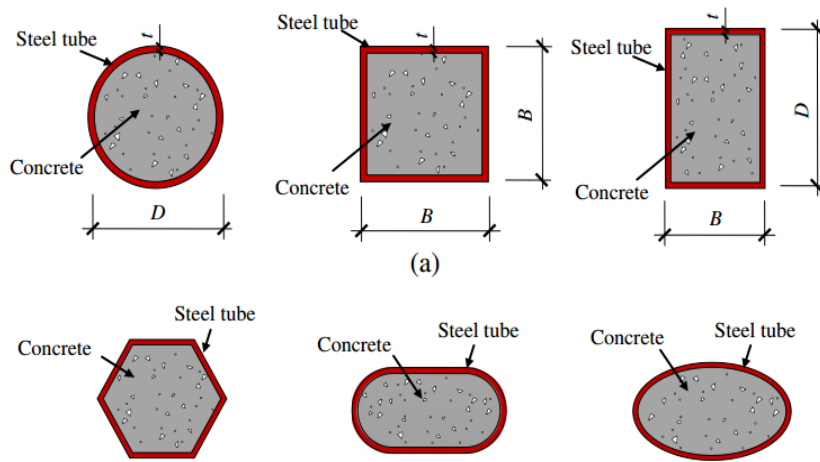
دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی شریف
Nahidkhodabakhshi@yahoo.com

چکیده

بتن ماده‌ای است که به دلیل کارایی و مقاومت فشاری زیاد کاربرد گسترده‌ای در مهندسی عمران دارد. مقاومت کم بتن در برابر تنش‌های کششی، به ویژه در محصوریت پایین ضرورت استفاده از سیستم‌های مرکب فولاد و بتن را فراهم می‌کند. در ستون‌های فولادی پر شده با بتن (CFST)، محصوریت بتن توسط فولاد تامین شده و کمانش موضعی فولاد به وسیله‌ی هسته‌ی بتنی بهبود می‌یابد. در این پژوهش ابتدا با استفاده از روش اجزای محدود نرم افزار آباکوس نتایج عددی ستون CFST با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده و از درستی مدل‌سازی، اطمینان حاصل شده‌است. سپس اثر تغییر ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی و مقاومت فشاری بتن بر رفتار ستون‌های CFST مورد بررسی قرار گرفت. برای در نظر گرفتن اثر تغییر این پارامترها از ۹ مدل ستون CFST با سه ضخامت متفاوت جداره‌ی مقطع فولادی و سه مقاومت فشاری مختلف بتن استفاده شد. رفتار غیرخطی فولاد با استفاده از مدل سخت‌شوندگی مرکب که شامل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک می‌باشد مورد استفاده قرار گرفت. روابط و نمودارهای تنش-کرنش و پارامترهای خرابی فشاری و کششی بتن به طور کامل شرح داده شده‌است. تاثیر افزایش ضخامت فولاد و مقاومت بتن بر جذب انرژی سازه، سختی اولیه و ظرفیت ستون مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج تحلیل، تاثیر افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی در عملکرد ستون‌های CFST نسبت به افزایش مقاومت بتن قابل توجه می‌باشد. بررسی ظرفیت جذب انرژی و تغییر مقاومت نهایی ستون‌های CFST نشان می‌دهد که اثر تغییر مقاومت فشاری بتن برای مدل‌های با فولاد محصورکننده‌ی با ضخامت کمتر قابل توجه می‌باشد. در مقاطع فولادی با ضخامت زیاد جداره، تغییر مقاومت فشاری بتن تاثیر زیادی در جذب انرژی نداشته و مقاومت ستون را به مقدار کمی افزایش می‌دهد. در نتیجه برای بهبود عملکرد سازه‌های دارای ستون‌های CFST از لحاظ جذب انرژی، سختی و ظرفیت مطلوب است از مقاطع فولادی با ضخامت مناسب جداره و بتن با مقاومت معمولی استفاده شود. واژه‌های کلیدی: ستون‌های فولادی پر شده با بتن CFST، تحلیل المان محدود، ستون‌های مرکب، سخت‌شوندگی مرکب، پارامترهای خرابی بتن.

بتن ماده‌ای است که به دلیل کارایی و مقاومت فشاری زیاد کاربرد گسترده‌ای در مهندسی عمران دارد. مقاومت کم بتن در برابر تنش‌های کششی، به ویژه در محصوریت پایین ضرورت استفاده از سیستم‌های مرکب فولاد و بتن را فراهم می‌کند. ستون‌های فولادی پر شده با بتن^۱ با استفاده از اثر محصوریت فولاد بر هسته بتنی عملکرد مناسبی را برای سازه فراهم می‌کنند. ستون‌های CFST اولین بار در ژاپن در ساختمان‌های چند طبقه مورد استفاده قرار گرفتند. این ستون‌ها فواید زیادی نسبت به اعضا سازه‌ای بتنی رایج دارند و به طور گسترده در نواحی لرزه‌خیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. لوله فولادی به عنوان قالب برای بتن در نظر گرفته می‌شود در نتیجه هزینه ساخت سازه را کاهش می‌دهد. همچنین لوله فولادی نقش میلگردهای طولی و عرضی را برای هسته بتنی ایفا می‌کند، در نتیجه نیاز به میلگردگذاری برای بتن نمی‌باشد و مقاومت و شکل‌پذیری هسته بتنی را افزایش می‌دهد. هسته بتنی خمش و کمانش لوله فولادی را به تاخیر می‌اندازد و لوله فولادی مانع پوسته شدن بتن^۲ می‌شود. با توجه به این خصوصیت‌های مهم، ستون‌های CFST برای سازه‌های بلند در نواحی لرزه‌خیز مناسب می‌باشند. ستون‌های مرکب اعضای سازه‌ای هستند که ویژگی‌های مناسب آن‌ها مانند سختی زیاد مقطع عرضی، مقاومت فشاری زیاد، مقاومت بتن در برابر آتش، شکل‌پذیری، مقاومت کششی و نسبت تنش به کرنش زیاد و وزن کم اثبات شده است. ستون‌های CFST به دلیل کاهش ابعاد ستون و افزایش مساحت طبقه باعث کاهش هزینه‌ی ساخت می‌شود. این ویژگی در طراحی سازه‌های بلند شهری که هزینه‌ی زمین زیاد است بسیار اهمیت دارد [۱].

اگرچه مقاطع عرضی دایره‌ای و مستطیلی شکل به دلیل راحتی طراحی اتصالات تیر و ستون، سختی خمشی زیاد مقطع عرضی و زیبایی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما مقاطع عرضی با شکل‌های مختلف برای ستون‌های CFST استفاده شده است. شکل (۱) مقاطع عرضی مختلف ستون‌های CFST را نشان می‌دهد.

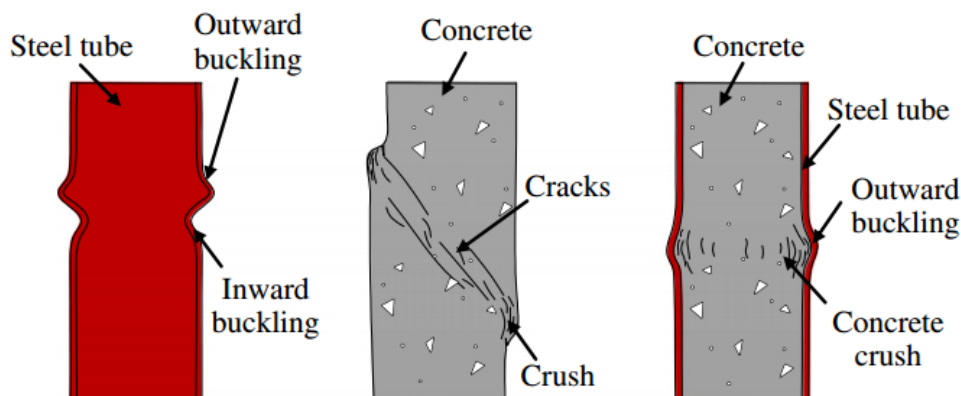


شکل (۱). مقاطع عرضی مختلف ستون‌های CFST [۲]

شکل (۲) الگوی خرابی فولاد، بتن و فولاد پر شده با بتن را نشان می‌دهد. کمانش داخلی و خارجی در لوله فولادی و خرابی برشی در بتن رخ می‌دهد. برای حالت ستون فولادی پر شده با بتن تنها کمانش خارجی در لوله فولادی رخ داده است و خرابی بتن حالت شکل‌پذیرتری دارد. در نتیجه در ستون‌های CFST محصوریت بتن توسط فولاد تامین شده و کمانش موضعی فولاد به وسیله هسته بتنی بهبود می‌یابد [۲].

¹ Concrete Filled Steel Tubular Columns

² Spalling



شکل (۲). مود خرابی فولاد، بتن و فولاد پرشده با بتن [۲]

مطالعات آزمایشگاهی و عددی بسیاری در رابطه با رفتار ستون‌های CFST انجام شده‌است که در ادامه تحقیقات مرتبط با این پژوهش شرح داده می‌شود.

اوساشا و بریج مطالعه‌ای بر روی لوله‌های فولادی جدار نازک و پرشده توسط بتن انجام دادند. پارامترهای نسبت قطر به ضخامت بین ۵۵ تا ۲۰۰، طول به قطر ۳/۵ و مقاومت فشاری ۵۰، ۸۰ و ۱۲۰ مگاپاسکال برای بتن در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت و نتایج بهبود مقاومت کمانشی را نشان داد. در این مطالعه آزمایشگاهی رفتار کمانش موضعی لوله‌های جدار نازک کوتاه با مقطع دایره، محصوریت ستون‌های پر نشده و پرشده با بتن بر روی مقطع عرضی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین روش طراحی برای لوله‌های فولادی جدار نازک پرشده با بتن توسعه داده شد [۳].

لین و تسای مطالعه‌ای بر روی ۱۸ نمونه‌ی دولایه‌ی CFST انجام دادند. نسبت قطر به ضخامت و نسبت فضای خالی برای طول موثر ۱۱۰۰ میلی‌متر به عنوان پارامتر در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج افزایش محصوریت بتن توسط لوله‌ی فولادی و کاهش کمانش موضعی فولاد توسط بتن را نشان داد [۴].

هوانگ مطالعه‌ای بر روی اثر شکل مقطع عرضی، نسبت عرض به ضخامت، سختی و شکل‌پذیری ستون‌های CFST انجام داد. نتایج افزایش قابل توجه مقاومت و شکل‌پذیری در ستون‌های مربعی CFST را نشان داد [۵]. داریشکا و همکاران تحلیل اجزای محدود بر روی ستون‌های CFST تحت بارگذاری محوری در نمونه‌های با مقطع عرضی دایره‌ای و مربعی و بتن با مقاومت ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ مگاپاسکال انجام دادند. نتایج نشان داد تغییر شکل ستون با افزایش مقاومت بتن ۱۰ الی ۱۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین مقاطع دایره‌ای محصوریت بهتری نسبت به مقاطع مربعی دارند [۶].

علی‌نژاد و خالو با بررسی عوامل مختلف از جمله نوع و ضخامت لوله، شعاع گوشه مقطع و نسبت ابعاد در مقاطع مستطیلی تاثیر محصور سازی بر رفتار ستون بتنی را بررسی کردند. با توجه به این مطالعه محصور کردن ستون بتنی، سبب افزایش ظرفیت باربری، شکل‌پذیری، دوام و جذب انرژی این نوع ستون‌ها شده است [۷].

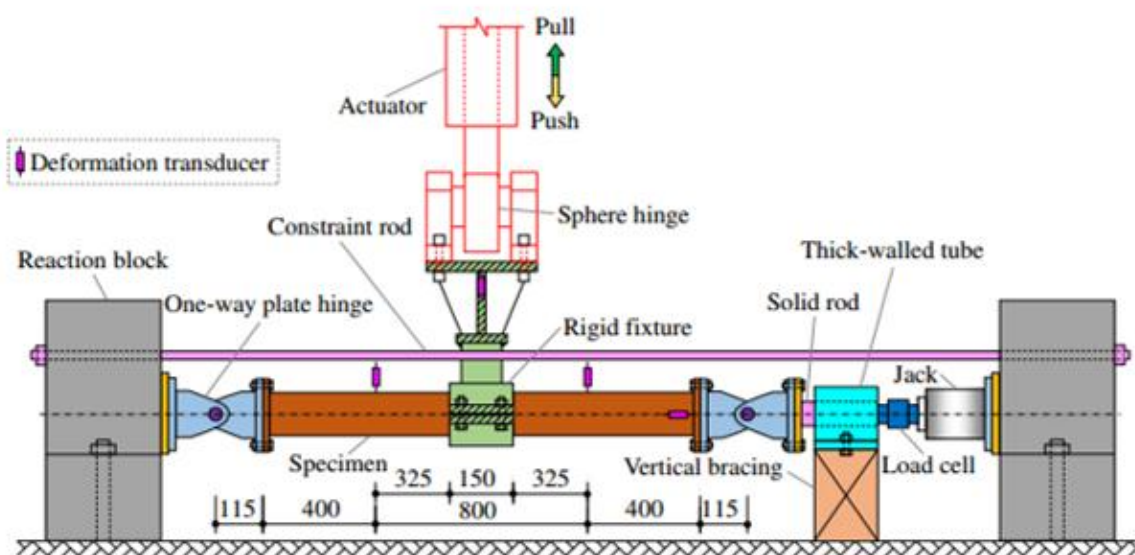
زمانیکه ستون‌های CFST در نواحی لرزه‌خیز مورد استفاده قرار بگیرند رفتار چرخه‌ای آن‌ها تحت بارگذاری سیکلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این ستون‌ها ظرفیت جذب انرژی قابل توجه دارند. همچنین شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی آن‌ها با افزایش بار محوری کاهش می‌یابد. برای مدل‌سازی عددی ستون‌های CFST تحت بارگذاری سیکلی هاجر و تورت [۸]، دناویت و هاجر [۹] مدل‌های سه بعدی المان محدود بر روی مقاطع مربعی و دایره‌ای پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که مدل‌سازی اجزای محدود می‌تواند به خوبی رفتار سازه را پیش‌بینی کند. با توجه به اینکه مقاومت، شکل‌پذیری و رفتار هیستریزس پارامترهای مهم در طراحی لرزه‌ای به شمار می‌آیند در

این تحقیق پس از صحت‌سنجی مدل اجزای محدود، رفتار هیستریزس مقاطع فولادی در ضخامت‌های مختلف جداره و مقاومت‌های مختلف بتن بررسی شده و تاثیر این پارامترها بر روی ظرفیت جذب انرژی، سختی و ظرفیت ستون‌های CFST مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مدل‌سازی اجزای محدود ستون‌های CFST و صحت‌سنجی با نتایج آزمایشگاهی

مطالعه‌ی رفتار سازه‌ها با روش‌های تجربی و عددی امکان‌پذیر است. یکی از روش‌های عددی که به دلیل سرعت و دقت بالا و هزینه‌ی کم، نسبت به سایر روش‌ها رواج بیشتری دارد، روش اجزای محدود است. ولی درستی مدل‌سازی اجزای محدود مورد استفاده باید با نتایج مدل‌های آزمایشگاهی تأیید شود. در این پژوهش با استفاده از روش اجزای محدود نرم افزار آباکوس^۳ مدل ارائه شده توسط یوفویانگ و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۱۰].

مدل استفاده شده برای صحت‌سنجی یک نمونه با سطح مقطع مربعی با ابعاد ۱۱۴ میلی‌متر، ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی ۳/۸۷ میلی‌متر و طول ۱۶۰۰ میلی‌متر می‌باشد. جزئیات آزمایش به صورت شکل (۳) می‌باشد.



شکل (۳). جزئیات آزمایش [۱۰]

مطابق شکل (۳) نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای در وسط و بار محوری متمرکز در یک انتها می‌باشد. مشخصات نمونه آزمایشگاهی در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱). مشخصات نمونه آزمایشگاهی

α	N_0 (KN)	n	$\sigma_{0.01}$ (MPa)	E_s (MPa)	ν_s	E_c (MPa)	f_c (MPa)
0.15	80.9	0.1	260.7	184000	0.312	34700	50

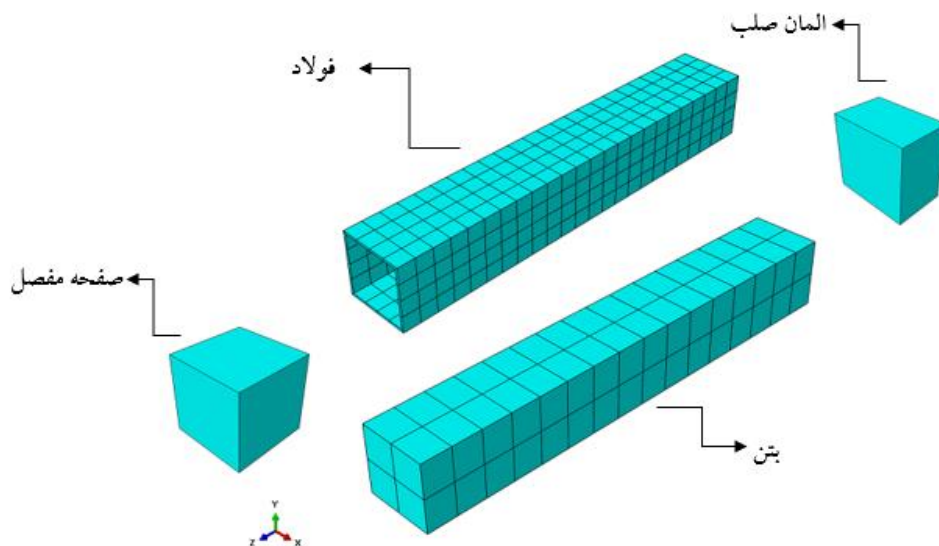
در این جدول $\sigma_{0.01}$ تنش کششی در کرنش باقی‌مانده ۰/۰۱، α نسبت فولاد، E_s مدول الاستیسیته‌ی فولاد، ν_s ضریب پواسون فولاد، E_c مدول الاستیسیته‌ی بتن و n نسبت نیروی محوری فشاری می‌باشد که از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود.

³ Abaqus

$$n = \frac{N_0}{N_{cr}} \quad (1)$$

در این رابطه N_{cr} ظرفیت ستون و N_0 نیروی محوری فشاری می‌باشد که در انتهای ستون وارد شده و در طول آزمایش ثابت باقی می‌ماند.

بارگذاری چرخه‌ای بر اساس دستورالعمل ATC-24 و به روش کنترل جابه‌جایی^۴ و کنترل نیرو^۵ است. برای مدل‌سازی نمونه در نرم‌افزار آباکوس با توجه به متقارن بودن ستون حول صفحه‌ی XOY، نصف نمونه مدل‌سازی می‌شود. این مدل از ۴ قسمت هسته‌ی بتنی، ورق فولادی، صفحه‌ی مفصل و المان صلب محل بارگذاری چرخه‌ای مطابق شکل (۴) تشکیل شده است. شرایط مرزی نمونه با بستن جابه‌جایی در راستای Z و لنگر حول محورهای X و Y در ناحیه قطعه‌ی صلب اعمال می‌شود.



شکل (۴). اجزای تشکیل‌دهنده مدل المان محدود

برای مدل‌سازی اعضا از جزء Solid و شبکه هشت‌گره‌ای C3D8R استفاده شده است. اصطکاک و لغزش بین فولاد و هسته‌ی بتنی توسط تماس سطح به سطح (Surface to surface) مدل‌سازی شده است. این تماس اجازه‌ی جدا شدن دو سطح از یکدیگر را داده و مانع فرورفتن آن‌ها در یکدیگر می‌شود. مشخصات سطح تماس در راستای عمود بر سطح از نوع تماس سخت^۶ و در راستای مماس بر سطح از نوع اصطکاک کولمب با ضریب ۰/۲۵ می‌باشد. اتصال بین صفحه‌ی مفصل، بتن و فولاد و اتصال بین قطعه‌ی صلب و فولاد از نوع Tie انتخاب شده است. مدل خمیری فولاد در نرم‌افزار آباکوس سطح تسلیم Mises به همراه جریان خمیری^۷ می‌باشد که برای توصیف رفتار فولاد ضدزنگ استفاده می‌شود. مدل سخت‌شوندگی مرکب^۸ که شامل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک^۹ و سخت-

⁴ Displacement control

⁵ Force control

⁶ Hard contact

⁷ Associated plastic flow

⁸ Mixed hardening

⁹ Isotropic hardening

شوندگی سینماتیک¹⁰ می‌باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل سخت‌شوندگی ایزوتروپیک فولاد ضدزنگ رابطه‌ی بین اندازه سطح تسلیم¹¹ σ^0 و کرنش خمیری معادل $\bar{\epsilon}^{pl}$ را مطابق رابطه (۲) توصیف می‌کند.

$$\sigma^0 = \sigma|_0 + Q_\infty \cdot (1 - e^{-b \cdot \bar{\epsilon}^{pl}}) \quad (2)$$

در این رابطه $\sigma|_0$ تنش تسلیم در کرنش خمیری صفر است که در این تحقیق با $\sigma_{0.01}$ برابر می‌باشد. Q_∞ بیشترین تغییر اندازه‌ی سطح تسلیم و b نرخ اندازه‌ی تغییرات سطح تسلیم با افزایش کرنش خمیری می‌باشند. مدل سخت‌شوندگی غیرخطی سینماتیک فولاد ضدزنگ با استفاده از رابطه‌ی بین بردار backstress (α_k) که انتقال سطح تسلیم در فضای تنش-کرنش خمیری را توصیف می‌کند، تعریف می‌شود. مدل سخت‌شوندگی غیرخطی سینماتیک با استفاده از رابطه‌ی (۳) تعریف می‌شود.

$$\alpha_k = \frac{C_k}{\gamma_k} \cdot (1 - e^{-\gamma_k \cdot \bar{\epsilon}^{pl}}) + \alpha_{k,1} \cdot e^{-\gamma_k \cdot \bar{\epsilon}^{pl}} \quad (3)$$

در این رابطه C_k مدول سخت‌شوندگی سینماتیکی اولیه، γ_k نرخ کاهش مدول سخت‌شوندگی سینماتیکی با افزایش تغییرشکل خمیری می‌باشد. $\alpha_{k,1}$ مقدار اولیه‌ی مولفه‌ی شماره k در backstress می‌باشد. مشخصات سخت‌شوندگی چرخه‌ای بر اساس مطالعات پیشین به دست می‌آید [۱۱ و ۱۲]. این پارامترهای پیشنهاد شده برای سخت‌شوندگی چرخه‌ای فولاد ضدزنگ با عملکرد سخت‌شوندگی مرکب در آباکوس مناسب می‌باشند. پارامترهای سخت‌شوندگی چرخه‌ای فولاد ضدزنگ در جدول (۲) آورده شده‌اند.

جدول (۲). پارامترهای سخت‌شوندگی چرخه‌ای فولاد ضدزنگ

Cross section	$\sigma _0$ (MPa)	Q_∞ (MPa)	b	C_{Kin} (MPa)	γ
Square	260.7	421.6	1.8	50387.2	195.5

رفتار پیچیده‌ی غیرخطی هسته‌ی بتنی تحت بار چرخه‌ای با استفاده از مدل خرابی خمیری در آباکوس شبیه‌سازی می‌شود در این مدل خرابی بتن دارای دو نوع شکست ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری می‌باشد که به ترتیب با استفاده از کشش معادل و کرنش خمیری فشاری تعیین می‌شوند. درحالی‌که کاهش سختی به دلیل خرابی در مرحله‌ی نرم‌شوندگی منحنی تنش-کرنش توسط پارامترهای خرابی کششی و فشاری توصیف می‌شود. برای بتن محصور تحت فشار، رابطه‌ی تنش در مقابل کرنش غیرخطی از رابطه‌ی ارائه شده توسط Han و همکاران استفاده شده‌است. رابطه‌ی (۴) تنش در مقابل کرنش غیرخطی را نشان می‌دهد.

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\beta_0 (x-1)^\eta + x} & (x \geq 1) \end{cases} \quad (4)$$

در این روابط $x = \frac{\sigma}{\sigma_0}$ ، $y = \frac{\sigma}{\sigma_0} = f'_c (N/mm^2)$ می‌باشد که ϵ_0 از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود.

¹⁰ Kinematic hardening

¹¹ Yield surface size

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6} \quad (5)$$

ε_c از رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon_c = (1300 + 12.5f'_c) \times 10^{-6} \quad (6)$$

η و β_0 مربوط به معادله‌ی (۴) از روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شود.

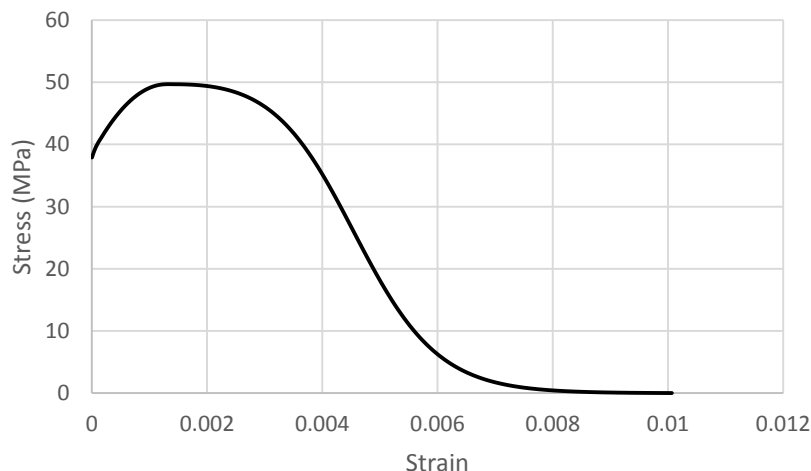
$$\eta = \begin{cases} 2. & \text{CFST با مقطع دایره} \\ 1.6 + 1.5x. & \text{CFST با مقطع مربع} \end{cases} \quad (7)$$

$$\beta_0 = \begin{cases} (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi - 0.5)7]} (f'_c)^{0.5} \times 0.5 \geq 0.12. & \text{CFST با مقطع دایره} \\ \frac{(f'_c)^{0.1}}{1.2\sqrt{1+\xi}}. & \text{CFST با مقطع مربع} \end{cases} \quad (8)$$

در این رابطه f'_c مقاومت استوانه‌ای بتن بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. افزایش رفتار خمیری به پارامتر محصوریت (ξ) بستگی دارد که بر اساس رابطه‌ی (۹) به دست می‌آید.

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} = \alpha \frac{f_y}{f_{ck}} \quad (9)$$

در این رابطه A_s سطح مقطع فولاد، A_c سطح مقطع بتن و α نسبت فولاد می‌باشد. همچنین f_y تنش تسلیم فولاد و f_{ck} مقاومت مشخصه‌ی بتن می‌باشد که ۰/۶۷ برابر مقاومت فشاری نمونه‌ی مکعبی بتن می‌باشد. در نهایت نمودار تنش-کرنش بتن در فشار با مقاومت فشاری ۵۰ مگاپاسکال مطابق شکل (۵) می‌باشد.

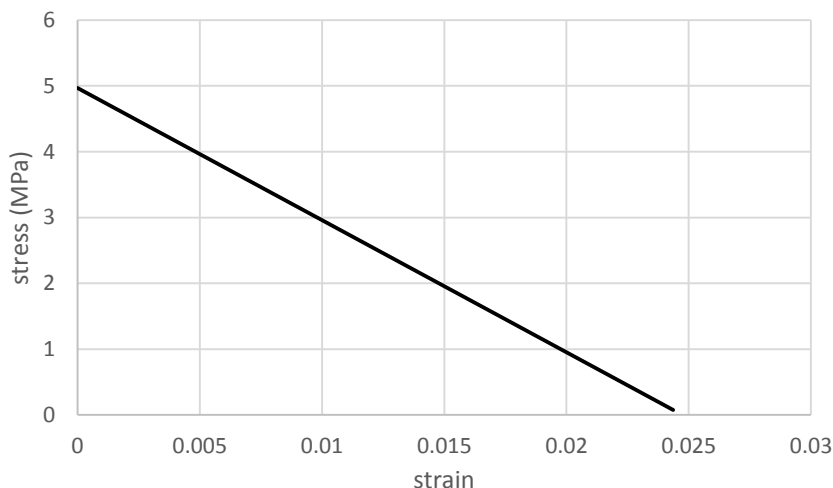


شکل (۵). نمودار تنش-کرنش بتن در فشار

شبه‌سازی سخت‌شوندگی کششی در آباکوس برای نشان دادن خصوصیت نرم‌شوندگی کششی هسته‌ی بتنی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل تنش-بازشدگی ترک توسط Goto و همکاران برای در نظر گرفتن اثر نرم‌شوندگی کششی، برای مقاومت کششی برابر با ۱۰ درصد مقاومت فشاری نهایی، با استفاده از یک رابطه‌ی خطی پیشنهاد شده است [۱۳]. بازشدگی ترک با استفاده از رابطه‌ی (۱۰) به کرنش خمیری تبدیل می‌شود.

$$\varepsilon^{pl} = \frac{u_{cr}}{V_e^{\frac{1}{3}}} \quad (10)$$

در این رابطه V_e میانگین حجم بخش هسته‌ی بتنی می‌باشد. با استفاده درونیابی برای مقاومت مدل موردنظر نمودار تنش- کرنش خمیری کششی بتن محصور با مقاومت کششی ۱۰ مگاپاسکال به صورت شکل (۶) می‌باشد.

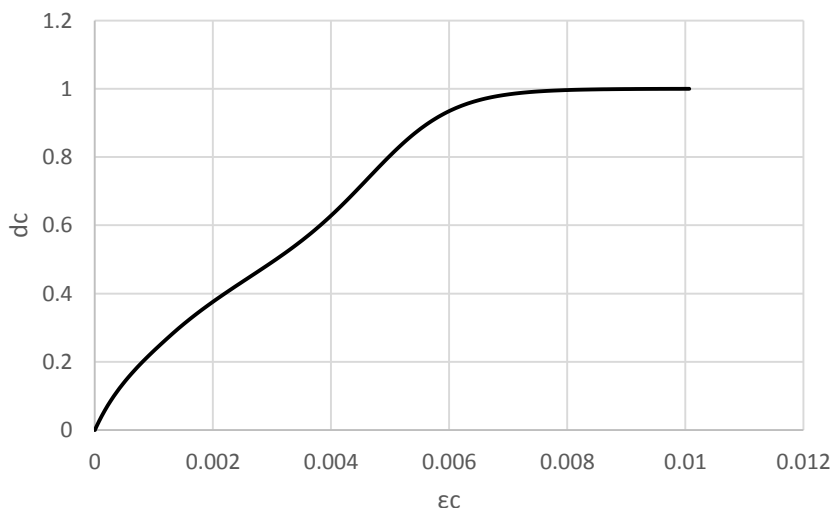


شکل (۶). نمودار تنش-کرنش بتن در کشش

معادله‌ی غیرخطی پیشنهاد شده توسط Birtel و Mark که تابعی از تنش، ضریب کشسانی و کرنش خمیری می‌باشد برای تعیین پارامترهای خرابی فشاری بتن مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴]. پارامتر خرابی فشاری بر اساس رابطه‌ی (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}} \quad (11)$$

b_c یک پارامتر ثابت با مقادیر بین صفر تا یک می‌باشد. که مقدار ۰/۷ با نتایج بارگذاری چرخه‌ای مطابقت خوبی دارد. نمودار پارامتر خرابی فشاری نسبت به کرنش خمیری مطابق شکل (۷) می‌باشد.

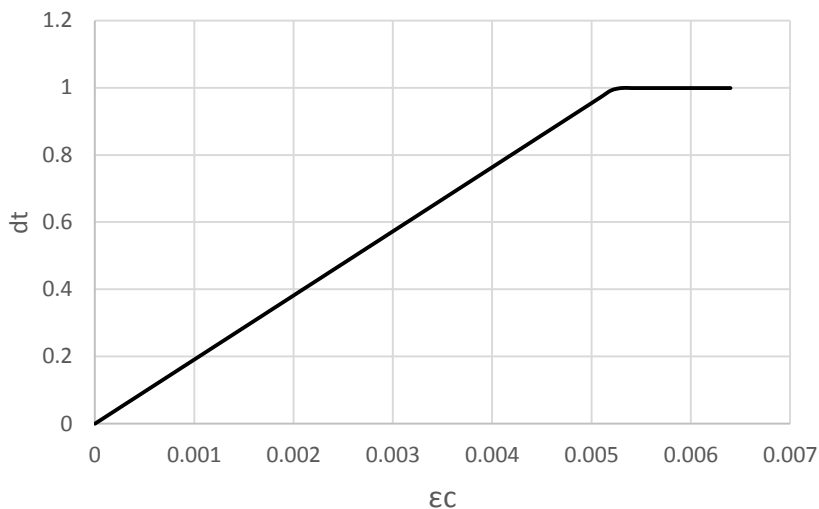


شکل (۷). نمودار پارامتر خرابی فشاری-کرنش پلاستیک بتن

پارامتر خرابی کششی از رابطه‌ی خطی ارائه شده توسط Goto و همکاران مطابق رابطه‌ی (۱۲) محاسبه می‌شود [۱۳].

$$d_t = \frac{1.24k_t}{\sigma_{t0}} u^{cr} \quad (12)$$

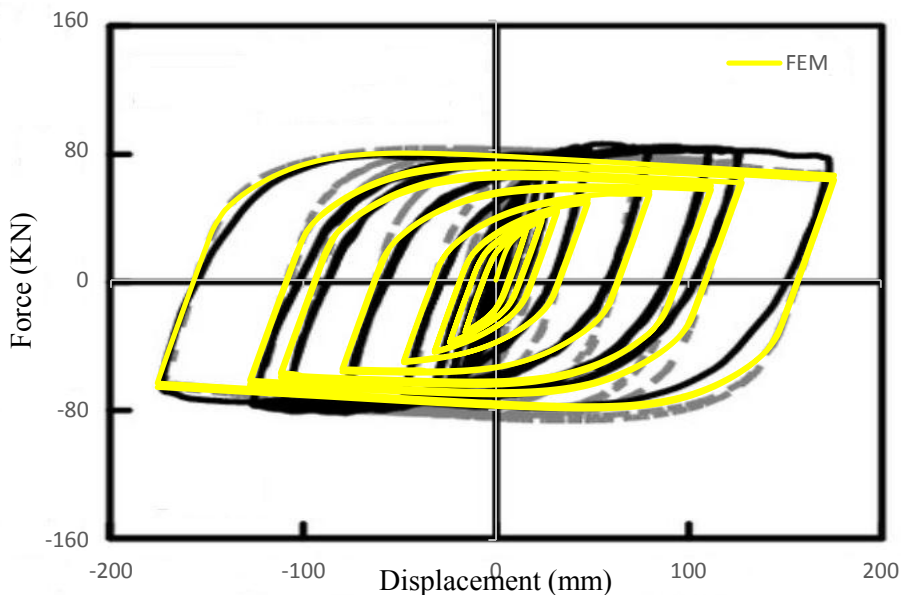
نمودار پارامتر خرابی کششی نسبت به کرنش خمیری مطابق شکل (۸) می‌باشد.



شکل (۸). نمودار پارامتر خرابی کششی-کرنش پلاستیک بتن

ضریب کشسانی هسته‌ی بتنی با استفاده از رابطه‌ی ارائه شده توسط ACI محاسبه می‌شود و ضریب پواسون ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود

جهت صحت‌سنجی مدل اجزای محدود با مدل آزمایشگاهی نمودار چرخه‌ای بدست‌آمده‌ی آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌است. در شکل (۹)، خطوط مشکی پررنگ نمودار چرخه‌ای مدل آزمایشگاهی، خطوط خط‌چین خاکستری مدل اجزای محدود یانگ و همکاران و خطوط زردرنگ مدل اجزای محدود انجام شده در این پژوهش را نشان می‌دهند.



شکل (۹). صحت‌سنجی مدل المان محدود با مدل آزمایشگاهی یانگ و همکاران [۱۰]

همانطور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود نتایج نمودار چرخه‌ای بدست آمده برای مدل اجزای محدود انجام شده در این پژوهش تطابق بسیار مناسبی با نتایج بدست آمده از آزمایش و مدل اجزای محدود انجام شده توسط یانگ و همکاران دارد.

۳- مدل سازی عددی ستون‌های CFST

۳-۱- مشخصات مدل‌های المان محدود

در این پژوهش اثر تغییر ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی و مقاومت فشاری بتن بر رفتار ستون‌های CFST مورد بررسی قرار گرفته است. برای در نظر گرفتن اثر تغییر این پارامترها از ۹ مدل ستون CFST با سه ضخامت متفاوت برای جداره‌ی مقطع فولادی و سه مقاومت فشاری مختلف بتن استفاده شده است. انتخاب مقاومت‌های فشاری به-گونه‌ای است که محدوده‌ی بتن با مقاومت فشاری کم، متوسط و زیاد را در برمی‌گیرد. جدول (۳) مشخصات هر کدام از مدل‌های ساخته شده را نشان می‌دهد.

جدول (۳). مشخصات مدل‌ها

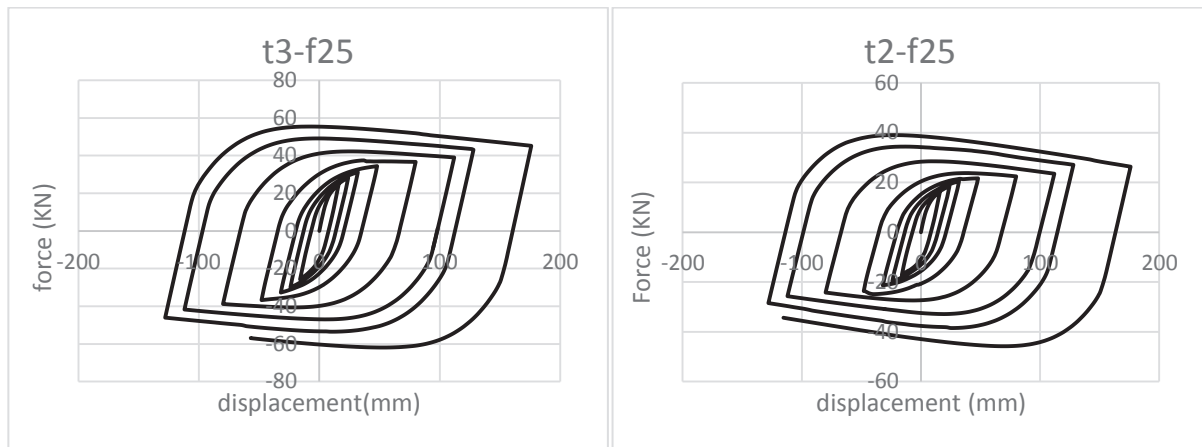
Number	Name	t (Steel Box thickness) (mm)	f_c (MPa)
1	t2-f25	2	25
2	t2-f50	2	50
3	t2-f70	2	70
4	t3-f25	3	25
5	t3-f50	3	50
6	t3-f70	3	70
7	t4-f25	4	25
8	t4-f50	4	50
9	t4-f70	4	70

۳-۲- مشخصات مصالح

مشخصات فولاد و بتن مدل‌سازی شده مشابه آن‌چه که در بخش صحت‌سنجی ارائه شد برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. از آنجایی که رفتار فولاد در همه‌ی مدل‌ها مشابه می‌باشد رفتار استفاده شده در مدل صحت-سنجی بکار گرفته شده است. با توجه به معادلات بالا مشخصات رفتار بتن شامل نمودار تنش-کرنش در کشش و فشار، رفتار خرابی در کشش و فشار و ضریب کشسانی برای مقاومت‌های فشاری مختلف متفاوت است. همچنین با توجه به تغییرات پارامتر α که نسبت فولاد و بتن را نشان می‌دهد، تغییر ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی نیز بر رفتار تنش-کرنش و خرابی بتن تاثیر می‌گذارد، در نتیجه رفتار بتن برای هر کدام از ۹ مدل ارائه شده در جدول بالا متفاوت است و با استفاده از روابط شرح داده شده بدست می‌آید. مشابه مشخصات ارائه شده در مدل صحت‌سنجی از اجزای Solid برای اعضای مدل استفاده شده و برای شبکه‌بندی از اجزای هشت‌گه‌ای آجری C3D8R استفاده شده است.

۳-۳- نمودارهای هیستریزیس

نمودارهای هیستریزیس برای ۲ ستون t2-25 و t3-25 در شکل (۱۰) آورده شده است.

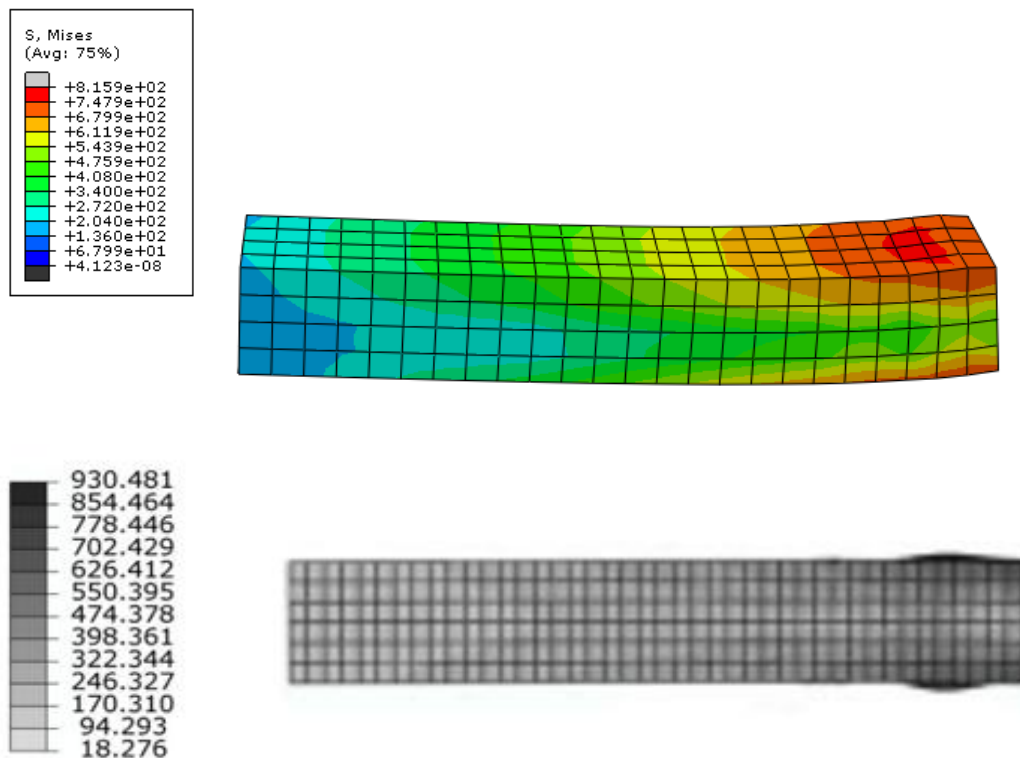


شکل (۱۰). نمودارهای هیستریزیس برای ۲ ستون t2-25 و t3-25

۴- نتایج حاصل از مدل سازی

۴-۱- بررسی توزیع تنش و خرابی ستون CFST

اعمال جابجایی‌های متناوب در انتهای صلب باعث ایجاد تنش‌های فشاری و کششی در ستون می‌شود. مطابق شکل (۱۱) با توجه به زیاد بودن مقدار تنش در وسط ستون، بیشینه‌ی تنش ایجاد شده در این قسمت‌ها رخ می‌دهد. شکل (۱۱) دو نمونه از تنش بدست آمده برای نمونه‌ی با ضخامت فولاد ۴ میلی‌متر و مقاومت فشاری ۵۵ مگاپاسکال بتن نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نیز مشاهده می‌شود بیشینه‌ی تنش در وسط ستون اصلی (انتهای ستون مدل سازی شده) رخ داده است که مطابقت مناسب مود خرابی بدست آمده برای مدل آزمایشگاهی (نمونه‌ی S0.15-0.1) و مدل اجزای محدود را نیز نشان می‌دهد.



شکل (۱۱). توزیع تنش بدست آمده برای نمونه‌ی با ضخامت فولاد ۴ میلی‌متر و مقاومت فشاری ۵۵ مگاپاسکال بتن

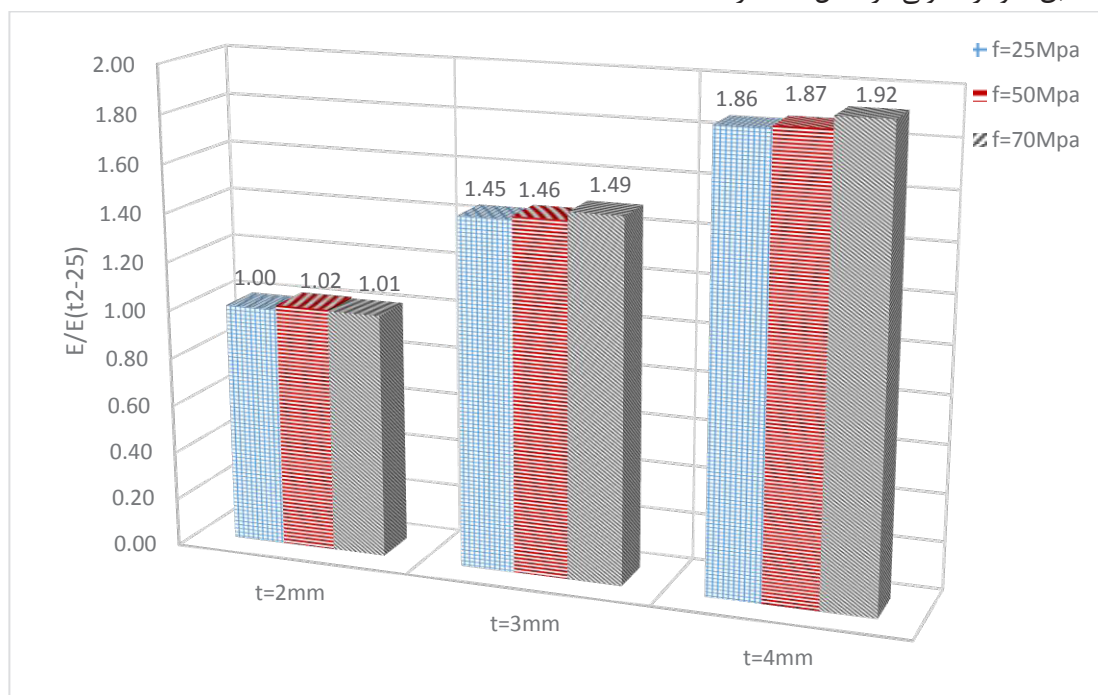
۴-۲- اثر تغییر مقاومت فشاری بتن و ضخامت فولاد بر میزان جذب انرژی ستون CFST

با افزایش مقاومت بتن شکل‌پذیری و جذب انرژی سازه‌های بتنی کاهش می‌یابد. محصوریت خارجی ایجاد شده در ستون‌های CFST باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری سازه می‌شود و ضعف بتن در مقاومت‌های بالا را بهبود می‌بخشد. جدول (۴) مقادیر جذب انرژی مدل‌های مختلف بررسی شده را نشان می‌دهد. جذب انرژی هر کدام از نمونه‌ها از محاسبه‌ی سطح داخل نمودار چرخه‌ای آن‌ها بدست می‌آید. برای مقایسه‌ی اثر تغییرات مقاومت فشاری بتن و تغییر ضخامت فولاد بر جذب انرژی ستون، مدل با ضخامت فولاد ۲ میلی‌متر و مقاومت فشاری بتن ۲۵ مگاپاسکال به عنوان نمونه‌ی مبنا در نظر گرفته شده و ستون سوم جدول (۴) نسبت جذب انرژی هر کدام از این مدل‌ها را نسبت به این نمونه نشان می‌دهد.

جدول (۴). مقادیر جذب انرژی مدل‌ها

model	energy absorption (N-m)	energy absorption / (t2-25) energy absorption
t2-25	44206559	1.00
t2-50	45072406	1.02
t2-70	44804240	1.01
t3-25	63901726	1.45
t3-50	64555347	1.46
t3-70	65987133	1.49
t4-25	82260574	1.86
t4-50	82777821	1.87
t4-70	84889997	1.92

به منظور مقایسه بهتر نتایج، مقدار انرژی جذب شده هر نمونه نسبت به نمونه‌ی مبنا برای ضخامت‌ها و مقاومت‌های مختلف مطابق نمودار ستونی در شکل (۱۲) ارائه شده است.



شکل (۱۲). مقایسه انرژی جذب شده هر نمونه نسبت به نمونه‌ی مبنا برای ضخامت‌ها و مقاومت‌های مختلف

۴-۲-۱- بررسی افزایش جذب انرژی در اثر افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی

افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی باعث افزایش محصوریت و جذب انرژی سازه می‌شود. مطابق نسبت‌های جذب انرژی ارائه شده در شکل (۱۲)، افزایش ضخامت فولاد از ۲ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر برای نمونه‌های با مقاومت فشاری ۲۵، ۵۰ و ۷۰ مگاپاسکال بتن به ترتیب جذب انرژی ستون را ۴۵ درصد، ۴۴ درصد و ۴۸ درصد افزایش می‌دهد. همچنین مقادیر افزایش جذب انرژی با تغییر ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی از ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر نیز به ترتیب برابر با ۸۶ درصد، ۸۵ درصد و ۹۱ درصد می‌باشد. با افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی قابلیت جذب انرژی سازه افزایش می‌یابد و تاثیر افزایش مقاومت در جذب انرژی ناچیز است.

۴-۲-۲- بررسی افزایش جذب انرژی در اثر افزایش مقاومت فشاری بتن

مطابق شکل (۱۲) برای نمونه‌های با ضخامت ۲ میلی‌متر جداره‌ی مقطع فولادی با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۵ مگاپاسکال به ۵۵ و ۷۰ مگاپاسکال جذب انرژی ستون ۲ درصد و ۱ درصد افزایش خواهد یافت. برای نمونه‌های با ضخامت‌های ۳ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر نیز با افزایش مقاومت فشاری از ۲۵ به ۵۵ و ۷۰ مگاپاسکال جذب انرژی ستون به ترتیب ۱ درصد و ۴ درصد و ۱ درصد و ۶ درصد می‌باشد. در ستون با ضخامت کم جداره‌ی مقطع فولادی با افزایش مقاومت بتن جذب انرژی ستون کاهش می‌یابد زیرا بتن تردتر شده و جذب انرژی آن کاهش می‌یابد. در ستون‌های با ضخامت زیاد جداره‌ی مقطع فولادی، کاهش جذب انرژی به دلیل افزایش مقاومت بتن از بین می‌رود. در واقع اثر محصوریت بتن افزایش یافته و ضعف بتن در مقاوم بالا را بهبود می‌بخشد.

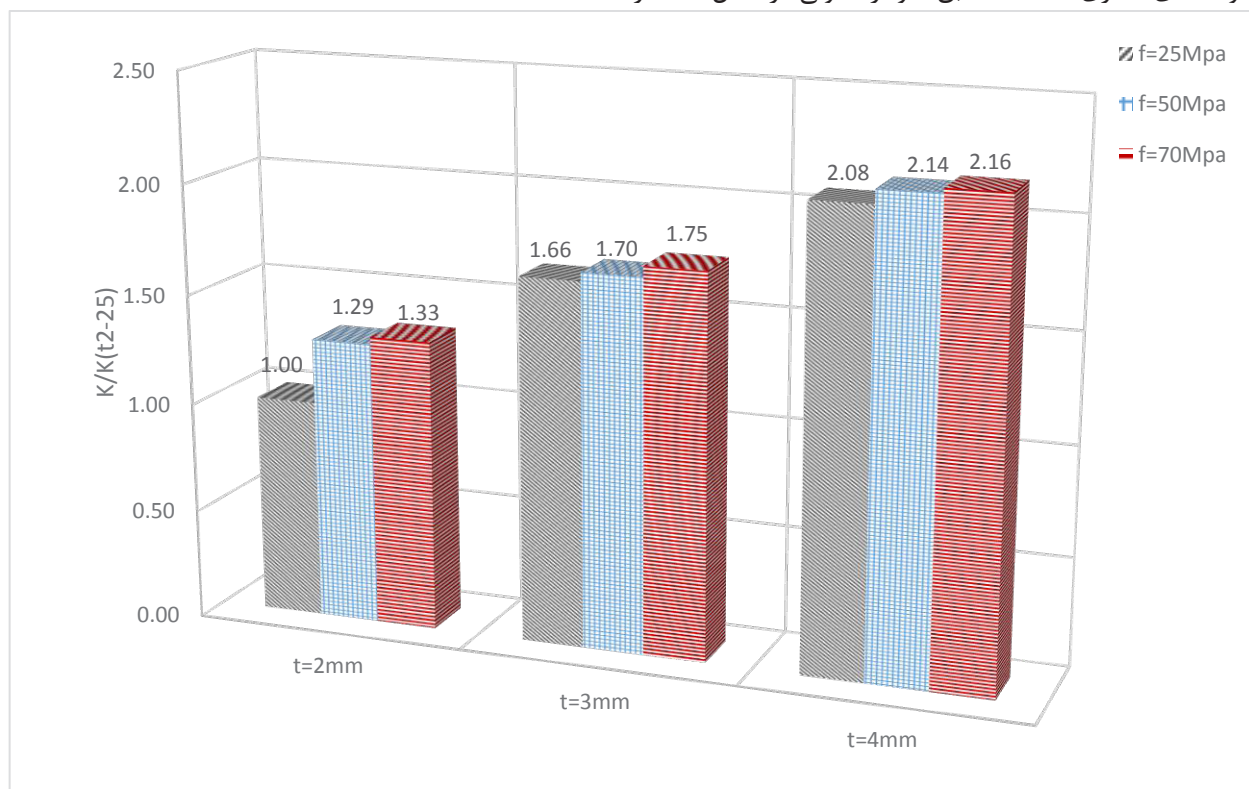
۴-۳- اثر تغییر مقاومت فشاری بتن و ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی بر سختی ستون CFST

مطابق روابط ارائه شده برای مقاومت فشاری و ضریب کشسانی بتن، ضریب کشسانی با جذر مقاومت فشاری رابطه‌ی مستقیم دارد، لذا افزایش مقاومت فشاری ضریب کشسانی را نیز به همراه خواهد داشت. در نتیجه افزایش مقاومت فشاری بتن با زیاد کردن ضریب کشسانی بتن باعث افزایش سختی سازه می‌شود. از طرفی تغییر ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی نیز باعث افزایش ممان اینرسی بخش فولادی ستون و به تبع آن افزایش ممان اینرسی کل ستون خواهد شد. جدول (۵) مقادیر سختی اولیه‌ی مدل‌های مختلف بررسی شده را نشان می‌دهد. برای مقایسه‌ی اثر تغییرات مقاومت فشاری بتن و تغییر ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی بر سختی سازه، مدل با ضخامت فولاد ۲ میلی‌متر و مقاومت فشاری بتن ۲۵ مگاپاسکال به عنوان نمونه‌ی مبنا در نظر گرفته شده و ستون سوم جدول (۵) نسبت سختی اولیه‌ی هر کدام از این مدل‌ها را نسبت به این نمونه نشان می‌دهد.

جدول (۵). سختی اولیه مدل‌ها

model	Initial Stiffness(N/mm)	Initial Stiffness / (t2-25) Initial stiffness
t2-25	1870.00	1.00
t2-50	2421.26	1.29
t2-70	2484.77	1.33
t3-25	3098.48	1.66
t3-50	3173.78	1.70
t3-70	3267.73	1.75
t4-25	3884.19	2.08
t4-50	4002.94	2.14
t4-70	4045.73	2.16

به منظور مقایسه بهتر نتایج، مقدار سختی اولیه هر نمونه نسبت به نمونه‌ی مبنا برای ضخامت‌های جداره و مقاومت‌های فشاری مختلف مطابق نمودار ستونی در شکل (۱۳) ارائه شده است.



شکل (۱۳). مقایسه سختی اولیه هر نمونه نسبت به نمونه‌ی مبنا برای ضخامت‌های جداره و مقاومت‌های فشاری مختلف

۱-۳-۴- بررسی افزایش سختی در اثر افزایش ضخامت فولاد

افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی باعث افزایش محصوریت و سختی سازه می‌شود. مطابق نسبت‌های سختی ارائه شده در شکل (۱۳)، افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی از ۲ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر برای نمونه‌های با مقاومت فشاری ۲۵، ۵۰ و ۷۰ مگاپاسکال بتن به ترتیب سختی ستون را ۶۶ درصد، ۴۱ درصد و ۴۲ درصد افزایش می‌دهد. همچنین مقادیر افزایش سختی با تغییر ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی از ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر نیز به ترتیب برابر با ۱۰۸ درصد، ۸۵ درصد و ۸۳ درصد می‌باشد. مشخص است که افزایش سختی برای ستون‌های با مقاومت فشاری بتن کمتر نسبت به ستون‌های با مقاومت فشاری بیشتر قابل توجه‌تر است.

۲-۳-۴- بررسی افزایش سختی در اثر افزایش مقاومت فشاری بتن

رابطه‌ی بین مقاومت فشاری-ضریب کشسانی بتن نشان می‌دهد که ضریب کشسانی با نسبت جذر مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۱۳) برای نمونه‌های با ضخامت ۲ میلی‌متر جداره‌ی مقطع فولادی با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۵ مگاپاسکال به ۵۵ و ۷۰ مگاپاسکال سختی ستون ۲۹ درصد و ۳۳ درصد افزایش خواهد یافت. برای نمونه‌های با ضخامت‌های جداره ۳ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر نیز با افزایش مقاومت فشاری از ۲۵ به ۵۵ و ۷۰ مگاپاسکال سختی سازه به ترتیب ۴ درصد و ۹ درصد و ۶ درصد و ۸ درصد می‌باشد. با افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی تاثیر افزایش مقاومت در افزایش سختی ستون کم می‌شود.

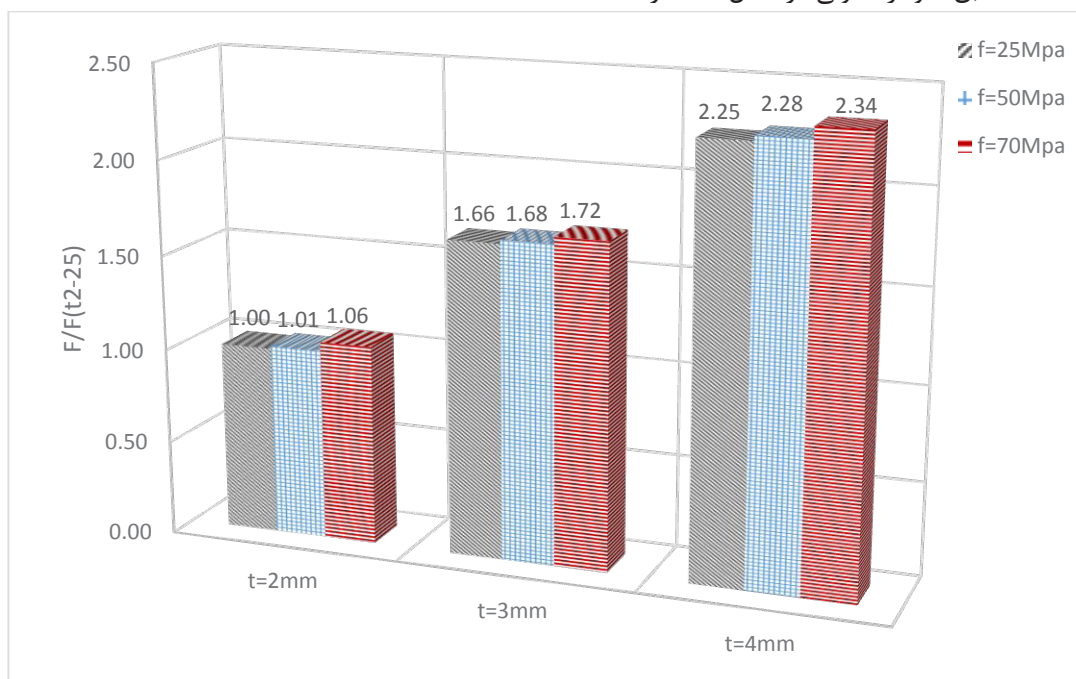
۴-۴- اثر تغییر مقاومت فشاری بتن و ضخامت فولاد بر ظرفیت ستون CFST

افزایش ضریب کشسانی بتن در اثر تغییر مقاومت فشاری بتن و همچنین افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی باعث افزایش سختی ستون می‌شود. افزایش سختی باعث بالارفتن مقاومت سازه در برابر جابجایی اعمال شده می‌شود. از طرفی افزایش مقاومت فشاری بتن نیز مقاومت نهایی سازه را افزایش می‌دهد. برای مقایسه‌ی اثر تغییرات گفته شده در مقاومت نهایی ستون، مقدار نیروی قائم ستون در مدل‌های مختلف برای جابجایی ۱۱۲ میلی‌متر با یکدیگر مقایسه و در جدول (۶) آورده شده‌است. نمونه‌ی با ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی ۲ میلی‌متر و مقاومت فشاری بتن ۲۵ مگاپاسکال به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و ستون سوم جدول (۶) نسبت مقاومت هر کدام از مدل‌ها را نسبت به این مدل نشان می‌دهد.

جدول (۶). ظرفیت مدل‌ها

model	column capacity (KN)	column capacity / (t2-25) capacity
t2-25	23.524	1.00
t2-50	23.871	1.01
t2-70	25.028	1.06
t3-25	39.004	1.66
t3-50	39.469	1.68
t3-70	40.352	1.72
t4-25	52.965	2.25
t4-50	53.596	2.28
t4-70	55.014	2.34

به منظور مقایسه بهتر نتایج، مقدار ظرفیت هر نمونه نسبت به نمونه‌ی مبنا برای ضخامت‌های جداره و مقاومت‌های فشاری مختلف مطابق نمودار ستونی در شکل (۱۴) ارائه شده است.



شکل (۱۴). مقایسه ظرفیت هر نمونه نسبت به نمونه‌ی مبنا برای ضخامت‌ها و مقاومت‌های مختلف

۴-۴-۱- بررسی افزایش ظرفیت ستون در اثر افزایش ضخامت فولاد

همانطور که گفته شد، افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی باعث افزایش محصوریت و در نتیجه باعث افزایش ظرفیت سازه می‌شود. مطابق نسبت‌های ظرفیت ارائه شده در شکل ۱۴، افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی فولاد از ۲ میلی‌متر به ۳ میلی‌متر برای نمونه‌های با مقاومت فشاری ۲۵، ۵۰ و ۷۰ مگاپاسکال بتن به ترتیب ظرفیت ستون را ۶۶ درصد، ۶۵ درصد و ۶۶ درصد افزایش می‌دهد. همچنین مقادیر افزایش سختی با تغییر ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی از ۲ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر نیز به ترتیب برابر با ۱۲۵ درصد، ۱۲۷ درصد و ۱۲۸ درصد می‌باشد. مشخص است که افزایش ظرفیت برای ستون‌های با مقاومت فشاری بتن مختلف تقریباً یکسان است و با افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی ظرفیت ستون افزایش زیادی دارد.

۴-۴-۲- بررسی افزایش ظرفیت ستون در اثر افزایش مقاومت فشاری بتن

مطابق شکل (۱۴) برای نمونه‌های با ضخامت ۲ میلی‌متر جداره‌ی مقطع فولادی با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۵ مگاپاسکال به ۵۵ و ۷۰ مگاپاسکال ظرفیت ستون ۱ درصد و ۶ درصد افزایش خواهد یافت. برای نمونه‌های با ضخامت‌های جداره ۳ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر نیز با افزایش مقاومت فشاری از ۲۵ به ۵۵ و ۷۰ مگاپاسکال سختی سازه به ترتیب ۲ درصد و ۶ درصد و ۳ درصد و ۹ درصد می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر تغییر ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی و مقاومت فشاری بتن بر رفتار ستون‌های CFST مورد بررسی قرار گرفت. برای در نظر گرفتن اثر تغییر این پارامترها از ۹ مدل ستون CFST با سه ضخامت متفاوت جداره‌ی مقطع فولادی و سه مقاومت فشاری مختلف بتن استفاده شده است. تاثیر افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی و مقاومت بتن بر جذب انرژی سازه، سختی اولیه و ظرفیت ستون مورد بررسی قرار گرفت.

۵-۱- در ستون دارای جداره‌ی فولادی با ضخامت کم (۲ میلی‌متر) با افزایش مقاومت بتن از ۵۰ به ۷۰ مگاپاسکال افزایش جذب انرژی ستون از ۲ درصد به ۱ درصد کاهش می‌یابد زیرا بتن تردتر شده و جذب انرژی آن کاهش می‌یابد. در ستون‌های دارای جداره‌ی فولادی با ضخامت زیاد، کاهش جذب انرژی به دلیل افزایش مقاومت بتن از ۵۰ به ۷۰ مگاپاسکال از بین می‌رود. در واقع اثر محصوریت بتن افزایش یافته و ضعف بتن در مقاومت بالا را بهبود می‌بخشد. همچنین با افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی محصوریت بتن و درصد فولاد افزایش یافته در نتیجه قابلیت جذب انرژی سازه افزایش می‌یابد ولی تاثیر افزایش مقاومت بتن در جذب انرژی ناچیز است. در نتیجه برای بهبود ضعف بتن در مقاومت بالا نیاز است از مقاطع فولادی با ضخامت جداره‌ی مناسب استفاده شود. اما با توجه به تاثیر ناچیز مقاومت بتن در جذب انرژی استفاده از بتن با مقاومت فشاری معمولی اقتصادی‌تر می‌باشد.

۵-۲- ضریب کشسانی بتن با جذر مقاومت فشاری آن رابطه‌ی مستقیم دارد، لذا افزایش مقاومت فشاری افزایش ضریب کشسانی را نیز به همراه دارد. در نتیجه افزایش مقاومت فشاری بتن با زیاد کردن ضریب کشسانی بتن باعث افزایش سختی سازه می‌شود. از طرفی تغییر ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی نیز باعث افزایش ممان اینرسی بخش فولادی ستون و به تبع آن افزایش ممان اینرسی کل ستون خواهد شد. با توجه به نتایج تحلیل، میزان افزایش سختی با افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی برای ستون‌های با مقاومت فشاری کم بتن (۲۵ مگاپاسکال) نسبت به ستون‌های با مقاومت فشاری بیشتر قابل توجه‌تر است. در نتیجه با افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی تاثیر افزایش مقاومت در افزایش سختی ستون کم می‌شود.

۵-۳- افزایش ضریب کشسانی بتن در اثر افزایش مقاومت فشاری آن و همچنین افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی باعث افزایش سختی ستون می‌شود. افزایش سختی باعث بالارفتن مقاومت سازه در برابر جابجایی اعمال شده می‌شود. از طرفی افزایش مقاومت بتن نیز مقاومت نهایی سازه را افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج، افزایش

ظرفیت برای ستون‌های با مقاومت فشاری بتن مختلف تقریباً یکسان است و با افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی ظرفیت ستون افزایش زیادی دارد.

با توجه به بندهای ۵-۱ الی ۵-۳، تاثیر افزایش ضخامت جداره‌ی مقطع فولادی در عملکرد ستون‌های CFST نسبت به افزایش مقاومت بتن قابل توجه می‌باشد. افزایش مقاومت بتن تاثیر ناچیزی در عملکرد سازه داشته و در ستون‌های دارای جداره‌ی فولاد با ضخامت کم اثر نامطلوبی دارد و باعث کاهش جذب انرژی می‌شود. در نتیجه برای بهبود عملکرد سازه‌های دارای ستون‌های CFST از لحاظ جذب انرژی، سختی و ظرفیت مطلوب است از مقاطع فولادی با ضخامت جداره‌ی مناسب و بتن با مقاومت فشاری معمولی استفاده شود.

مراجع

- [1] P.Prasanna Kumari, Dr. B.R. Niranjan, "Concrete Filled Steel Tubular Columns", *International journal for research in emerging science and technology*, Volume-3, Issue-5, pp. 80-83, 2016.
- [2] Lin-Hai Han, WeiLi, Reidar Bjorhovde, "Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular(CFST) structures: Members", *Journal of Constructional Steel Research*, Volume-100, pp. 211-228, 2014.
- [3] Oshea and Bridge, "Local buckling of thin-walled circular steel sections with or without internal restraint", *Journal of Constructional Steel Research*, Volume-41, Issues 2-3, pp. 137-157, 1997.
- [4] Lin and Tsai, "Mechanical behaviour of doubleskinned composite steel tubular columns", *National Centre for Research on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan*, 2000.
- [5] Huang CS, "Axial Load Behavior of Stiffened Concrete-Filled Steel Columns", *Journal of Structural Engineering*, Volume-128, Issue-9, pp.1222-1230, 2002.
- [6] Darshika K.Shah, M.D.Vakil, and M.N.Patel, "Parametric study of Concrete filled steel tube column", *Volume-2, Issue-2*, pp. 1678-1682, 2014.
- [7] علی‌علی نژاد و علیرضا خالو، "مروری بر عملکرد ستون‌های بتنی محصورشده با لوله‌های کامپوزیتی تحت بارمحوری فشاری"، پنجمین کنفرانس ملی بتن خودتراکم ایران و اولین کنفرانس ملی تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۶.
- [8] Hajjar JF, Tort C, "Mixed finite-element modeling of rectangular concrete-filled steel tube members and frames under static and dynamic loads". *Journal of Structural Engineering ASCE*, Volume-136, Issue-6, pp.654-64, 2010.
- [9] Denavit MD, Hajjar JF, "Nonlinear seismic analysis of circular concrete-filled steel tube members and frames", *Journal of Structural Engineering ASCE*, Volume-138, Issue-9, pp.1089-98, 2012.
- [10] You-Fu Yang, Chao Hou, and Min Liu, "Experimental Study and Numerical Analysis of CFSST Columns Subjected to Lateral Cyclic Loading", *Journal of Structural Engineering*, Volume-144, Issue-12, 2018.
- [11] Dutta, A., S. Dhar, and S. K. Acharyya. "Material characterization of SS 316 in low-cycle fatigue loading", *Journal of Materials Science*, Volume-45, Issue-7, pp.1782-1789, 2010.
- [12] Nip, K. H., L. Gardner, C. M. Davies, and A. Y. Elghazouli, "Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel", *Journal of Construction Steel Research*, Volume-66, Issue-1, pp.96-110, 2010.
- [13] Goto, Y., G. P. Kumar, and N. Kawanishi. "Nonlinear finite-element analysis for hysteretic behavior of thin-walled circular steel columns with in-filled concrete", *Journal of Structural Engineering*, Volume-136, Issue-11, pp.1413-1422, 2010.
- [14] Birtel, V., and P. Mark., "Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure", In *Proc. 19th Annual Int., ABAQUS Users' Conf.*, pp.95-108, 2006.

Numerical Analysis of CFST Columns Subjected to Lateral Cyclic Loading and Influence of Concrete Compression Strength and Steel Plate Thickness

Alireza khaloo

khaloo@sharif.edu

Distinguished Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

*Nahid khodabakhshi**

Nahidkhodabakhshi@yahoo.com

M.Sc student of Structural Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Concrete is widely used in civil engineering because of its high compressive strength and efficiency. Low resistance of concrete against tensile stresses, especially in low confinement systems necessitates the use of steel-concrete composite systems. In concrete-filled steel tubes, the confinement of concrete is supplied by steel and the local buckling of steel is improved by concrete core. In this paper, using the Abaqus software finite element method, the numerical results of the CFST column are compared with the experimental results and have been assured of the correctness of the modeling. Then, the effect of changing the thickness of the steel and the compressive strength of the concrete on the behavior of CFST columns is investigated. To consider the effect of changing these parameters, 9 CFST column models with three different steel thicknesses and three different compressive strengths of concrete have been used. Nonlinear behavior of steel using a mixed hardening model incorporating both isotropic and kinematic hardening was used in modeling. Concrete's stress-strain relations and compression-tensile damage parameters are fully described. The effect of increasing thickness of steel and concrete strength on structural energy absorption, initial stiffness and column capacity were investigated. According to the results of the analysis, the effect of increasing the thickness of steel on the performance of CFST columns relative to the increase in concrete strength is significant. Investigating the energy absorption capacity and the resistance of the CFST columns shows that the effect of changing the compressive strength of concrete for confinement steel with less thickness is significant. In confinement steel with high thickness, the change in concrete compressive strength does not have a significant effect on energy absorption and increases the column's strength slightly. As a result, to improve the performance of structures with CFST columns, in terms of energy absorption, stiffness and capacity, it is desirable to use suitable thickness for steel and normal strength for concrete.

Keywords: Concrete-Filled Steel tube CFST, Finite Element Analysis, Composite Columns, Mixed Hardening, Damage Parameters.