

بررسی تأثیر نسبت توخالی و سخت‌کننده بر رفتار ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن (CFDST)

امین قلی‌زاد^۱، بابک شیر^{۲*}، معصومه سادات مکی‌آبادی^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

۳- کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ تهران

چکیده

ستون‌های دو جداره فولادی لوله‌ای پر شده با بتن در سازه‌هایی مانند پل‌ها، ساختمان‌های بلند مرتبه و دکل‌های انتقال برق مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مقاله حاضر، با استفاده از نرم‌افزار عناصر محدود ABAQUS رفتار این نوع ستون‌ها با مقطع دایره و مربع در جداره داخلی و خارجی، با تغییر نسبت توخالی و همچنین با تغییر ارتفاع و ضخامت سخت‌کننده و تأثیر آنها بر شکل‌پذیری، ظرفیت باربری و تغییر شکل پلاستیک تحت بار محوری فشاری جزئی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی نشان داد، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن، تحت فشار محوری، با افزایش ضخامت سخت‌کننده و کاهش نسبت توخالی افزایش می‌یابند. افزایش تعداد و ارتفاع سخت‌کننده‌ها، به علت افزایش اثر محصورکنندگی حلقوی و درگیری بیشتر با بتن، باعث افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری و سختی ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن می‌شوند. همچنین هر چه سخت‌کننده ضخیم‌تر، دارای ارتفاع بزرگتر و تعداد سخت‌کننده بیشتری بوده و نسبت توخالی کوچکتر باشد، محدوده تغییر شکل پلاستیک جداره‌های فولادی و نقطه ماکزیمم تغییر شکل پلاستیک بزرگتر می‌شود. مشاهده شد استفاده از سخت‌کننده در این نوع ستون‌ها، باعث به تأخیر افتادن کماتش محلی می‌شود.

کلمات کلیدی: ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن (CFDST)، نسبت توخالی، سخت‌کننده، تحلیل عناصر محدود

Hollow Ratio and Stiffeners Effects Concrete Filled Double Steel Tubes Behaviour

Amin Gholizad¹, Babak Shiri^{2*}, Masoumeh Sadat Makkiabadi³

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

2- MSc Student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

3- MSc in Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, University of Science and Culture Tehran

Abstract

Concrete Filled Double Steel Tubes are mostly used in bridge piers, tall buildings, offshore and coastal structures and power transmission towers. Finite element analyses via ABAQUS software have been performed aiming to evaluate the strength, ductility and plastic deformation of CFDST columns with different hollow ration and stiffeners configurations. According to analyses results more strength and high ductility levels can be provided decreasing the composite section hollow and increasing stiffeners thickness. More stiffener plates with larger dimensions result in more strength and stiffness in composite columns due to increase in concrete

* مؤلف مسئول: بابک شیري babakshiri91@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۵/۲۷، تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۸/۲۰

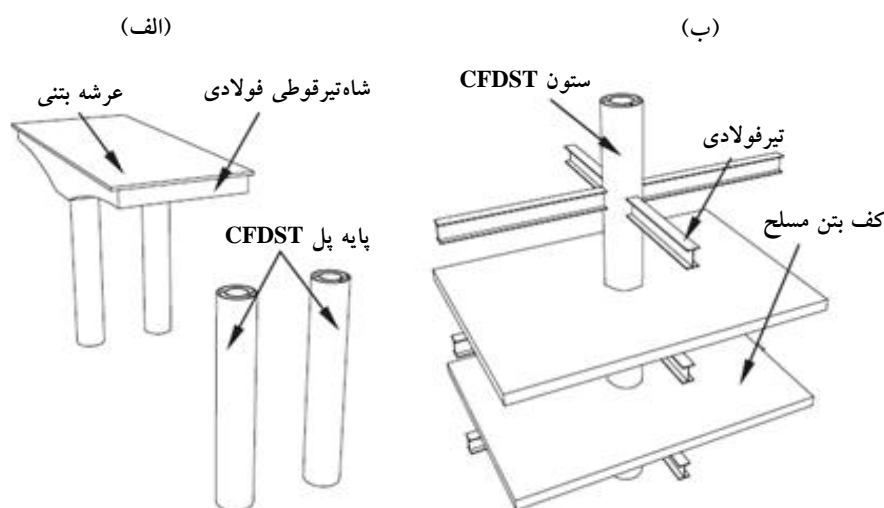
confinement and adjoint interaction of steel and concrete. It also raises plastic deformation level of the columns and postpone the local buckling.

Keywords: Concrete filled double steel tubes, Hollow ratio, Stiffener, Finite element analysis

۱- مقدمه

ستون دو جداره فولادی پر شده با بتن (CFDST)، از دو لوله فولادی که به صورت هم مرکز مونتاژ شده و بین دو لوله با بتن پر می‌گردد، تشکیل یافته است. این نوع از ستون‌ها داری مزایایی از قبیل عدم نیاز به قالب‌بندی برای بتن‌ریزی، حمل و مونتاژ سریع و حفاظت سطح بتن از آسیب می‌باشند. ستون‌های CFDST یکی از موثرترین شکل‌های سازه‌های ستون‌ها هستند که در آن جداره‌های فولادی، دو ویژگی مقاومت محوری و فشار محصورکنندگی به منظور افزایش مقاومت و شکل‌پذیری بتن پر شده داخلی را فراهم می‌کنند. در مقایسه با محصورکنندگی ستون‌های بتنی مسلح، ستون‌های CFDST فشار محبوس قوی‌تر و یکنواخت بیشتری توسط جداره‌های فولادی، به بتن پر شده داخلی فراهم می‌کنند، که باعث کاهش مشکل تراکم فولاد و افزایش کیفیت بتن‌ریزی می‌شود [۱].

اخیراً مطالعات عددی و آزمایشگاهی بر روی رفتار ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن توسط محققین انجام شده که از آن جمله می‌توان به مطالعات تائو و همکاران [۲]، هوانگ و همکاران [۳]، لی و همکاران [۴] اشاره نمود. نتایج بررسی نشان داده است که لوله فولاد داخلی مقاطع CFDST می‌تواند قبل از رسیدن به مقاومت نهایی خود، از بتن پر شده محافظت کند. برای نسبت قطر لوله به ضخامت مقطع عرضی، می‌توان محدودیت مقطع فولادی پر شده با بتن را به لوله بیرونی اعمال کرد، در حالی که این نوع مقاطع شامل لوله فولاد توخالی می‌باشند. بررسی‌ها نشان داده‌اند که اعضای CFDST رفتاری مشابه جداره‌های فولادی پر شده با بتن (CFST) دارند. همچنین با توجه به اینکه در ستون‌های CFDST، لوله داخلی توسط بتن محبوس و در برابر آتش محافظت شده است، بنابراین از مقاومت مناسبی در برابر آتش برخوردار هستند [۵]. نمایش شماتیک از کاربرد ستون‌های CFDST در پل‌ها و ساختمان‌های با ارتفاع بلند به ترتیب در شکل (الف) و (ب) نشان داده شده است.



شکل ۱: ستون‌های CFDST استفاده شده در پل‌ها و ساختمان‌ها: (الف) پایه‌های پل، (ب) ستون در ساختمان‌های بلند

در عمل ستون‌های CFDST که به عنوان پایه‌های پل با دهانه‌های بزرگ، پایه در سازه‌های دریایی، ستون در سازه‌های بلند مرتبه و یا هر نوع سازه دیگری مورد استفاده قرار می‌گیرند، ممکن است با نسبت توخالی متفاوت و یا ظرفیت باربری و شکل‌پذیری بالا بدون افزایش

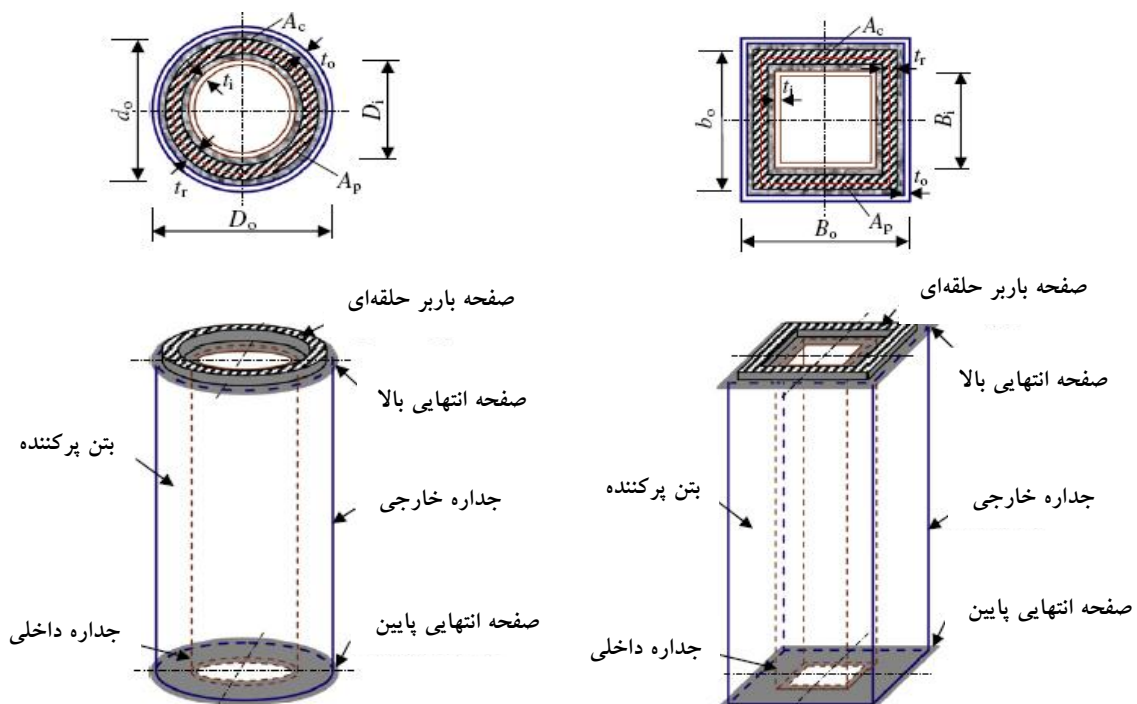
ابعاد مقطع موردنیاز باشند، با توجه به این موارد به نظر می‌رسد که بررسی رفتار این نوع از ستون‌ها تحت تأثیر نسبت توخالی و افزودن سخت‌کننده ضروری می‌باشد.

در مقاله حاضر بررسی عددی انجام شده بر روی ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن (CFDST) تحت تأثیر نسبت توخالی و سخت‌کننده با بارگذاری محوری جزئی و نسبت سطح فشار یکسان ارائه شده است. هدف از بررسی حاضر سه مورد می‌باشد: اول، بررسی عددی رفتار ستون‌های CFDST با بارگذاری فشار محوری جزئی، دوم، مقایسه رفتار بین ستون‌های CFDST با مقاطع دایره و مربع، و سرانجام، تأثیر تغییر نسبت توخالی و سخت‌کننده بر ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و سختی ستون‌های CFDST.

۲- مدل تحلیلی عناصر محدود

شکی نیست که مطالعات آزمایشگاهی می‌تواند اطلاعات کاملی در مورد رفتار سازه‌ای ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن ارائه دهد. با این وجود، اکثراً انجام آزمایش بر روی نمونه‌های CFDST از نظر اقتصادی پرهزینه و زمان‌بر بوده و به دلیل کمبود امکانات آزمایشگاهی عملی نیست. خوشبختانه، روش عناصر محدود به سرعت توسعه یافته و ابزار تحلیلی قدرتمندی برای محققان مهندسی فراهم کرده است.

در مقاله حاضر از مدل‌سازی عناصر محدود سه بعدی غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار عناصر محدود ABAQUS نسخه ۱۲ [۶] برای شبیه‌سازی ستون‌های CFDST بهره گرفته شده است. ستون‌های آزمایش شده توسط هان و همکاران [۷] برای مدل‌سازی عناصر محدود انتخاب شده در شکل ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۲: مدل تحلیلی عناصر محدود با CFDST با مقطع مربع و دایره [۷]

شکل ۲:
ستون‌های

مشخصات نمونه‌های مورد استفاده توخالی با مقطع دایره در جداره داخلی و خارجی (CHS) و مربع در جداره داخلی و خارجی (SHS) در جدول ۱ داده شده است که در آن:

t_o , $D_o(B_o)$ به ترتیب قطر (عرض) و ضخامت جداره فولادی خارجی، t_i , $D_i(B_i)$ به ترتیب قطر (عرض) و ضخامت جداره فولادی داخلی، t_r , $d_o(b_o)$ به ترتیب قطر (عرض) خارجی و ضخامت جداره حلقه برابر بوده و ارتفاع آن ۸۰ میلی‌متر می‌باشد. χ نسبت توخالی در ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن بوده و β نسبت سطح فشار جزئی در این نوع مقاطع می‌باشد. همچنین ضخامت صفحه انتهایی بالا و پایین ستون به ترتیب، ۴ و ۱۲ میلی‌متر بوده و طول مقاطع ۱۳۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: مشخصات نمونه‌های CFDST با مقاطع مربع و دایره و نسبت توخالی ۰/۲۵

نمونه	$D_o(B_o)$ (mm)	t_o (mm)	$D_i(B_i)$ (mm)	t_i (mm)	$d_o(b_o)$ (mm)	t_r (mm)	χ	β
CHS25	۴۶۰	۵/۷۲	۱۱۲	۳/۷۵	۳۲۲	۴۲	۰/۲۵	۴
SHS25	۴۶۰	۵/۷۲	۱۱۲	۳/۷۵	۳۲۲	۴۲	۰/۲۵	۴

برای ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن (CFDST)، نسبت توخالی (χ) برابر است با:

$$\chi = \begin{cases} D_i / (D_o - 2t_o) \\ B_i / (B_o - 2t_o) \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{(مقاطع توخالی دایره)} \\ \text{(مقاطع توخالی مربع)} \end{matrix} \quad (1)$$

همچنین برای ستون‌های CFDST بارگذاری شده فشار محوری، نسبت سطح فشار محوری (β) به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود [۷]:

$$\beta = \frac{A_c}{A_p} \quad (2)$$

که در آن، A_c سطح مقطع عرضی بتن و A_p سطح بارگذاری در بار فشار محوری می‌باشند. به منظور صحت شبیه‌سازی رفتار واقعی ستون‌ها، پارامترهایی همچون نوع عناصر محدود، مش، اندرکنش بتن-فولاد، شرایط مرزی و اعمال بار مورد نظر، در شبیه‌سازی ستون قابل توجه هستند. در همین حال، مدل‌های سازه‌ای جداره فولاد، سخت‌کننده‌ها و بتن مهم هستند که به طور مناسب در مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند.

۱-۲- نوع المان محدود، اندرکنش بتن-فولاد، شرایط مرزی و اعمال بار

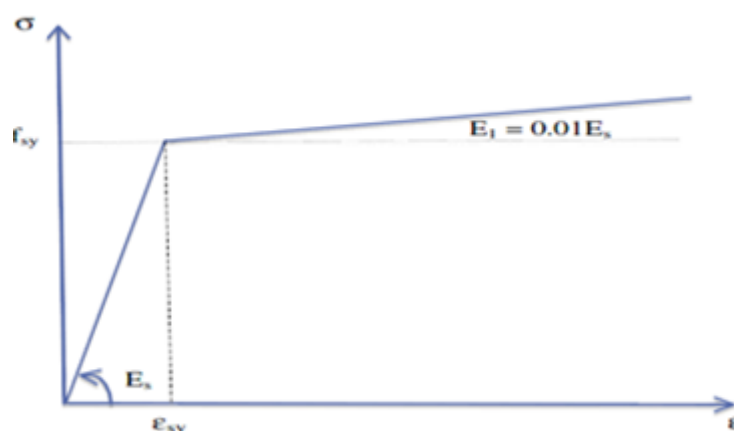
کتابخانه المان نرم‌افزار عناصر محدود ABAQUS جهت انتخاب نوع المان‌های جداره فولاد و هسته بتن ستون CFDST، در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. برای مدل‌سازی هسته بتنی و صفحات فولادی انتهایی بالا و پایین در نرم‌افزار، از المان Continuum یا Solid شش وجهی هشت گرهی، دارای سه درجه آزادی انتقالی در هر گره با روش انتگرال‌گیری کامل خطی که در نرم‌افزار ABAQUS با C3D8 نشان داده می‌شود، استفاده شد. همچنین برای مدل‌سازی جداره‌های فولادی و سخت‌کننده‌ها از المان Conventional Shell چهار گرهی خطی با انتگرال‌گیری کامل (S4)، که دارای شش درجه آزادی انتقالی و دورانی در هر گره می‌باشد، بهره گرفته شده است [۶]. برای مدل کردن تماس بین هسته بتنی و پوسته فولادی از المان سطح به سطح CONTACT برای تماس سطوح و المان Tie برای مدل‌سازی اتصال سخت‌کننده‌ها به جداره بیرونی در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. وقتی دو سطح در تماس با یکدیگر قرار گیرند، تنش اصطکاکی در جهت مماسی، در سطح تماس اتفاق می‌افتد، که این رفتار اصطکاکی توسط مدل اصطکاکی کلمب تعیین می‌گردد. سطوح در تماس قادر به تحمل تنش برشی حاصل تا تنش برشی بحرانی قبل از لغزش می‌باشد. تنش برشی بحرانی (τ_{crit}) توسط رابطه (۳) بیان می‌گردد [۸]:

$$\tau_{crit} = \mu P \quad (3)$$

که در آن، P فشار تماسی و μ ضریب اصطکاک کلمب بین فولاد و بتن بوده و طبق توصیه لام و همکاران [۹]، برابر $0/3$ در نظر گرفته شد. مقاطع مورد بررسی تحت بار محوری واقع بر مرکز ستون قرار گرفته و با رسیدن به 70 درصد بار بیشینه، باربرداری انجام شده است. شرایط مرزی به صورت یک سرگیردار و انتهای دیگر مفصلی مدل‌سازی شده است که انطباق قابل قبولی با شرایط واقعی دارند. به منظور بررسی رفتار واقعی ستون‌های CFDST پس از ترک‌خوردگی، شکست بتن و نیز کماتش جداره که با تغییر شکل‌ها و کرنش‌های بزرگ همراه می‌باشند، انجام تحلیل‌های غیرخطی که شامل غیرخطی‌های هندسی و مصالح هستند، یک امر اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بنابراین از تحلیل استاتیکی غیرخطی با روش کنترل تغییر مکان جهت بررسی مقاطع استفاده شده است.

۲-۲- مدل‌های سازه‌ای

مصالح مورد استفاده در تحلیل عددی از دو قسمت فولاد و بتن تشکیل شده است. مدل‌های سازنده مصالح، نقش مهمی در رفتار ستون ایفاء می‌کنند. بنابراین، جهت تعیین رفتار مصالح فولادی در بارگذاری محوری از حالت غیرخطی سینماتیک، که اثر بوشینگر را لحاظ می‌کند [۱۰]، در مقاله حاضر استفاده شده است. نمودار تنش-کرنش این نوع مدل رفتاری در شکل ۳ مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه، این مدل رفتاری فولاد، جواب قابل قبولی در تحلیل‌ها می‌دهد، در تحقیقات مختلف استفاده می‌شود. مشخصات مصالح صفحه انتهایی بالا و پایین مطابق مشخصات جداره فولاد داخلی در نظر گرفته شده است. همچنین مشخصات مصالح سخت‌کننده با توجه به محل قرارگیری در قسمت درونی جداره خارجی، مشابه جداره فولادی خارجی در نرم‌افزار وارد شده است. مشخصات مصالح مصرفی فولادی در جدول ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۳: منحنی تنش-کرنش تک محوره فولاد برای بارگذاری محوری [۱۰]

جدول ۲: مشخصات مصالح فولادی

نام قطعه	تنش تسلیم (Mpa)	تنش نهایی (Mpa)	مدول الاستیسیته (N/mm^2)	نسبت پواسون
جداره خارجی	۳۲۸/۳	۴۶۷/۶	$1/98 \times 10^6$	۲/۲۸
جداره داخلی	۳۲۱/۸	۴۵۳/۵	$1/9 \times 10^6$	۰/۲۸۵
سخت کننده	۳۲۸/۳	۴۶۷/۶	$1/98 \times 10^6$	۰/۲۸
صفحه انتهایی	۳۲۱/۸	۴۵۳/۵	$1/9 \times 10^6$	۰/۲۸۵

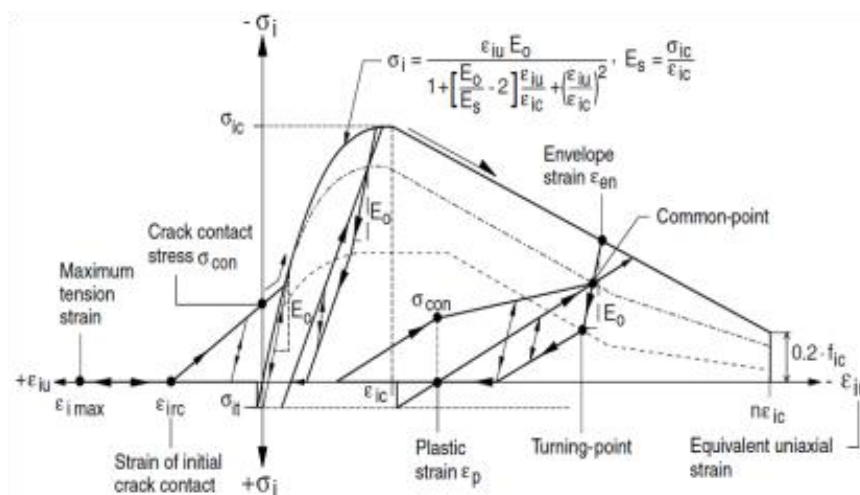
هنگامی که لوله فولادی تحت تش چند محوره قرار می‌گیرد، معیار تسلیم فون مایزس (F) به صورت رابطه (۴) بیان می‌گردد [۱۱]:

$$F = \sqrt{3}f_y = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = f_y \quad (4)$$

که در آن، $f_y/2$ تنش نامتغیر ثانویه تانصور تنش انحرافی، σ_1 ، σ_2 و σ_3 تنش‌های اصلی و f_y تنش تسلیم لوله فولادی است. معیار تسلیم فون مایزس F برای تعریف محدوده الاستیک به کار گرفته می‌شود.

جهت تعیین مشخصات بتن، سه نوع مدل رفتاری بتن ترک‌دار، مدل رفتاری ترک‌خوردگی ترد بتن و مدل رفتاری آسیب دیده خمیری در کتابخانه مصالح از پیش تعریف شده نرم‌افزار ABAQUS، برای بتن ارائه شده است [۶]. در این نرم‌افزار برای محل‌هایی که بتن تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار دارد، مدل رفتاری بتن آسیب دیده خمیری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر از این خصوصیت رفتاری برای مصالح بتن استفاده شده است. این مدل قابلیت استفاده در محاسبات استاتیکی و دینامیکی و همچنین استفاده از ویسکوالاستیسیته در معادلات اساسی برای رسیدن به همگرایی بهتر در بخش نرم‌شوندگی را داراست.

برای هر دو مقطع دایره و مربع، از بتن با مشخصات ۵۰ مگاپاسکال، ۳۰۲۲ نیوتن بر میلی‌متر مربع و ۰/۲ به ترتیب، برای مقاومت فشاری استوانه‌ای، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون بتن استفاده شده است، همچنین برای اعمال پارامترهای فشاری و کششی بتن از منحنی تنش-کرنش مقاله کرتزیگ و همکاران [۱۲] استفاده گردید. منحنی تنش-کرنش بتن در حالت فشاری در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

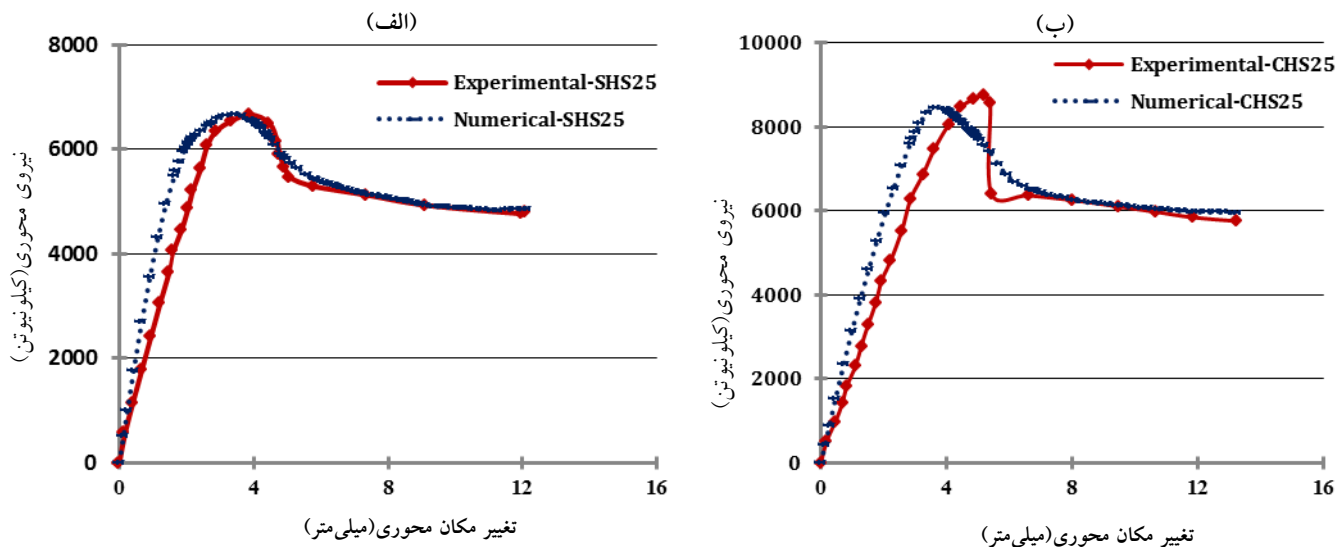


شکل ۴: منحنی تنش-کرنش بتن در حالت فشاری [۱۲]

۳- صحت‌سنجی مدل‌سازی

به منظور بررسی صحت مدل‌های ارائه شده، ابتدا نتایج حاصل از تحلیل ستون دو جداره فولادی پر شده با بتن، تحت بارمحوری فشاری جزئی، با نتایج آزمایشگاهی مدل‌های مشابه که توسط هان و همکاران [۷] انجام شده، مقایسه شده است. در شکل ۵ نمودار نیروی محوری-تغییر مکان محوری به دست آمده از نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیل مدل‌سازی عددی ستون‌های SHS25 (مقطع مربع در جداره داخلی و بیرونی با ۰/۲۵ توخالی) و CHS25 (مقطع دایره در جداره داخلی و بیرونی با ۰/۲۵ توخالی) نشان داده شده است. با توجه اختلاف ۰/۷ درصد و ۳/۳ درصد ظرفیت بار نهایی عناصر محدود و آزمایشگاهی به ترتیب برای نمونه‌های SHS25 و CHS25، همچنین مقایسه رفتار نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی، ملاحظه می‌گردد مدل عددی از دقت خوبی برخوردار می‌باشد و به عنوان یک

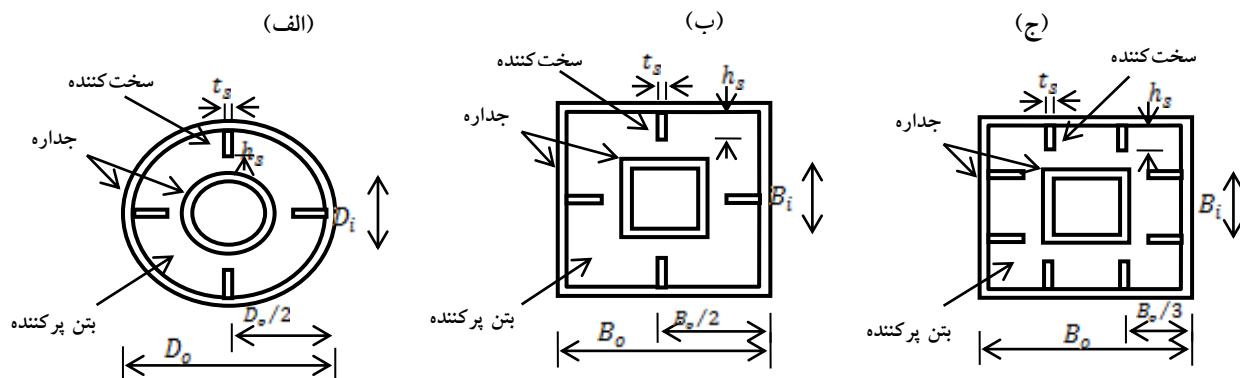
نتیجه، مدل المان محدود سه بعدی پیشنهادی با دقت قابل قبولی می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵: نمودار نیروی محوری- تغییر مکان محوری نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی CFDST با نسبت توخالی: الف) مقطع مربع، ب) مقطع دایره

۴- تحلیل پارامتری

با توجه به اینکه دقت مدل المان محدود غیرخطی سه بعدی با نسبت توخالی ۰/۲۵ برای مطالعه حاضر نشان داده شد، بنابراین برای تحلیل ستون دو جداره فولادی پر شده با بتن برای مقاطع دایره و مربع در قسمت داخلی و بیرونی، با نسبت‌های توخالی ۰/۵۰ و ۰/۷۵ و همچنین برای ستون با نسبت توخالی ۰/۲۵ با افزودن سخت‌کننده برای مقاطع فوق از مدل پیشنهادی استفاده گردید. در شکل ۶ جزئیات ستون‌های CFDST با افزودن سخت‌کننده نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۶ دیده می‌شود، دو نوع ترکیب سخت‌کننده با تعداد مختلف (۴، ۸) برای مقاطع دایره و مربع مدل شده است. ضخامت‌های مختلف سخت‌کننده (۵، ۱۰، ۱۲ میلی‌متر) در نظر گرفته شده به ارتفاع، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر و به اندازه طول ستون تحت بار فشاری محوری جزئی مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات نمونه‌ها در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۶: جزئیات ستون‌های CFDST با افزودن سخت‌کننده: الف) مقطع دایره با سخت‌کننده، ب) مقطع مربع با یک سخت‌کننده در هر وجه،

ج) مقطع مربع با دو سخت‌کننده در هر وجه

جدول ۳: مشخصات نمونه‌های CFDST با مقاطع دایره و مربع جهت تحلیل پارامتری

نمونه	$D_o(B_o) \times t_o$ (mm)	$D_i(B_i) \times t_i$ (mm)	d_o (mm)	t_r (mm)	χ	h_g (mm)	t_g (mm)
CHS50	۶۶۰×۵/۷۲	۲۲۴×۳/۷۵	۳۶۴	۲۸	۰/۵۰	-	-
SHS50	۶۶۰×۵/۷۲	۲۲۴×۳/۷۵	۳۶۴	۲۸	۰/۵۰	-	-
CHS75	۶۶۰×۵/۷۲	۳۳۶×۳/۷۵	۳۶۴	۱۴	۰/۷۵	-	-
SHS75	۶۶۰×۵/۷۲	۳۳۶×۳/۷۵	۳۶۴	۱۴	۰/۷۵	-	-
C1-PL(50x5)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۲۰	۵
C2-PL(100x5)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۱۰۰	۵
C3-PL(100x10)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۱۰۰	۱۰
C4-PL(100x12)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۱۰۰	۱۲
C5-PL(150x5)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۱۵۰	۵
S1-PL(50x5)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۵۰	۵
S2-PL(100x5)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۱۰۰	۵
S3-PL(100x10)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۱۰۰	۱۰
S4-PL(100x12)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۱۰۰	۱۲
S5-PL(150x5)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۱۵۰	۵
S6-PL(150x10)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۱۵۰	۱۰
S7-PL(150x12)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۱۵۰	۱۲
*S8-2PL(150x5)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۱۵۰	۵
*S9-2PL(150x10)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۱۵۰	۱۰
*S10-2PL(150x12)	۶۶۰×۵/۷۲	۱۱۲×۳/۷۵	۳۶۴	۴۲	۰/۲۵	۱۵۰	۱۲

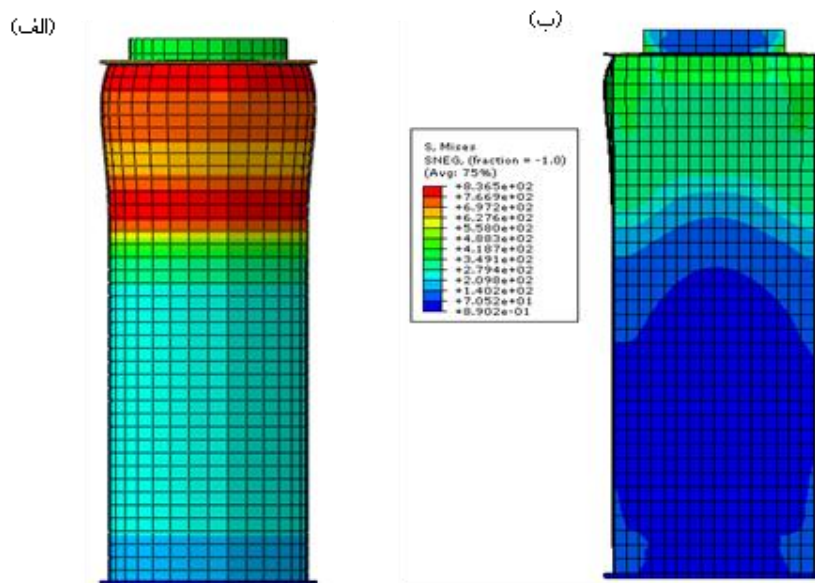
* دو سخت‌کننده در هر وجه مقطع مربع قرار گرفته است.

۵- تفسیر نتایج

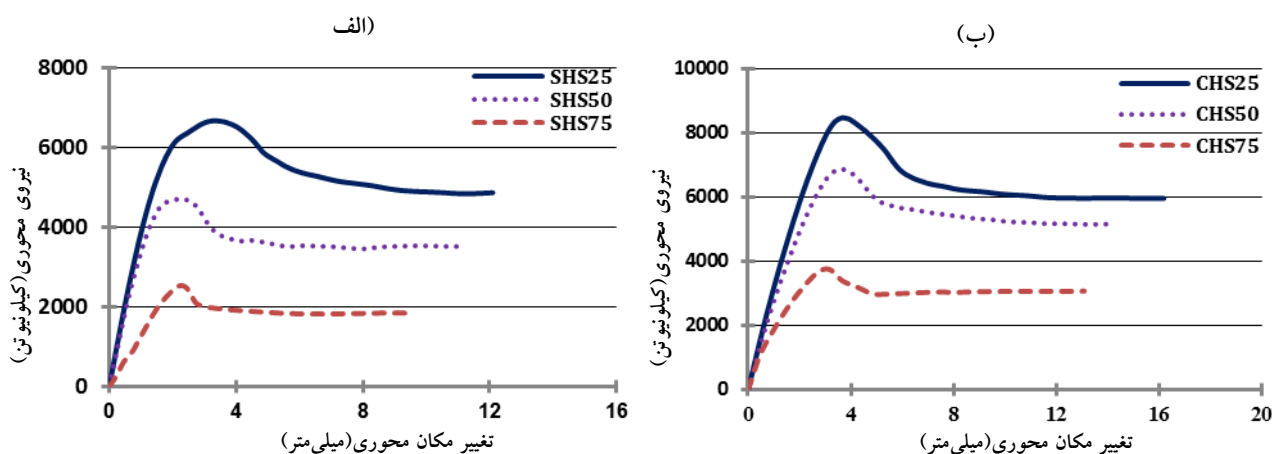
از شکل ۷ مشاهده می‌شود که در ستون‌های CFDST بارگذاری شده محوری جزئی، صفحه انتهایی بالا به علت خرد شدن بتن زیر صفحه، به حلقه U شکل تغییر شکل می‌دهد. همچنین در قسمت نزدیک صفحه انتهایی بالا، به علت اثر فشار موضعی بتن خرد شده بین جداره‌های فولادی، تغییر شکل پلاستیک خارجی و داخلی به ترتیب در جداره‌های فولادی خارجی و داخلی اتفاق می‌افتد.

۵-۱- تأثیر نسبت توخالی بر شکل‌پذیری و ظرفیت باربری ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن

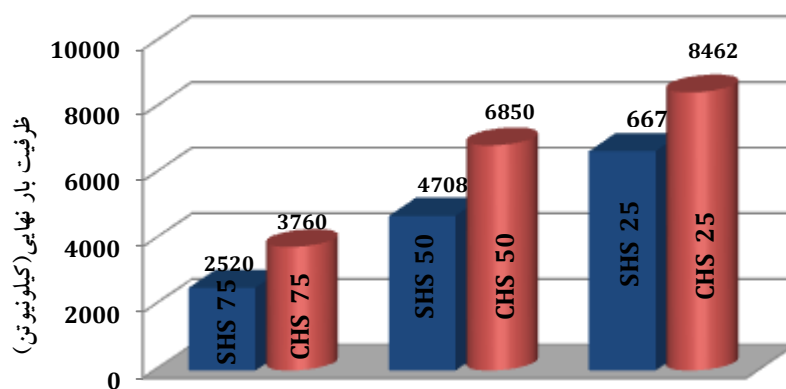
شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهند که برای ستون‌های CFDST، شیب اولیه منحنی نیروی محوری-تغییر مکان محوری و ظرفیت تحمل بارگذاری فشاری محوری با افزایش نسبت توخالی (χ) کاهش می‌یابد. همچنین، هرچه نسبت توخالی بزرگتر باشد، محدوده تغییر شکل پلاستیک جداره‌های فولادی کوچکتر و نقطه ماکزیمم تغییر شکل پلاستیک بزرگتر می‌شود.



شکل ۷: تغییر شکل یافته ستون‌های CFDST مدل‌سازی شده تحت فشار محوری جزئی: الف) مقطع دایره، ب) مقطع مربع



شکل ۸: نمودار نیروی محوری- تغییر مکان محوری ستون‌های CFDST با نسبت‌های توخالی ۰/۰۵۰/۲۵ و ۰/۷۵: الف) مقطع مربع، ب) مقطع دایره



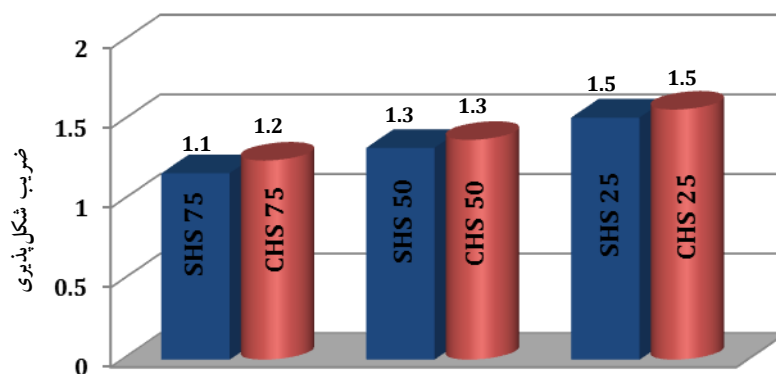
شکل ۹: مقایسه ظرفیت باربری نهایی مقاطع مربع و دایره شکل ستون‌های CFDST با نسبت‌های توخالی ۰/۰۵۰/۲۵ و ۰/۷۵

به منظور بررسی شکل پذیری ستون‌های CFDST، ضریب شکل پذیری (DI) این نوع ستون‌ها تحت فشار محوری با استفاده از رابطه ۵ تعریف می‌شود:

$$DI = \frac{\Delta_{85\%}}{\Delta_{UE}} \quad (5)$$

که در آن، Δ_{UE} تغییر شکل محوری مربوط به ظرفیت باربری و $\Delta_{85\%}$ تغییر شکل محوری وقتی که بار محوری تا ۸۵ درصد از ظرفیت باربری افت می‌کند.

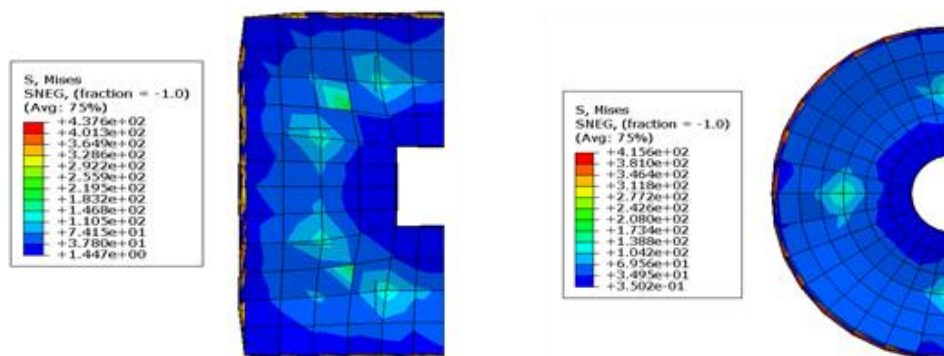
با توجه به محصورشدگی بهتر بتن توسط جداره‌های فولادی دایره‌ای نسبت به جداره‌های فولادی مربعی، از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که نمونه‌های به شکل دایره در جداره خارجی و داخلی (CHS 75, CHS 50, CHS 25) ضریب شکل پذیری (DI) بزرگتری در مقایسه با نمونه‌های به شکل مربع در جداره خارجی و داخلی (SHS 75, SHS 50, SHS 25) دارند. با توجه به این‌که نمونه با نسبت توخالی بزرگتر (λ)، سطح کوچکتری از بتن دارد، می‌توان دریافت که نسبت توخالی بزرگتر در ستون‌های CFDST، منجر به DI کوچکتری می‌شود. در چنین وضعیتی، با توجه به خرد شدن بتن زیر صفحه باربری، بار وارد شده روی مقطع بلافاصله در مرحله نزولی منحنی نیروی محوری- تغییر مکان محوری کاهش می‌یابد و اثر محصورشدگی توسط جداره‌های فولادی نمی‌تواند به طور کامل ایجاد شود.



شکل ۱۰: مقایسه ضریب شکل پذیری مقاطع مربع و دایره شکل ستون‌های CFDST با نسبت‌های توخالی ۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۰/۷۵

۲-۵- بررسی تأثیر سخت‌کننده بر رفتار ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن (CFDST)

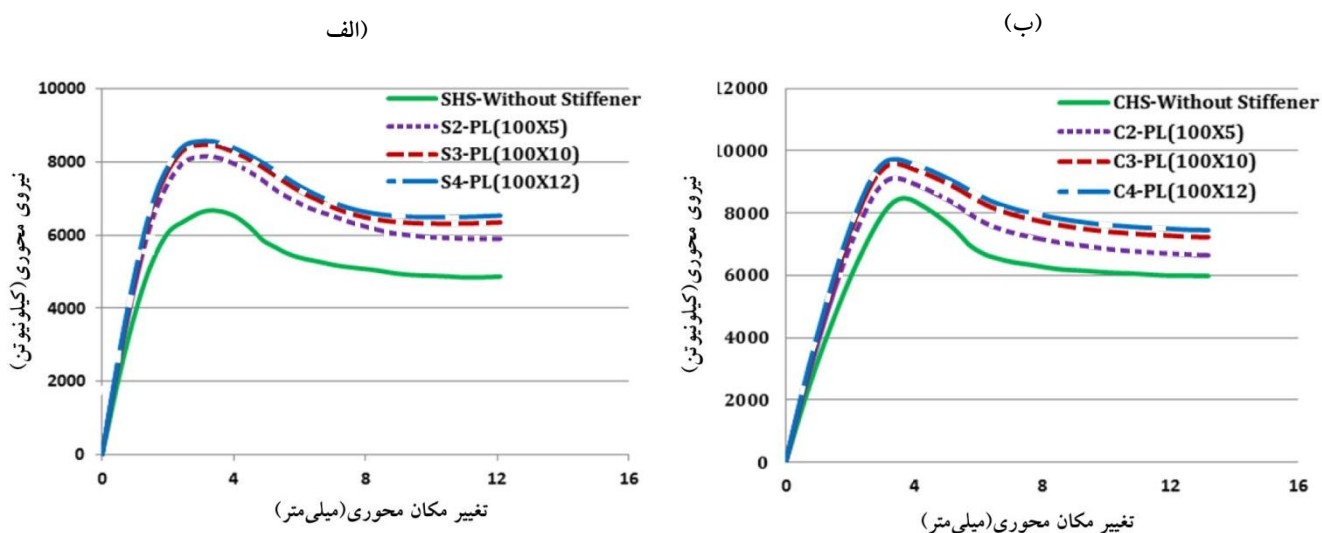
از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که برای ستون‌های CFDST بارگذاری شده محوری با افزودن سخت‌کننده، از کماتش زود هنگام جداره خارجی جلوگیری شده و تغییر شکل‌های ناشی از تغییر شکل پلاستیک جداره‌های فولادی خارجی و داخلی در اثر فشار موضعی بتن خرد شده بین جداره‌های فولادی، به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.



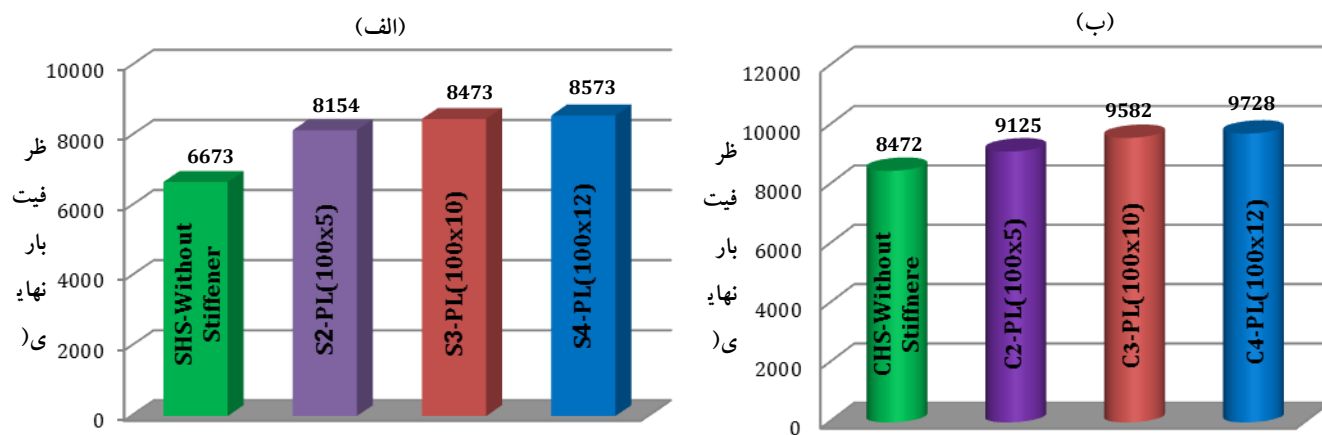
شکل ۱۱: تغییر شکل یافته نمونه‌های CFDST مربع و دایره شکل با افزودن سخت‌کننده

۱-۲-۵- تأثیر ضخامت سخت کننده بر ظرفیت باربری نهایی ستون‌های CFDST

سه ضخامت مختلف سخت کننده (۵، ۱۰ و ۱۲ میلی متر) برای بررسی اثر ضخامت سخت کننده بر شکل پذیری و ظرفیت باربری نهایی ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است که نشان می‌دهند شیب اولیه منحنی نیروی محوری - تغییر مکان محوری و ظرفیت تحمل بارگذاری فشاری محوری ستون‌های CFDST با افزایش ضخامت سخت کننده افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه سخت کننده ضخیم‌تر سختی کماتر بالتری تحت بارگذاری جانبی دارد، امکان توزیع یکنواخت بار بر روی نمونه و ساخت مقطع واقعی برای حمل بار بزرگتر را فراهم می‌آورد. به عنوان مثال، اگر برای مقطع مربع و دایره با تعداد ۴ سخت کننده مشابه و ارتفاع یکسان ۱۰۰ میلی متر، ضخامت سخت کننده از ۵ میلی متر تا ۱۲ میلی متر افزایش یابد، ظرفیت بار نهایی برای مقطع مربع از ۶۶۷۳ کیلو نیوتن بدون سخت کننده، به ۸۵۷۳ کیلو نیوتن، معادل ۲۸/۵ درصد افزایش و برای مقطع دایره از ۸۴۷۲ کیلو نیوتن بدون سخت کننده، به ۹۷۲۸ کیلو نیوتن، معادل ۱۴/۸ درصد افزایش خواهد داشت. همچنین با افزودن سخت کننده ۵ میلی متری برای مقطع مربع ۲۲/۲ درصد و برای مقطع دایره ۷/۷ درصد افزایش ظرفیت باربری فراهم می‌شود.



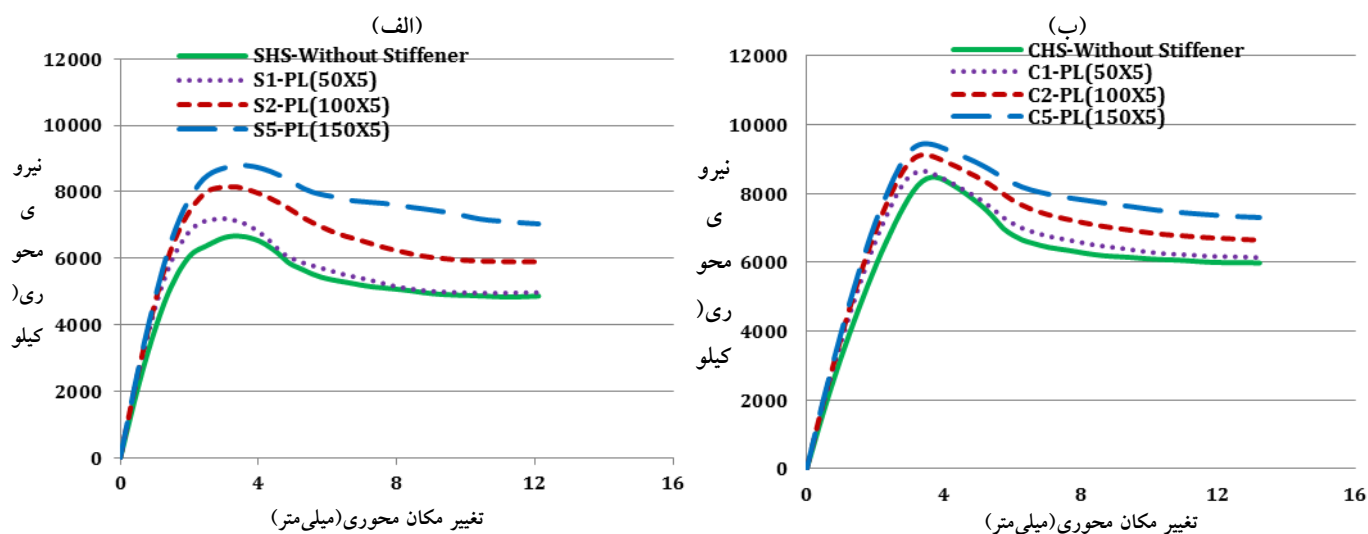
شکل ۱۲: نمودار نیروی محوری - تغییر مکان محوری ستون‌های CFDST با تغییر ضخامت سخت کننده: (الف) مقطع مربع، (ب) مقطع دایره



شکل ۱۳: مقایسه تأثیر ضخامت سخت کننده بر ظرفیت باربری نهایی ستون‌های CFDST: (الف) مقطع مربع، (ب) مقطع دایره

۲-۲-۵- تأثیر ارتفاع سخت کننده بر ظرفیت بار نهایی ستون‌های CFDST

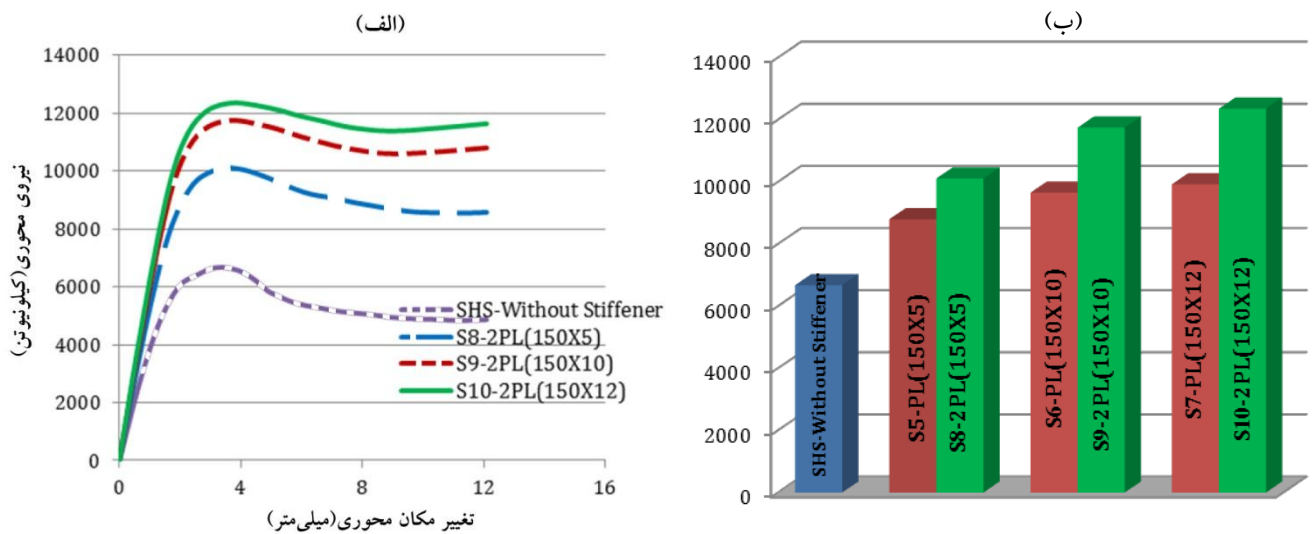
به منظور بررسی اثر ارتفاع سخت کننده بر رفتار ستون‌های CFDST، سه ارتفاع ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر به اندازه طول ستون برای مقطع دایره و مربع در تحلیل در نظر گرفته شدند. شکل ۱۴ تأثیر ارتفاع سخت کننده را بر رفتار و ظرفیت بار نهایی ستون‌های CFDST برای مقاطع مربع و دایره شکل نشان می‌دهد. با افزایش ارتفاع سخت کننده به علت افزایش اثر محبوس کنندگی حلقوی و درگیری بیشتر با بتن، مشاهده می‌شود که افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری و شکل پذیری ستون‌های CFDST به خصوص برای مقطع مربع به وجود می‌آید. به طوری که، اگر ارتفاع سخت کننده برای مقاطع مربع و دایره با تعداد ۴ سخت کننده و ضخامت یکسان ۵ میلی‌متر، از ۵۰ میلی‌متر تا ۱۵۰ میلی‌متر افزایش یابند، ظرفیت بار نهایی برای مقطع مربع ۲۲/۳ درصد و برای مقطع دایره ۹/۲ درصد افزایش نشان می‌دهد.



شکل ۱۴: مقایسه نمودار نیروی محوری- تغییر مکان محوری ستون‌های CFDST با تغییر ارتفاع سخت کننده: الف) مقطع مربع، ب) مقطع دایره

۳-۲-۵- تأثیر ترکیب و تعداد سخت کننده بر ظرفیت بار نهایی ستون دو جداره فولادی پر شده با بتن

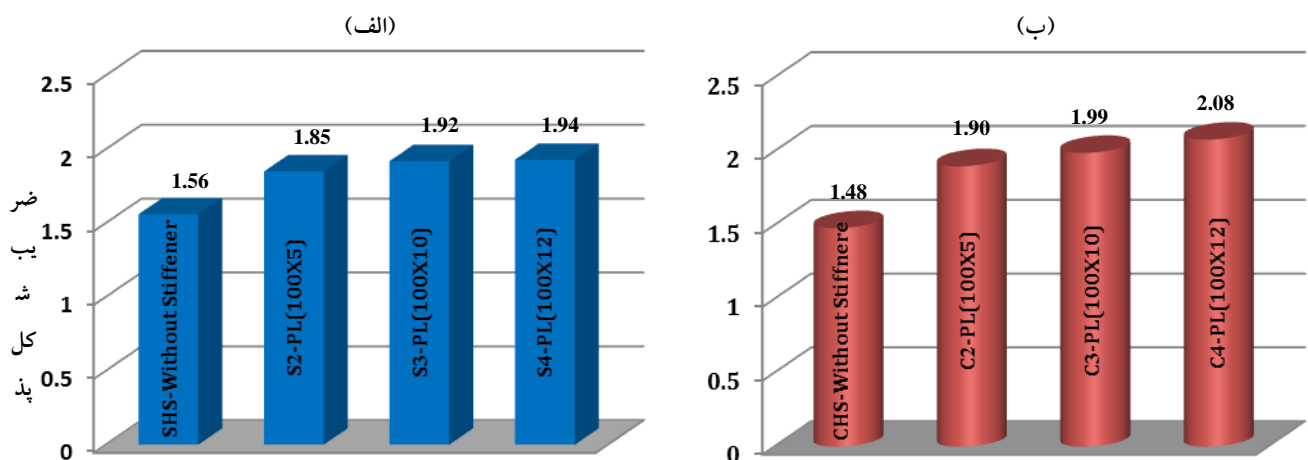
ستون دو جداره فولادی پر شده با بتن با مقطع مربع، با دو نوع ترکیب خاص و تعداد جفت سخت کننده به منظور بررسی تأثیر سخت کننده بر رفتار ستون‌های CFDST، مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج تحلیلی به دست آمده در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از دو سخت کننده در هر وجه مقطع مربع، ظرفیت بار نهایی ستون CFDST بدون سخت کننده رابه صورت چشمگیری افزایش می‌دهد. به عنوان مثال، ظرفیت بار نهایی ستون مربع بدون سخت کننده ۶۶۷۳ کیلونیوتن است که استفاده از سخت کننده S8-2PL(150X5) به مقدار قابل توجه ۱۰۱۰۸ کیلونیوتن افزایش می‌دهد و معادل ۵۱/۵ درصد بهبود می‌یابد. همچنین، استفاده از سخت کننده S10-2PL(150X12) منجر به ظرفیت بار نهایی ۱۲۳۵۶ کیلونیوتن می‌شود که ۲۴/۶ درصد بیشتر از ستون با یک سخت کننده در هر وجه مقطع مربع (S7-PL(150X12)) و ۸۵/۱۶ درصد بالاتر از ستون بدون سخت کننده بوده و مقدار قابل توجهی می‌باشد.



شکل ۱۵: تأثیر تعداد سخت‌کننده بر رفتار ستون CFDST با مقطع مربع: الف) نمودار نیروی محوری-تغییر مکان محوری، ب) مقایسه ظرفیت بار نهایی

۴-۲-۵- تأثیر سخت‌کننده بر شکل‌پذیری ستون‌های CFDST

با توجه به بهبود محصورشدگی بتن توسط سخت‌کننده‌ها در ستون‌های CFDST، مشاهده شد که علاوه بر افزایش باربری و سخت‌شدگی در مرحله الاستیک، شکل‌پذیری ستون در مرحله بعد از کمانش افزایش می‌یابد. ضریب شکل‌پذیری (DI) ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن با افزایش ارتفاع و تعداد سخت‌کننده، افزایش قابل توجهی می‌یابد. به طوری که با افزایش ارتفاع، از ۵۰ میلی‌متر تا ۱۵۰ میلی‌متر برای سخت‌کننده با ضخامت ۵ میلی‌متر، ضریب شکل‌پذیری برای مقاطع مربع و دایره به ترتیب، از $1/61$ تا $2/60$ و $1/75$ تا $1/98$ افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد، مقاطع مربع با یک سخت‌کننده در هر وجه مقطع (SHS25-(150X5))، دارای ضریب شکل‌پذیری $2/60$ می‌باشد که با افزایش تعداد به دو سخت‌کننده مشابه در هر وجه، به $2/73$ افزایش نشان می‌دهد. به عنوان مثال، در شکل ۱۶ تأثیر افزایش ضخامت سخت‌کننده با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر بر ضریب شکل‌پذیری ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن با مقاطع مربع و دایره نشان داده شده است.



شکل ۱۶: مقایسه ضریب شکل‌پذیری مقاطع مربع و دایره با تغییر ضخامت سخت‌کننده: الف) مقطع مربع، ب) مقطع دایره

۶- نتیجه گیری

در مقاله حاضر رفتار ستون‌های کامپوزیتی فولادی پر شده با بتن (CFDST) در معرض بارگذاری محوری مورد بررسی قرار گرفت. نرم افزار عناصر محدود ABAQUS نسخه ۱۲ برای انجام تحلیل غیرخطی استفاده شده و دقت مدل‌سازی عناصر محدود پیشنهادی با مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی مربوطه مشاهده شد. بررسی‌ها نشان دادند که ظرفیت باربری ستون‌های CFDST دایره‌ای در حدود ۳۰ درصد بیشتر از نمونه‌های مربعی شکل است. با وجود این، نسبت توخالی اثر معکوس بر روی ظرفیت باربری این نوع ستون‌ها دارد. تغییر شکل پلاستیک جداره فولادی نمونه‌های با مقطع مربع بیرونی و داخلی (SHS) نسبت به نمونه‌های با مقطع دایره بیرونی و داخلی (CHS) کمتر مشاهده می‌شود. همچنین، هرچه نسبت توخالی (χ) بزرگتر باشد، محدوده تغییر شکل پلاستیک جداره‌های فولادی کوچکتر و نقطه ماکزیمم تغییر شکل پلاستیک بزرگتر می‌شود.

نتایج بررسی نشان داد تأثیر سخت‌کننده بر شکل‌پذیری ستون‌های CFDST دایره‌ای بهتر از ستون‌های CFDST مربعی تحت فشار محوری جزئی است. به طور کلی، ضریب شکل‌پذیری ستون‌های CFDST بارگذاری شده محوری با افزایش نسبت توخالی (χ) کاهش و با افزایش ضخامت سخت‌کننده به علت سختی کماتش بزرگتر، افزایش می‌یابد و نیز شیب اولیه منحنی نیروی محوری-تغییر مکان محوری و ظرفیت تحمل بارگذاری فشاری محوری ستون‌های CFDST با افزایش تعداد و ارتفاع سخت‌کننده افزایش می‌یابد. استفاده از سخت‌کننده در ستون‌های CFDST باعث به تأخیر افتادن کماتش محلی می‌شود. همچنین، با افزایش تعداد و ارتفاع سخت‌کننده‌ها، به علت ایجاد محصورشدگی حلقوی، ظرفیت باربری مقاطع مربع ۸۵-۲۴ درصد افزایش و شکل‌پذیری ستون‌های CFDST به طور قابل ملاحظه افزایش می‌یابد. در ستون‌های دو جداره فولادی پر شده با بتن هرچه ضخامت سخت‌کننده بیشتر باشد، محدوده تغییر شکل پلاستیک جداره‌های فولادی بزرگتر و نقطه ماکزیمم تغییر شکل پلاستیک بزرگتر می‌شود.

۷- مراجع

- [1] Ho, J.C.M. and Dong, C.X.; "Improving strength, stiffness and ductility of CFDST columns by external confinement"; *Thin-Walled Structures*, No. 75 (2014) 18-29
- [2] Tao, Z. and Han, L. H. and Zhao X. L.; "Behaviour of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam-columns"; *Journal of Constructional Steel Research*, No. 60 (2004) 1129-1158
- [3] Huang, H. and Han, L. H. and Tao, Z. and Zhao X. L.; "Analytical behaviour of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns"; *Journal of Constructional Steel Research* 66, No. 4 (2010), 542-555
- [4] Li, W. and Han, L.H. and Zhao, X. L.; "Axial strength of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns with preload on steel tubes"; *Thin-Walled Structures*, No. 56 (2012) 9-20
- [5] Lu, H. and Han, L. H. and Zhao, X. L.; "Fire performance of self-consolidating concrete filled double skin steel tubular columns: Experiments"; *Fire Safety Journal* 45, No.2 (2010) 106-115
- [6] ABAQUS. ABAQUS Standard User's Manual.; Version 6.12. Providence, RI (USA): Dassault Systemes Corp, (2012)
- [7] Yang, Y. U. and Han, L. H. and Sun, B.H.; "Experimental behavior of partially loaded concrete filled double-skin steel tube (CFDST) sections"; *Journal of Constructional Steel Research*, No. 71 (2012) 63-73
- [8] Han, L. H. and Yao, G. H. and Tao, Z.; "Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion"; *Thin-Walled Structure* 45, No.1 (2007) 24-36
- [9] Pagoulatou, M. and Sheehan, T. and Dai, X. H. and Lam, D.; "Finite element analysis on the capacity of circular concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) stub columns"; *Engineering Structures*; No.72 (2014) 102-112
- [10] Yang, Y. F. and Han, L.H.; "Concrete-filled double-skin tubular columns under fire"; *Magazine of Concrete Research* 60, No.3 (2008) 211-222
- [11] Hu, H. T. and Su, F.C.; "Nonlinear analysis of short concrete-filled double skin tube columns subjected to axial compressive forces"; *Marine Structures*, No. 24 (2011) 319-337
- [12] Noh, S. Y. and Kratzig, W. B. and Meskouris, K.; "Numerical simulation of service ability, damage evolution and failure of reinforced concrete shells"; *Computers and Structures*, No. 81 (2003) 843-857