

Torsional Behavior Analysis of L- and T-Shaped Concrete-filled steel tube columns

Sara Sarvari Nejad¹, Mojtaba Labibzadeh^{2*}, Sina Farahani³

1-MSc of Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

ABSTRACT

Concrete-filled steel tube columns with L-shaped and T-shaped cross-sections have found a special place in modern construction due to their structural and architectural advantages. This research has conducted a comprehensive study combining numerical and analytical methods with the aim of filling the existing gap in predicting the torsional behavior of these columns. In this study, the torsional and combined behavior of composite columns reinforced with steel stiffeners has been investigated. For this purpose, advanced nonlinear modeling has been used, the results of which have been compared and validated with experimental data at three different levels. In these analyses, the effect of key parameters including the presence of stiffeners, changes in steel wall thickness, changes in steel strength, changes in concrete strength, as well as changes in confinement factor have been completely evaluated. The results of this research show that using steel stiffeners can increase the torsional capacity of T-shaped and L-shaped columns. It was also found that increasing steel thickness improves torsional capacity. Comparative examination of material parameters showed that the effect of steel strength on torsional capacity is much greater than the effect of concrete strength. Furthermore, using the modified least squares algorithm, novel analytical relationships based on confinement factor with accuracy above 93% for predicting the torsional capacity of these columns have been presented.

ARTICLE INFO

Receive Date: 15 August 2025

Revise Date: 24 December 2025

Accept Date: 03 February 2026

Keywords:

Concrete-filled steel tube column,
L-shaped column,
T-shaped column,
Steel plate,
Torsional capacity,
Confinement factor

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2026.538982.3788>

*Corresponding author: Mojtaba Labibzadeh
Email address: labibzadeh_m@scu.ac.ir

بررسی رفتار ستون‌های مرکب L و T شکل تحت اثر لنگر پیچشی

سارا سروری نژاد^۱، مجتبی لیب زاده^{۲*}، سینا فراهانی^۳

۱- کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲- دانشیار سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳- استادیار سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

ستون‌های مرکب فولادی-بتنی با مقاطع L و T شکل به دلیل مزایای سازه‌ای و معماری، جایگاه ویژه‌ای در ساخت و سازهای مدرن پیدا کرده‌اند. این پژوهش با هدف پر کردن خلأ موجود در پیش‌بینی رفتار پیچشی این ستون‌ها، مطالعه‌ای جامع را با ترکیب روش‌های عددی و تحلیلی انجام داده است. در این تحقیق، رفتار پیچشی و ترکیبی ستون‌های مرکب تقویت‌شده با سخت‌کننده‌های فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از مدل سازی پیشرفته غیرخطی استفاده شده که نتایج آن در سه سطح مختلف با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و اعتبارسنجی گردیده است. در این تحلیل‌ها، اثر پارامترهای کلیدی شامل وجود سخت‌کننده‌ها، تغییرات ضخامت جداره فولادی، تغییرات مقاومت فولاد، تغییرات مقاومت بتن و همچنین تغییرات ضریب محصورشدگی به‌طور کامل مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از سخت‌کننده‌های فولادی می‌تواند ظرفیت پیچشی ستون‌های T و L شکل را افزایش دهد. همچنین مشخص شد که افزایش ضخامت جداره موجب بهبود ظرفیت پیچشی می‌شود. بررسی مقایسه‌ای پارامترهای مصالح نشان داد که تأثیر مقاومت فولاد بر ظرفیت پیچشی بسیار بیشتر از تأثیر مقاومت بتن است. همچنین با استفاده از الگوریتم روش حداقل مربعات اصلاح‌شده روابط تحلیلی نوینی مبتنی بر ضریب محصورشدگی با دقت بالای ۹۳ درصد برای پیش‌بینی ظرفیت پیچشی این ستون‌ها ارائه گردید.

کلمات کلیدی: ستون فولادی پر شده با بتن-ستون L شکل-ستون T شکل-ورق فولادی-ظرفیت پیچشی-ضریب محصورشدگی

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۴/۰۵/۲۴	۱۴۰۴/۱۰/۰۳	۱۴۰۴/۱۱/۱۴	۱۴۰۴/۱۱/۱۴	۱۴۰۵/۰۵/۳۱	https://doi.org/10.22065/jsce.2026.538982.3788
*نویسنده مسئول:		مجتبی لیب زاده			
پست الکترونیکی:		labibzadeh_m@scu.ac.ir			

جدول علائم اختصاری و نمادها

θ	ضریب اثر محصورشدگی بتن هسته
A_s	سطح مقطع کل فولاد جداره
A_c	سطح مقطع کل بتن هسته
f_y	مقاومت تسلیم فولاد
f_{ck}	مقاومت فشاری بتن
f_{sc}	ضریبی برای محاسبه مقاومت مرکب ظرفیت باربری محوری ستون
C, B	ضریب‌های ثابت معادله روش نظریه یکپارچه
N_{uc1}	ظرفیت باربری نهایی ستون مرکب طبق روش نظریه یکپارچه
η	ضریب اصلاح روش جمع آثار قوا
E, D	ضریب‌های ثابت معادله روش جمع آثار قوا
N_0	تنش اسمی مقطع مرکب
N_{uc2}	ظرفیت باربری نهایی ستون مرکب طبق روش جمع آثار قوا
N_A	ظرفیت باربری ستون‌های کوتاه فولادی پر شده با بتن براساس آیین‌نامه آمریکا (AISC360-10)
N_E	ظرفیت باربری ستون‌های کوتاه فولادی پر شده با بتن براساس آیین‌نامه اروپا (EC4)
G, F	ضریب‌های اثر محصورشدگی ستون‌های مرکب طبق آیین‌نامه کشور چین (GB 50936)
N_c	ظرفیت باربری ستون‌های کوتاه فولادی پر شده با بتن براساس آیین‌نامه کشور چین (GB 50936)
τ	تنش برشی اسمی مقطع مرکب
T	لنگر پیچشی اعمالی
W_{sec}	مدول اینرسی پیچشی مقاطع مرکب

γ_t	ضریب مقاومت تسلیم پیچشی اسمی
τ_{scy}	مقاومت تسلیم اسمی مقاطع مرکب تحت اثر پیچش
f_{scy}	مقاومت تسلیم اسمی مقاطع مرکب تحت اثر بار فشاری
ζ	اثر محصور شدگی و معادل پارامتر θ
SI	شاخص مقاومت در مقاطع مرکب
T_u	در نهایت ظرفیت باربری پیچشی مقطع مرکب
ϵ_c^{pl}	کرنش پلاستیک بتن
ϵ_c^{in}	کرنش های غیرالاستیک بتن
d_c	پارامتر آسیب فشاری
σ_c	تنش موجود بتن
E_0	مدول الاستیسیته اولیه بتن
σ_{cu}	تنش نهایی بتن
ψ	زاویه اتساع
μ	پارامتر ویسکوزیته

۱- مقدمه

ستون‌های فولادی پر شده با بتن نوعی از ستون‌های مرکب هستند که به دلیل استفاده از مزایای همزمان فولاد و بتن در سال‌های اخیر رواج و توسعه یافته‌اند. این ستون‌ها با هدف افزایش ظرفیت باربری و کاهش احتمال کمانش موضعی مقاطع فولادی توسط محققین گسترش داده شده‌اند [۱]. با توجه به هدف از پیش تعیین شده افزایش ظرفیت باربری تلاش گردیده است پیکره‌بندی‌های مختلف هندسی برای مقاطع این ستون‌ها پیشنهاد گردد. عملکرد این ستون‌ها به نحوی است که در مرحله اول جدار فولادی با بهبود حالت محصورشدگی در بتن موجب افزایش خواص بتن از طریق ایجاد شرایط تنش سه محوره می‌گردد در حالی که از طرف دیگر بتن محصور شده نیز از کمانش موضعی داخلی مقطع فولادی جلوگیری می‌کند. مکانیزم بارگذاری مشاهده شده در تحقیقات گذشته نشان می‌دهد، با توجه به کمتر بودن نسبت پواسون بتن در مراحل اولیه بارگذاری نسبت به فولاد، تنها ترک‌های کوچکی در بتن به وجود می‌آید و در این مرحله از بارگذاری جدار فولادی تأثیری بر اثر محصور کنندگی نخواهد داشت و اگر چسبندگی بین فولاد و بتن کافی نباشد ممکن است جدایش نیز

مشاهده گردد [۱]. از دو منظر مصرف فولاد کمتر در مقایسه با ستون‌های فولادی و همچنین افزایش محصور شدگی در مقابل ستون‌های بتن‌آرمه، می‌توان ستون‌های داری مقاطع لوله‌ای شکل فولادی پر شده با بتن^۱ را به عنوان راهکاری با مزایای بیشتر در نظر گرفت. همچنین اجرای این ستون‌ها بدلیل حذف فرآیند قالب‌بندی متداول ستون‌های بتن‌آرمه با کاهش هزینه و زمان همراه خواهد بود [۲].

هرچند ستون‌های مرکب با مقطع دایره‌ای از مزایای سازه‌ای قابل توجهی برخوردارند، اما محدودیت‌های معماری در طراحی ساختمان‌های مدرن، توسعه ستون‌های مرکب با اشکال هندسی جایگزین را ضروری ساخته است. ستون‌های مرکب با مقاطع L و T شکل، به‌طور خاص، به دلیل تطبیق‌پذیری معماری و مزایای سازه‌ای خود، مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مقاطع به‌طور ایده‌آل برای موقعیت‌های خاصی مانند گوشه‌های ساختمان و محل تقاطع دیوارها به کار می‌روند، چرا که سطح مقطع آن‌ها بدون ایجاد برآمدگی نامسطح با خط دیوار همخوانی دارد و امکان بهینه‌سازی فضای معماری را فراهم می‌کند. مطالعات اولیه در این زمینه به پژوهش‌های مارین در سال ۱۹۷۹ [۳] و هسو در سال ۱۹۸۹ [۴] بازمی‌گردد که با بررسی رفتار ستون‌های فولادی پر شده با بتن با مقاطع T و L شکل تحت بار فشاری متمرکز، به توسعه منحنی‌های برهم‌کنش محوری-خمشی برای دو حالت بارگذاری محوری و بارگذاری با خروج از مرکز پرداختند. مطالعات گسترده‌تر بر روی رفتار لرزه‌ای و استاتیکی این ستون‌ها نیز نشان‌دهنده برتری معنادار آنها از نظر ظرفیت باربری و قابلیت تحمل تغییرشکل‌های غیرارتجاعی در مقایسه با ستون‌های فولادی و بتن‌آرمه متعارف است. اگرچه مقاطع لوله‌ای دایره‌ای به دلیل کسب بیشترین بهره‌وری از مکانیزم محصورشدگی، همچنان سهم قابل توجهی در صنعت ساختمان را به خود اختصاص می‌دهند [۵-۹]، اما با توجه به مزایای چندوجهی ستون‌های مرکب، پژوهش‌ها در زمینه بررسی رفتار آنها با در نظرگیری انواع پیکربندی‌های مقطع و شرایط بارگذاری مختلف تاکنون ادامه داشته است. یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۱۰] به بررسی رفتار استاتیکی ستون‌های فولادی پر شده با بتن با مقطع T شکل تحت بار متمرکز و با در نظرگیری خروج از مرکزیت پرداختند. در این مطالعه از سخت‌کننده‌های میله‌ای کششی و دندانه‌ای جهت افزایش ظرفیت کمانش موضعی استفاده گردید. نتایج مطالعه نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داد که کاربرد سخت‌کننده‌ها در گوشه‌های مقعر مقطع فولادی از تخریب هسته بتنی جلوگیری می‌نماید. همچنین سخت‌کننده‌های میله‌ای کششی در مقایسه با سایر انواع سخت‌کننده‌ها، کارایی بیشتری در به تأخیر انداختن کمانش موضعی ورق فولادی از خود نشان دادند [۱۰]. با این حال، اثرات سایر انواع بارگذاری از قبیل لنگر پیچشی و نیز رفتار سایر اشکال هندسی مقاطع در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفت. با شناسایی این ناز مطالعاتی، پژوهش‌های بعدی به بررسی اثر انواع دیگر بارگذاری و اشکال هندسی مختلف مقطع معطوف گردید. در این راستا، یو-هانگ و همکاران [۱۱] در مطالعه‌ای نظری، به‌طور خاص به ارزیابی ستون‌های فولادی دایره‌ای تحت تأثیر لنگر پیچشی و ترکیب نیروی محوری-پیچشی پرداختند و موفق به توسعه یک مدل نظری با عنوان لوله‌های چند لایه^۲ شدند. همچنین بر اساس مدل توسعه داده شده و استفاده از روش رگرسیون خطی، رابطه‌ای ساده شده جهت پیش‌بینی ظرفیت پیچشی این ستون‌ها تحت اندرکنش نیروی محوری و لنگر پیچشی ارائه گردید [۱۱]. لیو و همکاران [۱۲] در یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی به ارزیابی ستون‌های با سطح مقطع L و T شکل تحت بار محوری پرداختند. این مطالعه نه تنها مزیت استفاده از سخت‌کننده‌های فولادی را آشکار می‌کند، بلکه نشان می‌دهد افزایش پارامترهایی همچون نسبت فولاد، مقاومت بتن و سطح مقطع نیز به صورت معناداری بر ظرفیت باربری ستون‌ها تأثیر گذار است.

شیائو و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۳] با اضافه کردن یک مقطع I شکل داخلی به ستون‌های فولادی L شکل پر شده با بتن تلاش کردند ظرفیت فشاری این ستون‌ها را افزایش دهند. در این پژوهش، نمونه‌های آزمایشگاهی با سطوح مختلف لاغری و طول‌های کوتاه تا متوسط تحت بارگذاری محوری مورد بررسی قرار گرفته و ظرفیت فشاری آن‌ها ارزیابی شد. همچنین رابطه‌ای به منظور تخمین ظرفیت فشاری این ستون‌ها بر مبنای مدل اجزا محدود توسعه داده شده که نتایج آن در تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی قرار داشت. با توجه به مزایای ستون‌های L و T شکل، از جمله استفاده بهینه از فضا به ویژه هنگام قرار گیری در نواحی گوشه و تقاطع دیوارها و همچنین عدم برآمدگی یا بیرون‌زدگی نا مسطح آنها از دیوارهای مجاور، این مقاطع در دهه‌های اخیر به طور گسترده مورد استقبال جامعه مهندسی و معماران قرار گرفته‌اند. از اینرو در سال ۲۰۲۰ مطالعه‌ای توسط ژنگ و زنگ [۱۴] با هدف توسعه روابط سختی معادل و ظرفیت حداکثر فشاری این ستون‌ها صورت پذیرفت. در این مطالعه با توجه به اختلاف مشاهده شده بین نتایج مدل‌های عددی با رابطه پیشین آئین‌نامه

¹ Concrete-filled steel tubular (CFST)

² Laminated tubes model

اروپا^۳ [۱۵] روابطی جدید برای ظرفیت و سختی فشاری مبتنی بر روش رگریسون عددی پیشنهاد گردید. ژنگ و زنگ در ادامه و در سال ۲۰۲۱ [۱۶] با انجام پژوهشی، رفتار خمشی ستون‌های مرکب داری مقطع چند بخشی L شکل را بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد زاویه بارگذاری در ظرفیت خمشی این مقاطع مؤثر است به نحوی که بیشترین ظرفیت در زاویه ۱۳۵ و کمترین آن در زاویه ۴۵ و ۲۲۵ درجه بدست آمد. همچنین تغییر مقطع به مقطع چند سلولی و یا استفاده از سخت کننده‌های عمودی می‌تواند ظرفیت پیچشی این مقاطع را تا ۲۰ درصد افزایش دهد. در ادامه، استفاده از مقاطع چند سلولی و همچنین سخت کننده‌ها بدلیل تأثیری که در افزایش ظرفیت داشتند، بیش از پیش مورد توجه محققین مختلف قرار گرفت. ژنگ و همکاران [۱۷] با بررسی رفتار این مقاطع از طریق یک مطالعه پارامتریک تحت اثر بارهای دارای خروج از مرکزیت‌های مختلف و همچنین نسبت‌های لاغری متفاوت، روشی کارآمد را به منظور محاسبه ظرفیت خمشی آنها ارائه دادند. لیو و همکاران [۲] در سال ۲۰۲۳ با توسعه یک مدل عددی صحت‌سنجی شده و انجام مطالعات پارامتری جامع بر روی عوامل مؤثر شامل ارتفاع ستون، هندسه مقطع و مقاومت متفاوت مصالح، رابطه‌ای برای تخمین ظرفیت پایداری خمشی ستون‌های T شکل پیشنهاد دادند. این مطالعه با در نظرگیری مقطع فولادی T ساخته شده از دو مقطع I شکل و سه مقطع U شکل و تحت ترکیب بار محوری و لنگر خمشی صورت پذیرفته است.

لی و همکاران [۱۸] به ارزیابی رفتار ستون‌های مرکب T شکل تحت تأثیر خمش دو محوری و فشار پرداختند. نتایج بررسی آزمایشگاهی در مقیاس اصلی نشان داد که استفاده از روابط موجود برآورد ظرفیت مقاطع مستطیلی منجر به تخمین بیش از حد محافظه کارانه برای مقاطع T شکل می‌گردد. همچنین آنها نتیجه گرفتند که روابط موجود در دستورالعمل‌ها برای این مقاطع نیازمند بازنگری جدی هستند. در ادامه تلاش محققین برای بررسی انواع مختلفی از بارگذاری، در سال ۲۰۲۴ یانگ و همکاران [۱۹] با بررسی آزمایشگاهی مقاطع ویژه دایره‌ای پر شده با بتن تحت بار مرکب دریافتند که این ستون‌ها در اثر ترکیب بار بحرانی فشاری-پیچشی دچار شکست می‌گردند. هرچند رفتار آنها تا قبل از نقطه شکست نهایی موجب فراهم آوردن سطح بالایی از استهلاک انرژی می‌شود. در این مطالعه همچنین مشخص گردید که نیروی فشاری اعمالی می‌تواند بسته به میزان آن، موجب افزایش و یا کاهش ظرفیت پیچشی گردد. آنها همچنین به منظور تأثیر اندرکنش نیروی فشاری-پیچشی، رابطه‌ای جدید را ارائه دادند. لیو و همکاران [۲۰] در مطالعه‌ای یک روش طراحی برای تعیین ظرفیت ستون‌های مرکب با مقطع T شکل نامنظم تحت تأثیر ترکیب بار محوری و خمش را پیشنهاد دادند. در این مطالعه بدلیل اینکه مقطع T شکل رفتار متفاوت خمشی در جهات مختلف دارد، ابتدا روابط طراحی برای حالت خمش تک محوره توسعه یافت. همچنین آنها نشان دادند که شکل منحنی اندرکنش ظرفیت برای حالت خمش دو محوری به طور کلی با نسبت رابطه بار محوری اعمالی کنترل می‌گردد.

در ادامه مطالعات انجام شده بر روی ستون‌های T شکل فولادی پر شده با بتن، ژنگ و همکاران [۲۱] در یک پژوهش عددی، رفتار این مقاطع را تحت بارگذاری محوری فشاری هم مرکز و خارج از مرکز با زوایای مختلف مورد بررسی دقیق قرار دادند. نتایج تحلیل مدل‌ها نشان داد که استفاده از سخت کننده‌های طولی می‌تواند ظرفیت و عملکرد فشاری این مقاطع را حداکثر تا ۲۴/۵ درصد افزایش دهد. به موازات تحقیقات انجام شده بر روی مقاطع T شکل، پژوهش‌های متعددی نیز با هدف ارزیابی رفتار مقاطع L شکل و همچنین سایر مقاطع مرکب در سال‌های اخیر صورت گرفته است. لیو و همکاران در سال ۲۰۲۴ [۲۲] با انجام مطالعه‌ای ترکیبی عددی و آزمایشگاهی، رفتار محوری ستون‌های L شکل نامنظم پر شده از بتن را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، مشاهدات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های تحت بار محوری با خروج از مرکزیت نشان داد که ظرفیت فشاری نهایی آنها به جهت اعمال بار خارج از مرکز وابستگی معناداری دارد. همچنین نتایج تحلیل‌های عددی نشان دادند که پارامترهای ارتفاع ستون، ضخامت جداره فولادی، مقاومت فولاد و بتن مورد استفاده و همچنین خروج از مرکزیت بار بر روی عملکرد و ظرفیت پایداری این ستون‌ها مؤثر می‌باشند. هو و همکاران [۲۳] نیز با هدف بررسی اثر محصورشدگی ستون‌های چند سلولی مرکب با مقطع مربعی شکل، پژوهشی عددی را انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش ضخامت جداره فولادی و مقاومت تسلیم فولاد در مقایسه با افزایش مقاومت بتن، تأثیر به مراتب بیشتری بر بهبود میزان محصورشدگی

³ Eurocode 4

مقطع دارد. علاوه بر این ضریب محصورشدگی ارائه شده در این پژوهش در مقایسه با روابط موجود، از دقت بیشتری در پیش‌بینی ظرفیت باربری محوری ستون‌های مرکب فولادی پر شده با بتن برخوردار است. یو و همکاران [۲۴] نیز در سال ۲۰۲۴ بر مبنای یک مطالعه آزمایشگاهی مقیاس شده به ارزیابی رفتار ستون‌های L شکل تحت ترکیب بار محوری و چرخه‌ای پرداختند. در این پژوهش با بهره‌گیری از یک مدل اجزا محدود پیشرفته، تحلیل پارامتریک جامعی جهت بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی شامل نسبت بار محوری، طول جان مقطع، مقاومت بتن و ضخامت مقطع فولادی بر رفتار این ستون‌ها صورت پذیرفته است. بر این اساس، رابطه‌ای کاربردی و دقیق برای تخمین ظرفیت فشاری-خمشی ستون‌های مرکب فولادی پر شده با بتن با مقطع L شکل ارائه گردیده است که نشان دهنده بهبود قابل توجهی نسبت به مدل‌های موجود می‌باشد.

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، اگرچه مطالعات گسترده‌ای بر روی رفتار محوری و خمشی ستون‌های مرکب با مقاطع L و T شکل صورت گرفته است، اما تحقیقات بسیار محدودی به بررسی رفتار پیچشی و به‌ویژه اندرکنش نیروی محوری-پیچشی در این مقاطع پرداخته‌اند. این در حالی است که در شرایط واقعی، این ستون‌ها ممکن است در معرض ترکیبی از بارهای محوری و پیچشی قرار گیرند. بنابراین، نوآوری اصلی این پژوهش در ارزیابی سیستماتیک رفتار پیچشی و رفتار ترکیبی تحت نیروی محوری و لنگر پیچشی در ستون‌های فولادی پر شده با بتن با مقاطع L و T شکل تعریف گردیده است. بر اساس دانش نویسندگان، مطالعه مشابه‌ای در ادبیات فنی تاکنون وجود ندارد. برای دستیابی به این هدف، یک مدل اجزای محدود پیشرفته و صحت‌سنجی شده با داده‌های آزمایشگاهی توسعه یافته است. در ادامه، با استفاده از این مدل، یک مطالعه پارامتریک جامع برای شناسایی متغیرهای کلیدی تحت تأثیر بار پیچشی و همچنین ترکیب بار محوری و لنگر پیچشی انجام شده و در نهایت، یک رابطه تحلیلی جدید و کاربردی برای تخمین دقیق‌تر ظرفیت این ستون‌ها ارائه می‌گردد.

ساختار مطالعه حاضر به این شرح است: پس از مقدمه، در بخش دوم ابتدا به ارزیابی روابط تئوری ظرفیت باربری موجود پرداخته می‌شود. سپس با در نظرگیری تعدادی مدل ستون مرکب L و T شکل، تلاش می‌گردد تا ظرفیت باربری فشاری آنها با استفاده از روابط تئوری محاسبه گردد. در بخش سوم به تشریح جزئیات مدل اجزای محدود توسعه یافته به منظور مدل‌سازی عددی ستون‌های مرکب پرداخته می‌شود. سپس با در نظرگیری سه مطالعه آزمایشگاهی شامل ستون‌های L و T شکل تحت بار محوری خالص، ستون‌های دایره‌ای تحت لنگر پیچشی و همچنین ستون‌های دایره‌ای و مربعی تحت ترکیب بار محوری و لنگر خمشی، مدل عددی پیشنهادی صحت سنجی می‌گردد. در بخش چهارم، ابتدا به ارائه و تحلیل نتایج حاصل از مطالعه پارامتریک اختصاص دارد. سپس، فرآیند استخراج رابطه تحلیلی جدید و ارزیابی دقت آن در مقایسه با نتایج عددی و آزمایشگاهی مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت، در بخش پنجم، مهم‌ترین یافته‌های پژوهش جمع‌بندی و نتیجه‌گیری نهایی ارائه می‌گردد.

۲- ارزیابی تئوری ظرفیت باربری ستون‌های مورد مطالعه

با مرور ادبیات فنی روابط تئوری موجود برای محاسبه ظرفیت فشاری و پیچشی ستون‌های فولادی پر شده با بتن تلاش گردیده است تعدادی مدل مورد مطالعه معرفی و ظرفیت‌های باربری مورد نظر برای هریک از آنها محاسبه گردد.

۲-۱- ظرفیت باربری فشاری

۲-۱-۱- روش نظریه یکپارچه^۴

در این روش مقطع فولادی و بتنی به عنوان یک سازه کامپوزیت طوری در نظر گرفته می‌شود که نقش اثر محصورشدگی را جداره فولادی برای بتن فراهم می‌کند [۱۲]. ضریب محصورشدگی θ که یک کمیت بدون بعد می‌باشد، طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

^۴ The unified theory

$$\theta = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} \quad (1)$$

که در رابطه فوق A_s و A_c به ترتیب سطح مقطع کل فولاد و بتن می باشند. ضریب مقاومت ظرفیت باربری در این مدل نیز از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$f_{sc} = (C\theta^2 + B\theta + 1.0)f_{ck} \quad (2)$$

در این رابطه نیز هر دو ضریب ثابت B و C از روابط زیر بدست می آیند.

$$B = \frac{0.115f_y}{235} + 0.7 \quad (3)$$

$$C = -\frac{0.11f_{ck}}{20} + 0.01 \quad (4)$$

در نهایت ظرفیت بار محوری در این روش از رابطه زیر تعیین می گردد.

$$N_{uc1} = A_{sc} f_{sc} \quad (5)$$

در رابطه فوق پارامتر A_{sc} ، سطح مقطع کل می باشد که حاصل جمع هر دو سطح مقطع فولادی و هسته بتنی است.

۲-۲- روش جمع آثار قوا^۵

بر اساس این تئوری، ظرفیت باربری ستون مرکب از مجموع ظرفیت باربری بتن و فولاد محاسبه می شود، بدون آنکه اثر فشار محوری یا محصورشدگی بتن توسط لوله فولادی در نظر گرفته شود. همان گونه که لیو و همکاران [۱۲] اشاره کرده اند، این روش به عنوان یک مدل پایه ای مورد استفاده قرار می گیرد. به منظور محاسبه ظرفیت باربری ابتدا ضریب اصلاح η از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\eta = E\theta^2 + D\theta + 1.0 \quad (6)$$

که در رابطه بالا پارامترهای D و E از روابط زیر محاسبه گردیده و در نهایت ظرفیت باربری نهایی به روش جمع آثار قوا محاسبه می گردد.

$$D = -\frac{0.0852f_y}{235} + 0.27 \quad (7)$$

$$E = -\frac{0.0014f_{ck}}{20} - 0.019 \quad (8)$$

$$N_0 = A_c f_{ck} + A_s f_y \quad (9)$$

$$N_{uc2} = \eta N_0 \quad (10)$$

۲-۳- روابط آیین نامه ظرفیت نهایی ستون های مرکب فولادی پر شده با بتن

آیین نامه های طراحی آمریکا [۲۵] و همچنین اروپا [۱۵] هر دو از روش دوم یعنی اصل جمع آثار قوا به منظور ارزیابی ظرفیت باربری ستون های فولادی پر شده با بتن استفاده می کنند. لازم به ذکر است رویکرد مورد استفاده در آیین نامه کشور چین نیز روش دوم یعنی اصل جمع آثار قوا است [۲۶]. مطابق با آیین نامه [۲۵] ظرفیت باربری ستون های کوتاه فولادی پر شده از رابطه زیر برآورد می گردد:

$$N_A = 0.85A_c f_{ck} + A_s f_y \quad (11)$$

همچنین رابطه زیر برای تخمین این ظرفیت در آیین نامه اروپا [۱۵] پیشنهاد گردیده است.

$$N_E = A_c f_{ck} + A_s f_y \quad (12)$$

که پارامترهای موجود در روابط بالا در بخش های پیشین شرح داده شده است. آیین نامه ستون های مرکب چین [۲۶] نیز روابط زیر به منظور ارزیابی ظرفیت محوری مقاطع مرکب پیشنهاد داده است:

⁵ The superposition theory

$$f_{sc} = (G\theta^2 + F\theta + 1.212)f_{ck} \quad (13)$$

$$N_c = A_{sg} f_{sc} \quad (14)$$

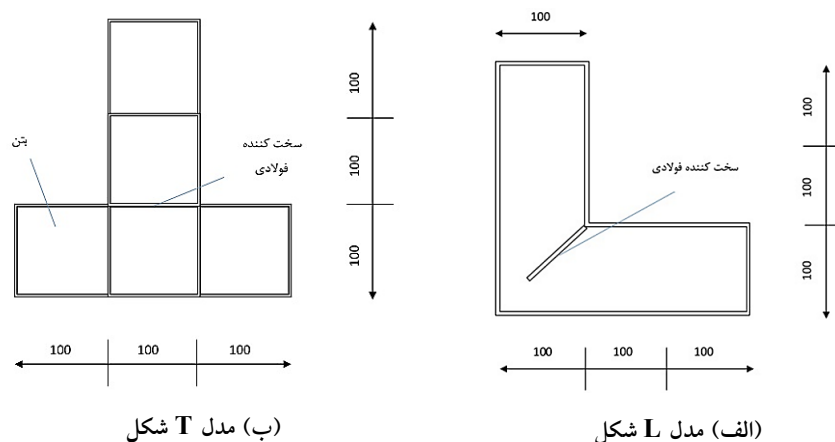
که در روابط فوق F و G ضرایب تأثیر اثر محصورشدگی می باشند که از روابط زیر محاسبه می گردند.

$$F = \frac{0.13f_y}{235} + 0.723 \quad (15)$$

$$G = -\frac{0.07f_{ck}}{20} + 0.026 \quad (16)$$

۲-۴- محاسبه ی ظرفیت باربری فشاری ستون های L و T شکل با استفاده از روابط و ارزیابی دقت روش های مختلف

در این بخش با در نظرگیری تعدادی مدل ستون مورد بررسی تلاش گردیده است ظرفیت باربری فشاری آنها با استفاده از روابط ارائه شده در بخش های پیشین محاسبه گردد. سطح مقطع و چیدمان سخت کننده های ستون های L و T شکل مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین جزئیات مربوط به مشخصات فولاد و بتن مصرفی در این ستون ها نیز در جدول ۱ ذکر شده است. لازم به ذکر است به منظور نام گذاری مدل های مورد مطالعه L در ابتدای اسم مدل ها به معنای شکل آنهاست و عدد درج شده در کنار آن در واقع معرف مقاومت بتن هسته آنها می باشد. همچنین حرف T در ابتدای اسم مدل ها به معنای شکل آنهاست. حرف N نیز معرف عدم استفاده از سخت کننده و S به معنای وجود سخت کننده می باشد. در ادامه نام گذاری نیز عدد اول بیان کننده طول جان و عدد دوم ضخامت جداری فولادی را نشان می دهد. جدول ۲ نتایج محاسبات ظرفیت باربری فشاری را بر اساس دو روش تئوری نظریه یکپارچه و جمع آثار قوا، همراه با مقایسه با سه روش آیین نامه ای ارائه می دهد. لازم به ذکر است در این جدول نیز واحد تمامی نیروها نیوتن، طول میلی متر، مقاومت مگاپاسکال و مساحت ها میلی متر مربع است. تمامی مدل های عددی ارائه شده مبتنی بر روش اجزای محدود، که جزئیات آنها در بخش های بعدی تشریح خواهد شد، مدلسازی و ظرفیت نهایی باربری محوری آنها محاسبه شده است. به منظور تسهیل مقایسه نتایج با روش های تئوری، نسبت ظرفیت باربری حاصل از تحلیل عددی هر مدل به ظرفیت تعیین شده توسط روش های تئوری و آیین نامه ای در شکل ۲ نمایش داده شده است. نتایج ارائه شده در جدول ۲ و شکل ۲ به وضوح نشان می دهد که از بین کلیه روش های مورد بررسی، روش نظریه یکپارچه با میانگین نسبت ۱/۰۴ و روش جمع آثار قوا با میانگین نسبت ۰/۹۹ دارای نزدیک ترین انطباق با نتایج عددی هستند و از دقت و قابلیت اطمینان بالاتری برای پیش بینی ظرفیت باربری این نوع مقاطع برخوردارند. در مقابل، روابط آیین نامه ای AISC 360 [۲۵]، EC4 [۱۵] و GB 50936 [۲۶] به ترتیب با میانگین نسبت های ۱/۱۹، ۱/۰۷ و ۰/۹۱، به صورت ذاتی ظرفیت را کمتر برآورد می کنند که نشان دهنده محافظه کارانه تر بودن این آیین نامه ها در طراحی ستون های مرکب با مقاطع L و T شکل است. این امر عمدتاً ناشی از در نظر نگرفتن کامل اثر محصورشدگی در روابط آیین نامه ای می باشد. بنابراین، روش نظریه یکپارچه به دلیل سادگی و دقت بالا به عنوان روش منتخب تئوری برای تخمین ظرفیت فشاری این قبیل ستون ها در کاربردهای عملی پیشنهاد می شود.



شکل (ب) مدل T شکل

شکل (الف) مدل L شکل

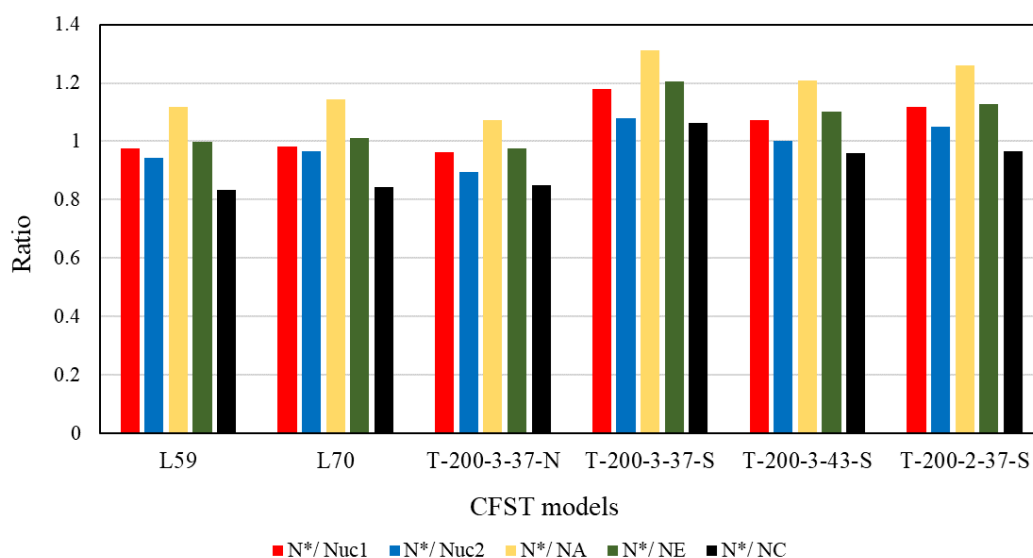
شکل ۱: هندسه سطح مقطع مدل‌های انتخابی (ابعاد به میلی متر)

جدول ۱: مشخصات ستون‌های مورد مطالعه L و T شکل

مدل ستون	ضخامت مقطع فولادی $t(mm)$	مقاومت فولاد $f_y(MPa)$	مقاومت بتن $f_{ck}(MPa)$	ضخامت سخت‌کننده $t(mm)$	مقاومت نهایی سخت‌کننده $f_h(MPa)$	طول ستون $L(mm)$
L59	۲/۷۲	۳۰۲	۵۸/۶	۲/۷۲	۳۰۲	۹۰۰
L70	۲/۷۲	۳۰۲	۷۰/۱	۲/۷۲	۳۰۲	۹۰۰
T-200-3-37-N	۳	۳۰۶	۳۶/۹	-	-	۹۰۰
T-200-3-37-S	۳	۳۰۶	۳۶/۹	۳	۳۰۶	۹۰۰
T-200-3-43-S	۳	۳۰۶	۴۲/۹	۳	۳۰۶	۹۰۰
T-200-2-37-S	۲	۲۳۲	۳۶/۹	۲	۲۳۲	۹۰۰

جدول ۲: نتایج محاسبات ظرفیت باربری فشاری مدل‌های مورد مطالعه با استفاده از روش‌های تئوری و آیین‌نامه‌ای

مدل ستون	روش اول، نظریه یکپارچه				روش دوم، روش جمع آثار قوا							AISC 360 [25]				EC4 [15]				GB 50936 [26]			
	B	C	f_{sc}	N_{uc1}	D	E	η	N_0	N_{uc2}	N_A	N_E	F	G	f_{sc}	N_C								
L59	۰/۸۴	-۰/۰۲۲	۷۶/۶۳	۳۹۷۴/۰	۰/۱۶	-۰/۰۲۳	۱/۰۵۶	۳۸۸۶/۰	۴۱۰۳/۰	۳۴۶۱/۰	۳۸۸۶/۰	۰/۸۹	-۰/۱۸	۸۸/۸۷	۴۶۰۸/۰								
L70	۰/۸۴	-۰/۰۲۸	۸۸/۳۳	۴۵۸۰/۷	۰/۱۶	-۰/۰۲۴	۱/۰۴۷	۴۴۴۲/۵	۴۶۵۳/۴	۳۹۳۳/۹	۴۴۴۲/۵	۰/۸۹	-۰/۲۲	۱۰۲/۸۶	۵۳۳۳/۸								
T-200-3-37-N	۰/۸۵	-۰/۰۱۰	۵۶/۱۷	۲۹۱۰/۲	۰/۱۶	-۰/۰۲۱	۱/۰۹۰	۲۸۸۰/۵	۳۱۴۰/۴	۲۶۱۳/۷	۲۸۸۰/۵	۰/۸۹	-۰/۱۰	۶۳/۶۸	۳۲۹۹/۳								
T-200-3-37-S	۰/۸۵	-۰/۰۱۰	۶۲/۵۳	۳۳۱۴/۷	۰/۱۶	-۰/۰۲۲	۱/۱۱۷	۳۲۴۷/۷	۳۶۲۶/۴	۲۹۸۰/۹	۳۲۴۷/۷	۰/۸۹	-۰/۱۰	۶۹/۳۵	۳۶۷۶/۳								
T-200-3-43-S	۰/۸۵	-۰/۰۱۴	۶۸/۴۹	۳۶۳۰/۹	۰/۱۶	-۰/۰۲۲	۱/۱۰۲	۳۵۳۷/۰	۳۸۹۷/۲	۳۲۲۶/۷	۳۵۳۷/۰	۰/۸۹	-۰/۱۲	۷۶/۵۳	۴۰۵۷/۰								
T-200-2-37-S	۰/۸۱	-۰/۰۱۰	۴۹/۲۱	۲۵۵۹/۱	۰/۱۸	-۰/۰۲۱	۱/۰۷۳	۲۵۴۳/۲	۲۷۲۸/۸	۲۲۷۳/۱	۲۵۴۳/۲	۰/۸۵	-۰/۱۰	۵۷/۰۴	۲۹۶۶/۴								



شکل ۲: نسبت ظرفیت باربری محوری بدست آمده از مدل عددی مطالعه حاضر (N^*) به مقادیر بدست آمده از روش‌های تئوری و آیین‌نامه‌ای موجود در ادبیات فنی (N_{uc1} , N_{uc2} , N_A , N_E and N_C)

۲-۲- ظرفیت باربری پیچشی

با توجه به عدم وجود روابط تحلیلی برای محاسبه ظرفیت باربری پیچشی ستون‌های فولادی پر شده با بتن با مقاطع L و T شکل، در این مطالعه از پارامتر مدول اینرسی پیچشی مقاطع مرکب W_{sec} که پیش‌تر برای مقاطع دایره‌ای و مربعی ارائه شده است، استفاده می‌شود. بدین ترتیب با تقریب این مقاطع به مربع‌های معادل و به‌کارگیری روش جمع آثار قوا، ظرفیت پیچشی آنها محاسبه خواهد شد [۲۸]. تنش برشی اسمی τ و مدول اینرسی پیچشی از روابط زیر محاسبه می‌گردد.

$$\tau = T / W_{sec} \quad (17)$$

$$W_{sec} = \begin{cases} \pi D^3 / 16 & \text{ستون دایره} \\ 0.208 B^3 & \text{ستون مربع} \end{cases} \quad (18)$$

به منظور بهینه‌سازی فرآیند محاسباتی، ضریب مقاومت تسلیم پیچشی اسمی γ_t مطابق رابطه زیر تعریف می‌گردد.

$$\gamma_t = \frac{\tau_{scy}}{f_{scy}} \quad (19)$$

که در رابطه بالا τ_{scy} مقاومت تسلیم اسمی مقاطع مرکب تحت اثر پیچش و f_{scy} نیز مقاومت تسلیم اسمی مقاطع مرکب تحت اثر بار فشاری است. در نهایت پارامتر γ_t با استفاده از روش آنالیز معکوس به دست می‌آید [۲۱-۲۷].

$$\tau_{scy} = \begin{cases} (0.422 + 0.313 \alpha^{2.33}) \zeta^{0.134} f_{scy} & \text{ستون دایره} \\ (0.455 + 0.313 \alpha^{2.33}) \zeta^{0.250} f_{scy} & \text{ستون مربع} \end{cases} \quad (20)$$

$$f_{scy} = \begin{cases} (1.14 + 1.02 \zeta) f_{ck} & \text{ستون دایره} \\ (1.18 + 0.85 \zeta) f_{ck} & \text{ستون مربع} \end{cases} \quad (21)$$

در روابط بالا پارامتر ζ همان اثر محصور شدگی و معادل θ در رابطه (۱) می‌باشد. در ادامه شاخص مقاومت SI مقاطع مرکب از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$SI = \begin{cases} 1.294 + 0.297 \ln(\zeta) & \text{ستون دایره} \\ 1.431 + 0.242 \ln(\zeta) & \text{ستون مربع} \end{cases} \quad (22)$$

در نهایت ظرفیت باربری پیچشی مقطع مرکب با استفاده از روابط (۱۸)، (۲۰) و (۲۲) به شکل زیر محاسبه می‌گردد.

$$T_u = SI \tau_{scy} W_{sec} \quad (23)$$

به منظور انجام مطالعات ارزیابی ظرفیت پیچشی و اعتبارسنجی روابط پیشنهادی، سه نمونه آزمایشگاهی معتبر از مطالعات پیشین انتخاب شدند. این مجموعه شامل دو نمونه مرجع از پژوهش هان و همکاران [۲۸] و یک نمونه شاخص از مطالعه چن [۲۹] می‌باشد که مشخصات هندسی و مکانیکی آنها به تفصیل در جدول ۳ ارائه گردیده است. انتخاب این نمونه‌های تجربی معیار، امکان ارزیابی هدفمند ظرفیت باربری پیچشی و اعتباربخشی به مدل‌های تحلیلی را در بخش‌های آتی فراهم می‌آورد. نتایج محاسبات ظرفیت باربری پیچشی نهایی برای این مدل‌ها براساس روابط (۱۸) تا (۲۴) نیز در جدول ۴ ارائه گردیده است.

جدول ۳: مشخصات نمونه‌های مورد مطالعه تحت اثر لنگر پیچشی

مطالعه	مدل ستون مرکب	$D \times t \times L$ (mm)	مقاومت نهایی جدار فولادی f_y (MPa)	مقاومت فشاری بتن f_c (MPa)
هان و همکاران [۲۸]	CH35	$139.8 \times 3.5 \times 1000$	۳۲۲.۹	۳۶.۳
هان و همکاران [۲۸]	CH45	$139.8 \times 4.5 \times 1000$	۳۴۸.۲	۳۱.۸۳
چن [۲۹]	C216	$216.3 \times 4.5 \times 1620$	۳۶۲	۳۲.۸

جدول ۴: نتایج محاسبات ظرفیت باربری پیچشی ستون‌های مورد مطالعه

مدل ستون	A_c (mm ²)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	f_{ck} (MPa)	θ	f_{scy} (MPa)	τ_{scy} (MPa)	SI	W_{sec} (mm ³)	T_u (KN.m)
CH35	۱۲۸۴۵/۶	۱۴۹۸/۶	۳۲۲/۹	۲۴/۳	۱/۴۳	۶۳/۳۷	۲۸/۱۹	۱/۳۹	۵۳۶۴۷۶/۹	۲۱۱/۰۴
CH45	۱۳۴۳۷/۱	۱۹۱۲/۷	۳۴۸/۲	۲۱/۳۱	۲/۳۲	۷۴/۸۴	۳۵/۶	۱/۵۲	۵۳۶۴۷۶/۹	۲۹/۰۶
C216	۳۳۷۴۴/۱	۲۹۹۴/۲	۳۶۲/۰	۳۲/۸	۰/۹۸	۷۰/۱۵	۲۹/۶	۱/۲۸	۱۹۸۷۰۰۶/۰	۷۵/۷۸

۳- توسعه مدل عددی و صحت‌سنجی

این بخش به توسعه روش مدل‌سازی اجزای محدود ستون‌های فولادی پر شده با بتن با مقاطع L و T شکل تحت شرایط بارگذاری مختلف در نرم‌افزار آباکوس^۶ [۳۰] اختصاص دارد. در مرحله اول، روش پیشنهادی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود برای ستون‌های L و T شکل تحت بار محوری فشاری اعتبارسنجی می‌شود. در مرحله دوم، با توجه به فقدان مطالعات تجربی بر روی رفتار این ستون‌ها تحت بارگذاری پیچشی و ترکیبی (محوری-پیچشی) در ادبیات فنی، از نتایج پژوهش‌های معتبر بر روی ستون‌های دایره‌ای و مربعی به عنوان مبنا استفاده می‌شود. بدین ترتیب، ابتدا مدل‌های عددی ستون‌های دایره‌ای تحت بار پیچشی توسعه یافته و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد تا صحت روش مدل‌سازی در پیش‌بینی ظرفیت باربری پیچشی تأیید شود.

۳-۱- پیکربندی مدل اجزای محدود

در این مطالعه، پوسته فولادی و سخت‌کننده‌ها به صورت المان‌های پوسته‌ای^۷ و هسته بتنی به صورت المان‌های حجمی^۸ مدل‌سازی شدند، در حالی که صفحات انتهایی به عنوان اجسام صلب^۹ تعریف گردیده‌اند. فرآیند سرهم‌بندی با مدل‌سازی یکپارچه پوسته فولادی و سخت‌کننده‌ها آغاز شد، سپس هسته بتنی درون پوسته فولادی قرار داده شد. برای تکمیل سیستم، صفحه سخت‌کننده بالایی به منظور اعمال بارگذاری محوری و صفحه پایینی برای ایجاد شرایط تکیه‌گاهی نصب گردیدند. شرایط مرزی شامل صفحه پایینی به صورت کامل

^۶ ABAQUS

^۷ Shell

^۸ Solid

^۹ Rigid Body

گیردار^{۱۰} تعریف شد و تمامی درجات آزادی ($U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$) در آن مقید گردید. برای صفحه بالایی، یک نقطه مرجع^{۱۱} تعریف و سپس به صفحه کویل^{۱۲} گردید. لازم به ذکر است که در این نقطه، برای تحلیل‌های مختلف، درجات آزادی لازم بسته به نوع بارگذاری (محوری، پیچشی یا ترکیبی) کنترل شد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در این پیکربندی نهایی، پوسته فولادی با ایجاد اثر محصورکنندگی بر روی بتن هسته و سخت‌کننده‌ها با به تأخیر انداختن کماتش موضعی، به صورت همزمان منجر به افزایش ظرفیت باربری کل سیستم می‌شوند.

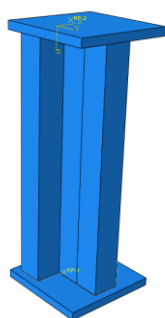
۳-۲- مدل‌سازی مصالح فولاد و بتن

در این پژوهش، از مدل آسیب خمیری بتن^{۱۳} در نرم‌افزار آباکوس [۳۰] برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن استفاده شده است. این مدل پیشرفته که مبتنی بر مکانیزم‌های گسیختگی ترک‌خوردگی کششی و خردشدگی فشاری فرمول‌بندی شده است [۳۱ و ۳۲]، قادر به پیش‌بینی رفتار پیچیده بتن از طریق ترکیب آسیب الاستیک ایزوتروپ با پلاستیسیته فشاری و کششی می‌باشد. این مدل برای تحلیل‌های دینامیکی، بارگذاری‌های یک‌طرفه و شرایط چرخه‌ای بهینه شده است [۳۳ و ۳۴]. همچنین پارامترهای الاستیک شامل مدول الاستیسیته و ضریب پواسون مطابق با مقادیر آزمایشگاهی یا روابط پیشنهادی آیین‌نامه بتن آمریکا [۳۵] تعیین گردیده است. رفتار غیرخطی فشاری بتن از طریق تعریف پارامتر آسیب فشاری (d_c) در ناحیه نرم‌شدگی منحنی تنش-کرنش مدل‌سازی شده است. نرم‌افزار به صورت خودکار کرنش پلاستیک (ϵ_c^{pl}) را بر اساس رابطه (۲۴) محاسبه می‌نماید که در آن σ_c تنش فشاری و E_0 مدول الاستیسیته اولیه است. پارامتر آسیب فشاری نیز مطابق رابطه (۲۵) از نسبت تفاضل تنش نهایی σ_{cu} و تنش موجود بتن σ_c به تنش نهایی تعیین می‌گردد [۳۶]. شکل ۴-الف مشخصه‌های کامل منحنی تنش-کرنش فشاری بتن همراه با پارامترهای آسیب را نمایش می‌دهد.

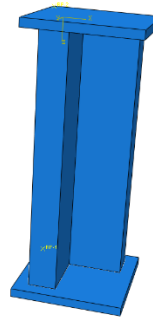
$$\epsilon_c^{pl} = \epsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (24)$$

$$d_c = \frac{\sigma_{cu} - \sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad (25)$$

پارامترهای مکمل مدل شامل زاویه اتساع (ψ) با دامنه ۳۰ تا ۴۲ درجه برای توصیف اثر بلندشدگی برشی [۳۷-۳۹] و پارامتر ویسکوزیته ($\mu=0.001$) برای بهبود همگرایی عددی تعیین شده‌اند. مقادیر نهایی پارامترهای پلاستیسیته از جمله زاویه اتساع (۳۰ درجه)، خروج از مرکزیت (۰/۱)، نسبت تنش (۱/۱۶) و مدول بالک (۰/۶۶) در نظر گرفته شده است. رفتار فولاد به صورت الاستو-پلاستیک دوطبقی با سخت‌شدگی پس از تسلیم مدل‌سازی شده است. در مطالعه حاضر، منحنی تنش-کرنش فولاد مطابق با پژوهش‌های مرجع [۱۲ و ۴۰] و مطابق شکل ۴-ب تعریف شده است که برای ستون‌های فولادی پر شده با بتن با مقاطع خاص توسعه یافته‌اند.



ب) ستون T شکل



الف) ستون L شکل

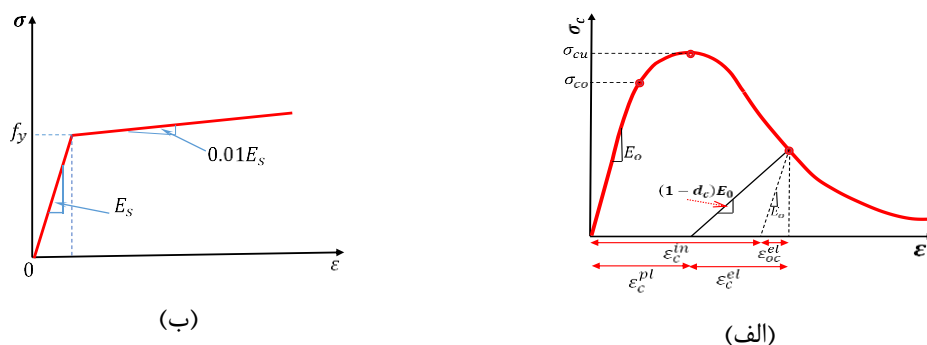
شکل ۳: نمایش ستون‌های مرکب مدل‌سازی شده در نرم افزار

¹⁰ ENCASTRE

¹¹ Reference Point

¹² Coupling

¹³ Concrete Damage Plasticity



شکل ۴: الف) رابطه‌ی بین تنش-کرنش فشاری بتن [۳۶] ب) منحنی فولاد برای مدل شبیه سازی شده المان محدود [۱۲ و ۴۰]

۳-۳- نوع المان و مش بندی

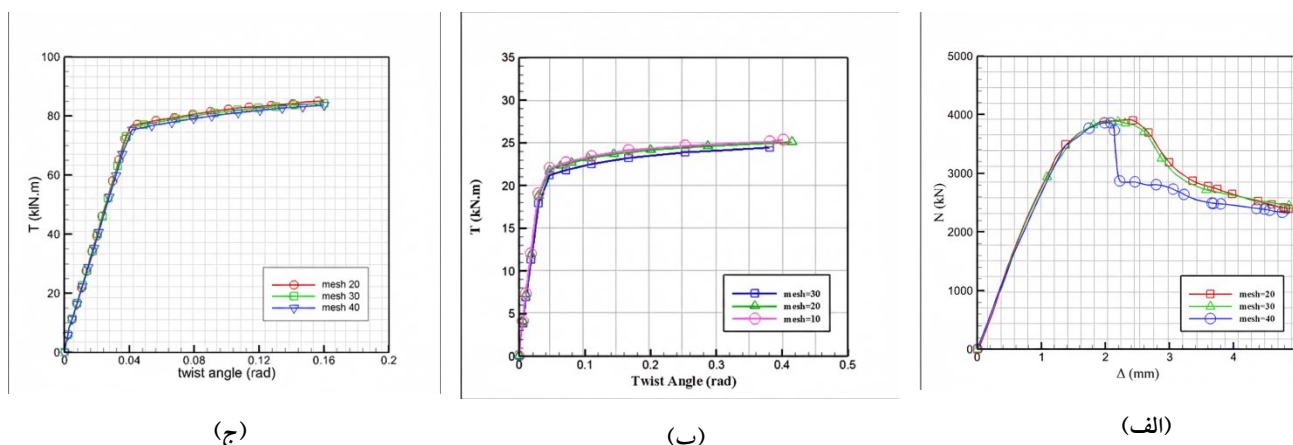
در این پژوهش از دو نوع المان استاندارد برای مش بندی سیستم استفاده شده است. برای مدلسازی هسته بتنی و صفحات سخت کننده از المان حجمی C3D8R (هشت گرهی با انتگرال گیری کاهش یافته) بهره گرفته شده است. این المان از خانواده المان های مرتبه اول با درون یابی خطی بوده و دارای سه درجه آزادی در هر گره (انتقال در جهتهای x ، y و z) می باشد. برای مدلسازی پوسته فولادی و سخت کننده های عمودی از المان پوسته ای S4R (پوسته چهار گرهی با انتگرال گیری کاهش یافته) استفاده گردیده است. این المان که آن نیز از نوع مرتبه اول محسوب می شود، دارای شش درجه آزادی در هر گره (سه انتقالی و سه چرخشی) می باشد. توزیع تراکم مش بندی به صورت غیر یکنواخت بوده و در نواحی با تمرکز تنش بالا (مانند اتصالات و محل سخت کننده ها) از مش ریزتر (۲۰-۱۵ میلی متر) و در سایر نواحی از مش درشت تر (۴۰-۳۰ میلی متر) استفاده شده است. این رویکرد ضمن حفظ دقت محاسباتی، از پیچیدگی های غیر ضروری مدل می کاهد

۳-۴- بار گذاری و آنالیز حساسیت مش بندی

در مازول Step از حل گر^{۱۴} پویای صریح^{۱۵} برای تمامی تحلیل ها استفاده شد. بار محوری به صورت فشار یکنواخت بر سطح صفحه بالایی و بار پیچشی به صورت جابجایی زاویه ای به نقطه مرجع صفحه بالایی اعمال گردید. در مطالعات اجزای محدود، انتخاب اندازه مناسب مش از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که دقت نتایج و کارایی محاسباتی را به طور همزمان تحت تأثیر قرار می دهد. در این پژوهش، بررسی حساسیت مش برای ستون های L، T و دایره ای با تحلیل ابعاد مختلف مش انجام شد. برای ستون L70، مقایسه ابعاد مش ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی متر در شکل ۵-الف نشان داد که مش ۳۰ میلی متر با توجه به همگرایی مناسب نتایج و زمان تحلیل بهینه، بهترین گزینه است. این اندازه برای تمامی مدل های L و T شکل انتخاب شد تا از انطباق مناسب مش بندی اجزای مختلف و بهبود همگرایی اطمینان حاصل شود. در مورد ستون های دایره ای شامل نمونه CH35 و مدل C216، مقایسه مش های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ میلی متر در شکل های ۵-ب و ۵-ج نشان داد که اختلاف نتایج بین مش های ۱۰ و ۲۰ میلی متر ناچیز است، لذا مش ۲۰ میلی متر به عنوان اندازه بهینه انتخاب گردیده است. این انتخاب ها بر اساس توازن بین دقت نتایج و کارایی محاسباتی صورت گرفته اند.

¹⁴ Equation Solver

¹⁵ Dynamic Explicit



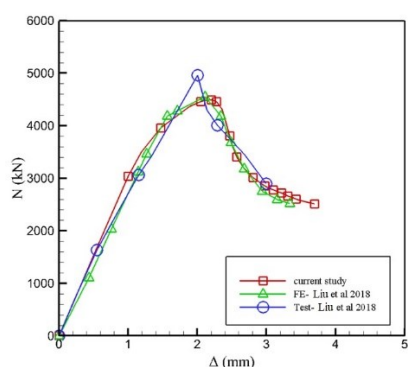
شکل ۵: آنالیز حساسیت مش بندی (الف) مدل L70 تحت بار محوری (ب) مدل CH35 تحت بار پیچشی (ج) مدل C216 تحت بار پیچشی

۳-۵- صحت سنجی

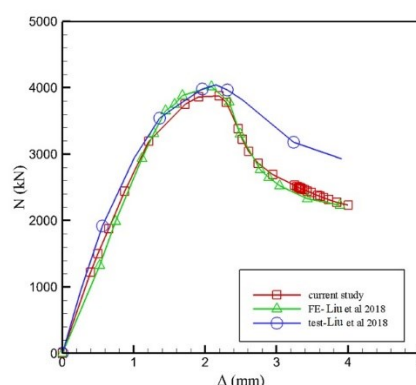
در تحقیق حاضر به دلیل عدم دسترسی به امکانات آزمایشگاهی و همچنین وجود داده‌های آزمایشگاهی در ادبیات فنی، جهت صحت‌سنجی مدل‌های عددی از نتایج آزمایشگاهی پژوهش‌های گذشته استفاده شده است. با توجه به اینکه در این مطالعه سه نوع مدل عددی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، بنابراین صحت سنجی نتایج بدست آمده در این تحقیق نیز در سه مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله اول ستون‌های L و T شکل تحت بارگذاری محوری با استفاده از نتایج مطالعات آزمایشگاهی لیو و همکاران [۱۲] مورد اعتبار سنجی قرار می‌گیرند. در مرحله دوم با توجه به اینکه هدف مطالعه‌ی حاضر بررسی رفتار اینگونه ستون‌ها تحت اثر لنگرهای پیچشی بود، تصمیم گرفته شد تا برای اطمینان از صحت مدل‌ها اقدام به صحت‌سنجی ستون‌های مرکب تحت اثر بارگذاری پیچشی صورت گیرد. در همین راستا از مطالعات بک و کیومیا [۲۷]، هان و همکاران [۲۸] استفاده شد و ستون‌های ایشان مدل‌سازی و با نتایج کار ایشان مقایسه گردید. در مرحله سوم اقدام به مدل‌سازی و صحت‌سنجی ستون‌های مرکب دایره‌ای و مربعی تحت اثر همزمان بار محوری و لنگر پیچشی شد. به این ترتیب مقدمات لازم جهت شبیه‌سازی رفتار ستون‌های L و T تحت اثر همزمان بار محوری و لنگر پیچشی فراهم شد.

۳-۵-۱- ستون‌های L و T شکل تحت بار محوری

لیو و همکاران [۱۲] در پژوهش خود ۶ ستون L شکل و ۱۲ ستون T شکل مرکب را طبق استاندارد مرجع [۴۱] تحت بارگذاری محوری آزمایشگاهی و همچنین مدل‌سازی اجزا محدود مورد ارزیابی قرار دادند. جزئیات ۶ مدل انتخابی از این مطالعه شامل ابعاد و مصالح فولادی و بتنی در جدول ۱ ارائه گردیده است. نمونه‌ها دارای ارتفاع مقیاس شده ۹۰۰ میلی‌متر هستند. شکل‌های ۶-الف و ۷-الف وضعیت نصب ستون و حسگرها را در مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در بالا و پایین ستون، صفحه‌هایی صلب برای شبیه‌سازی شرایط مرزی، به طور ثابت قرار داده شده است که در آن، صفحه‌ی صلب پایین نمونه، بالا رانده می‌شود و صفحه‌ی صلب بالای آن بدون حرکت نگه داشته می‌شود. همزمان با اعمال نیرو توسط جک هیدرولیکی نمودارهای نیرو-جابجایی از نمونه‌ها استخراج گردیده است که در مطالعه حاضر برای صحت‌سنجی از این نمودارها استفاده شده است. روش اعتبارسنجی شامل شبیه‌سازی عددی شرایط آزمایشگاهی با اعمال جابجایی به جای نیرو بود که امکان بررسی رفتار پس از نقطه بیشینه بار را فراهم می‌کرد. به عنوان نمونه مقایسه نتایج ۴ مدل در شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که مدل حاضر در پیش‌بینی سختی، بار نهایی و جابجایی متناظر با دقت بالایی با نتایج آزمایشگاهی لیو و همکاران [۱۲] مطابقت دارد. اختلاف جزئی مشاهده شده در ناحیه پس از نقطه بیشینه عمدتاً ناشی از پایداری کمتر نمونه‌های آزمایشگاهی در این مرحله است. جدول ۵ مقایسه ظرفیت باربری محوری تمامی مدل‌های مورد بررسی را بین نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی مطالعه لیو و همکاران [۱۲] و مطالعه عددی حاضر نشان می‌دهد. اختلاف کم این مقادیر (کمتر از ۵٪) تأییدکننده دقت و قابلیت اطمینان مدل اجزا محدود توسعه‌یافته در این مطالعه است. این تطابق خوب به ویژه در پیش‌بینی رفتار غیرخطی و نقطه تسلیم سازه حائز اهمیت است.



ج) ستون نمودار نیرو-جابجایی ستون L70

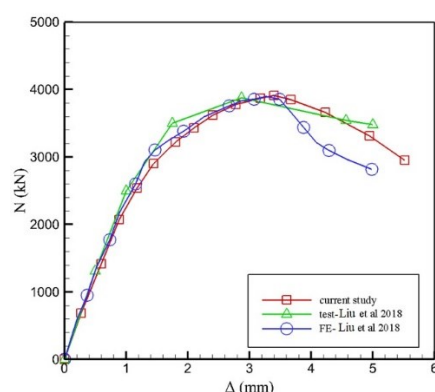


ب) ستون نمودار نیرو-جابجایی ستون L59

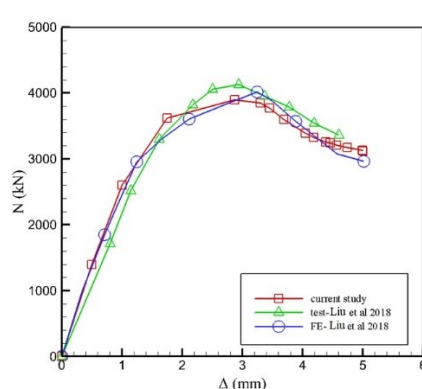


الف) پیکره‌بندی آزمایشگاهی

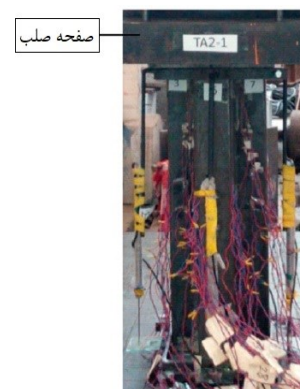
شکل ۶: پیکره‌بندی آزمایشگاهی و مقایسه نتایج عددی مطالعه حاضر و مطالعه لیو و همکاران [۱۲] برای دو نمونه از ستون‌های L شکل



ج) ستون نمودار نیرو-جابجایی ستون T-200-3-37-S



ب) ستون نمودار نیرو-جابجایی ستون T-200-3-43-S

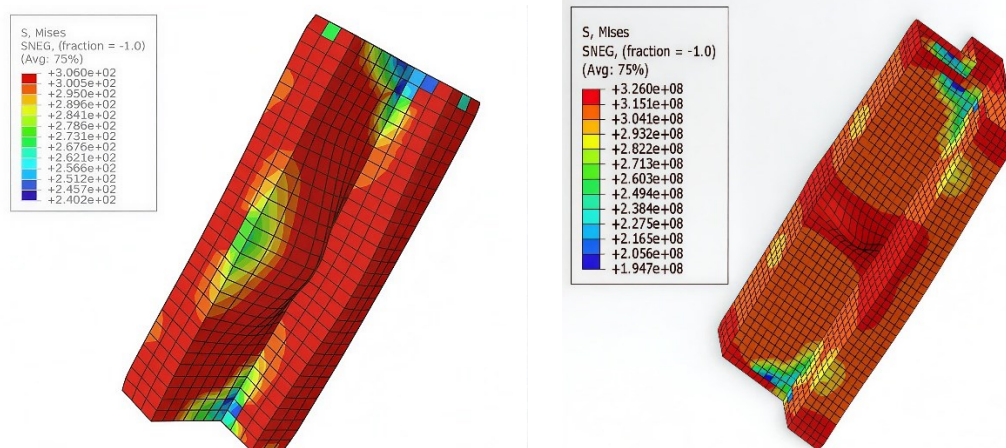


الف) پیکره‌بندی آزمایشگاهی

شکل ۷: پیکره‌بندی آزمایشگاهی و مقایسه نتایج عددی مطالعه حاضر و مطالعه لیو و همکاران [۱۲] برای دو نمونه از ستون‌های T شکل

جدول ۵: مقایسه‌ی ظرفیت باربری ستون‌های L شکل و ستون‌های T شکل

نام نمونه	میانگین ظرفیت فشاری سه نمونه آزمایشگاهی [۱۲] (KN)	ظرفیت فشاری مدل عددی لیو و همکاران [۱۲] (KN)	Δu مدل عددی لیو و همکاران [۱۲] (mm)	ظرفیت فشاری مدل عددی مطالعه حاضر (KN)	Δu مدل عددی مطالعه حاضر (mm)	ظرفیت فشاری مدل عددی مطالعه حاضر / ظرفیت فشاری نمونه آزمایشگاه [۱۲] (%)	ظرفیت فشاری مدل عددی مطالعه حاضر / ظرفیت فشاری مدل عددی [۱۲] (%)	درصد خطای نسبی نسبت به مدل عددی [۱۲] (%)	درصد خطای نسبی به مدل آزمایشگاهی [۱۲] (%)
L59	۴۰۸۶	۴۰۱۶/۰۰	۲/۰۸	۳۸۷۴/۳۲	۲/۱۹	۰/۹۴	۰/۹۶	۳/۵۳	۵/۱۸
L70	۴۶۶۳	۴۵۵۳/۰۰	۲/۱۲	۴۴۹۵/۰۳	۲/۲۰	۰/۹۶	۰/۹۸	۱/۲۷	۳/۶۰
T-200-3- 37-N	۳۰۰۵	۲۹۸۷/۵۵	۱/۹۰	۲۷۷۳/۰۲	۱/۷۵	۰/۹۲	۰/۹۳	۷/۱۸	۷/۷۲
T-200-3- 37-S	۳۸۵۳	۳۹۰۰/۰۵	۳/۲۶	۳۹۱۰/۰۰	۳/۴۰	۱/۰۱	۱/۰۰۲	۰/۲۵	۱/۴۸
T-200-3- 43-S	۴۱۰۵	۴۰۱۷/۰۰	۳/۲۴	۳۹۰۰/۰۰	۲/۸۸	۰/۹۵	۰/۹۷	۲/۹۱	۴/۹۹
T-200-2- 37-S	۳۰۷۲	۳۰۵۰/۰۰	۳/۳۴	۲۸۶۵/۳۴	۲/۴۶	۰/۹۳	۰/۹۴	۶/۰۶	۶/۷۳



(ب) تغییر شکل فولاد در مطالعه‌ی عددی حاضر

(الف) تغییر شکل فولاد پوسته در مطالعه عددی لیو و همکاران [۱۲]

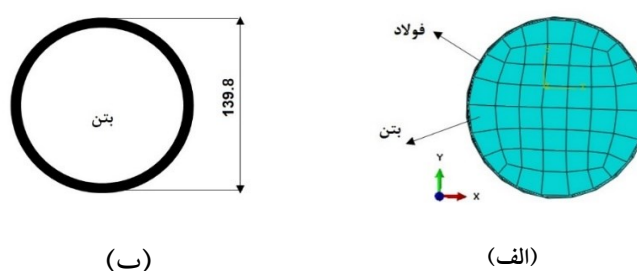
شکل ۸: تغییر شکل ستون مرکب T-200-3-37-N

به عنوان نمونه شکل ۸ به صورت جامع رفتار کمانشی نمونه T-200-3-37-N را در لحظه رسیدن به بار محوری بیشینه نشان می‌دهد. شکل ۸-الف (با واحد پاسکال) و شکل ۸-ب (با واحد مگاپاسکال) مکانیزم پیشرونده گسیختگی را به وضوح آشکار می‌سازد: ابتدا ترک خوردگی بتن هسته در ناحیه جان به عنوان نقطه تسلیم اولیه ایجاد می‌گردد، سپس این آسیب از طریق انتقال تنش به پوسته فولادی منتقل شده و در نهایت منجر به کمانش موضعی فولاد در مناطق بحرانی می‌گردد. این توالی رفتار، تعامل پیچیده بین بتن هسته و پوسته فولادی را در شرایط بارگذاری حادی به خوبی نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است تفاوت مقیاس‌های تنش در دو شکل، امکان بررسی همزمان الگوی کلی توزیع تنش در مقیاس میکرو و تحلیل دقیق نقاط بحرانی در مقیاس ماکرو را فراهم نموده است.

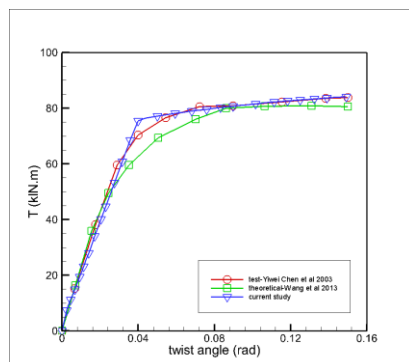
۳-۵-۲- ستون‌های دایره‌ای تحت اثر لنگر پیچشی

در این بخش، صحت‌سنجی دو نمونه ستون تحت اثر لنگر پیچشی خالص بر اساس پژوهش هان و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۲۸] و یک نمونه ستون دایروی مطابق با مطالعه چن [۲۹] انجام شده است که مشخصات آنها در جدول ۳ ارائه گردیده است. ابعاد و مدل مش‌بندی نمونه‌ها در شکل ۹ نمایش داده شده است. در شبیه‌سازی انجام‌شده، یک انتهای ستون به صورت گیردار مدلسازی شد و در انتهای دیگر چرخش اعمال گردید. همچنین، در هر دو انتها از صفحات با سختی بالا استفاده شد که در نرم‌افزار آباکوس [۳۰] با قید جسم صلب^{۱۶} تعریف شده‌اند. برای مدلسازی تماس بین فولاد و بتن، از ماژول اندرکنش^{۱۷} و گزینه تماس بین دو سطح^{۱۸} در هر سه نمونه بهره گرفته شد تا تعامل بین این دو ماده به صورت دقیق شبیه‌سازی شود. علاوه بر این، برای اتصال صفحه بالایی به ستون، از قید اتصال^{۱۹} استفاده شد تا اتصال کاملاً صلب، مشابه شرایط جوشکاری، در نظر گرفته شود. نمودارهای لنگر پیچشی-زاویه چرخش ستون‌های CH35، CH45 و C216 در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی تحت بارگذاری پیچشی خالص، همخوانی بسیار خوبی با مقادیر تجربی نشان می‌دهد. این تطابق بالا، توانایی مدل عددی توسعه‌یافته در پیش‌بینی دقیق رفتار پیچشی و برآورد ظرفیت باربری ستون‌های مرکب را به خوبی تأیید می‌کند.

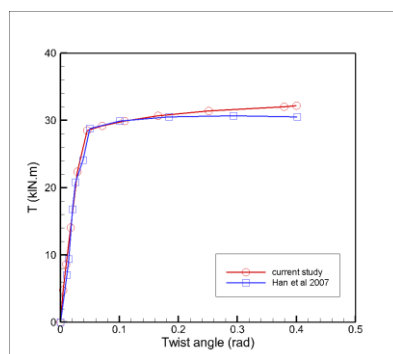
¹⁶ Rigid Body¹⁷ Interaction¹⁸ Surface-to-Surface¹⁹ Tie



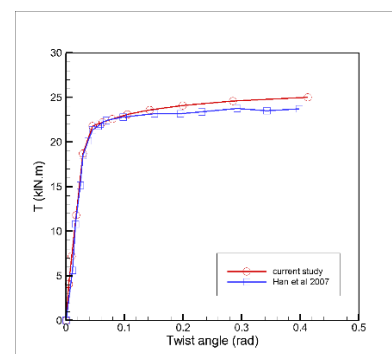
شکل ۹: نمایش ابعاد نمونه‌ی هان و همکاران [۲۸]



ج) نمودار لنگر پیچشی-چرخش ستون C216



ب) نمودار لنگر پیچشی-چرخش ستون CH45

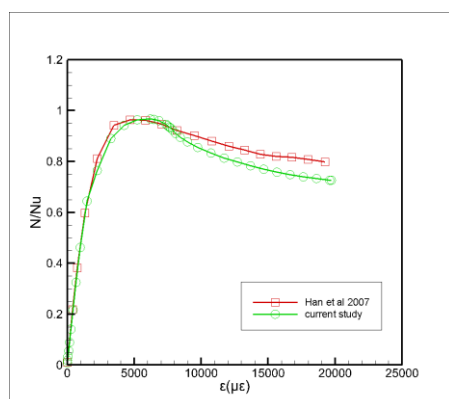


الف) نمودار لنگر پیچشی-چرخش ستون CH35

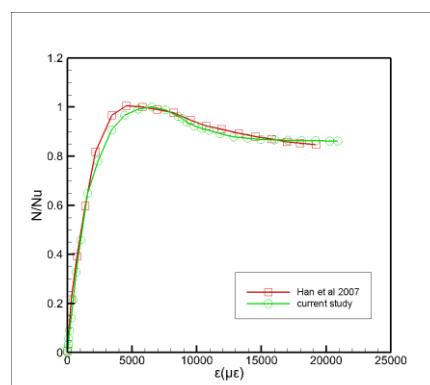
شکل ۱۰: نمودارهای صحت سنجی مدل‌های تحت لنگر پیچشی

۳-۵-۳- ستون‌های دایره‌ای و مربعی تحت اثر ترکیب بار محوری و لنگر پیچشی

در بخش پایانی صحت‌سنجی، به ارزیابی مدل عددی توسعه‌یافته در شبیه‌سازی رفتار ستون‌های دایره‌ای و مربعی تحت اثر ترکیبی بارهای محوری و پیچشی پرداخته‌ایم. این بررسی با استناد به مطالعات هان و همکاران [۴۲] انجام شده است. پس از تأیید صحت مدل در تحلیل بارگذاری محوری و لنگر پیچشی خالص در دو بخش پیشین، در این مرحله توانایی مدل در پیش‌بینی رفتار سازه‌ها تحت بارگذاری ترکیبی بار محوری و لنگر پیچشی مورد ارزیابی قرار گرفته است. این رویکرد گام به گام، اعتبار و دقت روش مدلسازی عددی ارائه شده را در شرایط بارگذاری مختلف به صورت جامع مورد تأیید قرار می‌دهد. در این تحقیق، از تعدادی از داده‌های آزمایشگاهی هان و همکاران [۴۲] برای ستون‌های دایره‌ای و مربعی به عنوان مرجع صحت‌سنجی استفاده شد. با توجه به شرح کامل مدل‌ها در منبع به منظور پرهیز از تکرار و رعایت اختصار، از تکرار جزئیات خودداری گردید. لازم به ذکر است در نام‌گذاری نمونه‌ها، حرف C به ستون با مقطع دایره‌ای اشاره دارد و حرف S نشان دهنده ستون با مقطع مربعی است. همچنین روش بارگذاری در نمونه‌های صحت سنجی شده این مطالعه به نحوی است که ابتدا بار محوری و سپس لنگر پیچشی در گام بعدی به مدل عددی اعمال می‌گردد. نمودارهای صحت‌سنجی ستون‌های دایره‌ای و مربعی به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده‌اند که در آن محور x نشان دهنده کرنش نسبی $\mu\epsilon = \epsilon \times 10^{-6}$ است. نتایج نشان‌دهنده تطابق مناسب بین مدل‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی است. از شکل ۱۳ می‌توان مشاهده کرد که تمرکز تنش در ستون‌های مربعی در گوشه‌های مقطع اتفاق می‌افتد.

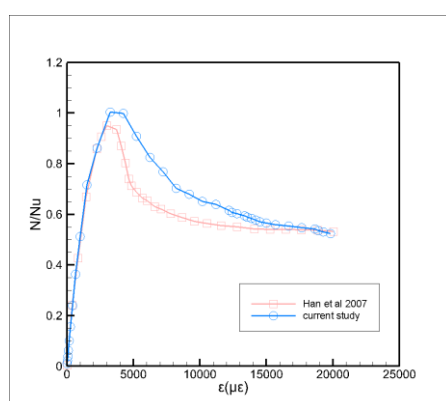


ستون C-2 (ب)

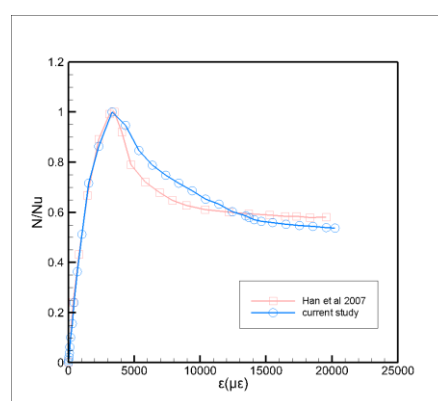


ستون C-1 (الف)

شکل ۱۱: نمودارهای ستون دایره‌ای تحت بار محوری و لنگر پیچشی

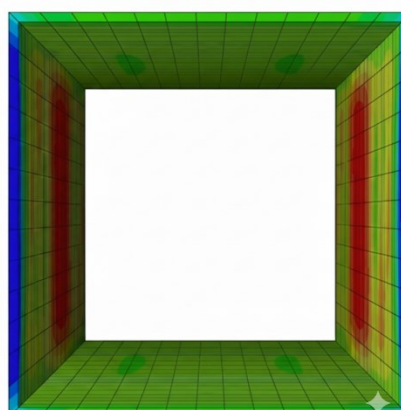
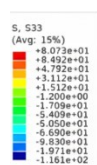


ستون S-2 (ب)

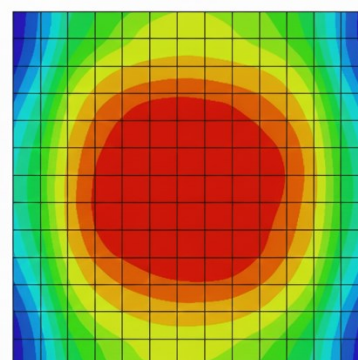
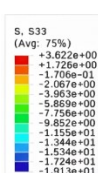


ستون S-1 (الف)

شکل ۱۲: نمودارهای ستون مربعی تحت بار محوری و لنگر پیچشی



(ب)



(الف)

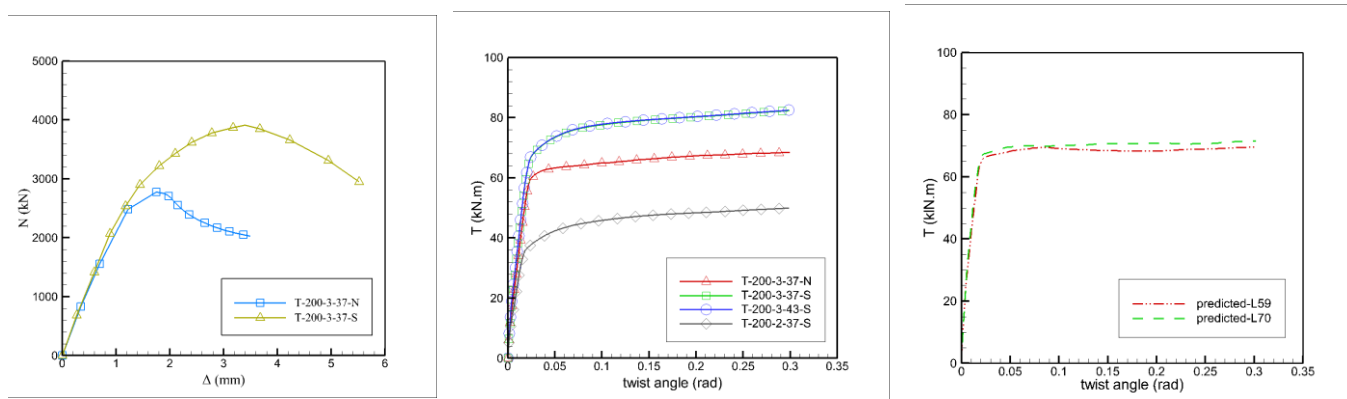
شکل ۱۳: توزیع تنش در نمونه‌ی مربعی شکل C1 (الف) توزیع تنش در هسته بتن (ب) توزیع تنش در جدار فولادی

۴- نتایج تحلیل غیرخطی مدل‌های مورد مطالعه

در این بخش، رفتار ستون‌های مرکب L و T شکل تحت لنگر پیچشی با استفاده از روش مدل‌سازی تأییدشده در بخش صحت‌سنجی مورد تحلیل قرار گرفته است. نمودارهای رابطه بین زاویه چرخش بر حسب رادیان و لنگر پیچشی بر حسب کیلو نیوتن متر تا نقطه گسیختگی و ظرفیت نهایی پیچشی ترسیم شده است. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده، یک رابطه رگرسیونی خطی برای تخمین ظرفیت پیچشی این ستون‌ها توسعه داده شده است.

۴-۱- مقایسه نتایج ستون‌های L و T شکل

شکل ۱۴-الف مقایسه رفتار دو ستون L59 و L70 را نشان می‌دهد که تنها در مقاومت بتن با هم تفاوت دارند. نتایج حاکی از آن است که مقاومت بتن تأثیر ناچیزی بر ظرفیت پیچشی دارد، در حالی که پیشتر مشاهده شد همین پارامتر تأثیر محسوسی بر رفتار فشاری ستون‌ها دارد. این الگوی رفتاری در ستون‌های T شکل نیز تکرار می‌شود، به طوری که مقایسه ستون‌های T-200-3-37-S و T-200-3-43-S در شکل ۱۴-ب نشان می‌دهد تفاوت مقاومت بتن تنها موجب تغییرات جزئی در ظرفیت پیچشی شده است. با این حال، مقایسه این ستون‌ها با نمونه T-200-3-37-S که فاقد سخت‌کننده‌های فولادی است، کاهش حدود ۲۵ درصدی ظرفیت پیچشی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۴-ج این یافته با نتایج تحقیقات لیو و همکاران [۱۲] همخوانی دارد و مؤید تأثیر قابل توجه سخت‌کننده‌ها بر افزایش ظرفیت باربری محوری نیز می‌باشد. نهایتاً، ستون T-200-2-37-S به دلیل کاهش همزمان مقاومت فولاد و ضخامت جداره، با افت حدود ۴۷ درصدی ظرفیت پیچشی نسبت به نمونه T-200-3-37-S مواجه شده است. این مشاهدات به وضوح نشان می‌دهد که پارامترهای مرتبط با مشخصات فولاد بر خلاف مشخصات بتن تأثیر تعیین‌کننده‌تری بر رفتار پیچشی حاکم بر ستون‌های مرکب دارند. با توجه به این یافته در بخش‌های بعدی تأثیر هریک از پارامترهای پوسته فولادی شامل ضخامت، مقاومت و استفاده از سخت‌کننده بررسی خواهد شد.



ج) ستون‌های T شکل تحت اثر بار فشاری

ب) ستون‌های T شکل تحت اثر لنگر پیچشی

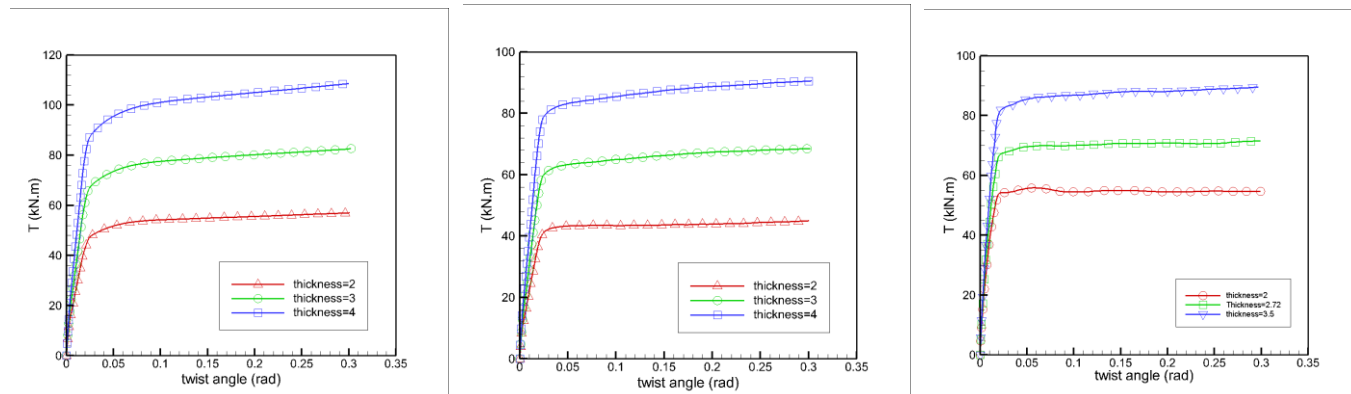
الف) ستون‌های L شکل تحت لنگر پیچشی

شکل ۱۴: مقایسه نتایج نمودارهای ظرفیت پیچشی و ظرفیت فشاری مدل‌های مورد مطالعه

۴-۲- بررسی اثر ضخامت فولاد

برای بررسی تأثیر ضخامت فولاد بر رفتار ستون‌های L و T شکل، مدل‌هایی با ضخامت‌های مختلف فولاد تحلیل شده‌اند. در ستون L70 (شکل ۱۵-الف)، کاهش ضخامت فولاد از ۲/۷۲ به ۰/۷۲ میلی‌متر منجر به تغییرات قابل توجهی در رفتار سازه شده است. به طور مشابه، برای ستون‌های T شکل شامل T-200-3-37-N (شکل ۱۵-ب) و T-200-3-43-S (شکل ۱۵-ج)، تأثیر تغییرات ضخامت فولاد از ۲ تا ۴ میلی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به وضوح نشان می‌دهند که افزایش ضخامت فولاد موجب بهبود معنادار ظرفیت پیچشی می‌شود. به عنوان مثال، در ستون L70 افزایش ضخامت به ۳/۵ میلی‌متر باعث ۲۳/۲ درصد افزایش ظرفیت پیچشی شده، در حالی که کاهش ضخامت به ۲ میلی‌متر منجر به ۲۰/۳ درصد کاهش ظرفیت شده است. این روند در ستون‌های T شکل نیز مشاهده می‌شود.

به طوری که افزایش ضخامت به ۴ میلی متر در نمونه های T-200-3-37-N و T-200-3-43-S به ترتیب ۳۲ و ۳۲/۹ درصد بهبود ظرفیت پیچشی را در پی داشته است. در مقابل، کاهش ضخامت به ۲ میلی متر باعث کاهش ۳۰/۱ تا ۳۲/۹ درصدی ظرفیت پیچشی شده است. این یافته ها بر اهمیت پارامتر ضخامت فولاد در طراحی ستون های مرکب تحت لنگر پیچشی تأکید می کنند.

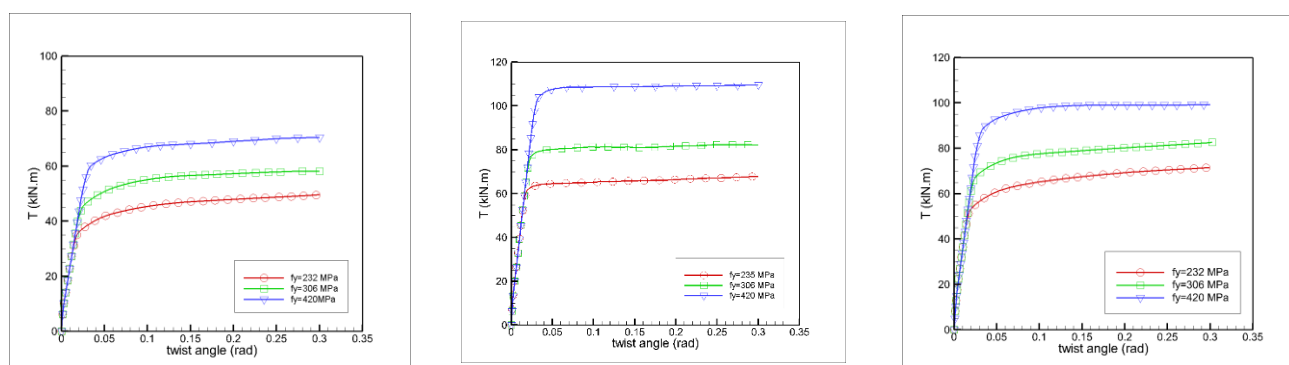


الف) ستون L70

ب) ستون T-200-3-37-N

ج) ستون T-200-3-43-S

شکل ۱۵: مقایسه نتایج نمودارهای ظرفیت پیچشی و ظرفیت فشاری با ضخامت های متفاوت پوسته فولادی



الف) ستون T-200-3-43-S

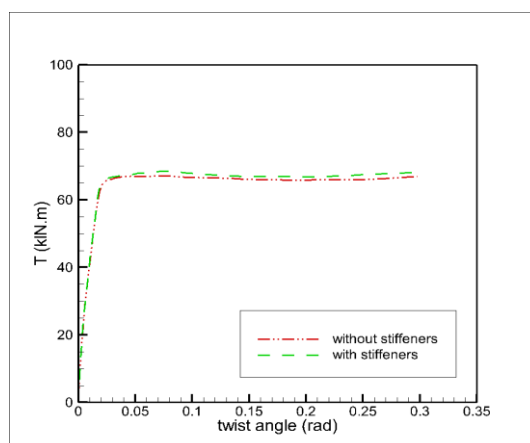
ب) ستون T-200-4-37-N

ج) ستون T-200-2-37-S

شکل ۱۶: مقایسه نتایج نمودارهای ظرفیت پیچشی با مقاومت های متفاوت پوسته فولادی

۴-۳- بررسی اثر مقاومت فولاد

این بخش به بررسی تأثیر مقاومت فولاد به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی بر ظرفیت پیچشی ستون های مرکب پرداخته است. بر اساس آیین نامه مرجع [۴۳] مدل هایی با مقاومت های مختلف فولاد طراحی و تحلیل شده اند. با توجه به شکل های ۱۶-الف و ۱۶-ب نتایج نشان می دهد تغییرات مقاومت فولاد تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت پیچشی دارد، به طوری که افزایش مقاومت از ۳۰۶ به ۴۲۰ مگاپاسکال موجب ۲۷ درصد بهبود در ستون T-200-3-43-S و ۳۴ درصد افزایش در ستون T-200-4-37-N شده است. در مقابل، کاهش مقاومت به ۲۳۲ مگاپاسکال باعث ۱۷ تا ۲۴ درصد کاهش ظرفیت پیچشی گردیده است. مطابق با شکل ۱۶-ج، برای ستون T-200-2-37-S مشخصات اولیه شامل مقاومت ۲۳۲ مگاپاسکال و ضخامت ۲ میلی متر، افزایش مقاومت به ۳۰۶ و ۴۲۰ مگاپاسکال به ترتیب ۲۰/۵ و ۵۰ درصد افزایش ظرفیت پیچشی را نشان می دهد.



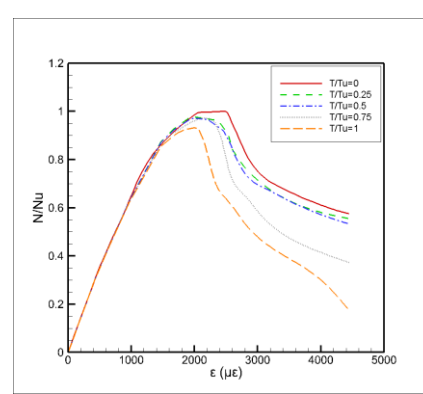
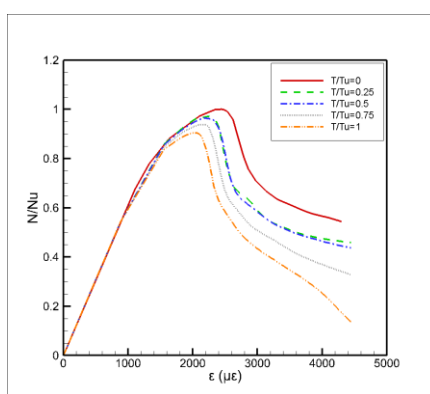
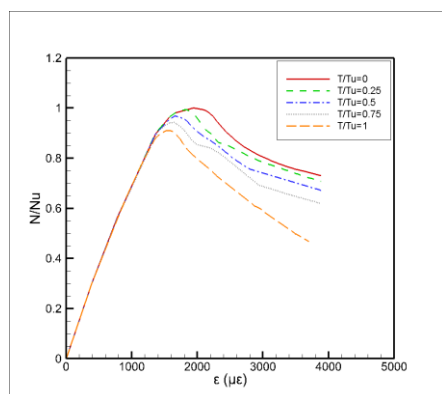
شکل ۱۷: مقایسه نتایج نمودارهای ظرفیت پیچشی ستون L59 با سخت کننده و بدون استفاده از سخت کننده فولادی

۴-۴- بررسی اثر سخت کننده

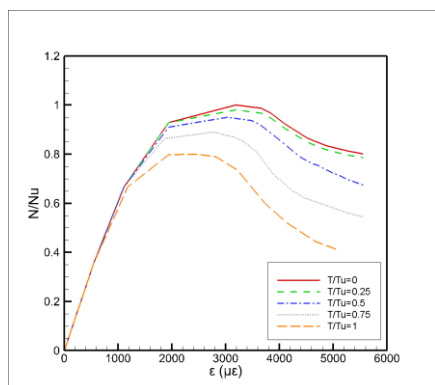
مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از سخت کننده‌های فولادی می‌تواند ظرفیت باربری ستون‌های مرکب را بهبود بخشد. در این راستا، مقایسه‌ای بین رفتار ستون L59 در دو حالت بدون سخت کننده و مجهز به سخت کننده قائم انجام شده است. نتایج حاصل از شکل ۱۷ نشان می‌دهد که حضور سخت کننده قائم تأثیر محسوسی بر ظرفیت پیچشی ستون L59 نداشته و تنها بهبود بسیار جزئی در عملکرد آن مشاهده می‌شود. این در حالی است که همان سخت کننده در ستون‌های T شکل موجب افزایش حدود ۲۵ درصدی ظرفیت پیچشی شده است. این تفاوت رفتاری نشان‌دهنده وابستگی اثر سخت کننده‌ها به هندسه مقطع ستون می‌باشد.

۴-۵- بررسی ستون‌های مرکب تحت اثر ترکیب بار محوری و لنگر پیچشی

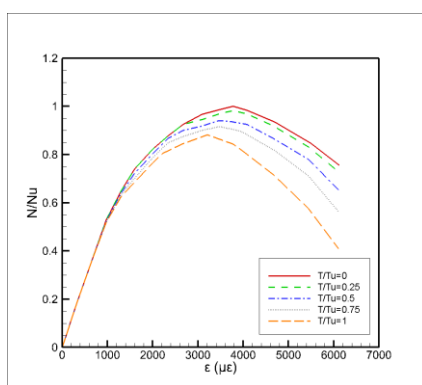
این پژوهش به بررسی رفتار ستون‌های مرکب تحت اثر همزمان بار فشاری و لنگر پیچشی می‌پردازد. مطابق با نتایج هان و همکاران [۴۲] که نشان می‌دهد الگوی بارگذاری تأثیر محسوسی بر رفتار کلی ستون ندارد، در این قسمت از الگوی بارگذاری شامل اعمال همزمان فشار و پیچش استفاده شده است. این انتخاب علاوه بر حفظ دقت نتایج، با ملاحظات زمانی و نیاز به ساده‌سازی نیز سازگار است. شرایط بارگذاری به این صورت اجرا شده است: ستون از یک طرف به صورت گیردار مهار شده و از طرف دیگر تحت ترکیب بار فشاری (به روش کنترل جابجایی) و لنگر پیچشی قرار گرفته است. لنگر پیچشی در چهار مرحله با نسبت‌های مختلفی از حداکثر ظرفیت پیچشی ستون (T/T_u) اعمال شده است. این روش بارگذاری که در شکل ۱۸ نمایش داده شده، امکان ارزیابی دقیق رفتار ستون تحت شرایط بارگذاری ترکیبی را فراهم می‌سازد. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که با وجود تغییرات جزئی در نمودارهای رفتاری، تأثیر الگوی بارگذاری بر پاسخ کلی ستون ناچیز است.



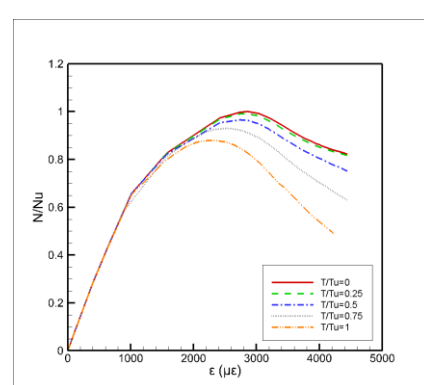
پ) ستون T-200-3-37-N



ب) ستون L70



الف) ستون L59

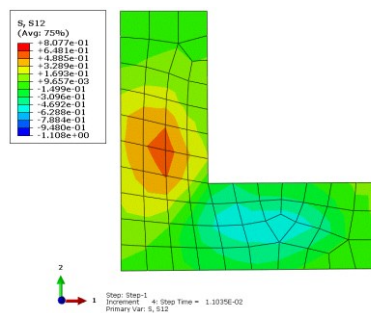
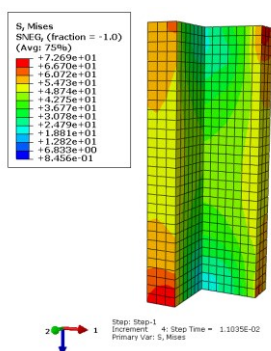


الف) ستون T-200-3-43-S

د) ستون T-200-3-37-S

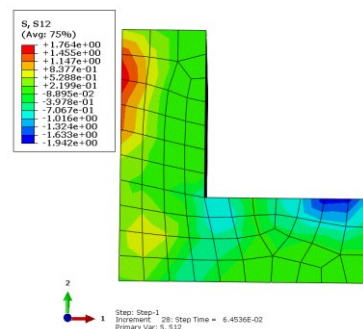
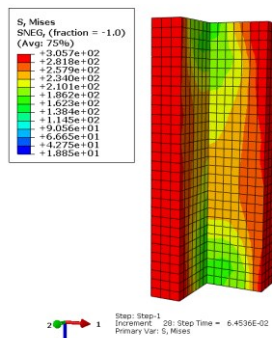
ج) ستون T-200-2-37-S

شکل ۱۸: اثر نسبت‌های مختلف T/T_u بر رابطه ی نیرو-کرنش



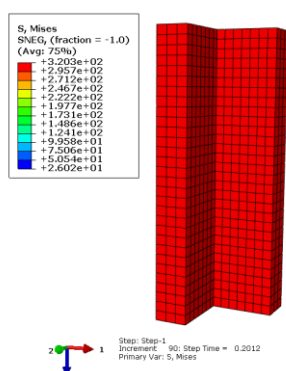
شکل (۱۹-ب): تنش فون مایسز فولاد در مرحله الاستیک

شکل (۱۹-الف): تنش برشی بتن در مرحله الاستیک

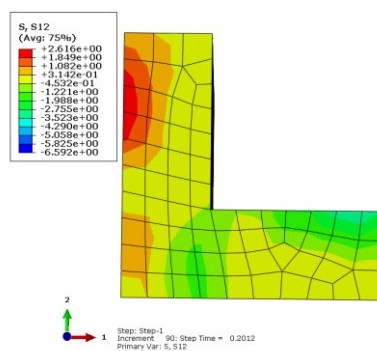


شکل (۱۹-ت): تنش فون مایسز فولاد در مرحله الاستیک

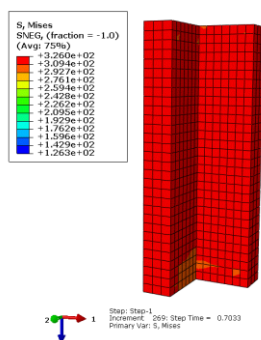
شکل (۱۹-پ): تنش برشی بتن در مرحله الاستیک



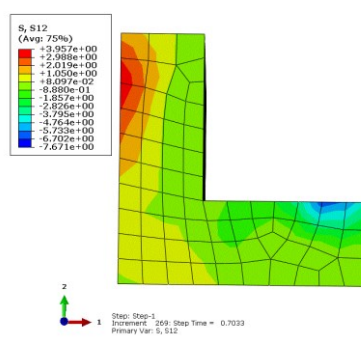
شکل (۱۹-ج): تنش فون مایسز فولاد در مرحله الاستو-پلاستیک



شکل (۱۹-ث): تنش برشی بتن در مرحله الاستو-پلاستیک



شکل (۱۹-ح): تنش فون مایسز فولاد در مرحله سخت شدگی



شکل (۱۹-چ): تنش برشی بتن در مرحله سخت شدگی

شکل ۱۹: توزیع تنش در ستون L59 تحت لنگر پیچشی

۴-۶- مکانیزم خرابی ستون‌ها تحت اثر لنگر پیچشی

در این بخش به عنوان نمونه به تحلیل مکانیزم خرابی ستون مدل L59 تا بیشینه ظرفیت پیچشی پرداخته می‌شود. در مراحل اولیه بارگذاری (شکل‌های ۱۹-الف تا ۱۹-ت)، بتن و فولاد در محدوده الاستیک رفتار کرده و بار را به صورت مستقل تحمل می‌کنند. با تسلیم شدن تدریجی فولاد (شکل ۴-۳۳-ت)، ستون وارد فاز الاستوپلاستیک می‌شود (شکل‌های ۱۹-ث و ۱۹-ج)، که در آن ترک‌خوردگی بتن و افزایش حجم ناشی از آن، منجر به افزایش محصورشدگی توسط لوله فولادی می‌گردد. در این مرحله، تنش برشی با فاصله از مرکز ستون افزایش می‌یابد. در نهایت، با رسیدن به مرحله سخت‌شدگی کرنش (شکل‌های ۱۹-چ و ۱۹-ح)، بتن ترک‌خورده به دلیل محصورشدگی قادر به تحمل لنگر پیچشی بوده و پتانسیل تحمل اضافی ناشی از سخت‌شدگی فولاد نیز ظاهر می‌گردد.

۴-۷- ارائه رابطه برای محاسبه ظرفیت پیچشی ستون‌های T و L شکل با روش رگرسیون خطی

همانگونه که در بخش مبانی نظری اشاره شد، پارامتر اثر محصورشدگی (θ) به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در رفتار ستون‌های فولادی پر شده با بتن شناخته می‌شود. تغییر در مشخصات مصالح (فولاد جداره و بتن هسته) و همچنین ابعاد هندسی سطح مقطع می‌تواند تأثیر معناداری بر این ضریب داشته باشد. از این‌رو، ارائه رابطه‌ای که ظرفیت نهایی پیچشی را بر مبنای ضریب محصورشدگی بیان کند، از جنبه کاربردی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، با بهره‌گیری از روش حداقل مربعات اصلاح‌شده^{۲۰} که نخستین بار توسط فراهانی و اخویسی [۴۴] ارائه شد و سپس توسط پژوهشگرانی همچون نیلسن و همکاران [۴۵] و پالاسیوس و همکاران [۴۶] مورد ارزیابی قرار گرفت، دو رابطه کاربردی برای ظرفیت نهایی باربری پیچشی ستون‌های مرکب با مقاطع T و L شکل توسعه داده شده است.

جزئیات کامل این روش در مراجع مرتبط قابل دسترسی است. شایان ذکر است که روابط پیشنهادی با در نظر گرفتن محدودیت‌های مدل‌های مورد مطالعه حاضر تدوین شده‌اند و بدیهی است گسترش آن‌ها برای مدل‌های متنوع‌تر با هندسه‌های متفاوت در آینده ضروری خواهد بود. در این راستا، ظرفیت پیچشی نمونه‌های ستون T شکل با بررسی تغییرات پارامترهای مختلف ارزیابی شده و خلاصه‌ای از یافته‌های این تحلیل‌ها در جدول ۶ ارائه گردیده است. با انتخاب سری فوریه به عنوان تابع پایه و اعمال الگوریتم روش حداقل مربعات اصلاح‌شده، رابطه زیر برای تخمین ظرفیت نهایی ستون‌های T شکل پیشنهاد می‌گردد که برای مقادیر ضریب محصورشدگی در بازه ۰/۴ تا ۱/۲ معتبر است.

$$T_u = 70.14 - 36.15 \cos(2.55\theta) - 10.19 \sin(2.55\theta) \quad (26)$$

جدول ۷ نیز ظرفیت نهایی باربری پیچشی و همچنین ضریب محصور شدگی مدل‌های مورد مطالعه L شکل را ارائه می‌دهد. رابطه پیشنهادی برای این ستون‌ها نیز طبق رابطه زیر تعریف می‌گردد که در محدوده ضریب محصور شدگی ۰/۲ تا ۰/۵ دارای اعتبار است.

$$T_u = 71.19 + 3.70 \cos(48.92\theta) + 12.72 \sin(48.92\theta) \quad (27)$$

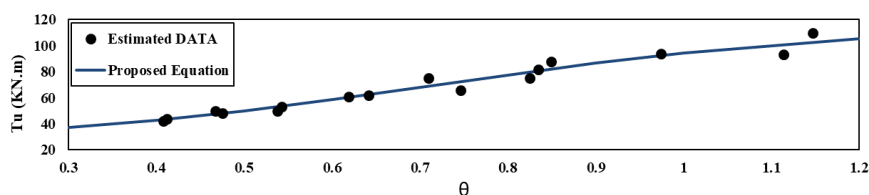
جدول ۶: ضریب محصور شدگی و ظرفیت باربری پیچشی ستون‌های مورد مطالعه T شکل

T_u (KN.m)	θ (-)	مدل ستون	T_u (KN.m)	θ	مدل ستون
۷۵	۰/۷۱۰	T-200-3-43-S	۶۱	۰/۶۱۹	T-200-3-37-N
۵۰	۰/۴۶۷	T-200-2-43-S	۴۲	۰/۴۰۸	T-200-2-37-N
۹۳	۱/۱۱۴	T-200-4-37-S	۸۲	۰/۸۳۵	T-200-4-37-N
۵۰	۰/۵۳۸	T-200-3-43-235-S	۶۲	۰/۶۴۲	T-200-4-37-235-N
۹۴	۰/۹۷۴	T-200-3-43-420-S	۱۱۰	۱/۱۴۷	T-200-4-37-420-N
۴۴	۰/۴۱۲	T-200-2-37-S	۴۸	۰/۴۷۵	T-200-3-37-235-N
۵۳	۰/۵۴۳	T-200-2-37-306-S	۸۸	۰/۸۴۹	T-200-3-37-420-N
۶۶	۰/۷۴۶	T-200-2-37-420-S	۷۵	۰/۸۲۵	T-200-3-37-S

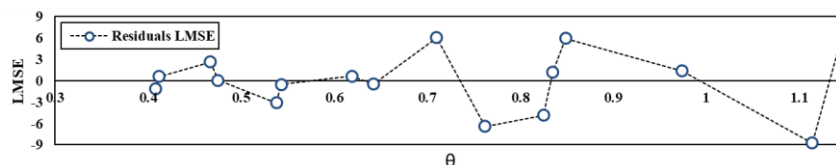
جدول ۷: ضریب محصور شدگی و ظرفیت باربری پیچشی ستون‌های مورد مطالعه L شکل

T_u (KN.m)	θ (-)	مدل ستون
۶۴	۰/۳۷۰	L59
۶۷	۰/۳۳۴	L65
۷۰	۰/۳۱۰	L70
۵۵	۰/۲۲۳	L70-2
۸۶	۰/۴۰۳	L70-4

شکل‌های ۲۰ و ۲۱ مقایسه‌ای بین ظرفیت باربری پیچشی محاسبه شده توسط روابط پیشنهادی و نتایج تحلیلی ارائه می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، روابط پیشنهادی قادرند با دقت قابل قبولی مقادیر لنگر پیچشی را در سطوح مختلف محصورشدگی پیش‌بینی نمایند. بر اساس ارزیابی‌های انجام شده، بیشینه خطای روابط پیشنهادی برای ستون‌های مرکب T شکل و L شکل به ترتیب به ۸/۷٪ و ۶/۳٪ محدود می‌شود. همچنین ضرایب R^2 روابط پیشنهادی به ترتیب برای معادله (۲۶) مقدار ۰/۹۵ و برای رابطه (۲۷) مقدار ۰/۸۴ بدست آمد. این نتایج حاکی از کارایی مناسب روابط ارائه شده در تخمین ظرفیت پیچشی ستون‌های مرکب بوده و امکان بهره‌گیری از آنها در کاربردهای عملی مهندسی را تأیید می‌نماید.

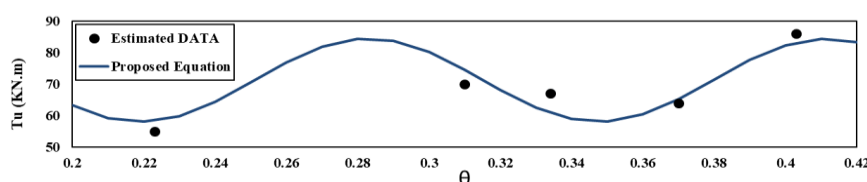


(الف)

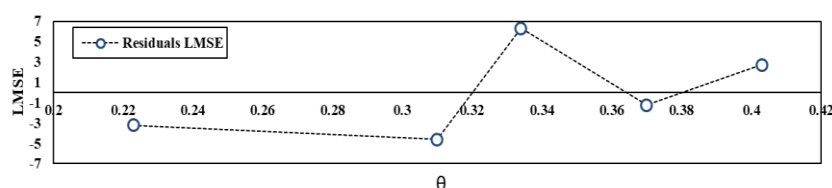


(ب)

شکل ۲۰: ارزیابی رابطه ظرفیت پیچشی ستون مرکب T شکل الف) مقایسه نتایج بدست آمده از رابطه پیشنهادی با مقادیر تحلیلی ب) خطای بدست آمده



(الف)



(ب)

شکل ۲۱: ارزیابی رابطه ظرفیت پیچشی ستون مرکب L شکل الف) مقایسه نتایج بدست آمده از رابطه پیشنهادی با مقادیر تحلیلی ب) خطای بدست آمده

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، تعدادی ستون مرکب L و T شکل فولادی پر شده با بتن مورد مطالعه قرار گرفت. برای ارزیابی این ستون‌ها تحت تأثیر لنگر پیچشی و سپس ترکیب پیچش و فشار، از مدلسازی عددی مبتنی بر مطالعات آزمایشگاهی با سه سطح صحت‌سنجی استفاده شد. اثرات سخت‌کننده‌های فولادی، ضخامت جداره فولادی، و مقاومت مصالح (فولاد و بتن) بر ظرفیت پیچشی ستون‌ها به‌طور جامع تحلیل و مقایسه گردید. نتایج نشان داد که تحت بارگذاری پیچشی، ستون‌های مجهز به سخت‌کننده از ظرفیت پیچشی بالاتری نسبت به نمونه‌های فاقد سخت‌کننده برخوردارند. علاوه بر این، سخت‌کننده‌ها نقش مؤثری در افزایش ظرفیت فشاری و تأخیر در کمانش موضعی ایفا کردند. بررسی پارامترهای مؤثر نشان داد که مقاومت بتن تأثیر ناچیزی بر ظرفیت پیچشی دارد، درحالی‌که پارامترهای فولادی نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کنند. افزایش ضخامت جداره فولادی از ۲ به ۴ میلی‌متر موجب افزایش حدود ۳۲ درصدی ظرفیت پیچشی شد و افزایش مقاومت فولاد از ۳۰۶ به ۴۲۰ مگاپاسکال تا ۳۴ درصد ظرفیت پیچشی را بهبود بخشید. افزایش ضخامت و استفاده از سخت‌کننده‌ها بسته به هندسه مقطع اثر متفاوتی داشت و در ستون‌های T شکل منجر به افزایش ۲۵ درصدی ظرفیت پیچشی را گردید. با این حال، به دلیل تأثیر منفی افزایش وزن سازه بر خطر زلزله، پارامتر مقاومت فولاد از اولویت بالاتری نسبت به افزایش ضخامت برخوردار است. ضریب

اثر محصورشدگی به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در ستون‌های مرکب شناسایی شد که هرگونه تغییر در مشخصات بتن یا فولاد بر آن تأثیرگذار است. در این مطالعه، با بهره‌گیری از این پارامتر و روش حداقل مربعات اصلاح‌شده، روابطی برای محاسبه ظرفیت پیچشی ستون‌های L و T شکل ارائه گردید. دقت روابط پیشنهادی قابل قبول بود، به‌طوری که حداکثر خطای محاسباتی برای ستون‌های T شکل در محدوده ضریب محصورشدگی $0/4$ تا $1/2$ ، مقدار $8/7$ درصد و برای ستون‌های L شکل در محدوده ضریب $0/2$ تا $0/5$ ، $6/3$ درصد به دست آمد. در بررسی رفتار ستون‌ها تحت تأثیر همزمان لنگر پیچشی و نیروی محوری، مشاهده شد که با افزایش لنگر پیچشی، ظرفیت فشاری مقطع کاهش یافته و بار بیشینه در کرنش‌های کمتر و با شکل‌پذیری پایین‌تری اتفاق می‌افتد. همچنین، نتایج تأیید کرد که مقاطع با ضریب محصورشدگی بالاتر، اثر سخت‌شدگی بیشتری از خود نشان داده و شیب افت مقاومت در آن‌ها کندتر است.

مراجع

- [1] Labibzadeh, M., Vakil, M., Hosseini, F., Khayat, M., Hajjari, E. (2024). Experimental and numerical investigations of the octagonal concrete-filled thin-walled tube columns with binding bars (O-CFT-WBB) under compressive pressure and thermal loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 223, 109047.
- [2] Liu, W. H., Guo, Y. L., Tian, Z. H., Yang, X., & Li, J. Y. (2023). Experimental and numerical study of T-shaped irregularly concrete-filled steel tube columns under combined axial loads and moments. *Journal of Building Engineering*, 65, 105796.
- [3] Marin, J. (1979). Design aids for L-shaped reinforced concrete columns. In *Journal Proceedings* (Vol. 76, No. 11, pp. 1197-1216).
- [4] Hsu, C. T. T. (1989). T-shaped reinforced concrete members under biaxial bending and axial compression. *Structural Journal*, 86(4), 460-468.
- [5] ASCCS. (1997). Concrete Filled Steel Tubes-a Comparison of International Codes and Practices. In *Proc. ASCCS Seminar, Innsbruck, Austria*.
- [6] Elchalakani, M., Zhao, X. L., Grzebieta, R. (2004). Concrete-filled steel circular tubes subjected to constant amplitude cyclic pure bending. *Engineering Structures*, 26(14), 2125-2135.
- [7] Han, L. H., Yao, G. H., Zhao, X. L. (2005). Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC). *Journal of Constructional Steel Research*, 61(9), 1241-1269.
- [8] Yu, M., Zha, X., Ye, J., She, C. (2010). A unified formulation for hollow and solid concrete-filled steel tube columns under axial compression. *Engineering structures*, 32(4), 1046-1053.
- [9] Portolés, J. M., Romero, M. L., Filippou, F. C., Bonet, J. L. (2011). Simulation and design recommendations of eccentrically loaded slender concrete-filled tubular columns. *Engineering Structures*, 33(5), 1576-1593.
- [10] Yang, Y., Wang, Y., Fu, F., Liu, J. (2015). Static behavior of T-shaped concrete-filled steel tubular columns subjected to concentric and eccentric compressive loads. *Thin-Walled Structures*, 95, 374-388.
- [11] Yu-hang, W., Jian-guo, N., Jian-sheng, F. (2013). Theoretical model and investigation of concrete filled steel tube columns under axial force-torsion combined action. *Thin-Walled Structures*, 69, 1-9.
- [12] Liu, X., Xu, C., Liu, J., Yang, Y. (2018). Research on special-shaped concrete-filled steel tubular columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 147, 203-223.
- [13] Xiao, Y., Bie, X. M., Song, X., Zhang, J., Du, G. (2020). Performance of composite L-shaped CFST columns with inner I-shaped steel under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 170, 106138.
- [14] Zheng, Y., & Zeng, S. (2020). Design of L-shaped and T-shaped concrete-filled steel tubular stub columns under axial compression. *Engineering Structures*, 207, 110262.
- [15] BS EN1994-1-1, Eurocode 4. (2004). *Design of composite steel and concrete structures*, Part 1.1. General Rules and Rules for Buildings. , British Standards Institution, London
- [16] Zheng, Y., Zeng, S. (2021). Flexural behaviour of stiffened and multi-cell L-shaped CFSTs considering different loading angles. *Journal of Constructional Steel Research*, 178, 106520.
- [17] Zheng, Y., Liang, W., Ma, S., Zeng, S. (2022). Behavior of stiffened and multi-cell L-shaped CFST columns under eccentric compression. *Thin-Walled Structures*, 174, 109156.
- [18] Lei, M., Li, Y. L., Li, Y. Q., Zhang, J., Du, G. (2023). Behavior of concrete-filled T-shaped steel tubular beam-columns under biaxial compressive loads. *Engineering Structures*, 277, 115409.
- [19] Yang, Y., Zhou, Q., Han, X., Chen, Y. F. (2024). Investigation on special-shaped concrete-filled steel tubular column under combined compression and torsion. *Thin-Walled Structures*, 202, 112109.

- [20] Liu, W. H., Guo, Y. L., Tian, Z. H., Yang, X. (2024). Sectional strength design of T-shaped irregularly concrete-filled steel tube columns under combined axial load and any directional moments. *Structures*, 67, 106982.
- [21] Zheng, Y., Lin, Y., Liang, W. (2024). Concentric and eccentric compressive behaviors of stiffened T-shaped CFST columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 212, 108229.
- [22] Liu, W. H., Wang, X., Guo, Y. L., Tian, Z. H., Li, J. Y., Bai, W. H. (2024). Experimental and numerical study of L-shaped irregularly concrete-filled steel tube columns under axial compression and eccentric compression. *Journal of Building Engineering*, 84, 108572.
- [23] Hu, C., Wang, Y., Cheng, R., Luo, J., Gong, M. (2024). Confinement effect and stress-strain model for concrete of multi-cell CFST column under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 221, 108865.
- [24] Yu, C. Q., Tong, G. S., Tong, J. Z., Zhang, J. W., Li, X. G., Xu, S. L. (2024). Experimental and numerical study on seismic performance of L-shaped multi-cellular CFST frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 213, 108360.
- [25] ANSI/AISC 360-10. (2010) *Specification for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- [26] GB 50936-2014. (2014) *Technical Code for Concrete Filled Steel Tubular Structures*. Architecture Industrial Press of China, Beijing.
- [27] Beck, J., Kiyomiya, O. (2003). Fundamental pure torsional properties of concrete filled circular steel tubes. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2003(739), 285-296.
- [28] Han, L. H., Yao, G. H., Tao, Z. (2007). Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion. *Thin-walled structures*, 45(1), 24-36.
- [29] Chen, Y. W. (2003). *Research on torsion behavior of concrete filled steel tube*. Taiwan: Central University.
- [30] Smith M. (2009) *ABAQUS/Standard User's Manual*, Version 6.9. Dassault Systèmes Simulia Corp.
- [31] Labibzadeh, M., Tabatabaei, S. M. J. H., Ghafouri, H. R. (2018). An efficient element free method for stress field assessment in 2D linear elastic cracked domains. *Computational and Applied Mathematics*, 37(5), 6719-6737.
- [32] Labibzadeh, M., Firouzi, A., Ghafouri, H. R. (2018). Structural performance evaluation of an aged structure using a modified plasticity model in inverse solution method. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 26(9), 1326-1355.
- [33] Labibzadeh, M. (2015). Damaged-plasticity concrete model identification for prediction the effects of CFRPs on strengthening the weakened RC two-way slabs with central, lateral and corner openings. *International Journal of Structural Engineering*, 6(3), 240-268.
- [34] Labibzadeh, M., Hamidi, R. (2017). Effect of stress path, size and shape on the optimum parameters of a brittle-ductile concrete model. *Engineering Structures and Technologies*, 9(4), 195-206.
- [35] ACI Committee 318-11/318R-11. (2011). *Building code requirements for reinforced concrete and commentary*. Farmington Hills, MI, American Concrete Institute.
- [36] Jankowiak, T., Lodygowski, T. (2005). Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. *Foundations of civil and environmental engineering*, 6(1), 53-69.
- [37] Genikomsou, A. S., Polak, M. A. (2015). Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. *Engineering structures*, 98, 38-48.
- [38] Malm, R. (2009). *Predicting shear type crack initiation and growth in concrete with non-linear finite element method*. Doctoral dissertation, KTH University.
- [39] Wu, J. Y., Li, J., Faria, R. (2006). An energy release rate-based plastic-damage model for concrete. *International journal of Solids and Structures*, 43(3-4), 583-612.
- [40] Yun, X., Gardner, L. (2017). Stress-strain curves for hot-rolled steels. *Journal of constructional steel research*, 133, 36-46.
- [41] GB 50010-2010, (2010). *Code for Design of Concrete Structures*. , Architecture Industrial Press of China, Beijing, (in Chinese).
- [42] Han, L. H., Yao, G. H., Tao, Z. (2007). Behaviors of concrete-filled steel tubular members subjected to combined loading. *Thin-Walled Structures*, 45(6), 600-619.
- [43] GB50018, C. S. (2002). *Technical code of cold-formed thin-wall steel structures*. General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine: Beijing, China.
- [44] Farahani, S., Akhaveissy, A. H. (2022). Direct displacement-based seismic design of buckling-restrained braced RC frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(3), 1767-1839.
- [45] Nielsen, K., Svenningsen, J., Barari, A., Farahani, S., Ibsen, L. B. (2023). On the cyclic stability diagram of offshore wind turbine supported on multiple foundations in saturated dense sand. *Engineering Failure Analysis*, 144, 106926.
- [46] Palacios, A. E., Nguyen, M. D., Markovic, V., Farahani, S., Barari, A., Ibsen, L. B. (2022). Numerical simulation of caisson supported offshore wind turbines involving uniform liquefiable sand layer. In *Conference on Performance-based Design in Earthquake*. *Geotechnical Engineering* (pp. 1664-1673). Cham: Springer International Publishing.