مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس دوره بیست و دوم، شماره۳، سال۱٤۰۱



مطالعه عددی رفتار چرخهای اتصال ستون CFST مدفون شده در فونداسیون

صالح محمدابراهیمزاده سپاسگزار'، مرتضی نقی پور'*، مهدی نعمتزاده

۱. دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ۲. استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ۳. دانشیار دانشکده مهندسی و فناوری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مازندران

*m-naghi@nit.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱٤۰۰/۰٥/۲۲

تاريخ پذيرش: ١٤٠٠/١٢/٠٧

حكىدە

در این مقاله به تجزیه و تحلیل عددی رفتار اتصال ستون CFST مدفون شده در فونداسیون تحت بارگذاری ترکیبی محوری -خمشی پرداخته شده است. ابتدا مدل اجزاء محدود پیشنهادی توسط نتایج آزمایشگاهی پژوهش های قبلی تحلیل و مقایسه شده که نتایج نشان داد که آسیب موضعی، الگوهای خرابی و منحنی هیسترزیس با هم هماهنگی داشتند. در ادامه مطالعه دقیق پارامتریک برای ارزیابی رفتار چرخهای اتصال CFST مدفون شده در فونداسیون با متغیرهای قطر به ضخامت طول مدفون شدگی، مقاومت فشاری بتن و چگونگی اتصال ستون CFST به فونداسیون انجام شده است. بر اساس نمودارهای هیسترزیس حاصل شده از مطالعه پارامتریک مدلهای عددی، مقادیر شاخصهای سختی، مقاومت، شکلپذیری و انرژی برای نمونههای محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعه نشان داد با استفاده از مدل اجزاء محدود پیشنهادی، در اتصال ستون TST به فونداسیون با صفحه ستون نسبت به ستون CFST در حالت مدفون رفتار چرخهای ضعیف تری حاصل شده است. علاوه بر این، استفاده انرژی برای نمونههای محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعه نشان داد با استفاده از مدل اجزاء محدود پیشنهادی، در اتصال ستون TST به فونداسیون با صفحه ستون نسبت به ستون TST در حالت مدفون رفتار چرخهای ضعیف تری حاصل شده است. علاوه بر این، استفاده انرژی برای نمونههای محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعه نشان داد با استفاده از مدل اجزاء محدود پیشنهادی، در اتصال ستون ترژی برای نمونههای معاصبه و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعه نشان داد با ستفاده از مدل اجزاء محدود پیشنهادی، در این، استفاده انرژی برای نمونههای معاصبه و مورد برونی تعیرات در حلقه می نمودار هیسترزیس، مقاومت جانبی، عملوه بر این، استفاده از سختی خانین داده است. با افزایش مقاومت بتن، تغییرات در حلقهای نمودار هیسترزیس، مقاومت جانبی، عملوره شکلپذیری و شده بدون سختی داده است. با افزایش کمی داشته است. حالت مدفون در یال متون تری معنون دارای صفحه ستون، در حالت مدفون شده بدون سختی مندون و با سختکننده و با سخت مقاومت تریس مقاومت جانبی و سختی معلوره شدگی ستون شده بدون سختی ملولی، به صورت ترک خوردگی قطری بتن روی فونداسیون است. آسی شخامت لوله فولادی و شرایط مدفون شدگی ستون شده با سختکننده طولی، به صورت ترک خوردگی قطری بتن روی فونداسیون ایست. افزایش ضخامت لوله نولادی و شرایط مدگی ستون جندی معن

واژگان کلیدی: لوله فولادی پر شده با بتن، اتصال ستون به فونداسیون، سختی سازه، طول مدفون شدگی، تجزیه و تحلیل اجزاء محدود

1. Concrete Filled Steel Tube

۱. مقدمه

استفاده از لولههای فولادی پر شده با بتن (CFST) در دهه اخیر در ساخت و ساز مهندسی از جمله پروژههای ساخت پل، مانند پایهها و اعضا قوسی پل افزایش یافته است. در مقاطع CFST لوله فولادی به عنوان قالب کار می کند و سبب بهبود مقاومت فشاری و افزایش محصورشدگی بتن میشود. اعضای CFST در حالتی که به عنوان ستون در ساختمانهای بلند یا پایه پل استفاده میشوند باید به طور مناسب به فونداسیون متصل شوند. با این حال، مقررات کافی در استانداردهایی مانند استاندارد طراحی پل مقررات کافی در استانداردهایی مانند استاندارد طراحی پل (AISC) [2] و مشخصات فنی برای اتصال سازههای لولهای فولادی پر شده بتن وجود ندارد و مطالعات محدودی در این زمینه انجام شده است.

در اتصالات مرسوم ستونهای فولادی به فونداسیون، استفاده از صفحه ستون رایج است که به طور گستردهای در ساختمانهای با ارتفاع نسبتاً کم استفاده می شود. مطالعات گستردهای در زمینه عملکرد لرزهای اتصالات در پای ستونهای فولادی انجام شده است. در پژوهش بورزویی و همکاران و کانویند و همکاران اتصالات فولادی با صفحه ستون را تحت بارگذاری چرخهای مورد مطالعه قرار دادند [3–4]. همچنین مطالعه دیگری توسط روداس و همکاران روی اتصالات ستون فولادی به صفحه ستون [5] و اتصالات ستون فولادی به محکاران و گریلی و همکاران [6، 7] انجام گرفته است.

در چند دهه گذشته، اعضای لولههای فولادی پر شده با بتن (CFST) به عنوان اعضای نوین در سازههایی، مانند ساختمانهای بلند مرتبه، پلها و ایستگاههای مترو بسیار مورد استفاده قرار گرفتهاند و مطالعات زیادی توسط هان و همکاران در زمینه عملکرد مناسب لرزهای سازههای CFST انجام شده است [8]. اتصال ستون CFST مدفون در پی، باعث افزایش مقاومت و سختی اتصال پای ستون شده که در آن بخشی از پای ستون، توسط یک بتن مسلح فونداسیون محصور شده است. چندین گروه از پژوهشگران، در مطالعات مختلف توسط مون، رودر و همکاران

اتصال ستون CFST به فونداسيون انجام دادند [9–14]. نتايج اين پژوهش ها نشان داد که این نوع اتصال از لحاظ اجرایی در ساخت و سازها ساده و از لحاظ رفتار سازهای می تواند شکل پذیری عالی در اتصال ایجاد کند. همچنین استهلاک انرژی خوب این اتصالات نشان داد که کاربرد آن در سازههایی مانند پایههای پل و اتصالات ستون به فونداسیون در مناطق لرزهای مناسب است. در مطالعات پيشين [12-15]، اتصالات با قطر، ضخامت و طول مدفون شده متفاوت، مورد بررسی قرار گرفته است. طول های تعبیه شده ستون بيشتر بين ٥/٠ تا ١/٥ برابر قطر خارجي لوله فولادي، نسبت قطر به ضخامت ستون (D/t) بیشتر بین ۳۰ و ۱۲۰ و نسبت بار محوری (P/P₀) بیشتر بین ۰/۰۳ و ۳/۰ بود. در نتایجی که در مطالعات پیشین حاصل شده است سه دسته بندی انجام شده است که در دسته اول ستون CFST با هندسه مربعی و صفحه اتصال مربعی، در دسته دوم ستونCFST با هندسه لوله دایرهای و صفحه اتصال برشی دایرهای و در دسته سوم ستون CFST با هندسه لوله دایرهای بدون حلقه و مدفون استفاده شده است. با توجه به این مطالعات آزمایشگاهی طول مدفون شدگی بحرانی برای ستون CFST با صفحه و حلقه برشی حدود ۰/۹ تا ۱ برابر قطر خارجی لوله فولادی بود که کمتر از این مقادیر سبب شکست مخروطی بتن مى شود [12–15].

در پژوهشی دیگر رضایی فر و یونسی، مطالعه تحلیلی در زمینه رفتار اتصال تیر فولادی به ستون CFT با استفاده و یا عدم استفاده از سخت کننده در جان تیر انجام دادند. بررسی تحلیلی نمونههای طراحی شده در این مطالعه، علاوه بر اثبات رفتار مناسب اتصال موجود تحت بارگذاری چرخهای و یکنواخت، تاثیر چشمگیر سخت کنندههای جان تیر بر عملکرد اتصال مطالعه شده را تایید کردند [16].

نقیپور و همکاران در پژوهشی آزمایشگاهی به تأثیر محصورشدگی فعال و عناصر برشگیر در رفتار خمشی تیرهای لولهای فولادی پرشده با بتن پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که تعبیه برشگیر و محصورشدگی فعال، روی افزایش ظرفیت خمشی تیر مرکب اثر چشمگیری داشته است [17].

نقیپور و همکاران در پژوهشی دیگر به مدلسازی و بررسی رفتار ستونهای مرکب فولادی بتنی دوجداره با جداره داخلی دایرهای و جداره خارجی شش ضلعی پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که با وجود اینکه در آیین نامههای مختلف وقتی که نسبت برون محوری به قطر افزایش مییابد از میزان محصور شدگی کم میشود، اما در مقاطع دولایه زمانی که این محدوده در بین فضای دو لوله قرار گیرد به دلیل فشار لوله داخلی به بتن، میزان محصور شدگی را حفظ میکند [18].

پاچیده و همکاران در سال ۲۰۲۱، در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی عملکرد لرزهای ستونهای CFDST با هندسه مربع، لوزی و دایرهای شکل پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که با وجود اینکه مود خرابی ستونهای با مقطع داخلی مربع و لوزی مشابه یکدیگر بوده اما ستونهای با مقطع داخلی دایره آثار تخریبی و گسیختگی نامناسب تری نسبت به ستونهای با مقطع داخلی مربع و لوزی داشته اند. همچنین مود گسیختگی پای ستونها پس از بیدا کرده است. سختی اولیه و ضریب شکل پذیری ستونهای با

مقطع داخلی لوزی تا حدود ۲ برابر سایر ستونها هستند [19]. پاچیده و همکاران در پژوهشی دیگر به مطالعه آزمایشگاهی تأثیر افزایش دما بر عملکرد ستونهای فولادی دوجداره پرشده با بتن با هندسه خارجی منشوری تحت بار چرخهای پرداختند. در این مطالعه به بررسی اثر دماهای ۲۵، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی گراد بر عملکرد ستونهای فولادی دوجداره پرشده با بتن با هندسه منشوری پرداخته شد و پس از آن کلیه ستونها تحت بار چرخهای با پروتکل بارگذاری ATC-24 قرار گرفت و بارگذاری تا مرحله گسیختگی ستون ادامه یافت. نتایج این مطالعه نشان داد کم و بیش در تمامی ستونها از دمای ۲۵ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد پس از ۱۵ چرخه و در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد پس از ۹ یا ۲۱ چرخه، ظرفیت باربری ستونها تا حدود ۵۰ درصد افت داشته است [29].

با توجه به اینکه نتایج تحقیقات پیشین، طول مدفون شدگی برای اتصالات ستون CFST به تیر یا فونداسیون را مورد ارزیابی قرار دادند ولی المانهای تقویت کننده اتصال در پای ستونها

ارزیابی نشده است که تاثیر بالایی در طول مدفون شدگی دارد. از این رو، تحلیل پارامتریک گستردهای با استفاده از مدلهای اجزا محدود (FEA) در این راستا انجام شده است.

در این مقاله، در بخش اول چگونگی مدلسازی اجزاء محدود اتصالات مورد بررسی با استفاده از نرم افزار آباکوس ارائه شده است. در بخش دوم به بررسی مطالعات آزمایشگاهی برای درستی آزمایی پرداخته شده و در بخش سوم، مطالعات عددی روی پارامترهایی مانند مقاومت بتن، عمق مدفون شدگی، شرایط اتصال پای ستون و نسبت قطر به ضخامت یا همان شرایط فشردگی ستون، تحت بارگذاری چرخهای مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲. روش FEA و راستی آزمایی ۲-۱. معرفی مدل FEA ۲-۱-۱. اندازه عناصر و مش

مطالعات آزمایشگاهی موثرترین روش برای پژوهشها در زمینه رفتار سازهها است که به دلیل پرهزینه و وقت گیر بودن، مطالعات عددی اهمیت پیدا کرده است. برای استفاده از روش عددی در مدلسازی اعضای مرکب، نیاز به بررسی مطالعات پیشین در این زمينه است تا بتوان از تسلط كافي در تكنيكها و فرضيات مدلسازی بهرهمند شد. در این راستا مطالعات متعددی انجام شده است که برای نمونه می توان به پژوهش دای و همکاران (۲۰۱٤)، دوارت و همکاران (۲۰۱٦)، دینگ و همکاران (۲۰۱۷) و لی و همکاران (۲۰۱۷) در زمینه اعضای کامپوزیت فولادی-بتنی اشاره نمود [24-21]. نتایج کارگیری روش عددی برای این مطالعات نشان داد که نرمافزار ABAQUS عملکرد خوبی در ارائه پاسخها برای رفتار غیر خطی مصالح و نمودارهای هیسترزیس دارد. در این مقاله، از نرمافزار آباکوس استاندارد برای تهیه یک مدل غير خطى FEA استفاده شده است. رفتار غير خطى اتصالات CFST تحت بارگذاری ترکیبی که شامل بار محوری فشاری و بار خمشی جانبی رفت و برگشتی است، مورد مطالعه قرار گرفته شده است. در این مطالعه برای درستیآزمایی و تأیید مدل FEA از مطالعه آزمایشگاهی لهمن و برگ استفاده شده است [13].

در مدلهای عددی مورد بررسی در این مقاله اعضای تشکیل دهنده مدل اجزاء محدود را میتوان به چهار قسمت تقسیم کرد

که عبارتند از: فونداسيون بتني، هسته بتني، لوله فولادي و میلگردهای تقویت شده. پژوهشهای پیشین [16] نشان دادند که در نرمافزار ABAQUS، برای دقت در مدلسازی بتن استفاده از عناصر جامد ۸ گرهای ۳ بعدی (C3D8R) و برای مدلسازی لوله فولادی استفاده از عناصر پوسته ٤ گره ۳ بعدی (S4R) مناسب و دقت قابل قبولی در نتایج عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی را نشان میدهد. در مدلهای این پژوهش نیز، برای مدلسازی بتن از المان C3D8R و برای مدلسازی لوله فولادی از المان S4R و برای اعضای میلگرد از المان T3D2 استفاده شده است. سایز المان برای اعضای بتنی در حالت کلی ۰۰ در ۰۰ میلیمتر و برای ناحیههای دارای تماس ۲۵ در ۲۵ میلیمتر و سایز المانهای لوله فولادی در ناحیه کمانش موضعی ۱۰ در ۱۰ میلیمتر انتخاب شده است که این سایز مش با مطالعات پیشین [20 و 21] مشترک بودند. همچنین اندازههای مش ارائه شده طوری در نظر گرفته شده است که دقت کافی برای نشان دادن کمانش موضعی را داشته باشد و از طرفی سبب همگرایی صحیح مدلسازی شود.

۲-۱-۲. مصالح

مصالح مورد استفاده در این پژوهش از دو قسمت فولادی و بتنی تشکیل شده است. برای مدلسازی بتن از مدل آسیب پلاستیک بتن ۱(CDP) استفاده شده است که رفتار لرزهای بتن را به خوبی توصیف میکند. برای مدلسازی رفتار تنش-کرنش بتن از نمودار هان و همکاران ارائه شده در مطالعات پیشین استفاده شده که تنش- کرنش بتن در فشار و کشش در شکل (۱) نشان داده شده است [22]. به دلیل اثر محصورشدگی، هر دو عضو لوله فولادی و هسته بتنی تحت شرایط تنش چند محوری هستند. برای عضو فولادی از نمودار تنش-کرنش هان که در شکل (۱) نشان داده شده استفاده شد. در مطالعات پیشین [23-25] ثابت کردند که این نمودار برای مصالح در محاسبات عددی مدلسازی سبب دقت معقول و منطقی می شود.

شکل ۱. نمودار تنش- کرنش مصالح مورد استفاده در مدل عددی، الف) فولاد، ب) رفتار فشاری بتن، ج) رفتار کششی بتن



Fig. 1. Stress-strain diagram of materials used in numerical model, a) steel, b) compressive behavior of concrete, c) tensile behavior of concrete

برای تعریف آسیب و شکست مصالح فولادی از روش آسیب شکل پذیر ۲ استفاده شده است. در این تئوری برای لوله فولادی، منحنی پلاستیک، کرنش مربوط به شکست، تنش سه محوری ۳ و نرخ کرنش فولاد و نوع آسیب تعریف شده است [26–27]. در حالت کلی، نوع آسیب را در نرم افزار می توان به صورت آسیب

1. Concrete Damage Plasticity

Ductile Damage

117

3. Stress triaxiality

آنجا که در مدلهای آزمایشگاهی هنگام اعمال بار چرخهای در بتن ترک ایجاد شده و افزایش جابهجایی چرخهای سبب باز و بسته شدن ترکها در بتن می شود، در مدل های عددی نیز پدیده باید درنظر گرفته شود. در نرم افزار آباکوس مدل موثر برای رفتار چرخهای بتن CDP است که در هنگام بارگذاری چرخهای باز و بسته شدن بتن را نمی تواند در نظر بگیرد به همین دلیل بر اساس مطالعات و تحقیقات گذشته [30] در محل ایجاد ترک بتن هسته در ستون CFST از پیش ترک استفاده شده است. در مدل پیش ترک هسته بتنی در یای ستون که دچار کمانش موضعی شده است و بتن قابلیت تحمل مقاومت کششی ندارد به دو قسمت تقسیم می شود و بین آن از اندرکنش تماسی برای انتقال نیرو استفاده می شود. اندرکنش تماسی اعمال شده در این حالت شامل اندرکنش تماسی عمودی و مماسی است. در اندرکنش تماسی عمودی دو سطح بر اساس نرمال صفحات فشار عمودی را انتقال میدهند و برای اعمال آن در آباکوس از خواص تماس سخت؛ استفاده شده است. در اندرکنش تماسی مماسی دو سطح روی هم لغزش و صفحات تنش برشی را انتقال میدهند که مقدار این تنش برشی با استفاده از روش پنالتی و ضریب اصطکاک ۰/۰ در نظر گرفته شده است. محل "پیش از ترک" در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل ۲. جزییات شرایط مرزی و بارگذاری، الف) شرایط مرزی اتصال ستون CFST به فونداسیون، ب) پروتکل بارگذاری چرخهای استاندارد ATC-24



تغییر مکان ۱(DDE) و خسارت انرژی ۲(EDE) تعریف نمود. در حالت پیشفرض در روش DDE زمانی که تغییر مکان در یک المان به بیشترین مقدار خود می سد المان حذف شده و تخریب رخ می دهد. در روش EDE آسیب بر اساس انرژی شکست بعد از جابهجایی پلاستیک تعریف می شود. در این مقاله، کرنش شکست و تنش سه محوره برای فولاد به ترتیب ۲۹/۰ و ۱۳۳۳ در نظر گرفته شده که در آزمایشها و مطالعات پیشین این مقدار برای فولاد معمول است [11-12 و 28]. با توجه به شبه استاتیک بودن آزمایشها مقدار نرخ کرنش کرنش در شکست ۱ در نظر گرفته شده است. روش آسیب مورد استفاده در این پژوهش DDE انتخاب شد و بیشترین جابهجایی ۲۰ میلی متر در نظر گرفته شده کرنش پلاستیک معادل در المان به کرنش شکستگی می رسد، با کرنش پلاستیک معادل در المان به کرنش شکستگی می رسد، با فروع جابهجایی ۲۰ میلی متر، المانها شروع به آسیب دیدن کرده شروع جابهجایی ۲۰ میلی متر، المانها شروع به آسیب دیدن کرده

۲-۱-۳. شرایط مرزی و بار گذاری

با توجه به متقارن بودن سازه مورد بررسی برای اعمال شرایط مرزی از مشخصات متقارن با یک محور تقارن در راستای عمود بر محور ستون استفاده شده است که در شکل (۲) نشان داده شده است. برای شرایط مرزی فونداسیون نیز کف آن کاملا گیردار شده است. برای اعمال بار محوری به بالای ستون CFST، از نیروی فشاری روی سطح بتن و برای اعمال بار جانبی از روش کنترل-فشاری روی سطح بتن و برای اعمال بار جانبی از روش کنترل رفتار چرخهای اعمال شده به نمونهها در مطالعات آزمایشگاهی و استانداردهای مربوط به بارگذاری چرخهای، پروتکل چرخهای استانداردهای مربوط به بارگذاری چرخهای، پروتکل چرخهای استاندارد 24-ATC انتخاب شده که در شکل (۲) نشان داده شده است. برای ایجاد تماس سطح به مطح بین لوله فولادی و بتن هسته از ضریب اصطکاک ۲۰/۰ که در مطالعات پیشین پیشنهاد شد [20،19،1]، استفاده شده است. برای برقراری ارتباط بین میلگردهای تقویت کننده فونداسیون و بتن فونداسیون نیز از قید مدفون شدگی ۳ استفاده شده است. از

3. Embedded region

4. Hard contact

1. Displacement Damage Evolution

2. Energy Damage Evolution

117



Fig. 2. Details of boundary and loading conditions, a) boundary conditions of CFST column connection to the foundation, b) ATC-24 standard cyclic loading protocol

شکل ۳. هندسه مشخورده و محل بارگذاری در مدل اجزای محدود اتصال ستون CFST به فونداسیون



Fig. 3. Mesh-geometry and loading location in the finite element model of CFST column connection to the foundation

برای ارزیابی درستی آزمایی، مقایسه ها بین حالت های آسیب و منحنی های هیسترزیس نتایج آزمایشگاهی لهمن و برگ و نتایج عددی انجام شده است [13].

در این پژوهش از دو مدل اتصال آزمایشگاهی با نامهای اتصال EMB80 و اتصال EMB96 استفاده شده است که جزییات و ابعاد آن در شکل (٤) نشان داده شده است. در شکل (٥) نمودار هیسترزیس بین نمونه آزمایشگاهی و عددی مقایسه شده را نشان میدهد. بر اساس شکل (٥) نتایج نمودار هیسترزیس نشان میدهد که پیش بینی مقدار نیروها در حلقههای هیسترزیس کموبیش خوب

و نتایج مقایسه شاخصها بین نمونه آزمایشگاهی و عددی دارای اختلاف کم و قابل قبول است. در جدول (۱) مقادیر F_{FE} و رای K_{EE} / K_{FE} به ترتیب ۱۰/۴ و ۱۰/۴ و ۱۰/۳ و ۱۰/۳ و برای نمونه EMB96 به ترتیب ۱۰/۹ و ۱۰/۴ حاصل شده است که مقادیر نزدیک به عدد ۱ هستند و نشان میدهد مدلهای عددی پیشنهادی رفتار اتصال را به خوبی پیشبینی میکنند. برای اتصال ستون CFST به فونداسیون محل ایجاد آسیب در پای ستون و به صورت پارگی لوله فولادی و شکست بتن رخ داده است. در شکل (۱) وضعیت نهایی آسیب اتصالات در مدل FEA پیشنهادی و آزمایشگاهی نشان داده است که محل کمانش موضعی و پارگی را

۳. مطالعه پارامتریک

در این مطالعه ستونهای CFST احاطه شده شده در فونداسیون برای بار فشاری محوری و لنگر خمشی مانند تیر یک سر گیردار طراحی شدهاند. سختی سیستم (K) را میتوان معادل رابطه (۱) و (۲) تعریف کرد در حالیکه اتصالات CFST محصور شده در فونداسیون نمیتوانند به شرایط انتهایی گیردار و ثابت برسند و سختی خمشی اتصال CFST محاط شده در فونداسیون باید از سختی ستون کنسول گیردار کاسته شود. در این پژوهش یک مطالعه جامع با استفاده از تجزیه و تحلیل پارامتریک برای محاسبه شاخص های مقاومت نهایی، انرژی و شکل پذیری علاوه بر شاخص سختی در اتصال، انجام شده است.

بارهای مقاوم ایجاد شده در قسمت مدفون شده روی سطح ستون توسط فونداسیون تامین می شود که بر این اساس پارامترهای طول مدفون شده، مقاومت بتن ستون و عمق مدفون شدگی، شرایط اتصال پای ستون و نسبت قطر به ضخامت یا همان شرایط فشردگی ستون حساسیت بالایی در شاخص های سازهای سختی، مقاومت نهایی، انرژی و شکل پذیری دارند و در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفته است. **شکل ٤.** هندسه مورد بررسی اتصال ستون CFST به فونداسیون در پژوهش لهمن و برگ [۱۳]، الف) نمای جانبی هندسه اتصال EMB80، ب) نمای جانبی هندسه اتصال EMB96، ج) ابعاد مقطع فونداسیون



Fig.4. Geometry of CFST column connection to the foundation in Lehman and Berg research [13], a) Side view of EMB80 connection geometry, b) Side view of EMB96 connection geometry, c) Foundation cross-sectional dimensions

شکل ٥. مقایسه نمودار هیسترزیس مدل عددی و آزمایشگاهی اتصال ستون CFST به فونداسیون، الف) نمونه EMB80، ب) نمونه EMB96



Fig. 5. Comparison of hysteresis diagram of numerical and experimental model of CFST column connection to foundation, a) EMB80 specimen, b) EMB96 specimen

جدول ۱ . خلاصهای از ابعاد، مصالح و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی									
Experimental Model	Details of the specimens [13]								
	D×H	D/t	L _e /D	$f_{\rm y}$ (MPa)	$f_{\rm c,col}$ (MPa)	$f_{\rm c,f}$ (MPa)			
EMB80 specimen	508×1830	80	0.9	379	56.9	69.3			
EMB96 specimen	610×1830	96	0.9	290	74	68.3			

specimen	secant stiffness	yield force	Max. force	yield displacement	displacement equal to 85%	ductility	total energy
	K (kN/mm)	Py (kN)	P _{max} (kN)	$\delta_{y} (mm)$	$\delta_{u}\left(kN\right)$	μ	E(kN.mm)
EM80-Exp.	9.50	280.74	608.10	29.55	125.84	4.26	448083.55
EM80-Abaqus	10.20	307.36	584.04	30.13	123.51	4.10	410206.19
The ratio of experimental to numerical index	0.93	1.09	0.96	1.02	0.98	0.96	0.92
EM96-Exp.	11.65	431.65	727.70	37.05	125.10	3.38	602617.74
EM96-Abaqus	12.40	456.36	738.23	36.80	123.19	3.35	645198.02
The ratio of experimental to numerical index	0.94	1.06	1.01	0.99	0.98	0.99	1.07

Table.1. Summary of dimensions, materials and comparison of experimental and numerical results



Fig. 6. Comparison of failure mode in numerical and experimental model, a) Numerical failure mode, b) experimental failure mode [13]

٤. منحنیهای هیسترزیس اتصال ستون CFST به فونداسیون

در این بخش به مطالعه پارامتریک روی منحنیهای هیسترزیس اتصال بر اساس پارامترهای معرفی شده در قسمت قبل پرداخته شده است. نمودار مربوط به منحنیهای هیسترزیس نمونههای عددی مورد مطالعه درشکلهای (۸ و ۹) نشان داده شده است که این منحنیها بر اساس نیروی عکسالعمل بر حسب جابهجایی نوک ستون ترسیم شده است.

همچنین با توجه به مقادیر جابهجایی، مقادیر دوران را نیز میتوان از تقسیم جابهجایی بر طول ستون (Δ/L) محاسبه نمود. منحنیهای هیسترزیس نمونههای عددی مورد مطالعه نشان میدهند که یک پاسخ الاستیک اولیه برای همه نمونهها رخ داده و به دنبال آن ستونها با روند کاهش سختی تدریجی و اتلاف انرژی وارد فاز الاستوپلاستیک میشوند. به طور کلی، کمانش اولیه محلی در اکثر نمونهها در دوران ۲–۳٪ اتفاق افتاد و شکستگی لوله فولادی در دوران ۲–۸٪ ظاهر شد.

یک مطالعه دقیق پارامتریک برای ارزیابی رفتار چرخهای اتصال CFST مدفون شده در فونداسیون با مشخصات ستون لوله دایرهای به قطر (D) ۵۰۸ میلیمتر، ضخامت ۳، ٤/٥ و ٦ میلیمتر (به ترتیب حالت لاغر (S)، غیرفشرده (NC) و فشرده (۳(C))، طول مدفون شدگی 0.5D، 0.5D و 1D، مقاومت فشاری بتن ۳۰، ٤٠ و ٥٠ مگایاسکال و چگونگی اتصال ستون CFST به فونداسیون در حالت A، B، C و D به ترتیب صفحه ستون، مدفون بدون سخت کننده، مدفون با سخت کننده حلقهای، مدفون با سخت کننده طولی شکل (۷) انجام شده است. تعداد کل نمونه های مورد بررسی ٥٤ عدد و چگونگی نامگذاری نمونههای طوری انجام شده است تا بتوان از نام نمونه پارامترهای مورد بررسی آن تشخیص داده شود. تمامی نمونهها در جدول (۲) آورده شده است که نام هر نمونه از شش قسمت تشکیل شده است. عبارت اول CCFC؛ که در نام تمامی نمونه ها مشترک است بیانگر اتصال ستون CFST به فونداسيون، عبارت دوم بيانگر چگونگی اتصال ستون به فونداسیون، عبارت سوم بیانگر میزان بار محوری ستون، عبارت چهارم بیانگر مقاومت فشاری بتن، عبارت پنجم بیانگر عمق مدفون شدگی و عبارت ششم بیانگر شرایط فشردگی مقطع ستون است.

Compact
CFST Column to Foundation Connection

Slender
Non Compact



شکل ۷. شرایط اتصال ستون CFST به فونداسیون در حالت مختلف مورد مطالعه

Fig. 7. The connection conditions of the CFST column to the foundation in different models دورانهای بالا به دلیل آسیب فشاری شدید بتن عملکرد خود را از دست داده و جداره فولادی سهم بیشتری در انتقال نیروها را بر عهده می گیرد. براساس منحنی های هیسترزیس نمونه ها با تغییر پارامتر فشردگی مقطع ستون CFST برای نحوه اتصال A، B، C و D نتایج نشان میدهد با افزایش ضخامت جداره فولادی در نمودارها تغییرات زیادی حاصل شده است که اثر قابل توجه نسبت قطر به ضخامت یا فشردگی مقطع ستون CFST در رفتار چرخهای این نوع اتصالات را نشان داده است. با توجه به اثر قابل توجه ضخامت جداره فولادی در انتقال نیروها به فونداسیون در حالتی که مقطع ستون CFST لاغر است در دوران های ۲ تا ۳ درصد دچار کمانش و در حالت غیرفشره در دورانهای ۳ تا ٤ درصد و برای مقطع فشرده در دوران ٤ تا ٥ درصد دچار كمانش شده است. این تغییرات فشردگی مقطع اثر قابل توجهی در رفتار چرخهای و مشخصههای سازهای اتصال گذاشته است که در بخش بعدی مقادیر کمی آن مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل (۸) منحنىهاى هيسترزيس نمونهها با تغيير پارامتر شرايط اتصال پاي ستون CFST به فونداسيون ترسيم شده است. در اين قسمت نمودارها در سه ردیف دسته بندی شدهاند و در هر ردیف نمودارهای مربوط به حالت ستون CFST فشرده (C)، غیرفشرده (NC) و لاغر (S) با مقاومت فشاری ثابت آورده شده است. در این قسمت هر نمودار از چهار منحنی هیسترزیس که برای چگونگی اتصال A، B، A و D ترسیم شده، مورد مقایسه قرار

با رسیدن به بیشترین بار جانبی می توان کاهش تدریجی مقاومت خمشی را در نمودارها مشاهده کرد. بعد از شکستگی لولههای فولادی پرشده با بتن، سطح حلقههای هیسترزیس کاهش یافت. فرآيند شكست در نمونهها به دليل نقص اوليه هسته بتن و لوله فولادی در اثر بارگذاری سبب ایجاد خسارات تجمعی می شود. این خسارات در نتیجه سبب خرد شدن بتن و شکستگی فولاد به صورت نامتقارن شده و با افزایش دوران ستون افزایش یافته است. بتن هسته در مناطق فشاري و کششي اثر محصورکنندگي را متحمل شده و متعاقب آن تحت پروتکل بارگذاری چرخهای دچار آسیب در پای ستون شده است. در شکل (۸) بر اساس نمودار هیسترزیس برای مقاومت فشاری ۳۰، ٤٠ و ٥٠ مگایاسکال، برای سه حالت ستون CFST فشرده (C)، غيرفشرده (NC) و لاغر (S) نتايج نشان میدهد با افزایش مقاومت فشاری بتن در نمودارها تغییرات کمی حاصل شده است که اثر کم مقاومت بتن در رفتار چرخهای این نوع اتصالات را نشان داده است. توزیع نیروی فشاری در بتن هسته به دلیل نزدیک بودن به تار خنثی در حالت خطی (دریف کمتر از ۱/۰ درصد) سبب افزایش سختی می شود ولی با افزایش دریفت و به دلیل اعمال بار در حالت رفت و برگشتی، ترک کششی زودرس در کل سطح مقطع بتن هسته پای ستون ایجاد شده که این عامل اثر بتن را کم کرده است. از طرفی افزایش مقاومت فشاری بتن سبب افزایش انتقال بار فشاری در رفتار چرخهای اتصال میشود که تاثیر آن در افزایش انتقال نیرو است که در مطالعه عددی رفتار چرخهای اتصال ستون CFST مدفون شده در فونداسیون

گرفته است. منحنی های هیسترزیس برای شرایط اتصال A، حلقه های لاغر و جمع شده تری نسبت به شرایط اتصال B، C و D داشته است. از طرفی حلقه های نمودار هیسترزیس در حالت D نسبت به حالت B و C چاق و پهن تر حاصل شده است که عملکرد خوب آن را در رفتار چرخه ای نشان داده است.

در ادامه مطالعه پارامتریک منحنیهای هیسترزیس نمونهها با تغییر پارامتر عمق مدفون پای ستون CFST به فونداسیون در شکل (۹) ترسیم شده است. در این قسمت نیز نمودارها در چهار ردیف دسته بندی شدهاند و در هر ردیف نمودارهای مربوط به نحوه اتصال A، B، J و D با مقاومت فشاری ثابت بتن آورده شده است. هر یک از نمودارها در این قسمت از سه منحنی هیسترزیس برای سه عمق مدفون پای ستون CFST، ۰/۰، ۰/۰ و ۱ برابر قطر ستون مورد مقایسه قرار گرفته است.

با توجه به نمودارهای هیسترزیس، میزان تاثیر عمق مدفون شدگی در حالتی که در پای اتصال از سخت کننده استفاده نشده است اثرگذاری بیشتری داشته است و با اضافه شدن سخت کننده ها به دلیل افزایش سختی پای ستون و توزیع یکنواخت تر نیروهای مقاوم از ستون به فونداسیون اثرگذاری آن کمتر شده است. از طرفی در حالتی که مقاطع ستون لاغر هستند با اضافه شدن سخت کننده طولی از کمانش موضعی زودرس جلوگیری کرده و صلبیت مناسبی در پای ستون برای انتقال نیرو ایجاد کرده است. با توجه به مطالب بیان شده در ادامه برای مقایسه دقیق تر میزان اثرگذاری هر یک از پارامترها در بخش های بعدی مشخصه های سختی، مقاومت و انرژی و شکل پذیری برای نمونه ها به طور کامل محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفته است.







در حالت کلی شرایط کاملا گیردار 1D برای اتصالات لوله دایرهای بدون سختکننده حاصل شده و سختی کل اتصال با افزایش طول مدفون شده شده از 0.5D به 1D، روند افزایشی داشته است.

مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس

۵. بررسی مشخصههای اتصالات CFST به فونداسیون

در این بخش با استفاده از منحنی پوش نمونههای عددی که از نمودارهای هیسترزیس حاصل شده، به محاسبه مشخصههای اتصالات CFST به فونداسيون يرداخته شده است. منظور از مشخصههای اتصال کاراکترهای سختی، مقاومت، شکل یذیری و انرژی است. منحنیهای پوش با اتصال نقاط نیروی بیشینه در جابهجایی هدف برای هر یک از حلقههای منحنی هیسترزیس در ناحیه کششی و فشاری ترسیم شده است. برای تحلیل منحنیهای پوش نیرو – جابهجایی در پژوهشهای پیشین روش ایدهآل سازی مختلفی ارائه شده است. روش های معمول ایدهآل سازی منحنی نيرو-جابهجايي شامل روش لنگر تسليم معادل (GYM)، روش انرژی معادل الاستیوپلاستیک (EEM) و روش پارک۳ هستند. در روشهای بیان شده، نقطه ($\Delta_{\rm m}, P_{\rm m}$)، نیروی بیشینه و جابهجایی معادل آن، نقطه (Δy,Py) نیروی تسلیم و جابهجایی معادل آن و نقطه (∆u,Pu) نیروی گسیختگی و جابهجایی معادل آن است که در مطالعات پیشین مقدار Pu=0.85Pm پیشنهاد شده است. در این یژوهش از روش EEM برای ایدهآل سازی نمودارهای یوش استفاده شده است. که در ادامه به بررسی مشخصههای سازهای حاصل شده از نمودارها پرداخته شده است و نتایج آن برای تمامی نمونهها در جدول (۲) آمده است. پس از محاسبه هر یک از مشخصهای اتصال ستون CFST به فونداسیون به مقایسه نسبی

میزان تغییرات سختی، مقاومت، شکلپذیری و انرژی در هر گروه از نمونهها بر حسب پارامتر متغیر پرداخته شده است.

۱-٥. سختي

شیب اولیه منحنیهای پوش نیرو-جابهجایی (Δ-F) که به روش انرژی محاسبه شده است بیانگر سختی سکانتی اتصال CFST مدفون شده در فونداسیون است که مقادیر آن برای هریک از نمونهها در جدول (۲) آورده شده است. از طرفی در بارگذاریهای چرخهای به دلیل تغییرات نیرو در هر حلقه منحنی هیسترزیس، کاهش سختی سکانتی پیشرونده در نمونهها حاصل میشود. در شکل (۱۰) سختی سکانتی حلقههای نمودار هیسترزیس به صورت کلی برای یک حلقه از نمودارهیسترزیس ترسیم شده است. شیب خط AB در شکل (۱۰) برای محاسبه سختی سکانتی ستفاده شده است. برای محاسبه این کاهش سختی سکانتی هر حلقه از فرمول (۳) استفاده شده است که در مطالعات پیشین نیز پیشنهاد شده است [13].

 $K_{\text{sec}} = (K_{\text{sec}} + K_{\text{sec}})/2 = (F_i^{-}/\Delta_i^{-} + F_i^{-}/\Delta_i^{-})/2$ (7) (R) $F_i^{-} = F_i^{+} - F_i^{-} - F_i^{+} - F_i^{-} -$



شکل ۹. منحنی های هیسترزیس نمونه های مورد مطالعه برای پارامتر عمق مدفون پای ستون

Fig. 9. Hysteresis curves of the studied models for the depth of the embedded foot of the column parameter

- 1. General Yield Moment Method
- 2. Equivalent Elastoplastic Energy Method

برای نمونه در شکل (۱۱) منحنی های جابه جایی - سختی سکانتی حلقه های هیسترزیس برای پارامتر مقاومت فشاری بتن با ثابت ماندن نوع اتصال و حالت فشردگی مقطع مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به نمودارهای شکل (۱۵) مقاومت فشاری بتن ستون CFST تاثیر کمی در سختی سکانتی اتصال داشته است. با توجه به مقادیر سختی سکانتی محاسبه شده در جدول (۲)، مشخصه سختی سکانتی به ترتیب نسبت به پارامترهای نحوه اتصال ستون CFST، شرایط فشردگی ستون CFST و طول مدفون شده حساسیت بیشتری در برابر بار چرخه ای از خود نشان داده است.

شکل ۱۰. سختی سکانتی حلقههای نمودار هیسترزیس



Fig. 10. Secant stiffness of the hysteresis loops

٥-٢. شكل پذيرى

یکی دیگر از شاخص های مهم در نمودار نیرو-جابه جایی در سازه ها، شاخص شکل پذیری است. در این مطالعه برای محاسبه شاخص شکل پذیری از نسبت تغییر شکل ها در منحنی های پوش استفاده شده است. شاخص شکل پذیری با نماد D و بر اساس رابطه (٤) محاسبه شده است و مقادیر آن در جدول (۲) اساس رابطه شده در شکل (۱۳) آورده شده است [13]. و حالت مقایسه شده در شکل (۱۳) آورده شده است (٤)

در این فرمول عبارت ${}^{\Delta}_{e} {}_{e} {}^{\sqrt{\Delta}}_{e}$ به ترتیب جابه جایی در نقطه تسلیم و گسیختگی نهایی است. مقادیر شکل پذیری در اتصال نوع A (اتصال دارای صفحه ستون) در بازه بین ۲/۳۰ تا ۲/۳۰ در اتصال در اتصال نوع B (مدفون بدون سخت کننده) با عمق مدفون شدگی شدگی 0/۰ برابر قطر ستون در بازه بین ۳/۰۹ تا ۶/۱۵ در اتصال نوع D (مدفون با سخت کننده حلقه ای) با عمق مدفون شدگی 0/ برابر قطر ستون در بازه بین ۳/۷۰ تا ۶/۹ و اتصال نوع D مدفون با سخت کننده مقدون شدگی ۵/۰ برابر قطر ستون در بازه بین ۳/۷۰ تا ۲/۹ مدفون شدگی قرار برابر قطر ستون در بازه بین ۳/۷۰ تا ۶/۹ در اتصال نوع D فرون با سخت کننده طولی) با عمق مدفون شدگی 0/۰ برابر قطر ستون در بازه بین ۱۹/۹ تا ۶/۹ در اتصال نوع D فرون با سخت کننده حلقه مدفون شدگی ۵/۰ برابر قطر ستون در بازه بین ۱۹/۹ تا ۶/۹ در مدفون شدگی ۵/۰ برابر

عمق از ۰/۰ به ۲۰/۰ و ۱ برابر قطر ستون روند افزایشی در مقادیر شکلپذیری حاصل شده است که در جدول (۲) آورده شده است. با تغییر پارامتر مقاومت فشاری بتن از ۳۰ به ٤٠ و ۰۰ مگاپاسکال تاثیر کمی در شکلپذیری حاصل شده است. بیشترین میزان شکلپذیری به ترتیب برای پارامترهای چگونگی اتصال ستون CFST، شرایط فشردگی ستون CFST و طول مدفون شده حاصل شده است.

۳-0. استهلاک انرژی

رفتار لرزهای اعضای سازهای با توجه به تغییرات خواص مصالح در ناحیه پلاستیک در حرکت رفت و برگشتی، سبب استهلاک و جذب انرژی ورودی و مقاومت سازه در برابر زلزله می شود. در این راستا شاخص استهلاک انرژی یکی دیگر از شاخص های سازهای مهم در رفتار چرخهای است که در نمونههای عددی این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر استهلاک انرژی از مجموع مساحت زیر نمودار هر یک از حلقههای نمودار هیسترزیس تا جابهجایی گسیختگی ($^{\Delta_{u}}$) محاسبه شده است. نمودار مربوط به منحنی های انرژی تجمعی مستهلک شده بطور خلاصه برای چند نمونه عددی در حالات مختلف چگونگی اتصال ستون CFST به فونداسیون در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در شکل (۱۲)، انرژی حلقههای نمودار هیسترزیس برای دورانهای مختلف نشان داده شده است که به تدریج با افزایش جابهجایی جانبی مقادیر انرژی روند صعودی دارد. در ادامه، انرژی هر حلقه به تدریج به دلیل آسیب تجمعی ناشی از بارگذاری چرخهای کاهش مییابد. هنگامی که ستونهای آزمایش در مرحله خرابی بودند، کاهش مشهود انرژی حلقه نشان داده که نمونه به زودی از کار میافتد. با توجه به مقادیر حاصل شده از میزان استهلاک انرژی مدل های عددی مورد مطالعه در جدول (۲)، ستون های دارای اتصال مدفون شده در حالت D اتلاف انرژی بسیار خوبی را نشان می دهد و ظرفیت اتلاف انرژی قابل توجهی نسبت به نمونههای دیگر از خود نشان دادند. بعد از پارامتر حالت اتصال پای ستون، پارامتر عمق مدفون شدگی و شرایط فشردگی ستون بیشترین تاثیر را توانایی اتلاف انرژی از خود نشان دادند. پارامتر مقاومت بتن کمترین تاثیر را نسبت به دیگر یارامترها در میزان اتلاف انرژی نشان داد.

صالح محمد ابراهیم زاده سپاسگزار و همکاران

مطالعه عددی رفتار چرخهای اتصال ستون CFST مدفون شده در فونداسیون

	<u> </u>	0), 0	J.		• •		
specimens	Ksec (kN/mm)	P _y (kN)	P _{max} (kN)	δ _y (mm)	δu (kN)	D	E(kN.mm)
CCFC-A-0.2-30-0-S	4.72	163.54	210.51	34.67	82.82	2.39	90650.59
CCFC-A-0.2-40-0-S	4.97	176.93	222.85	35.63	84.65	2.38	93061.06
CCFC-A-0.2-50-0-S	5.20	190.11	234.41	36.59	86.47	2.36	95806.87
CCFC-A-0.2-30-0-NC	7.08	231.92	282.98	32.74	87.38	2.67	121968.14
ССГС-А-0.2-40-0-NС	7.38	248.58	297.13	33.71	89.20	2.65	124168.84
CCFC-A-0.2-50-0-NC	7.55	264.30	306.54	34.99	92.23	2.64	128171.64
ССГС-А-0.2-30-0-С	10.07	300.50	345.10	29.85	92.41	3.10	137135.63
ССГС-А-0.2-40-0-С	10.31	311.03	353.73	30.17	93.31	3.09	150337.26
ССГС-А-0.2-50-0-С	10.60	323.26	360.63	30.50	93.99	3.08	148265.12
CCFC-B-0.2-30-0.5-S	7.21	189.23	225.06	26.23	83.65	3.19	156606.47
CCFC-B-0.2-40-0.5-S	7.71	213.62	248.60	27.70	85.49	3.09	166068.01
CCFC-B-0.2-50-0.5-S	8.37	236.43	269.35	28.26	87.33	3.09	168683.96
ССГС-В-0.2-30-0.5-NC	10.97	271.67	300.08	24.77	88.25	3.56	208808.63
ССГС-В-0.2-40-0.5-NC	11.63	296.57	327.52	25.50	90.09	3.53	216508.97
CCFC-B-0.2-50-0.5-NC	12.37	327.53	350.97	26.47	92.85	3.51	219800.31
ССГС-В-0.2-30-0.5-С	15.65	353.52	375.10	22.59	93.76	4.15	267536.05
ССГС-В-0.2-40-0.5-С	16.28	375.54	394.60	23.07	94.68	4.10	275818.97
ССГС-В-0.2-50-0.5-С	16.64	395.94	408.10	23.80	96.52	4.06	276525.27
CCFC-C-0.2-30-0.5-S	9.23	207.33	239.10	22.47	84.91	3.78	182533.73
CCFC-C-0.2-40-0.5-S	10.02	230.75	260.39	23.02	86.77	3.77	188118.60
CCFC-C-0.2-50-0.5-S	10.76	254.48	281.12	23.64	88.64	3.75	196815.42
CCFC-C-0.2-30-0.5-NC	13.80	292.80	320.09	21.22	89.57	4.22	251360.89
CCFC-C-0.2-40-0.5-NC	14.70	321.04	343.80	21.84	91.44	4.19	256479.34
CCFC-C-0.2-50-0.5-NC	15.40	349.29	362.94	22.68	94.24	4.16	262211.93
CCFC-C-0.2-30-0.5-C	19.37	374.82	385.65	19.35	95.17	4.92	315853.51
<u>CCFC-C-0.2-40-0.5-C</u>	20.20	399.31	406.86	19.76	96.10	4.86	319896.43
<u>CCFC-C-0.2-50-0.5-C</u>	20.59	419.80	419.59	20.39	97.97	4.81	323029.70
<u>CCFC-D-0.2-30-0.5-S</u>	11.48	241.36	276.69	21.02	87.45	4.16	307375.11
CCFC-D-0.2-40-0.5-S	12.55	271.19	304.21	21.61	89.38	4.14	315411.26
CCFC-D-0.2-50-0.5-S	13.54	300.34	329.82	22.19	91.30	4.11	333820.08
CCFC-D-0.2-30-0.5-NC	17.22	341.94	3/1.58	19.85	92.26	4.65	412/81.93
CCFC-D-0.2-40-0.5-NC	18.39	3/5.90	400.15	20.44	94.18	4.61	429704.51
CCFC-D-0.2-50-0.5-NC	19.30	409.47	422.94	21.22	97.07	4.58	459397.73
CCFC-D-0.2-30-0.5-C	23.81	431.01	442.30	18.10	98.03	5.42	4/0392.58
CCFC-D-0.2-40-0.5-C	24.99	462.08	408.01	18.49	98.99	5.35	491000.14 521499.91
CCFC-D-0.2-50-0.5-C	25.39	488.18	485.05	19.07	100.91	3.29	331488.81
ССГС-D-0.2-50-1-5	9.91	237.28	200.86	25.97	04.07	3.27	175204 47
CCFC-D-0.2-50-0.75-5	15.02	259.40	420.80	20.09	00.57	2.60	2/78/8/7
$\frac{\text{CCFC-B-0.2-30-1-NC}}{\text{CCEC P 0.2 50 0.75 NC}}$	13.03	300.74	429.33	24.55	90.37	2.56	24/040.47
CCFC-B-0.2-50-0.75-NC	20.44	481.79	506.38	24.55	103.12	1 38	316374.76
$\frac{\text{CFC-B-0.2-30-1-C}}{\text{CCEC P 0.2 50 0.75 C}}$	18.32	401.79	457.74	23.57	08.12	4.36	2050/3.68
ССЕС С 0.2 50.1 8	12.80	288.20	320.06	23.08	93.42	4.20	293943.08
	11.67	260.29	304.66	22.33	92.50	3.03	216054 50
<u> </u>	17.79	393.62	403.31	22.32	102.22	4.62	312190.23
CCFC-C-0 2-50-0 75-NC	16.90	353.36	301.03	20.90	94.47	4.52	303378.42
CCFC-C-0.2-50-0.75-11C	24.10	454.81	470.49	18.87	103.12	5 46	390953 57
CCFC_C_0 2-50-0 75_C	27.10	429.90	455.68	19.08	99 71	5.23	369675 44
CCFC-D-0 2-50-1-S	16.09	296.63	348.64	18.43	93 55	5.07	406143.65
CCFC-D-0 2-50-0 75-8	14 56	281.90	345.28	19.36	88 87	4.59	366988 49
CCFC-D-0 2-50-1-NC	23 33	399.95	460 76	17.14	95.90	5.59	547717 61
CCFC-D-0.2-50-0 75-NC	21.55	389.37	444 17	18.07	94.81	5.25	517435.91
CCFC-D-0.2-50-0.75-1(C	31.99	477.73	539.68	14.93	97.80	6.55	641527.92
CCFC-D-0.2-50-0.75-C	28.64	464.57	514.82	16.22	95.10	5.86	587741.33
	20.0 .		01.002	10.22	/0.10	0.00	20111100

جدول ۲. خلاصهای از مقادیر مشخصه های چرخهای اتصال CFST به فونداسیون



Fig. 11. Displacement-Secant stiffness curves of hysteresis loops for the compressive strength concrete parameter

٤-٥. بررسی تغییرات مشخصههای اتصال

در این بخش به بررسی تغییرات مشخصههای سختی، مقاومت، شکل پذیری و انرژی اتصال ستون CFST به فونداسیون پرداخته شده است و در شکل (۱۳) این تغییرات در نمودارهای جداگانه برای هر پارامتر ترسیم شده است. برای بررسی این تغییرات هر یک از مشخصههای سختی، مقاومت، شکلپذیری و انرژی به ترتیب با نماد D ،F ،K و E معرفی شده و برای هر کدام از دو اندیس i و o استفاده شده است. اندیس i بیانگر مقادیر هر یک از مشخصهها در نمونههای عددي و انديس 0 بيانگر مشخصه مرجع در هر گروه از نمونهها است. برای نمونه در سه نمونه CCFC-A-0.2-40- ،CCFC-A-0.2-40- ، 0-S و CCFC-A-0.2-50-0-S مشخصههای نمونه با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال بعنوان مرجع در نظر گرفته شده و میزان تغییرات مشخصههای نمونههای با مقاومت ٤٠ و ٥٠ مگاپاسکال نسبت به نمونه ۳۰ مگایاسکال محاسبه شده است. سختی دو نمونه -CCFC-A CCFC-A- و CCFC-A-0.2-50-0-S نسبت به نمونه -0.2-40-0-S 0.2-30-0-S به ترتیب ٥ و ١٠ درصد افزایش، میزان افزایش مقاومت این دو نمونه به ترتیب ٦ و ١١ درصد و میزان افزایش انرژی ۳ و ٦ درصد حاصل شده است. در بین نمونههای مورد بررسی برای پارامتر مقاومت فشاري بتن بيشترين افزايش سختي، مقاومت، شكل پذيري و انرژی به ترتیب ۱۸، ۲۵، ۳ و ۱۳ درصد حاصل شده است. برای پارامتر شرایط فشردگی مقطع ستون CFST بیشترین افزایش سختی، مقاومت، شکل پذیری و انرژی به ترتیب ۱۱۷، ۲۷، ۳۳ و ۷۳ درصد حاصل شده است. برای پارامتر چگونگی اتصال ستون CFST بیشترین افزایش سختی، مقاومت، شکل پذیری و انرژی به ترتیب ۱٦۱، ٤١، ٧٥ و ۲٥٨ درصد حاصل شده و براي پارامتر ميزان مدفون شدگی ستون CFST بیشترین افزایش سختی، مقاومت، شکل پذیری و انرژی به ترتیب ۲۵، ۲۵، ۲۷ و ۲۲ درصد حاصل شده است. در

نمونههای مورد بررسی به دلیل وابستگی رفتار اتصال ستون CFST به فونداسیون به چگونگی اتصال و اثر محصورشدگی، در نمونههای با نسبت قطر به ضخامت (D/t) کمتر (مقطع فشرده) ظرفیت اتلاف انرژی بالاتری مشاهده شده است. در نمونههایی که مقاومت بتن در آنها افزایش یافته است، ظرفیت تحمل نهایی اتصالات به طور نامحسوس افزایش می بابد. بیشترین تغییرات مشخصهها در پارامتر پرگونگی اتصال ستون CFST به فونداسیون حاصل شده است. میزان افزایش قابل توجه مشخصهها در این پارامتر نشان می دهد عملکرد نصیف است. تاثیر تغییرات پارامتر مقاومت است، چگونگی اتصال صفحه ستون در مقایسه با اتصال ستون CFST مدفون بسیار نصیف است. تاثیر تغییرات پارامتر مقاومت فشاری بتن، چگونگی نصیف است. تاثیر تغییرات پارامتر مقاومت فشاری بتن، حکونگی اتصال ستون CFST به ترتیب بیشتر بر روی مقاومت اتصال، سختی اتصال ستون CFST به ترتیب بیشتر بر روی مقاومت اتصال، سختی شدگی ستون CFST به ترتیب بیشتر بر روی مقاومت اتصال، سختی شدگی ستون TST به ترتیب بیشتر بر روی مقاومت اتصال، سختی اتصال، استهلاک انرژی و سختی اتصال حاصل شده است که در شکل

۲. پیش بینی آسیب اتصال

هنگامی که بار جانبی یا جابهجایی جانبی از حالت ارتجاعی فراتر رود، پاسخ الاستیک و پاسخ پلاستیک تحت بارگذاری چرخهای به طور متناوب تکرار شده و تشخیص زمان و مکان پاره شدگی لوله از هندسه گرافیکی مدل قابل تشخیص است. علاوه بر این، به دلیل سخت شدگی رفتار تنش-کرنش مهندسی فولاد، کرنش و تنش شکستگی حاصل شده در نمونه دمبلی در آزمایشگاه و در مدل درستی آزمایی نمی تواند به عنوان تنش و کرنش شکستگی تحت بارگذاری چرخهای استفاده شود. به همین دلیل در مدل عددی از تنش-کرنش حقیقی استفاده شده است. در شکل (۱۶) مقایسهای حالت شکست رخ داده در نمونههای عددی با شرایط مختلف اتصال ستون CFST به فونداسیون ارائه شده است.



شکل ۱۲. منحنیهای انرژی تجمعی-دریف برای پارامتر شرایط اتصال پای ستون

Fig. 12. Cumulative energy -drift curves for the column foot conditions parameter



شکل ۱۳ نمودار نسبت مشخصهها برای نمونههای اتصال مورد مطالعه، الف) پارامتر مقاومت فشاری بتن، ب) پارامتر لاغری مقطع، ج) پارامتر شرایط اتصال پای ستون، د) پارامتر عمق مدفونشدگی

Fig. 13. Hysteresis Characteristic ratio for the connections, a) concrete compressive strength parameter, b) cross-section slender parameter, c) column foot connection condition parameter, d) embedded depth parameter

درصد سختکنندههای طولی از کمانش موضعی پافیلی در پای ستون کم کرده و کمانش موضعی در ورقهای سختکننده رخ داده و در ادامه در دریفت بالای ۷ تا ۸ درصد حالت آسیب به صورت ترکهای قطری در فونداسیون رخ داده است و از ظرفیت فونداسيون نيز در اتصال استفاده شده است.

در منحنی های هیسترزیس دو حالت شکست مختلف برای نمونههای مورد بررسی رخ داد که شامل شکست در پای ستون (پارگی لوله فولاد) و شکست در بتن فونداسیون در اطراف پای ستون است. در نمونههای با نسبت قطر به ضخامت مختلف در حالت A (صفحه ستون) و حالت مدفون شدگی B و C، شکست اتصال بصورت پارگی جداره فولادی در پای ستون و برای حالت اتصال مدفون شده D سبب رخ دادن شکست در بتن فونداسیون به صورت ترکهای قطری در اطراف یای ستون حاصل شده است که در شکل (۱٤) نشان داده شده است.

در دریفت کم (زیر ۱/۵ درصد)، اگرچه پای ستون به کشش و فشار افتاده است ولي كرنش پلاستيک صفر بوده است. با افزايش دریفت از ۱/۵ درصد به بالا پای ستون دارای تنش و کرنشهای پلاستیک شده و المانهای پای ستون کرنش و تنش باقیمانده ناشی از پلاستیک شدگی را تجربه کردند. در دریفت بین ۳ تا ٥ درصد کمانش خفیف قابل مشاهدهای در لوله فولادی رخ داده است. در ادامه با افزایش دریفت نمونه عددی با شرایط اتصال صفحه ستون، مدفون شدگی بدون سختکننده و مدفون شدگی با سختکننده حلقهای در دوران ۵ تا ٦ درصد دچار کمانش موضعی شدید جداره فولادی در پای ستون شده و در دوران بالای 7 درصد کرنش پلاستیک المانهای محل کمانش کرده به مقدار بالای ۲/۳ رسیده و جداره فولادی شروع به پارگی کرده که با حذف شدگی المان در یای ستون ظاهر شده است. در نمونه اتصال دارای سختکننده طولی مدفون شده حالت آسیب در دوران ۵ تا ٦ شکل ۱٤. حالت شکست نمونههای عددی در شرایط مختلف اتصال ستون CFST به فونداسیون، الف) بدون سختکننده، ب) صفحه ستون، ج) سختکننده

حلقهاي، د) سختكننده طولي

مطالعه عددی رفتار چرخهای اتصال ستون CFST مدفون شده در فونداسیون



Fig. 14. Failure mode of numerical specimens in different conditions of CFST column connection to the foundation, a) embedded column without stiffener, b) base plate, c) embedded column with ring stiffener, d) embedded column with longitudinal stiffener

۲. نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد ستون CFST و اتصال آن به فونداسیون در شرایط مدفون تحت بار فشاری محوری ثابت و جابهجایی چرخهای جانبی مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج حاصل شده زیر را میتوان بر اساس مطالعه عددی ارائه داد:

با استفاده از مدل اجزاء محدود پیشنهادی، می توان برای اتصال ستون CFST به فونداسیون حالتهای شکست، کمانش موضعی، عملکرد جداره فولادی و پارگی و همچنین پیشبینی رفتار مطلوب نمودار هیسترزیس که مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد، استفاده نمود.

رفتار چرخهای ضعیف برای اتصال CFST به فونداسیون در شرایط اتصال با صفحه ستون و رفتار چرخهای بهتر برای ستون CFST و اتصال آن به فونداسیون در شرایط مدفون شده حاصل شده است. علاوه بر این، رفتار هیسترزیس اتصال ستون CFST با صفحه سختکننده مدفون شده نیز بسیار بهتر از اتصال مدفون شده بدون سختکننده است.

حلقههای نمودار هیسترزیس با افزایش مقاومت بتن تغییر کمی دارند. علاوه بر این، مقاومت جانبی، سختی جانبی، عملکرد شکلپذیری و اتلاف انرژی تجمعی نیز با افزایش مقاومت بتن افزایش کمی داشته است.

حالتهای خرابی اتصال CFST به فونداسیون با صفحه انتهایی مانند حالت اتصال مدفون شده بدون سخت کننده و با سخت کننده دیسکی است. حالات خرابی در این سه حالت (حالت A، B و C) از اتصال بصورت شکستگی لوله فولادی انتهای ستون است. در حالت اتصال مدفون شده با سخت کننده طولی (حالت D) بصورت ترک خوردگی قطری بتن روی فونداسیون است.

حلقههای نمودار هیسترزیس با افزایش ضخامت لولههای فولادی (تغییر فشردگی مقطع ستون CFST) به حالت کشیدهتر (چاقتر) حاصل شدهاند. علاوه بر این، مقاومت جانبی، سختی جانبی، عملکرد انعطاف پذیر و انرژی تجمعی اتلاف شده نیز با افزایش ضخامت لوله فولادی افزایش مییابد.

شرایط مدفون شدگی ستون CFST با سختکننده اثر مثبتی بر روی حلقههای هیسترزیس اتصال CFST به فونداسیون ایجاد کرده

- [10] Moon, J., Lehman, D. E., Roeder, C. W., & Lee, H. E. 2013. Evaluation of embedded concretefilled tube CFT column-to-foundation connections. *Engineering structures*, 56, 22-35.
- [11] Stephens, M. T., Berg, L. M., Lehman, D. E., & Roeder, C. W. 2016. Seismic CFST column-toprecast cap beam connections for accelerated bridge construction. *Journal of Structural Engineering*, 1429, 04016049.
- [12] Lee, J. R. 2011. Experimental investigation of embedded connections for concrete-filled steel tube columns subjected to combine axial-flexural loading *Doctoral dissertation*, *University of Washington*.
- [13] Berg, L. M. 2014. CFT column-to-cap beam connections for accelerated bridge construction in seismic regions *Doctoral dissertation*.
- [14] Moon, J., Lehman, D. E., Roeder, C. W., & Lee, H. E. 2013. Evaluation of embedded concretefilled tube CFT column-to-foundation connections. *Engineering structures*, 56, 22-35.
- [15] Moon, J., Roeder, C. W., Lehman, D. E., & Lee, H. E. 2012. Analytical modeling of bending of circular concrete-filled steel tubes. *Engineering structures*, 42, 349-361.
- [16] Rezaifar, O., & Younesi, A. 2016. Finite element study the seismic behavior of connection to replace the continuity plates in (NFT/CFT) steel columns. Steel and Composite Structures, 21(1), 73-91.
- [17] Naghipour, M., Nemati, M., Jalali, J., & Nematzadeh, M. 2017. The effect of active confinement and shear key elements on the flextural behavior of Concrete Filled Steel Tube (CFST). *Journals of Civil and Environmental Engineering*, 46, 57-70.
- [18] Naghipour, M., Mahdavi, M., & M Ebrahimzadeh, S. 2021. Numerical analysis of concrete-filled double skin tubular slender columns with internal circular and external hexagonal tubes. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(2), 56-69.
- [19] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. 2021. An Experimental Study on Cyclic Performance of the Geometrically Prismatic Concrete-Filled Double Skin Steel Tubular (CFDST) Columns. *Iranian Journal of Science* and Technology, Transactions of Civil Engineering, 45(2), 629-638.
- [20] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. 2020. Impact of Temperature Rise on the Seismic Performance of Concrete-Filled Double Skin Steel Columns with Prismatic Geometry. *Journal* of Testing and Evaluation, 49(4).

است. علاوه بر این، این نوع اتصال توانسته است مقاومت جانبی، سختی جانبی، شکل پذیری و انرژی تجمعی اتلافی را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. در بین پارامترهای مورد بررسی بیشترین تاثیر در بهبود رفتار چرخهای اتصال ستون CFST به فونداسیون را به ترتیب پارامتر نحوه اتصال، شرایط فشردگی ستون، عمق مدفون شدگی داشتند.

۸. مراجع

- [1] AASHTO, L. 2012. AASHTO LRFD Bridge design specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials, *Washington, DC*.
- [2] AISC. Steel Construction Manual. American Institute of Steel Construction, *Chicago, IL*, 14th Ed.
- [3] Borzouie, J., MacRae, G. A., Chase, J. G., Rodgers, G. W., & Clifton, G. C. 2016. Experimental studies on cyclic performance of column base strong axis–aligned asymmetric friction connections. *Journal of Structural Engineering*, 1421, 04015078.
- [4] Kanvinde, A. M., Higgins, P., Cooke, R. J., Perez, J., & Higgins, J. 2015. Column base connections for hollow steel sections: seismic performance and strength models. *Journal of structural engineering*, 1417, 04014171.
- [5] Rodas, P. T., Zareian, F., & Kanvinde, A. 2016. Hysteretic model for exposed column–base connections. *Journal of Structural Engineering*, 14212, 04016137.
- [6] Cui, Y., Nagae, T., & Nakashima, M. 2009. Hysteretic behavior and strength capacity of shallowly embedded steel column bases. *Journal* of structural engineering, 13510, 1231-1238.
- [7] Grilli, D., Jones, R., & Kanvinde, A. 2017. Seismic performance of embedded column base connections subjected to axial and lateral loads. *Journal of Structural Engineering*, 1435, 04017010.
- [8] Han, L. H., Li, W., & Bjorhovde, R. 2014. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular CFST structures: Members. *Journal of constructional steel research*, 100, 211-228.
- [9] Lehman, D. E., & Roeder, C. W. 2012. Foundation connections for circular concretefilled tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, 78, 212-225.

Experiments. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 221, 1-13.

- [34] Qiu, W., McCann, F., Espinos, A., Romero, M. L., & Gardner, L. 2017. Numerical analysis and design of slender concrete-filled elliptical hollow section columns and beam-columns. *Engineering structures*, 131, 90-100.
- [35] Zhu, H., Stephens, M. T., Roeder, C. W., & Lehman, D. E. 2017. Inelastic response prediction of CFST columns and connections subjected to lateral loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 132, 130-140.
- [21] Dai, X. H., Lam, D., Jamaluddin, N., & Ye, J. 2014. Numerical analysis of slender elliptical concrete filled columns under axial compression. *Thin-Walled Structures*, 77, 26-35.
- [22] Duarte, A. P. C., Silva, B. A., Silvestre, N., De Brito, J., Júlio, E., & Castro, J. M. 2016. Finite element modelling of short steel tubes filled with rubberized concrete. *Composite Structures*, 150, 28-40.
- [23] Ding, F. X., Yin, G. A., Wang, L. P., Hu, D., & Chen, G. Q. 2017. Seismic performance of a nonthrough-core concrete between concrete-filled steel tubular columns and reinforced concrete beams. *Thin-Walled Structures*, 110, 14-26.
- [24] Li, G., Liu, D., Yang, Z., & Zhang, C. 2017. Flexural behavior of high strength concrete filled high strength square steel tube. *Journal of Constructional Steel Research*, 128, 732-744.
- [25] Yang, Y. F., Wen, Z., & Dai, X. H. 2016. Finite element analysis and simple design calculation method for rectangular CFSTs under local bearing forces. *Thin-Walled Structures*, 106, 316-329.
- [26] Alam, M. I., Fawzia, S., & Zhao, X. L. 2016. Numerical investigation of CFRP strengthened full scale CFST columns subjected to vehicular impact. *Engineering Structures*, 126, 292-310.
- [27] Han, L. H., Tao, Z., & Liu, W. 2001. Concrete filled steel tubular structures from theory to practice [J]. *Journal of Fuzhou University* Natural Sciences Edition, 6003.
- [28] Tao, Z., Ghannam, M., Song, T. Y., & Han, L. H. 2016. Experimental and numerical investigation of concrete-filled stainless steel columns exposed to fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 118, 120-134.
- [29] Li, W., & Han, L. H. 2011. Seismic performance of CFST column to steel beam joints with RC slab: Analysis. *Journal of Constructional Steel Research*, 671, 127-139.
- [30] Tu, Y. Q., Shen, Y. F., Zeng, Y. G., & Ma, L. Y. 2014. Hysteretic behavior of multi-cell T-Shaped concrete-filled steel tubular columns. *Thin-Walled Structures*, 85, 106-116.
- [31] Manual, A. U. 2020. Abaqus user manual. Abaqus.
- [32] Hooputra, H., Gese, H., Dell, H., & Werner, H. 2004. A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminum extrusions. *International Journal of Crashworthiness*, 95, 449-464.
- [33] Hopperstad, O. S., Børvik, T., Langseth, M., Labibes, K., & Albertini, C. 2003. On the influence of stress triaxiality and strain rate on the behaviour of a structural steel. Part I.

Numerical study of the cyclic behavior of embedded CFST columns to foundation

Saleh Mohammad Ebrahimzadeh Sepasgozar¹, Morteza Naghipour^{2*}, Mahdi Nematzadeh³

1. PhD student, Babol Noshirvani University of Technology

2. Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology

3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and

Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

*m-naghi@nit.ac.ir

Abstract

In this paper, a finite element analysis of the behavior of embedded CFST columns to the foundation under axial-lateral combined loading. First, the proposed finite element model is compared and analyzed by the experimental results of previous research, which showed that the local damage, failure patterns and hysteresis curves were consistent. A detailed parametric study to evaluate the cyclic behavior of embedded CFST columns to the foundation with the characteristics, the ration diameter to thickness, embedded length, compressive strength and connection conditions CFST column to the foundation. Based on the parametric study, the values of stiffness, strength, ductility and energy for the studied specimen have been calculated. The results showed that using the proposed finite element model, weak cyclic behavior for CFST connection to the foundation in the conditions of connection with the base plate and better cyclic behavior for the CFST column and its connection to the foundation in the embedded conditions is obtained. In addition, the hysteresis behavior of the CFST column connection with the embedded stiffener plate is much better than the embedded connection without the stiffener. The rings stiffener of the hysteresis diagram changes compact condition with increasing concrete strength. In addition, lateral strength, lateral stiffness, ductility performance and cumulative energy dissipation also increased in compact specimens with increasing confine concrete. The failure modes of the CFST connection to the foundation with the base plate are the same as the embedded connection mode without the stiffener and with the ring stiffener. The failure modes in these three modes are from the connection as a tearing steel pipe at the end of the column. In the case of an embedded connection with a longitudinal stiffener, it is a diagonal crack of the concrete on the foundation. Lateral strength, lateral stiffness, ductility performance, and cumulative energy also increase with increasing steel pipe thickness. CFST column burial conditions with hardeners have a positive effect on the hysteresis rings of CFST connection to the foundation, and this type of connection has been able to significantly improve lateral strength, lateral stiffness, ductility and dissipative cumulative dissipation energy.

Keywords: Concrete filled Steel tube, Column connection to foundation, stiffness, embedded length, finite element analysis