

مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن

مجید طاهری^۱، سیامک اپیکچی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- استادیار، مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

*تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، epackachis@aut.ac.ir

چکیده

مد شکست برشی عناصر سازه‌ای مانند تیرها و ستون‌ها از مدهای شکست ترد محسوب می‌شود. بر این اساس، آیین‌نامه‌های طراحی روابط محافظه‌کارانه‌ای را برای تعیین مقاومت برشی ارائه کرده‌اند تا از عدم وقوع این شکست ناگهانی اطمینان حاصل شود. در این راستا، آیین‌نامه AISC 360 روابطی را برای تعیین مقاومت برشی اعضای مختلط محاط در بتن با در نظر گرفتن مقاومت برشی فولاد به تنهایی، مقاومت برشی بخش بتن مسلح و مقاومت مقطع فولادی در ترکیب با میلگردهای عرضی ارائه کرده است. آیین‌نامه AISC 360 به‌طور محافظه‌کارانه‌ای استفاده از مجموع مقاومت برشی مقطع فولادی و بتن مسلح را برای تعیین مقاومت برشی اعضای مختلط محاط در بتن به دلیل تحقیقات ناکافی نادیده گرفته است.

این مطالعه رفتار برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن را به‌صورت مطالعات آزمایشگاهی و عددی بررسی می‌کند. در این پژوهش، ستون‌های مختلط محاط در بتن با طول کوتاه که رفتار آن‌ها توسط برش کنترل می‌شود، با در نظر گرفتن چندین پارامتر مهم طراحی، از جمله مقاومت فشاری بتن، نسبت فولاد و شکل هسته فولادی، نسبت میلگردهای طولی، فاصله میلگردهای عرضی و نسبت عملکرد مختلط مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. مدهای شکست، الگوی گسترش ترک، پاسخ نیرو-تغییرشکل، مقاومت برشی اسمی ستون‌های مختلط محاط در بتن و اثرات متغیرهای کلیدی بر مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن ارائه و مورد بحث قرار گرفته‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که حذف بخش فولادی یا سهم بتن مسلح منجر به نادیده گرفتن بخش قابل توجهی از مقاومت برشی اعضای مختلط محاط در بتن می‌شود. از بین پارامترهای کلیدی طراحی در نظر گرفته شده، نسبت میلگرد عرضی، مقاومت فشاری بتن و نسبت هسته فولادی تأثیرگذارترین متغیرهایی هستند که بر رفتار برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن تأثیر می‌گذارند.

واژگان کلیدی

ستون‌های مختلط محاط در بتن، رفتار برشی، مقاومت برشی اسمی، مد شکست، مطالعات آزمایشگاهی و عددی، نرم‌افزار LS-DYNA

Shear strength of encased composite columns

M. Taheri, S. Epackachi

Abstract

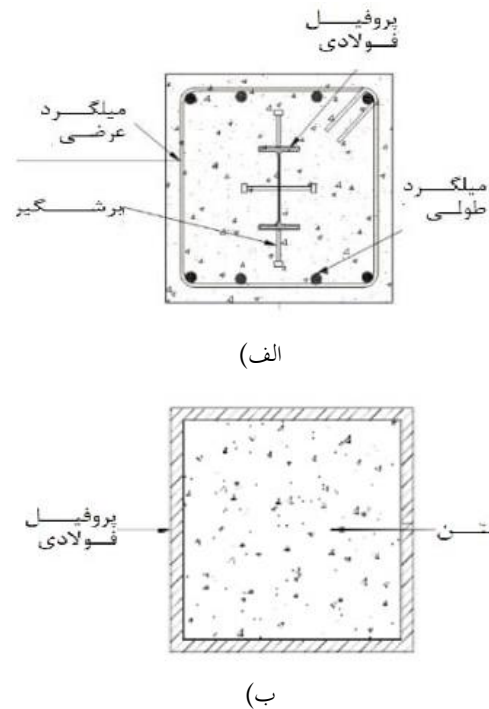
Shear failure of structural elements such as beams and columns is considered as a brittle failure. Accordingly, the design standards provide conservative equations for determining shear strength to ensure to delay of this abrupt failure. In this regard, the AISC 360 Standard provides equations to determine the shear strength of encased composite members considering the steel contribution, the reinforced concrete contribution, and the strength of the steel section in combination with the transverse reinforcement. The AISC 360 conservatively ignores the combination of the shear strength of steel section and reinforced concrete to determine the shear strength of encased composite members due to insufficient research.

This study investigates the shear behavior of encased composite (EC) columns experimentally and numerically. Short EC columns in which their behavior is governed by shear are tested considering several design variables, including the concrete compressive strength, the steel ratio, the shape of the steel core, the ratio of longitudinal reinforcement, the transverse reinforcement spacing, and the level of the composite action. Failure mode, the crack pattern, the load-displacement response, the nominal shear strength of EC columns, the yield condition of steel core, and the effects of key variables on the shear strength of EC columns are presented and discussed. The results of this study show that the exclusion of steel section or reinforced concrete contribution leads to a significant underestimation of the shear strength of encased composite members. Out of the considered design variables, the transverse reinforcement ratio, concrete compressive strength, and steel core ratio are the most influential variables affecting the shear behavior of EC columns.

Keywords

Encased Composite Columns, Shear Behavior, Failure Mechanism, Experimental and Numerical Analysis, LS-DYNA Nominal Shear Strength

به طور کلی ستون‌های مختلط، به دو دسته ستون‌های محاط در بتن و ستون‌های مختلط پر شده با بتن تقسیم‌بندی می‌شوند. ستون‌های محاط در بتن از یک یا چند هسته فولادی، معمولاً مقاطع H تشکیل می‌شوند که بتن مسلح اطراف آن را پر می‌کند. در مقابل ستون‌های پر شده با بتن از مقاطع فولادی توخالی مانند لوله و یا قوطی تشکیل می‌شوند که درون آن‌ها با بتن پر می‌شود. شکل (۱) سطح مقطع ستون‌های محاط در بتن را در برابر ستون‌های مختلط پر شده با بتن نشان می‌دهد.



شکل ۱- انواع ستون مختلط (الف) ستون مختلط محاط در بتن

(ب) ستون مختلط پر شده با بتن

مزیت ستون‌های مختلط پر شده با بتن، محصورشدگی بیش‌تر هسته بتنی است که باعث می‌شود ستون‌های مختلط پر شده با بتن دارای ظرفیت فشاری و شکل‌پذیری بالاتری در مقایسه با ستون‌های بتن مسلح و یا ستون‌های مختلط محاط در بتن باشند. از سوی دیگر حضور بتن در اطراف هسته فولادی در ستون‌های مختلط محاط در بتن، باعث جلوگیری از کمانش موضعی اجزای هسته فولادی می‌شود و همچنین هسته فولادی را در برابر عوامل طبیعی مانند آتش‌سوزی و خوردگی محافظت می‌کند.

امروزه استفاده از ستون‌های با مقطع مختلط محاط در بتن با توجه به بهره‌مندی اعضای مختلط از مزایای هم‌زمان فولاد و بتن، گسترش یافته است. بیش‌ترین استفاده از این اعضا در ساختمان‌های بلندمرتبه، پل‌ها و سایر ساختمان‌های صنعتی است. با توجه به گسترش روزافزون کاربرد این ستون‌ها در صنعت ساختمان‌سازی، مطالعات روی آن‌ها نیز افزایش چشم‌گیری یافته است.

بخش قابل توجهی از تحقیقات ستون‌های مختلط محاط در بتن، در مورد مقاومت خمشی و فشاری این ستون‌ها است. در این تحقیقات که تعدادی از آن‌ها در مراجع [۷-۱] آمده است، تمرکز اصلی بر روی اثر پارامترهای متفاوت بر مقاومت کمانشی این ستون‌ها، مقاومت خمشی آن‌ها در برابر بارهای جانبی و یا اثرات اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی بر رفتار ستون‌های مختلط محاط در بتن بوده است. گروه دیگری از پژوهشگران بر روی رفتارهای چرخه‌ای این ستون‌ها مطالعه کرده‌اند [۸-۱۴]. این دسته از پژوهشگران در پی شناخت رفتار لرزه‌ای این ستون‌ها در زلزله‌های بزرگ هستند. دسته سوم از پژوهشگران، به بررسی رفتار این ستون‌ها در دماهای بالا پرداخته‌اند [۱۵-۱۸]. آن‌ها به دنبال بررسی اثرات حرارت‌های بالا بر رفتار ستون‌های مختلط محاط در بتن از یک‌طرف و میزان محافظت بتن از هسته فولادی در آتش‌سوزی‌های بزرگ هستند. گروه دیگری از پژوهشگران به بررسی اثرات مقاومت برش‌گیرها بر رفتار خمشی ستون‌های مختلط محاط در بتن پرداخته‌اند [۱۹-۲۲].

تحقیقات حاضر نشان می‌دهد اگرچه تعداد پژوهش‌ها در حوزه ستون‌های مختلط محاط در بتن زیاد است. اما، تعداد تحقیقات انجام‌شده روی مقاومت برشی این ستون‌ها بسیار کم است. در ادامه تعدادی از پژوهش‌های صورت‌گرفته ارائه شده است.

وینگ^۱ و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۰۱ با مقایسه نتایج آزمایشگاهی مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن با آیین‌نامه‌های AISC 360، ACI، AIJ-SRC و NEHRP [۲۴-۲۷] به این نتیجه رسیدند که آیین‌نامه AISC 360، مقاومت برشی این ستون‌ها را بسیار محافظه‌کارانه تخمین می‌زند. این پژوهشگران در ادامه روشی برای تخمین مقاومت برشی اسمی ستون‌های مختلط محاط در بتن با استفاده از مدهای شکست برشی ارائه کردند.

¹ Weng

ناکامورا^۱ و همکاران طی مطالعات آزمایشگاهی و عددی به بررسی رفتار خمشی و برشی اعضای مختلط محاط در بتن با عملکرد مختلط ناقص پرداختند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که مقاومت برشی اعضای مختلط محاط در بتن بسیار بیش‌تر از هسته فولادی به تنهایی است [۲۸]. ما^۲ و همکاران با انجام یک سری مطالعات آزمایشگاهی روی رفتار چرخه‌ای ستون‌های مختلط محاط در بتن به این نتیجه رسیدند که رفتار برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن در حالت کلی، رفتاری ترد بوده و با شکست ناگهانی همراه است [۲۹]. شوئی^۳ و همکاران نیز با انجام چندین مطالعه بر روی رفتار برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن به این نتیجه رسیدند که در این نوع ستون‌ها، در مرحله پس‌کمانشی، هسته فولادی و بتنی به‌طور هم‌زمان به مقاومت نهایی خود نمی‌رسند [۳۰-۳۲].

اگرچه معیار طراحی در آیین‌نامه‌های ساختمانی تشکیل و توسعه مفصل پلاستیک تحت ترکیب بارهای محوری و خمشی به‌عنوان پارامتر اصلی که بر رفتار ستون حاکم است، می‌باشد؛ اما در برخی حالت‌ها مانند چشمه اتصال ستون‌های مختلط و یا تیرهای با دهانه کوتاه که در آن‌ها برش حاکم می‌شود، برآورد صحیح از ظرفیت برشی این اعضا ضروری به نظر می‌رسد. از سوی دیگر، از آنجایی که برش در اعضا به‌عنوان رفتار نیرو-کنترل به‌شمار می‌رود، تخمین محافظه‌کارانه از ظرفیت برشی یک عضو ممکن است منجر به بزرگ‌تر شدن آن عضو شود. افزایش ابعاد نیرو-کنترل نیز بالطبع باعث افزایش ابعاد اعضای تغییرشکل-کنترل خواهد شد. افزایش ابعاد یک سازه در نهایت باعث افزایش وزن سازه‌ای و در نتیجه افزایش برش پایه می‌گردد که از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست. بنابراین، نیاز به انجام آزمایش و مطالعات عددی گسترده به‌منظور اطمینان از عملکرد برشی این اعضا و همچنین پرهیز از اسراف مواد اولیه به‌دلیل تخمین‌های محافظه‌کارانه و در پی آن افزایش وزن لرزه‌ای سازه، ضروری به نظر می‌رسد.

آیین‌نامه AISC 360-16 سه روش برای محاسبه ظرفیت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن و ستون‌های مختلط پرشده با بتن پیشنهاد کرده است [۳۳]. مطابق این ضوابط، مقاومت برشی ستون‌ها مختلط محاط در بتن با استفاده از یکی از بندهای زیر محاسبه خواهد شد:

الف) مقاومت برشی هسته فولادی به تنهایی

ب) مقاومت برشی بتن مسلح

پ) مقاومت برشی هسته فولادی به همراه مقاومت برشی میلگردها

اگرچه آیین‌نامه AISC 360-22 مجوز استفاده از ترکیب مقاومت برشی هسته فولادی و بتن مسلح را برای محاسبه مقاومت برشی ستون‌های مختلط پرشده با بتن داده است [۳۴]، با این حال، هنوز برای محاسبه مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن، استفاده از مقاومت برشی هسته فولادی و بتن مسلح به‌طور هم‌زمان مجاز نیست. در تفسیر انتهایی آیین‌نامه AISC 360 برای محاسبه ظرفیت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن، علت در نظر گرفتن ترکیب مقاومت برشی هسته فولادی و مقاومت برشی بتن مسلح در محاسبه مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن، کمبود پژوهش‌های مرتبط اعلام کرده است. بنابراین این پژوهش به دنبال پرکردن خلأ ایجادشده در این بخش است.

در این پژوهش، مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن با استفاده از یک سری مطالعات آزمایشگاهی و عددی عناصر محدود مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در این راستا ابتدا، سه ستون برای ایجاد بستر مناسب برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل عددی عناصر محدود مورد آزمایش قرار می‌گیرد. پس از انجام آزمایش و صحت‌سنجی مدل عددی، تعداد ۳۰ مدل عددی با در نظر گرفتن پارامترهای کلیدی شامل ابعاد مقطع ستون، نسبت سطح مقطع هسته فولادی به بتنی، شکل مقطع هسته فولادی، درصد میلگرد طولی و عرضی ستون، فاصله میلگردهای عرضی، درصد عملکرد مختلط عضو و میزان پوشش ستون مختلط و ... مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که می‌توان از مجموع ظرفیت برشی بتن مسلح محاط و هسته فولادی به‌عنوان ظرفیت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن استفاده کرد و ظرفیت برشی ستون‌های مختلط محاط ارائه‌شده توسط آیین‌نامه AISC 360-22 بسیار محافظه‌کارانه است.

۲- مطالعه آزمایشگاهی

برای مطالعه مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن، چهار ستون مختلط محاط در بتن با توجه به ضوابط آیین‌نامه AISC 360-22 طراحی و مورد آزمایش قرار گرفت. در این مطالعات با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاه، ستون‌ها به‌صورت افقی قرار گرفتند و نیروی برشی به میانه آن‌ها وارد شد. جدول (۱) مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی و شکل (۲) جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. با توجه به جزئیات می‌توان دید که به‌منظور تأمین عملکرد مختلط بین بتن محاط و هسته فولادی از ناودانی به‌عنوان برش‌گیر استفاده شده

¹ Nakamura

² Ma

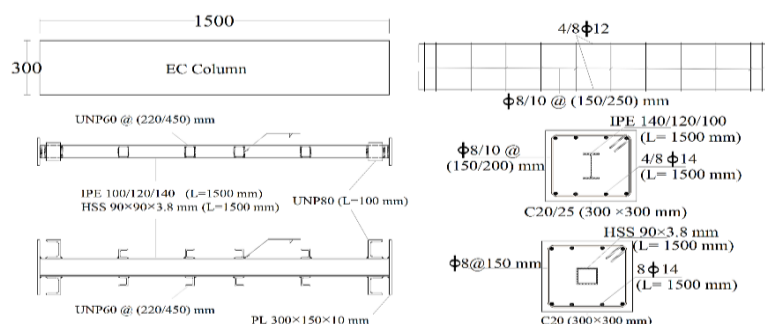
³ Xue

حمل و نقل نمونه‌ها مطابق ضوابط آیین‌نامه‌ای معتبر صورت پذیرفته است.

است. در شکل (۳) مراحل آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. شایان ذکر است که در این پژوهش تمام مراحل طراحی و آماده‌سازی شامل تهیه مصالح نمونه‌ها، جوشکاری، میلگردگذاری، قالب‌بندی، بتن‌ریزی، عمل‌آوری و

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

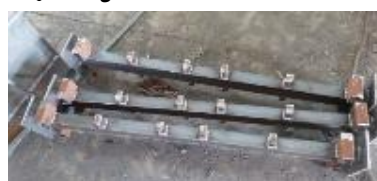
ردیف	نام نمونه‌ها	ابعاد مقطع	تنش فشاری بتن (MPa)	هسته فولادی	میلگرد طولی	میلگرد عرضی	عملکرد مختلط
		(mm)		پروفیل	درصد	درصد (mm)	درصد
۱	C20I10L8S35F	300 x 300	۲۱	IPE100	۱/۱۴	۸φ14	۱/۳۷
۲	C20I10L8S25F	300 x 300	۲۰/۵	IPE100	۱/۱۴	۸φ14	۱/۳۷
۳	C20I10L8S15F	300 x 300	۲۱/۲	IPE100	۱/۱۴	۸φ14	۱/۳۷
۴	C20I10L8S35P	300 x 300	۲۰/۹	IPE100	۱/۱۴	۸φ14	۱/۳۷



شکل ۲- جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی



(ب) میلگردگذاری



(الف) هسته فولادی



(ت) قالب‌بندی



(پ) نصب کرنش‌سنج



(ت) بتن‌ریزی

شکل ۳- مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها

۱-۲- مصالح مصرفی

برای هسته فولادی نمونه‌ها در این آزمایش از پروفیل‌های با مقطع I شکل مطابق آیین‌نامه BS-EN 10365 استفاده شده است [۳۵]. تمامی پروفیل‌های استفاده‌شده در هسته فولادی از مصالح ST37 با مقاومت تسلیم ۲۴۰ MPa و مقاومت نهایی ۳۷۰ MPa ساخته شده است.

حداقل سه عدد از میلگردهای طولی و عرضی و دو نمونه از جان و بال پروفیل‌های هسته فولادی برای تعیین نمودارهای تنش-کرنش مورد آزمایش قرار گرفته است. این نمودارها برای تعیین مشخصات مصالح میلگردها از جمله مقاومت مشخصه تسلیم و نهایی و کرنش‌های تسلیم و نهایی استفاده خواهد شد. جدول (۲) مشخصات مصالح فولادی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که اعداد ارائه‌شده در این جدول، میانگین اعداد به‌دست‌آمده برای مصالح مورد استفاده در این آزمایش است.

بتن آماده با مقاومت فشاری ۲۰ MPa برای آزمایش ستون‌ها استفاده شده است. طرح اختلاط این بتن شامل آب آشامیدنی، ماسه شسته، شن خردشده و سیمان پرتلند معمولی تیپ (I) با استفاده از ضوابط ACI 211.1 می‌باشد [۳۶]. سه نمونه مکعبی با ابعاد ۱۵۰ mm برای هر ستون در هنگام بتن‌ریزی تهیه شده است. این نمونه‌های مکعبی دقیقاً قبل از آزمایش مقاومت برشی ستون‌ها، برای تعیین مقاومت فشاری بتن آزمایش شده‌اند. لازم به ذکر است که حداقل سن نمونه‌های بتنی در هنگام آزمایش ۲۸ روز بوده است.

جدول ۲- مشخصات مصالح نمونه‌ها

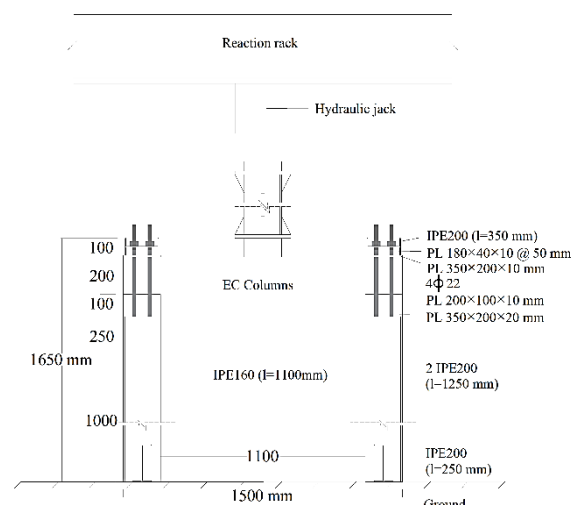
تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش تسلیم ($\mu\epsilon$)	
۲۵۰	۳۶۸	۱۵۰۶	هسته فولادی
۴۰۲	۵۹۸	۱۹۷۹	میلگرد طولی
۳۷۸	۵۷۴	۱۸۷۸	میلگرد عرضی

۲-۲- ستاپ آزمایشگاهی و نحوه بارگذاری

هنگام بارگذاری قسمت بالای پروفیل‌های تکیه‌گاهی به‌وسیله یک IPE160 به هم متصل شده است. پایین پروفیل‌های تکیه‌گاهی نیز به کف صلب آزمایشگاه متصل شده است. در پایین پروفیل‌های تکیه‌گاهی به‌منظور افزایش ظرفیت تکیه‌گاه در برابر واژگونی جانبی، پروفیل IPE200 در دو سمت آن جوش شده است. این پروفیل‌ها از زیر به کف صلب آزمایشگاه وصل شده‌اند. قسمت بالای تکیه‌گاه در محل قرارگیری دو سر ستون جهت تأمین

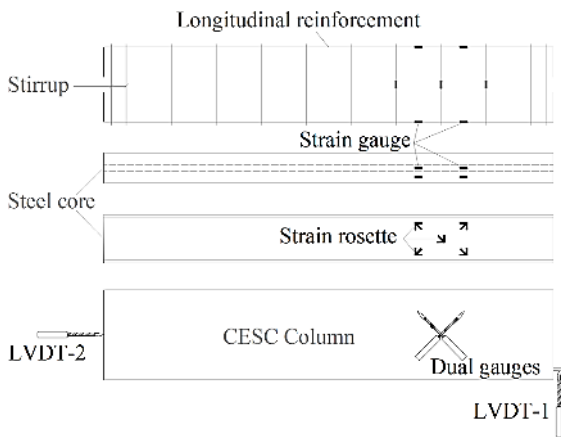
گیرداری مناسب از پیچ استفاده شده است. در این بخش، پس از جای‌گذاری ستون، یک پروفیل روی آن قرار گرفته و توسط پیچ‌ها کاملاً محکم می‌شود. برای اطمینان از عدم پیچش این بخش و تأمین شرایط گیرداری، پیچ‌ها قبل از شروع هر آزمایش به‌طور کامل سفت و پیش‌تنیدگی در آن تأمین می‌شود.

شکل (۴) تصویر شماتیک ستاپ آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در این آزمایش بار حداکثر تا ۶۰۰ kN توسط جک قائم به میانه ستون وارد می‌شود. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، تکیه‌گاه ستون‌ها از دبل IPE200 ساخته شده است. شایان‌ذکر است این تکیه‌گاه‌ها طوری طراحی شده‌اند که در طول آزمایش دچار کمانش و لغزش افقی نشوند.



شکل ۴- تصویر شماتیک ستاپ آزمایشگاهی

همان‌طور که در شکل (۴) عنوان شده است، طول ستون‌ها در این آزمایش با توجه به ابعاد سطح مقطع به ۱/۵ متر محدود شده است. استفاده از گیرداری در پای ستون و همچنین طول و جزئیات کلی ستون‌های مختلط، به‌منظور فراهم‌آوردن شرایط ایجاد مکانیسم‌های شکست برشی در ستون است. با انجام این جزئیات در ستون‌ها از ایجاد مکانیسم‌های خمشی جلوگیری شده و در تمامی نمونه‌ها مد شکست برشی حاکم شده است. برای اطمینان از عدم ایجاد مکانیسم خمشی، نیروی لازم برای رساندن مقطع به ظرفیت خمشی و ظرفیت برشی در ادامه مقایسه شده است. مطابق ضوابط AISC 360 و به کمک روش توزیع تنش پلاستیک می‌توان ظرفیت خمشی مقطع را محاسبه کرد. با تعبیه تعداد کافی برش‌گیر در مقطع و با توجه به تعداد میلگردهای طولی و ابعاد هسته فولادی، ارتفاع بلوک فشاری برای این ستون‌ها تقریباً $a_p = 48.44 \text{ mm}$ می‌شود. با محاسبه طول بازوی بخش‌های



شکل ۵- ابزارگذاری نمونه‌های آزمایشگاهی

در نمونه‌های آزمایشگاهی در این مطالعه، ابعاد مقطع ستون‌های مختلط برابر 300 X 300 mm در نظر گرفته شده است. هسته فولادی در این نمونه‌ها از مقطع IPE بوده و در اطراف آن تعداد هشت عدد میلگرد طولی قرار گرفته است.

جزئیات دقیق نمونه‌های آزمایشگاهی به همراه نمونه‌های عددی در شکل (۴) و جدول (۳) آمده است. این جزئیات شامل ابعاد ستون‌ها، مقاومت فشاری بتن، مقاطع مورد استفاده به عنوان هسته فولادی، درصد میلگردهای عرضی و طولی و نسبت عملکرد مختلط ستون‌ها است.

بارگذاری نمونه‌های آزمایشگاهی شامل دو مرحله نیرو-کنترل و تغییرشکل-کنترل است. مرحله نیرو-کنترل به منظور اطمینان از عملکرد ستون در ناحیه ارتجاعی و حذف خطاهای سیستمی انجام شده است. برای هر نمونه ابتدا نمونه‌ها تحت بارگذاری نیرو-کنترل با گام‌های ۵kN قرار داده شدند. پس از رسیدن نیرو به ۸۰ درصد نیروی تسلیم ستون‌های مختلط محاط در بتن، حاصل از مطالعات عددی، بارگذاری به تغییرشکل-کنترل به منظور دستیابی به تغییرشکل‌های پس‌کمانشی تبدیل شده است. در قسمت‌های بعد نتایج مطالعات آزمایشگاهی در کنار مطالعات عددی ارائه شده است.

شایان ذکر است که در این مطالعه از روش انرژی معادل الاستیک-پلاستیک برای تعیین مقاومت تسلیم برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن استفاده شده است [۳۸]. مقاومت برشی نهایی ستون‌های مختلط محاط در بتن نیز برابر ۸۰ درصد مقاومت حداکثر برشی آن‌ها در ناحیه پس‌کمانشی در نظر گرفته شده است.

مختلف ستون، مجموع لنگر خمشی پلاستیک $M_n = 92.42 \text{ kN} - m$ تعیین می‌گردد. با توجه به گیرداری دو سمت ستون، مقدار لنگر ستون از رابطه $M_n = \frac{P_f L}{8}$ حاصل می‌شود. بنابراین مقدار نیروی لازم برای ایجاد خمش پلاستیک در ستون، (P_f) با احتساب فاصله آزاد ستون بین دو تکیه‌گاه $(L = 1100 \text{ mm})$ ، برابر با ۶۷۲kN خواهد شد. این درحالی است که حداکثر نیروی برشی با در نظر گرفتن مجموع مقاومت برشی بخش بتن مسلح و هسته فولادی برای نمونه شماره ۳ با بیش‌ترین درصد میلگرد عرضی در حدود $P_v = 672 \text{ kN}$ به دست آمده است. بنابراین، با توجه به تفاوت زیاد نیروی وارده در دو حالت، انتظار می‌رود که در ستون‌ها رفتار برشی حاکم شود.

برای کنترل دقیق فرآیند آزمایش و برداشت دقیق داده‌ها نیاز به به‌کارگیری تعدادی کافی از متدهای اندازه‌گیری دقیق و کارآمد است. در این پژوهش وسایل اندازه‌گیری متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این وسایل از دوربین و روش پردازش عکس نیز برای تعیین نتایج دقیق تغییرشکل‌ها استفاده شده است. در مدل‌های آزمایشگاهی از دو نمونه کرنش‌سنج محوری و سه‌محوره استفاده شد. شکل (۵) کرنش‌سنج‌های استفاده شده در اجزای مختلف ستون را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، از کرنش‌سنج‌های محوری برای اندازه‌گیری کرنش‌های محوری در میلگردهای طولی و عرضی و بال‌های هسته فولادی ستون‌ها استفاده شده است. از طرف دیگر، کرنش‌سنج‌های سه‌محوره در جان هسته فولادی ستون‌ها برای اندازه‌گیری کرنش‌های برشی جان به کار برده شده است. علاوه بر کرنش‌سنج‌ها، وسایل اندازه‌گیری تغییرمکان (LVDT)^۱ نیز در نقاط مختلف ستون‌ها برای اندازه‌گیری تغییرمکان‌های مورد انتظار برنامه‌ریزی شده است. شکل (۵) همچنین LVDT‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، از LVDT-1 برای اطمینان از عدم تغییرمکان افقی تکیه‌گاه ستون‌ها استفاده شده است. در قسمت میانی ستون نیز به منظور برآورد میزان تغییرشکل برشی جان ستون از دو LVDT به صورت قطری استفاده شده است. جهت برآورد تغییرشکل‌های برشی به این روش از مطالعه پردیس و همکاران بهره گرفته شده است [۳۷].

¹ Linear Variable Differential Transformer

۳- مطالعات عددی

از نرم افزار LS-DYNA برای انجام مطالعات عددی استفاده شده است [۳۹]. این مطالعات به منظور بهبود پایگاه داده مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن برای مقایسه با پیش‌بینی‌های AISC 360 انجام شده است. برای این مطالعات ۱۰ ستون طراحی و مدل‌سازی شد. در نهایت نیز نتایج مقاومت برشی آن‌ها با نتایج روابط مقاومت برشی AISC 360 ستون‌های مختلط محاط در بتن مقایسه شده است. چهار مدل اول در این مطالعات عددی دقیقاً مشابه نمونه‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شدند. از این چهار مدل به منظور صحت‌سنجی و کالیبره کردن پارامترهای مدل عددی استفاده شده است. پارامترهای در نظر گرفته شده در این مطالعات

شامل مقطع ستون، مقاومت فشاری بتن، نسبت هسته فولادی، نسبت‌های میلگردهای طولی و عرضی و درصد عملکرد مختلط ستون‌ها می‌باشد.

۳-۱- فرضیات مدل‌سازی

در تمامی مدل‌های عددی، طول، بار جانبی و شرایط تکیه‌گاهی مشابه نمونه‌های آزمایشی در نظر گرفته شده است. هسته فولادی، بخش بتنی و صفحه بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها در نرم‌افزار توسط عناصر جامد هشت گرهی مدل‌سازی شده‌اند. مدل‌سازی میلگردهای طولی و عرضی ستون نیز توسط عناصر تیری صورت پذیرفته است.

جدول ۳- مشخصات نمونه‌های عددی

ردیف	نام نمونه‌ها	ابعاد مقطع	تنش فشاری بتن	هسته فولادی	میلگرد طولی	میلگرد عرضی	عملکرد مختلط
		(mm)	(MPa)	پروفیل	درصد	(mm)	درصد
۱	C20I12L8S35F	300 x 300	۲۰	IPE120	۱/۴۷	8φ14	۱/۳۷
۲	C20I14L8S35F	300 x 300	۲۰	IPE140	۱/۸۲	8φ14	۱/۳۷
۳	C20I12L4S35F	300 x 300	۲۰	IPE120	۱/۴۷	4φ14	۰/۶۸
۴	C20I12L8S35P	300 x 300	۲۰	IPE120	۱/۴۷	8φ14	۱/۳۷
۵	C25I12L8S35F	300 x 300	۲۵	IPE120	۱/۴۷	8φ14	۱/۳۷
۶	C20H9L8S35F	300 x 300	۲۰	HSS90x3.8	۱/۴۶	8φ14	۱/۳۷

مدل Winfrith-Concrete-Model (MAT_084, 085)، که توسط ^۱بروده‌هاوس^۱ و ^۲نیلسون^۲ توسعه یافته است [۴۰ و ۴۱]، برای مدل‌سازی بتن در نرم‌افزار استفاده گردید. از بین مدل‌های بتن موجود در LS-DYNA، مدل Winfrith-Concrete-Model قابل‌اعتمادترین مدل مواد برای شبیه‌سازی ترک‌خوردگی بتن است. زیرا این مدل می‌تواند انرژی ناشی از بازشدن ترک را در طول بار جانبی اعمال شده به بتن، شبیه‌سازی کند. نکات پیشنهاد شده توسط ^۱ایکچی و همکاران^۱ برای استفاده درست از مدل‌سازی بتن با Winfrith-Concrete-Model [۴۲-۴۴] در این مطالعه استفاده شده است.

برای حذف المان‌های بتنی در تحلیل به دلیل شکست، از Mat-ADD-EROSION در نرم‌افزار استفاده شده است. شایان‌ذکر است که در این مطالعه، از کرنش اصلی فشاری و کششی بتن به عنوان معیار شکست برای حذف عناصر بتنی استفاده شده است.

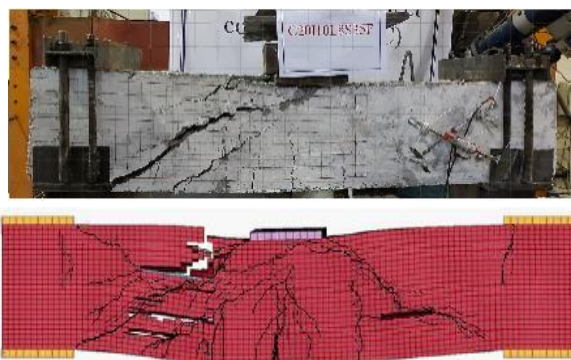
جهت مدل‌سازی هسته فولادی، میلگردهای طولی و عرضی از Mat-Plastic-Kinematic (MAT003) استفاده شد. این مدل مواد برای مدل‌سازی سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و کینماتیک مناسب است.

صفحه بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها به عنوان یک مدل صلب در نرم‌افزار با استفاده از Mat 020-Rigid مدل‌سازی شده‌اند. برای تعریف اندرکنش بخش بتنی با سایر بخش‌ها، مانند هسته فولادی، تکیه‌گاه‌ها و صفحه بارگذاری، تماس سطحی با سطح تماس خودکار اعمال شده است. این روش بارهای اعمالی را بین گره اصلی و فرعی منتقل می‌کند. اعمال LAGRANGE-IN-SOLID به خوبی گره‌های میلگردهای فولادی را به عناصر بتنی، حتی با اندازه مش متفاوت متصل می‌کند.

¹ Broadhouse

² Neilson





شکل ۷- مقایسه گسترش ترک در مدل عددی و آزمایشگاهی

به طور کلی، پاسخ ستون مختلط محاط در بتن و ترک خوردگی آن در هنگام افزایش بار جانبی را می توان در سه مرحله توضیح داد: (۱) مرحله اول مربوط به پاسخ الاستیک ستون های مختلط محاط در بتن است که در آن هیچ ترکی در وجه ستون مشاهده نمی شود؛ (۲) ترک های عمودی (خمشی) در عمق میانی ستون در محل اعمال بار ظاهر می شود و هم زمان ترک های مورب (برشی) بین نقطه بار و تکیه گاه های انتهایی ستون ایجاد می گردد و (۳) زمانی که بار به ۵۰ درصد مقاومت تسلیم برشی ستون ها می رسد، ستون وارد پاسخ غیرخطی خود شده و ترک های مورب سریع تر از ترک های عمودی رشد می کنند که به این معنی است که پاسخ ستون ها توسط برش کنترل می شود. شکست نهایی ستون های مختلط محاط در بتن در نهایت به دلیل ترکیبی از خردشدگی بتن، تسلیم هسته فولادی و میلگردهای عرضی اتفاق می افتد.

۲-۴- نمودارهای نیرو-تغییر شکل

شکل (۹) نمودارهای نیرو-تغییر شکل ستون های مختلط محاط در بتن را نشان می دهد. لازم به ذکر است که ضریب شکل پذیری (μ)، مقدار تغییر شکل نهایی ستون (Δ_u)، تغییر شکل ستون در مقاومت نهایی به تغییر شکل ستون در مقاومت تسلیم ($\mu = \Delta_u / \Delta_y$) و تغییر شکل ستون در مقاومت تسلیم (Δ_y) می باشد. مطابق نتایج نمودارها، نمونه C20I10L8S15F بیشترین مقاومت برشی تسلیم و حداکثر مقاومت برشی را دارد. کمترین مقاومت برشی نیز مربوط به نمونه C20I10L8S35P است. مقاومت برشی حداکثر نمونه C20I10L8S15F و C20I10L8S35P به ترتیب ۵۸۹ و ۴۵۴ کیلونیوتن است. با این حساب، بیشترین اختلاف مقاومت های حداکثر برشی برابر با ۲۹/۷ درصد است. به عنوان یک نتیجه، از بین متغیرهای اصلی طراحی، میلگردهای عرضی به طور قابل توجهی روی مقاومت برشی ستون های مختلط محاط در بتن تأثیر می گذارد.

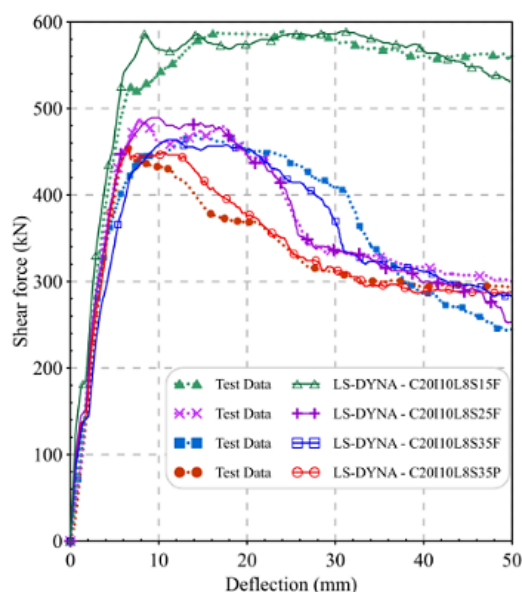
۲-۳- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی با مدل اجزای محدود همان طور که در بخش های قبل عنوان شد، از چهار نمونه اول در جدول (۳) برای اعتبارسنجی مدل عددی استفاده شده است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی شامل منحنی های نیرو-تغییر شکل، مکانیسم شکست و نحوه توسعه ترک در نمونه ها برای اعتبارسنجی مدل سازی ستون در نرم افزار LS-DYNA به کار رفته است. شکل (۶) منحنی های نیرو-جابجایی ستون ها در تحلیل های عددی و آزمایشگاهی را مقایسه می کند. این مقایسه، دقت کافی مدل عددی را برای شبیه سازی رفتار برشی ستون های مختلط محاط در بتن نشان می دهد. از سوی دیگر شکل (۷) نیز تطابق خوبی را بین الگوی ترک پیش بینی شده نمونه C20I10L8S35F توسط نرم افزار و نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد.

۴- نتایج تحلیل ها و بحث و بررسی

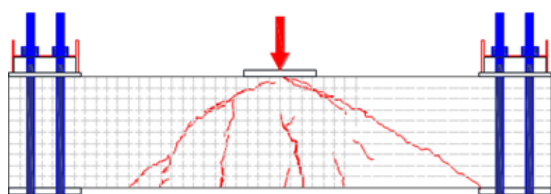
در این بخش نتایج مطالعات آزمایشگاهی و عددی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج این قسمت در چهار بخش شامل مدهای شکست و گسترش ترک، نمودارهای نیرو-تغییر مکان، مطالعات پارامتریک و مقاومت برشی اسمی ستون های مختلط محاط در بتن در AISC 360 آورده شده است.

۴-۱- مدهای شکست

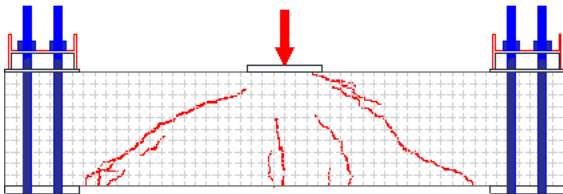
شکل (۸) گسترش ترک ستون های مختلط محاط در بتن را در لحظه مقاومت برشی نهایی نشان می دهد. در تمامی نمونه ها به دلیل دهانه کوتاه ستون ها، نسبت میلگردهای طولی و شرایط تکیه گاهی در این مطالعه، تعداد ترک های مورب بیش تر از ترک های خمشی است. البته می توان گفت در نمونه C20I10L8S15F و C20I10L4S35F ترک های عمودی و مورب تقریباً یکسان هستند.



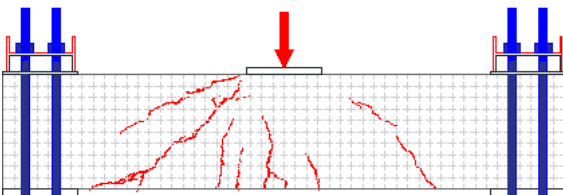
شکل ۶- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی مدل عددی و آزمایشگاهی



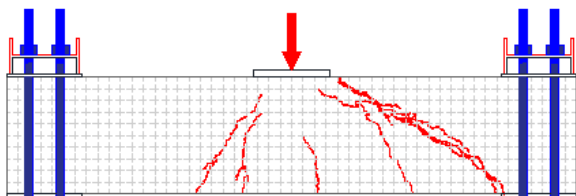
g) C20I12L4S35F



h) C20I12L8S35P



i) C25I12L8S35F



j) C20H9L8S35F

ادامه شکل ۸- گسترش ترک در ستون‌های مختلط محاط در بتن

در نمونه C20I14L8S35F نسبت به C20I12L8S35F ۳۷ درصد افزایش شکل‌پذیری و ۱۰ درصد افزایش مقاومت برشی مشاهده شده است. بنابراین، افزایش نسبت هسته فولادی باعث بهبود مقاومت برشی و ضریب شکل‌پذیری ستون‌های مختلط محاط در بتن می‌شود. علت این افزایش بزرگ‌تر بودن سطح مقطع جان هسته فولادی در نمونه C20I14L8S35F نسبت به C20I12L8S35F است. به‌طور مشابه، شکل مقطع هسته فولادی نیز به‌طور قابل‌توجهی بر مقاومت برشی ستون‌ها تأثیر می‌گذارد. با مقایسه دو نمونه C20I12L8S35F و C20H9L8S35F با سطح مقطع یکسان، ظرفیت برشی C20H9L8S35F به‌دلیل سطح مقطع بزرگ‌تر جان‌ها بیش‌تر است؛ از طرفی، ضریب شکل‌پذیری در نمونه C20H9L8S35F به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کم‌تر از C20H9L8S35F است. از آنجایی که پروفیل HSS توخالی است، کماتش جان‌های هسته فولادی احتمالاً باعث شکل‌پذیری کم‌تر در نمونه C20H9L8S35F شده



a) C20I10L8S35F



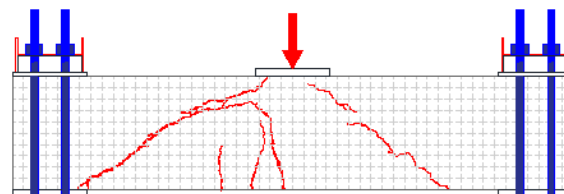
b) C20I10L8S25F



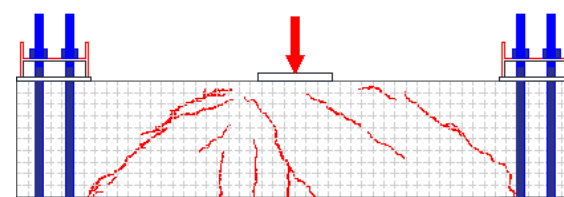
c) C20I10L8S15F



d) C20I10L8S35P

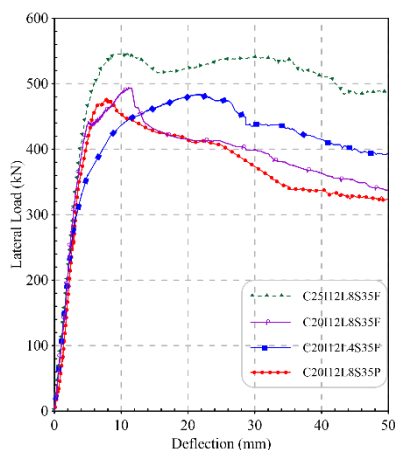


e) C20I12L8S35F

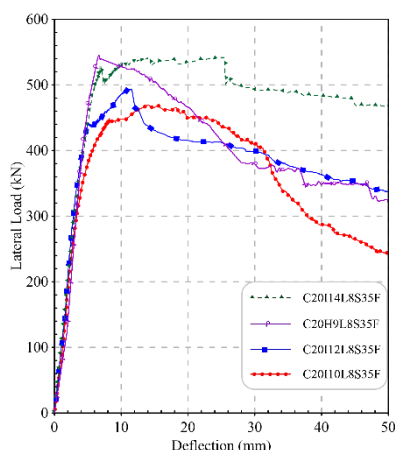


f) C20I14L8S35F

شکل ۸- گسترش ترک در ستون‌های مختلط محاط در بتن



ب) مدل‌ها با هسته فولادی مشترک



ب) اثر هسته فولادی

ادامه شکل ۹- نمودار نیرو-تغییر مکان ستون‌های مختلف محاط در بتن

۲-۳-۴ مقاومت فشاری بتن

ستون‌های C20I12L8S35F و C25I12L8S35F با انواع مختلف بتن (C20 و C25) طراحی شده‌اند تا تأثیر مقاومت فشاری بتن بر رفتار برشی ستون‌های مختلف محاط در بتن را بررسی کنند. شکل (۹-ب) نشان می‌دهد که اثر مقاومت فشاری بتن بر مقاومت برشی ستون مختلف محاط در بتن قابل توجه است. با افزایش مقاومت فشاری بتن از ۲۰ MPa به ۲۵ MPa، ظرفیت تسلیم و مقاومت برشی حداکثر ستون مختلف محاط در بتن به ترتیب ۱۵٪ و ۱۱٪ افزایش می‌یابد. جابه‌جایی نهایی و شکل‌پذیری ستون‌های مختلف محاط در بتن نیز به ترتیب ۴۱٪ و ۲۲٪ افزایش یافته است.

۳-۳-۴ شکل هسته فولادی

تفاوت نمونه‌های C20H9L8S35F و C20I12L8S35F در شکل هسته فولادی آن‌ها است. هسته فولادی C20H9L8S35F و C20I12L8S35F از پروفیل‌های HSS و I شکل ساخته شده است که مطابق با استاندارد اروپایی BS-EN 10365 سطح مقطع

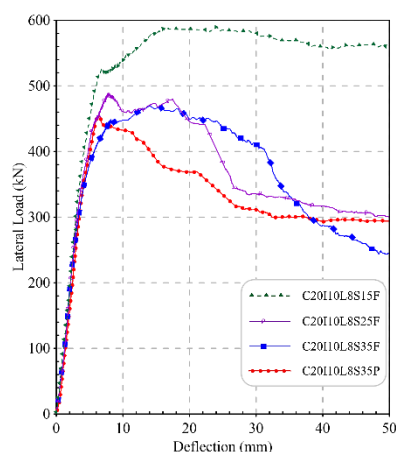
است. مشخص است که ضریب شکل‌پذیری ستون‌های مختلف محاط در بتن با کاهش فاصله آرماتورهای عرضی و افزایش نسبت هسته فولادی افزایش می‌یابد؛ و برعکس، با کاهش عملکرد کامپوزیت و افزایش فاصله آرماتورهای عرضی، کاهش می‌یابد. با این حال، در نمونه C20H9L8S35F، به عنوان یک استثنا، ضریب شکل‌پذیری با افزایش نسبت هسته فولادی با وجود افزایش مقاومت برشی کاهش یافته است.

۳-۴ مطالعات پارامتریک

در این مطالعه، اثرات متغیرهای مختلف طراحی بر مقاومت برشی ستون مختلف محاط در بتن بررسی شده است. پارامترهای کلیدی طراحی در نظر گرفته شده در این مطالعه شامل مقاومت فشاری بتن، نسبت هسته فولادی (تعریف شده به عنوان نسبت سطح هسته فولادی به سطح ناخالص ستون)، شکل هسته فولادی، نسبت میلگرد طولی، فاصله میلگردهای عرضی و درصد عملکرد مختلف می‌باشد. تأثیر این پارامترهای کلیدی بر نحوه گسترش ترک، مدهای شکست، شکل‌پذیری و پاسخ‌های نیرو-تغییر مکان در ادامه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۱-۳-۴ نسبت هسته فولادی

منحنی نیرو-تغییر مکان ستون‌های C20I14L8S35F، C20I12L8S35F و C20I10L8S35F با نسبت‌های مختلف هسته فولادی به ترتیب ۱/۸۲، ۱/۴۷ و ۱/۱۴ درصد در شکل (۹-پ) آمده است. بر اساس نتایج آزمایش، نسبت هسته فولادی به طور قابل توجهی بر مقاومت برشی ستون‌های مختلف محاط در بتن تأثیر می‌گذارد. به طور مشابه، ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های C20I14L8S35F و C20I12L8S35F به ترتیب ۶۳ و ۱۹ درصد بیش‌تر از C20I10L8S35F است.



الف) مدل‌ها با هسته فولادی مشترک

شکل ۹- نمودار نیرو-تغییر مکان ستون‌های مختلف محاط در بتن

یکسانی دارند [۳۵]. همان‌طور که شکل (۹-پ) نشان می‌دهد، ۱۰٪ تفاوت بین حداکثر مقاومت برشی C20I12L8S35F و C20H9L8S35F وجود دارد، که به این معنی است شکل هسته فولادی تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن دارد. در مقابل، تغییر شکل نهایی و ضریب شکل‌پذیری C20H9L8S35F به ترتیب ۲۶٪ و ۳۴٪ کاهش یافت. این کاهش به‌طور بالقوه می‌تواند مربوط به کماتش جان‌های هسته فولادی باشد.

۴-۳-۴ نسبت آرماتورهای طولی

نسبت میلگردهای نمونه‌های C20I12L8S35F و C20I12L4S35F متفاوت است. تعداد آرماتورهای طولی در C20I12L8S35F و C20I12L4S35F به ترتیب هشت و چهار است. همان‌طور که در شکل (۹-ب) مشاهده می‌شود، تفاوت بین مقاومت برشی C20I12L8S35F و C20I12L4S35F حدود ۲٪ است که نشان می‌دهد تأثیر نسبت میلگردهای طولی بر مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن ناچیز است. اثر اولیه کاهش درصد نسبت میلگرد طولی، تغییر شکست برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن به خمشی-برشی است (شکل (۸)).

مطابق با این شکل، در مقاومت حداکثر، ترک‌های عمودی C20I12L4S35F در عمق میانی نسبت به C20I12L8S35F گسترده‌تر هستند. از طرفی، ظرفیت تسلیم C20I12L8S35F پنج درصد بیش‌تر از C20I12L4S35F است. بنابراین، کاهش نسبت آرماتور طولی باعث کاهش ظرفیت تسلیم و نیروی حداکثر شده است. در مقابل، کاهش نسبت میلگرد طولی منجر به افزایش ۱۶٪ و ۲۶٪ تغییر مکان تسلیم و شکل‌پذیری شده است.

۴-۳-۵ نسبت میلگردهای عرضی

برای بررسی اثر نسبت میلگردهای عرضی، سه نمونه C20I10L8S35F، C20I10L8S25F و C20I10L8S15F با نسبت‌های میلگرد عرضی ۰/۲۲۹، ۰/۲۶۱ و ۰/۳۴۹ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۹-الف) مشاهده می‌شود، افزایش ۱۷٪ و ۵۶٪ در نسبت میلگردهای عرضی در ستون مختلط محاط در بتن منجر به افزایش ۴٪ و ۲۵٪ حداکثر مقاومت برشی شده است. در نتیجه، افزایش نسبت میلگردهای عرضی به‌طور قابل‌توجهی مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن را بهبود می‌بخشد.

مقایسه C20I10L8S25F و C20I10L8S15F نشان می‌دهد که با رشد ۳۳ درصدی نسبت‌های میلگرد عرضی، مقاومت برشی

ستون‌های مختلط محاط در بتن ۲۱ درصد افزایش یافته است. درعین‌حال، با افزایش ۱۷ درصدی نسبت میلگردهای عرضی C20I10L8S25F در برابر C20I10L8S35F، حداکثر مقاومت برشی فقط چهار درصد بهبود یافته است. در نتیجه، اگرچه نسبت میلگرد عرضی در C20I10L8S25F افزایش یافته است، افزایش ظرفیت برشی ستون کم است زیرا در این نمونه، فاصله میلگردهای عرضی نیز هم‌زمان افزایش یافته است. به‌طور مشابه، با افزایش نسبت آرماتور عرضی در C20I10L8S15F و کاهش فاصله میلگردهای عرضی، برخلاف C20I10L8S25F، مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن بسیار بهبود یافته است. به‌عنوان نمونه، ظرفیت تسلیم و ضریب شکل‌پذیری C20I10L8S15F به ترتیب ۱۰۱٪ و ۷۶٪ افزایش یافت، زیرا در این نمونه‌ها نسبت میلگرد عرضی افزایش و فاصله آن‌ها کاهش یافته است. برخلاف C20I10L8S15F، افت ۲۳ درصدی ضریب شکل‌پذیری C20I10L8S25F نسبت به C20I10L8S35F، به دلیل افزایش فاصله میلگردهای عرضی این نمونه است. به‌طور خلاصه، نسبت میلگردهای عرضی مشروط بر آن که در محدوده ضوابط آیین‌نامه‌ای باشد، به‌طور قابل‌توجهی بر مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن اثر می‌گذارد.

۴-۳-۶ نسبت عملکرد مختلط

دو نمونه C20I10L8S35F و C20I10L8S35P، به ترتیب با عملکرد مختلط ناقص (۵۰ درصد) و عملکرد مختلط کامل، برای بررسی تأثیر این پارامتر بر رفتار برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن تهیه شدند. همه متغیرهای طراحی به‌جز عملکرد مختلط برای این دو نمونه یکسان هستند. عملکرد مختلط ناقص در این مطالعه به‌عنوان یک سطح عملکرد مختلط تعریف می‌شود که در آن اتصال‌دهنده‌ها تنها نیمی از مقاومت برشی مورد نیاز برای یک عملکرد مختلط کامل بین بتن و هسته فولادی را انتقال می‌دهند. نتایج این مطالعه نشان داد که اثر عملکرد مختلط بر پاسخ ارتجاعی ناچیز است. با این حال، استفاده از عملکرد مختلط ناقص منجر به شکست ناگهانی و زود هنگام نمونه با افزایش بار به دلیل جدا شدن هسته بتن و فولاد می‌شود.

در پایان این بخش به‌طور خلاصه می‌توان گفت که فواصل میلگردهای عرضی، نسبت هسته فولادی، شکل هسته فولادی و مقاومت فشاری بتن به‌طور قابل‌توجهی بر مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن تأثیرگذار است. با این حال، نسبت عملکرد مختلط و نسبت میلگردهای طولی تأثیر ناچیزی بر مقاومت برشی ستون‌های مختلط محاط در بتن دارند. بر اساس



نتایج، میلگردهای عرضی بیشترین و میلگردهای طولی کمترین سهم را در مقاومت برشی ستونهای مختلط محاط در بتن داشتند.

۴-۴- مقاومت برشی اسمی ستونهای مختلط محاط در بتن

بر اساس ضوابط AISC 360، مقاومت برشی اسمی ستونهای مختلط محاط در بتن ($\phi_v V_n$)، طبق یکی از روابط زیر قابل محاسبه است:

الف) با در نظر گرفتن مقاومت برشی فولاد به تنهایی و مطابق الزامات بخش G.

$$V_n = V_{sc} = 0.6 F_y A_w C_{v1}, \quad \phi_v = 0.9 \quad (1)$$

ب) در نظر گرفتن مقاومت برشی بخش بتن مسلح و ضوابط آیین نامه 318-19 ACI.

$$V_n = V_c + V_{sr}, \quad \phi_v = 0.75$$

$$V_c = \left[2\lambda \sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right] b_w d, \quad V_{sr} = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (2)$$

ج) در نظر گرفتن مجموع مقاومت برشی هسته فولادی مطابق ضوابط بخش G و مقاومت برشی میلگردهای برشی اطراف هسته بر اساس ضوابط آیین نامه 318-19 ACI.

$$V_n = V_{sc} + V_{sr}, \quad \phi_v = 0.75 \quad (3)$$

در روابط فوق، (V_n) مقاومت برشی اسمی ستون مختلط محاط در بتن، (V_{sc}) مقاومت برشی اسمی هسته فولادی، (V_c) مقاومت برشی اسمی بتن، (V_{sr}) مقاومت برشی اسمی میلگردهای عرضی، (F_y) تنش تسلیم مشخصه فولاد، (A_w) سطح مقطع جان هسته فولادی، (C_{v1}) ضریب مقاومت برشی جان، (λ) ضریب تصحیح برای بتن سبک، (f'_c) مقاومت فشاری مشخصه بتن، (N_u) نیروی محوری ضریب دار عمود بر مقطع عضو، (A_g) سطح مقطع کل ستون، (b_w) عرض مقطع ستون، (d) فاصله دورترین تار فشاری ستون از مرکز میلگردهای کششی، (A_v) مساحت میلگردهای برشی در فاصله s ، (f_{yt}) تنش تسلیم مشخصه میلگردهای عرضی، (s) فاصله میلگردهای عرضی و (ϕ_v) ضریب کاهش مقاومت برشی هستند.

جدول (۴) نتایج آزمایش و تحلیل های عددی ستون های مختلط محاط در بتن را نشان می دهد. علاوه بر نتایج تحلیل، مقاومت برشی پیش بینی شده برای ستون های مختلط محاط در بتن توسط AISC 360 با در نظر گرفتن هر سه معادله AISC 360 ارائه شده است. مقاومت برشی بتن مسلح به اضافه مقاومت برشی هسته فولادی نیز به جدول (۴) اضافه شده است. مقاومت برشی محاسبه شده

بر اساس روابط AISC 360 به دلیل شرایط آزمایش و بارگذاری در این جدول دو برابر شده است. به منظور سهولت در مقایسه، داده های آزمایشگاهی یا عددی به صورت نرمال شده در جدول استفاده شده است ($V_{AISC}/V_{test/numerical}$).

بر اساس نتایج، بخش های AISC 360 I4.1، a، b و c مقاومت برشی ستون های مختلط محاط در بتن را به طور میانگین، به ترتیب

۳۲٪، ۵۱٪ و ۵۷٪ مقاومت برشی حاصل از آزمایش و یا تحلیل های عددی پیش بینی می کند. انحراف معیار در این مطالعه برای هر کدام از این روابط به ترتیب ۵/۸، ۵/۲ و ۶/۴ است. از سوی دیگر ظرفیت برشی اسمی ستون های مختلط محاط در بتن با در نظر گرفتن مجموع مقاومت برشی هسته فولادی و بتن مسلح چیزی در حدود ۸۳٪ مقاومت برشی حاصل از آزمایش و یا تحلیل های عددی است. در این حالت نیز انحراف معیار به طور متوسط ۵/۸ به دست آمده است. بر اساس نتایج آزمایش ها و تحلیل ها در این مطالعه، معادلات AISC 360 به طور قابل توجهی مقاومت برشی اسمی ستون های مختلط محاط در بتن را محافظه کارانه ارزیابی می کند. از سوی دیگر، در نظر گرفتن مجموع مقاومت برشی هسته فولادی و بخش بتن مسلح منجر به تخمین دقیق تری از مقاومت برشی ستون های مختلط محاط در بتن می شود.

جدول ۴- مقایسه مقاومت برشی حاصل از آزمایش یا مطالعه عددی با مقاومت اسمی بر اساس روابط آیین نامه AISC 360

ردیف	نام نمونه ها	آزمایشگاهی / نتایج آزمایش عددی / عددی	AISC 360 I4.1a	AISC 360 I4.1b	AISC 360 I4.1c	مجموع فولادی و بتنی	AISC 360 I4.1a	AISC 360 I4.1b	AISC 360 I4.1c	مجموع فولادی و بتنی
		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
۱	C20I10L8S35F	آزمایشگاهی	۱۲۴	۲۵۶	۲۵۴	۳۸۰	۲۶/۴	۵۴/۵	۵۴/۰	۸۰/۹
۲	C20I10L8S25F	آزمایشگاهی	۱۲۴	۲۸۵	۲۸۳	۴۰۹	۲۵/۵	۵۸/۶	۵۸/۱	۸۴/۰
۳	C20I10L8S15F	آزمایشگاهی	۱۲۴	۳۳۸	۳۳۶	۴۶۲	۲۱/۱	۵۷/۴	۵۷/۰	۷۸/۵
۴	C20I10L8S35P	آزمایشگاهی	۱۲۴	۲۵۶	۲۵۴	۳۸۰	۲۷/۳	۵۶/۴	۵۵/۹	۸۳/۷
۵	C20I12L8S35F	عددی	۴۹۴	۲۵۶	۲۸۹	۴۱۶	۳۲/۳	۵۱/۸	۵۸/۶	۸۴/۲
۶	C20I14L8S35F	عددی	۵۴۲	۲۵۶	۳۲۹	۴۵۵	۳۶/۷	۴۷/۲	۶۰/۶	۸۳/۹
۷	C20I12L4S35F	عددی	۴۸۴	۲۵۶	۲۸۹	۴۱۶	۳۳/۰	۵۲/۹	۵۹/۸	۸۵/۸
۸	C20I12L8S35P	عددی	۴۷۷	۲۵۶	۲۸۹	۴۱۶	۳۳/۵	۵۳/۷	۶۰/۷	۸۷/۲
۹	C25I12L8S35F	عددی	۵۴۷	۲۶۷	۲۸۹	۴۲۷	۲۹/۲	۴۸/۹	۵۲/۹	۷۸/۱
۱۰	C20H9L8S35F	عددی	۵۴۵	۱۸۴	۲۵۶	۳۱۴	۳۳/۷	۴۶/۹	۵۷/۵	۸۰/۷
	میانگین						۳۱/۸	۵۱/۳	۵۶/۹	۸۳/۰
	انحراف معیار						۵/۸	۵/۲	۶/۴	۵/۸

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه رفتار برشی ستون های مختلط محاط در بتن به صورت مطالعه آزمایشگاهی و عددی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. ۱۰ ستون مختلط محاط در بتن بر اساس آیین نامه AISC 360-22 طراحی و برای بررسی اثرات متغیرهای طراحی مختلف از جمله مقاومت فشاری بتن، نسبت هسته فولادی، شکل هسته فولادی، نسبت میلگرد طولی، فاصله میلگردهای عرضی و نسبت عملکرد مختلط مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مهم این مطالعه عبارت است از:

۱. روابط پیشنهادی AISC 360 به طور قابل توجهی مقاومت برشی ستون های مختلط محاط در بتن را محافظه کارانه ارزیابی می کند.

۲. بر اساس نتایج آزمایش و تحلیل عددی، مقاومت برشی ستون های مختلط محاط در بتن را می توان با در نظر گرفتن مجموع مقاومت برشی هسته فولادی و بخش بتن مسلح محاسبه کرد.

۳. مقاومت ستون مختلط محاط در بتن در برابر نیروی برشی اعمال شده عمدتاً توسط جان هسته فولادی، میلگردهای

عرضی و بخش بتنی ستون های مختلط محاط در بتن تأمین می شود.

۴. میلگرد عرضی، مقاومت فشاری بتن، نسبت هسته فولادی و شکل هسته به طور قابل توجهی به مقاومت برشی ستون های مختلط محاط در بتن کمک می کند. برعکس، سهم میلگردهای طولی در مقاومت برشی ستون های مختلط محاط در بتن ناچیز است.

۵. سطح عملکرد مختلط نیز بر مقاومت برشی ستون های مرکب تأثیر می گذارد. هرچه عملکرد مرکب کم تر باشد، ظرفیت برشی ستون مختلط محاط در بتن کم تر است.

۶. کاهش فاصله میلگردهای عرضی و افزایش نسبت هسته فولادی به طور قابل توجهی شکل پذیری ستون های مختلط محاط در بتن را بهبود می بخشد. شکل پذیری ستون های مختلط محاط در بتن همچنین با افزایش نسبت میلگردهای طولی کاهش یافت.

۶- قدردانی

بدین وسیله از حمایت مالی آقای برزگر سراجی و شرکت آژینه سازان کاسپین برای انجام این مطالعه کمال تشکر و قدردانی می شود.



- [13] Chen, C.C., and Hoang, T.T. (2016), "Role of concrete confinement of wide-flange structural steel shape in steel reinforced concrete columns under cyclic loading", *Engineering Structures*, 110: pp. 79-87.
- [14] Hajjar, J.F., (2002), "Composite steel and concrete structural systems for seismic engineering", *Journal of Constructional Steel Research*, 58(5-8): pp. 703-723.
- [15] Selden, K.L., (2014), "Structural behavior and design of composite beams subjected to fire", Ph.D. Dissertation, Purdue University, School of Civil Engineering.
- [16] Fischer, E.C. and Varma, A.H. (2017), "Fire resilience of composite beams with simple connections: Parametric studies and design", *Journal of Constructional Steel Research*, 128: pp. 119-135.
- [17] Selden, K.L., Fischer, E.C., and Varma, A.H. (2016), "Experimental investigation of composite beams with shear connections subjected to fire loading", *Journal of Structural Engineering*, 142(2): p. 04015118.
- [18] Selden, K.L., and Varma, A.H. (2016), "Flexural capacity of composite beams subjected to fire: fiber-based models and benchmarking", *Fire Technology*, 52: pp. 995-1014.
- [19] Tremblay, R., Massicotte, B., Filion, I., and Maranda, R. (1998), "Experimental study on the behaviour of partially encased composite columns made with light welded H steel shapes under compressive axial loads", pp. 195-204.
- [20] Vincent, R., and Tremblay, R. (2001), "An innovative partially composite column system for high-rise buildings. in *Proceedings*", North American Steel Construction Conference., Fort Lauderdale, Florida.
- [21] Tremblay, R., Tirca, L., Bouchereau, R., Toupin, J.D., and Massicotte, B. (2018), "Flexural demand on partially-encased composite columns in multi-storey concentrically braced steel frames", In *STESSA 2003-Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*, pp. 479-485. Routledge.
- [22] Begum, M., Driver, R.G., and Elwi, A.E. (2007), "Finite-element modeling of partially encased composite columns using the dynamic explicit method", *Journal of Structural Engineering*, 133(3): pp. 326-334.
- [23] Weng, C., Yen, S., and Chen, C.C. (2001), "Shear strength of concrete-encased composite structural members", *Journal of Structural Engineering*, 127(10): pp. 1190-1197.
- [24] Architectural Institute of Japan (AIJ), Standards for structural calculation of steel reinforced concrete structures. 1987, Architectural Institute of Japan: Tokyo.
- [25] ACI 318-99, (1999), Buildings code requirements for structural concrete. American Concrete Institute (ACI): Detroit.
- [1] Dundar, C., Tokgoz, S., Tanrikulu, A.K. and Baran, T. (2008), "Behaviour of reinforced and concrete-encased composite columns subjected to biaxial bending and axial load", *Building and Environment*, 43(6), pp. 1109-1120.
- [2] Xiao, C., Deng, F., Chen, T., and Zhao, Z. (2017), "Experimental study on concrete-encased composite columns with separate steel sections", *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 23(4), pp. 483-491.
- [3] Kim, C.S., Park, H.G., Lee, H.J., Choi, I.R., and Chung, K.S. (2017), "Eccentric axial load test for high-strength composite columns of various sectional configurations", *Journal of Structural Engineering*, 143(8), p. 04017075.
- [4] Zhao, X., Wen, F., Chen, Y., Hu, J., Yang, X., Dai, L., and Cao, S. (2018), "Experimental study on the static performance of steel reinforced concrete columns with high encased steel ratios", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27(15), p.e1536.
- [5] Rong, C., and Shi, Q. (2020), "Behaviour of angle steel frame confined concrete columns under axial compression", *Construction and Building Materials*, 241: p. 118034.
- [6] Lai, B., Liew, J.R., Le Hoang, A., and Xiong, M. (2019), "A unified approach to evaluate axial force-moment interaction curves of concrete encased steel composite columns", *Engineering Structures*, 201: p. 109841.
- [7] Lai, B., Liew, J.R., Venkateshwaran, A., Li, S., and Xiong, M. (2020), "Assessment of high-strength concrete encased steel composite columns subject to axial compression", *Journal of Constructional Steel Research*, 164: p. 105765.
- [8] EL-Attar, M.M., El-Karmoty, H.Z., and EL-Moneim, A.A. (2016), "The behavior of ultra-high-strength reinforced concrete columns under axial and cyclic lateral loads", *HBRC Journal*, 12(3): pp. 284-295.
- [9] Chen, C., Wang, C., and Sun, H. (2014), "Experimental study on seismic behavior of full encased steel-concrete composite columns", *Journal of Structural Engineering*, 140(6): p. 04014024.
- [10] Campian, C., Nagy, Z., and Pop, M. (2015), "Behavior of fully encased steel-concrete composite columns subjected to monotonic and cyclic loading", *Procedia Engineering*, 117: pp. 439-451.
- [11] Zeng, L., Xiao, Y., Chen, Y., Jin, S., Xie, W., and Li, X. (2017), "Seismic damage evaluation of concrete-encased steel frame-reinforced concrete core tube buildings based on dynamic characteristics", *Applied Sciences*, 7(4), p. 314.
- [12] Hwang, H.J., Eom, T.S., Park, H.G., and Lee, S.H. (2016), "Axial load and cyclic lateral load tests for composite columns with steel angles", *Journal of Structural Engineering*, 142(5), p. 04016001.



- [40] Broadhouse, B., and Neilson, A. (1987), "Modelling reinforced concrete structures in DYNA3D", UKAEA Atomic Energy Establishment.
- [41] Broadhouse, B. (1995), "The Winfrith concrete model in LS-DYNA3D", Report: SPD/D (95), 363: p. 794.
- [42] Epackachi, S., Whittaker, A.S., Varma, A.H., and Kurt, E.G. (2015), "Finite element modeling of steel-plate concrete composite wall piers", *Engineering Structures*, 100, pp. 369-384.
- [43] Epackachi, S., (2014), "Experimental, numerical, and analytical studies on the seismic response of steel-plate concrete (SC) composite shear walls", State University of New York at Buffalo.
- [44] Epackachi, S., and Whittaker, A.S. (2018), "A validated numerical model for predicting the in-plane seismic response of lightly reinforced, low-aspect ratio reinforced concrete shear walls", *Engineering Structures*, 168: p. 589-611.
- [26] American Institute of Steel Construction (AISC 360), (1993), Load and resistance factor design specification for structural steel buildings. American institute of steel construction: Chicago.
- [27] Building Seismic Safety Council (BSSC): NEHRP, (1997), recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings and other structures. Building Seismic Safety Council: Washington, D.C.
- [28] Nakamura, S.i., and Narita, N. (2003), "Bending and shear strengths of partially encased composite I-girders", *Journal of Constructional Steel Research*, 59(12): pp. 1435-1453.
- [29] Ma, H., Xue, J., Liu, Y., and Zhang, X. (2015), "Cyclic loading tests and shear strength of steel reinforced recycled concrete short columns", *Engineering Structures*, 92, pp. 55-68.
- [30] Xue, Y., Shang, C., Yang, Y., and Yu, Y. (2022), "Macro-modeling on cyclic behavior of concrete-encased steel short columns under shear failure", *Journal of Building Engineering*, 51, p. 104297.
- [31] Xue, Y., Shang, C., Yang, Y., and Yu, Y. (2022), "Prediction of lateral load-displacement curve of concrete-encased steel short columns under shear failure", *Engineering Structures*, 262, p. 114375.
- [32] Xue, Y., Shang, C., Yang, Y., and Yu, Y. (2022), "Shear strength prediction for concrete encased steel short columns: calibration based on current design codes", *Journal of Building Engineering*, 45, p. 103626.
- [33] ANSI/AISC 360-16, (2016), Specification for Structural Steel Buildings. American institute of steel construction: Chicago.
- [34] ANSI/AISC 360-22, (2022), Specification for Structural Steel Buildings. American institute of steel construction: Chicago.
- [35] BS EN 10365: (2017), Hot Rolled Steel Channels, I and H Sections-Dimensions and Masses. British Standards Institution (BSI): London, UK.
- [36] ACI 318-19, (2019), Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute: Farmington Hills.
- [37] Pardis, N., Ebrahimi, R., and Kim, H.S. (2017), "Equivalent strain at large shear deformation: Theoretical, numerical and finite element analysis", *Journal of Applied Research and Technology*, 15(5), pp. 442-448.
- [38] ASTM E2126 (2007), Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [39] CA: (2015), Livermore Software Technology Corporation (LSTC), LS-DYNA. Livermore: California.

