

عملکرد فشاری ستون‌های کوتاه فولادی محاط شده در بتن مسلح حای الیاف فولادی

آرمین معمارزاده^۱، مهدی نعمت زاده^{۲*}، محسن احمدی^۳

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه مازندران
۲- دانشیار گروه عمران، دانشگاه مازندران
۳- استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی بابل

*m.nematzadeh@umz.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۲۷

تاریخ دریافت: ۹۹/۷/۹

چکیده

امروزه استفاده از ستون‌های مرکب بتن و فولاد به سرعت در حال گسترش است. از این رو اهمیت مطالعه روی عملکرد فشاری این نوع ستون‌ها، عوامل مؤثر بر آن‌ها و ارائه راهکارهایی به منظور ارتقا عملکرد این ستون‌ها، بسیار مهم تلقی می‌شود. از این رو، در این مطالعه به بررسی ظرفیت باربری محوری ستون‌های فولادی محاط شده در بتن الیافی^۱ (SRFC) پرداخته شده است. در مجموع ۳۶ نمونه ستون کوتاه فولادی محاط شده در بتن الیافی ساخته شده و تأثیر متغیرهایی شامل نوع شکل پروفیل فولادی (اعم از H و C شکل)، کسر حجمی الیاف فولادی (۰٪، ۰/۷۵٪ و ۱/۲۵٪) و فاصله خاموت‌ها (۴۰، ۶۵ و ۱۳۰ میلی‌متر) روی عملکرد فشاری این ستون‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که ظرفیت محوری ستون‌های فولادی محاط شده در بتن از شکل فولاد داخل آن تأثیر می‌پذیرد. بدین صورت که ظرفیت محوری ستون‌ها با مقطع H شکل بیشتر از ستون‌ها با مقطع C شکل بود که علت آن محصورشدگی بیشتر در این نوع مقاطع می‌باشد. همچنین، افزایش درصد الیاف فولادی در بتن این نوع ستون‌ها می‌تواند علاوه بر افزایش شکل‌پذیری، ظرفیت محوری ستون را تا ۶ درصد افزایش دهد. علاوه بر این، فاصله خاموت‌ها تأثیر بسیار چشمگیری روی ظرفیت محوری این نوع ستون‌ها دارد به طوری که با افزایش فاصله خاموت‌ها ظرفیت محوری ستون‌ها به شدت کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: ستون‌های مرکب فولادی-بتنی، محصورشدگی، ظرفیت باربری محوری، بتن الیافی، شکل‌پذیری.

در سال‌های اخیر، ستون‌های مرکب به واسطه ظرفیت باربری بالا، قابلیت شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی زیاد به‌طور گسترده‌ای

۱- مقدمه

مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سازه‌های بلند با ستون‌های فولادی، معمولاً دارای تغییر شکل‌های جانبی هستند. از سوی دیگر، استفاده از بتن آرمه به تنهایی در ستون‌های ساختمان‌های بلند، در طبقات پایین، فضای بیشتری را اشغال نموده و دارای وزن بیشتری است و به علت ترد و شکننده بودن بتن، سازه حاصل دارای شکل‌پذیری کمتری بوده و در بارهای لرزه‌ای، افت مقاومت در سازه به وجود می‌آید. ترکیب این دو مصالح می‌تواند یک سیستم مؤثر و کارآمدتر نسبت به استفاده مجزا از آن‌ها را تشکیل دهد [1, 2]. ستون‌های مرکب از لحاظ محل قرارگیری بتن و فولاد به دو گروه کلی تقسیم‌بندی می‌شوند که با نام‌های مقاطع فولادی محاط در بتن و مقاطع توخالی پرشده با بتن شناخته می‌شوند. ستون‌های فولادی تقویت‌شده بتنی (SRC) به‌عنوان نوعی از ستون‌های کامپوزیت می‌توانند مزایای قابل توجهی نسبت به ستون‌های فولادی داشته باشند. ازجمله این مزایا می‌توان به مقاومت محوری و مقاومت در برابر حریق این نوع ستون‌ها، با توجه به پوششی بتنی روی فولاد اشاره کرد [3-5]. ستون‌های بتنی توسط آرماتورهای تقویتی به دو ناحیه تقسیم می‌شوند. ناحیه اول هسته بتنی محصورشده مؤثر داخلی و ناحیه دوم بتن محصورشده غیر مؤثر خارجی که شامل بتن پوشش و قسمت سهمی بتن میان میلگردهای تقویتی است. در ستون‌های مرکب فولادی با روکش بتن محصورشدگی بتن به وسیله مقطع فولادی و میلگردهای تقویتی فراهم می‌شود. محصورشدگی بتن به عوامل زیادی ازجمله شکل مقطع فولادی، قطر، شبکه‌بندی، فاصله و تعداد آرماتورهای طولی و همچنین قطر و فاصله آرماتورهای عرضی بستگی دارد، علاوه بر این عوامل تنش تسلیم مقطع فولادی و آرماتورهای تقویتی مانند مقاومت فشاری بتن روی محصورشدگی مؤثر است [6, 7]. ستون مرکب بر اساس نواحی محصورشدگی به سه قسمت اصلی تقسیم می‌شود و همانطور که در شکل (۱) مشخص است، متشکل از بتن با محصورشدگی زیاد، بتن با محصورشدگی جزئی و بتن محصور نشده است.

پژوهش‌های زیادی روی اعضای مرکب انجام گرفته است که نتایج نشانگر رفتار بسیار مطلوب آن‌ها بوده است که به توسعه ضوابط طراحی فعلی کمک شایانی نموده است. مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده روی اعضای مرکب و همچنین قاب‌های ساخته شده از آن‌ها منجر به تهیه پایگاه داده‌ای وسیعی برای ارزیابی و اعتبارسنجی

نتایج شده است [8]. در پژوهشی که توسط هانگ و همکاران [9] روی رفتار ستون‌های SRC با مقاومت بالا انجام شد، یک نوع بتن با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۱۰۰-۱۵۰ مگاپاسکال برای کاربرد در ستون کامپوزیت فولادی استفاده شد و نتایج حاصل از آن نشان داد ستون‌های مرکب ساخته‌شده، دارای شکست ترد و انفجاری هستند. در سال ۲۰۱۵، لی کایون و همکاران [10] در پژوهشی به مطالعه روی رفتار مکانیکی ستون‌های مرکب فولادی محاط در بتن در مقایسه با ستون‌های بتنی مسلح تحت بارگذاری استاتیکی و همچنین بارگذاری چرخه‌ای پرداختند که نتایج نشان می‌دهد ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون‌های SRC تحت بارگذاری استاتیکی به‌طور چشمگیری بیشتر از ستون‌های بتنی مسلح است و همچنین تحت بارگذاری چرخه‌ای، نمودارهای هیستریزس ستون SRC برتر از ستون بتنی مسلح است. ژو و لیو [11] ۸ ستون کوتاه تحت بارمحوری و بارلرزه‌ای روی ستون‌های SRC معمولی و SRC محصورشده با لوله، به‌طور همزمان قرار دادند که نتایج آزمایش نشان داد که ستون‌های کوتاه معمولی SRC دچار شکستگی برشی شدند و رفتار بسیار تردی از خود نشان دادند درحالی‌که ستون‌های SRC محصورشده با لوله به دلیل اثر محصورشدگی زیاد، عملکرد بسیار خوبی را از خود نشان دادند.

بسیاری از کارهای پژوهشی، ستون‌های کامپوزیتی با بخش فولاد سازه‌ای H شکل را تأیید کرده‌اند. با این حال، اشکال دیگر بخش فولادی مانند متقاطع یا T شکل به‌طورکلی در ساختمان‌های کامپوزیت استفاده می‌شود. در سال ۲۰۰۶، توسط لی و چن [12]، یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی ظرفیت محوری ستون فولادی مدفون در بتن ارائه شد در این مدل تحلیلی، دو نوع رفتار برای آرماتورهای طولی و مقطع فولادی ارائه شد. در مدل‌سازی عددی انجام‌شده توسط نرم‌افزار آباکوس، از رابطه‌های مندر برای لحاظ نمودن اثر محصورشدگی استفاده شد. همچنین میرزا و شابک [13] در پژوهش‌های خود نشان داده‌اند که قسمت‌های محصورشده با تبدیل قسمت سهموی به قسمت مستطیلی می‌تواند ساده شود. همچنین پژوهش‌های محدودی روی اثر الیاف بر مقاومت بتن انجام شده است. این مقاله یک مطالعه جامع در مورد استفاده از الیاف در ستون‌های SRC است و تأثیر الیاف بر محصورشدگی این نوع ستون‌ها را بررسی می‌کند. هدف اصلی این پژوهش استفاده از الیاف برای بهبود کارایی

پس از تحمیل بار حداکثر تا شکست کامل، زمان بیشتری را سپری می‌کند.

بتن نسبت به بتن معمولی (بدون الیاف) در رفتار پس از اوج و حتی تأثیر آن روی مقاومت فشاری است. از آنجایی که الیاف شکل‌پذیری سازه را پس از اوج بار، افزایش می‌دهد در نتیجه سازه (در اینجا ستون)

شکل ۱. نواحی بتن با محصورشدگی زیاد، بتن با محصورشدگی جزئی و بتن محصور نشده در مقاطع مرکب

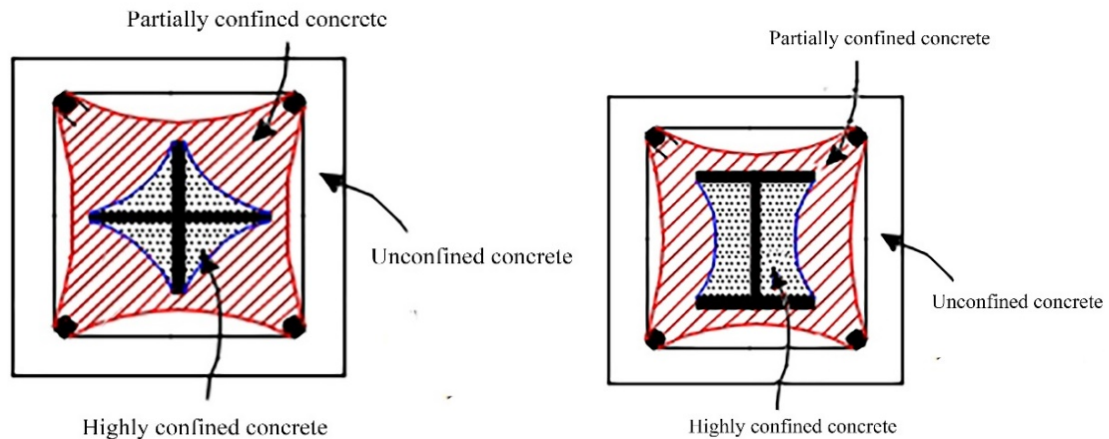


Fig. 1. Regions for unconfined, partially confined, and highly confined concrete in various composite cross sections

برای ساخت پروفیل فولادی H شکل از ۵۴ عدد صفحاتی به ابعاد $4 \times 60 \times 300$ میلی‌متر و جوش دادن این صفحات به شکل H استفاده شده است و همچنین برای ساخت پروفیل فولادی C شکل از دو سری ورق به ابعاد مختلف و اتصال آن‌ها به وسیله دستگاه جوش به یکدیگر استفاده شده است (۱۸ عدد صفحاتی به ابعاد $4 \times 70 \times 300$ میلی‌متر و ۳۶ عدد صفحاتی به ابعاد $4 \times 30 \times 300$ میلی‌متر). در چهارگوشه هر یک از ستون‌ها ۱ میلگرد طولی F10 قرار داده شده است و برای خاموت‌ها از میلگرد F8 استفاده شده است. تنش تسلیم و تنش نهایی پروفیل‌ها و میلگردها با استفاده از آزمون‌های استاندارد اندازه‌گیری شد و مقدار آن برای پروفیل‌ها به ترتیب برابر ۲۵۳ و ۳۷۱ مگاپاسکال و برای میلگردها به ترتیب برابر ۳۱۲ و ۴۴۳ مگاپاسکال است. جزئیات مقطع ستون‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است.

۲-۲- طرح اختلاط

نسبت‌های طرح اختلاط بتن در نظر گرفته شده در این مطالعه برای حجم یک مترمکعب در جدول (۱) ارائه شده است. در این مطالعه، ۳ سری طرح اختلاط با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت و برابر با ۰/۳۵ برای تمام طرح‌های اختلاط در نظر گرفته شد. درصد الیاف استفاده شده در این طرح به ترتیب برابر ۰، ۰/۷۵ و

پژوهش‌های زیادی به ستون‌های SRC اختصاص داده شده است و در این بین استفاده از پروفیل با اشکال مختلف اعم از پروفیل‌های متقارن و غیرمتقارن بسیار متداول بوده و استفاده از بتن به همراه الیاف فولادی در آن بسیار محدود است. از این رو، نویسندگان معتقدند که نتایج این مطالعه می‌تواند بینش مناسبی برای مطالعات آینده در این زمینه فراهم نماید و برای پژوهشگران مفید باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

در این مطالعه به منظور ساخت بتن استفاده شده ستون‌ها، از سیمان پرتلند نوع I، و ریزدانه و درشت‌دانه شکسته طبیعی استفاده شد. بیشینه اندازه درشت‌دانه ۹/۵ میلی‌متر و وزن مخصوص آن ۲/۶۵ بود. همچنین ریزدانه نیز دارای وزن مخصوص و مدول نرمی به ترتیب ۲/۵۶ و ۲/۷۰ بوده و برای رسیدن به کارایی مناسب به دلیل وجود الیاف در بتن از فوق روان کننده در درصدهای مختلف، استفاده شد. الیاف استفاده شده از جنس فولادی و از نوع دو انتها قلاب‌دار بود که دارای طول ۳۰ میلی‌متر و قطر ۰/۶ میلی‌متر بود. مقاومت کششی الیاف فولادی طبق اطلاعات کارخانه ۱۱۰۰ مگاپاسکال بود. همچنین

۱/۲۵ است چراکه بیشتر کارآمدترین میزان الیاف موجود در بتن تا محدوده ۱/۵ درصد حجمی بوده [14] و بیش تر از این میزان الیاف، اثر چندانی روی بهبود عملکرد بتن ندارد [15].

جدول ۱. طرح اختلاط

Mix ID	Coarse Aggregates	Fine Aggregates	Cement	Water	Silica fume	Super Plasticizers	Steel Fiber	Slump
			(kg/m ³)			(%)	(%)	(mm)
Pattern I	928	823	405	155	45	0.8	0	10
Pattern II	928	823	405	154	45	1	0.75	12
Pattern III	928	823	405	154	45	1.1	1.25	12

نسبت آب به کل مواد سیمانی در همه طرح ها برابر ۰/۳۵ می باشد.

Table 1. Mix Design

همچنین پروفیل استفاده شده در ستون ها در دو شکل H و شکل C شکل تهیه شده است. از دیگر متغیرهای استفاده شده در این آزمایش می توان به فاصله خاموت ها اشاره کرد که دارای ۳ طرح با فاصله های ۴۰، ۶۵ و ۱۳۰ میلی متر است که در حالت کلی به صورت نسبت خاموت بررسی می شود. پارامتر نسبت خاموت با محاسبه نسبت فاصله خاموت (S) به عمق مقطع ستون (D) شناخته می شود. با توجه به فاصله خاموت ها، سه مقدار نسبت S/D برابر ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۹ است.

۲-۳- تهیه نمونه ها

در این پژوهش تعداد ۳۶ نمونه به منظور آزمایش ظرفیت باربری ساخته شد. تمام نمونه ها دارای هندسه ی یکسان هستند. مقطع عرضی مربعی ستون ها برابر ۱۵۰×۱۵۰ میلی متر به ارتفاع کلی ۳۰۰ میلی متر در نظر گرفته شد. برای ساخت بتن حاوی الیاف، ابتدا مصالح سنگی شامل شن و ماسه در درون میکسر به مدت

۳۰ ثانیه مخلوط شد. سپس سیمان با پوزولان مورد استفاده (میکروسیلیس) ترکیب شده و به مخلوط اضافه شد تا به مدت ۱ دقیقه درون میکسر مخلوط شود. پس از آن مخلوطی از فوق روان کننده و آب که شامل آب لازم برای رساندن رطوبت سنگدانه ها به وضعیت اشباع با سطح خشک نیز هست، به آرامی درون میکسر ریخته شد و تا مدت ۲ دقیقه هم زده شد. در پایان، الیاف مورد استفاده طرح به مخلوط اضافه شد و تا ۲ دقیقه دیگر در داخل میکسر هم خورد. پس از اختلاط بتن، برای تعیین کارایی بتن تازه، آزمایش اسلامپ مخلوط های بتنی مطابق با ASTM C143 [16] اندازه گیری شد که مقدار آن در جدول (۱) ذکر شده است. به منظور ساخت و بتن ریزی این ستون ها ابتدا مقطع فولادی از پیش ساخته شده به اندازه ارتفاع ستون بریده شد. قبل از ریختن بتن در قالب، قطعه فولادی با دقت تنظیم شد تا این اطمینان حاصل شود که در مرکز قالب قرار دارد تا ستون در زمان بارگذاری، یکپارچه عمل کند. تمام ستون های کوتاه ساخته شده به صورت عمودی تا زمان آزمایش، مورد عمل آوری قرار گرفتند. این شرایط عمل آوری در محیط آزمایشگاه تا حداقل ۲۸ روز ادامه یافت. بعد از اتمام عمل آوری، نمونه های SRFC مورد آزمایش قرار گرفتند. برای شناسایی نمونه های SRFC جدول (۲)، حرف C و H نشان دهنده شکل مقطع است که به ترتیب معرف Cross shaped و H-shaped هستند. همچنین، حرف S معرف خاموت است و عدد پس از آن، نشان دهنده فواصل خاموت ها در ارتفاع ستون بر حسب سانتی متر است. در

شکل ۲. جزئیات مقطع ستون

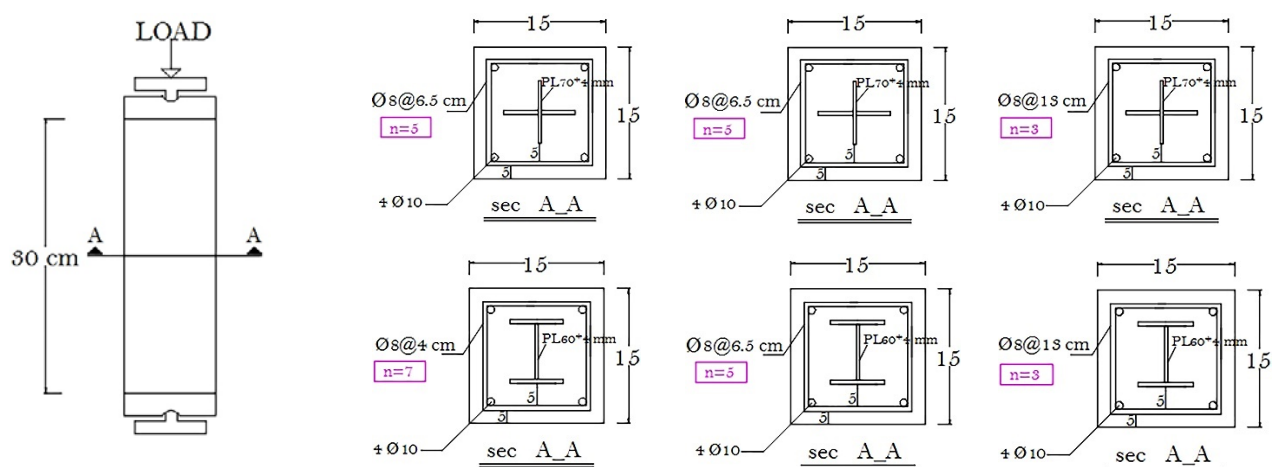


Fig. 2. Column Section Details

جابه‌جایی‌های نسبی اندازه‌گیری شده توسط LVDT، ۵۰ میلی‌متر است.

جدول ۲. ویژگی‌های هندسی و مواد نمونه‌های آزمایشی.

Specimen ID	$B \times D$ (mm)	f_c (MPa)	f_{ys} (MPa)	f_{us} (MPa)	f_{yr} (MPa)	L (mm)	S (mm)	V_f (%)
C-S4F0	150 × 150	55.75	253	371	312	300	40	0
C-S4F0.75	150 × 150	56.85	253	371	312	300	40	0.75
C-S4F1.25	150 × 150	57.76	253	371	312	300	40	1.25
C-S6.5F0	150 × 150	53.12	253	371	312	300	65	0
C-S6.5F0.75	150 × 150	55.18	253	371	312	300	65	0.75
C-S6.5F1.25	150 × 150	56.09	253	371	312	300	65	1.25
C-S13F0	150 × 150	53.63	253	371	312	300	130	0
C-S13F0.75	150 × 150	56.39	253	371	312	300	130	0.75
C-S13F1.25	150 × 150	57.56	253	371	312	300	130	1.25
H-S4F0	150 × 150	54.49	253	371	312	300	40	0
H-S4F0.75	150 × 150	55.96	253	371	312	300	40	0.75
H-S4F1.25	150 × 150	56.43	253	371	312	300	40	1.25
H-S6.5F0	150 × 150	52.69	253	371	312	300	65	0
H-S6.5F0.75	150 × 150	55.90	253	371	312	300	65	0.75
H-S6.5F1.25	150 × 150	56.90	253	371	312	300	65	1.25
H-S13F0	150 × 150	53.12	253	371	312	300	130	0
H-S13F0.75	150 × 150	56.19	253	371	312	300	130	0.75
H-S13F1.25	150 × 150	57.01	253	371	312	300	130	1.25

NOTE:

f_c = Concrete compressive cylinder strength f_{ys} = Steel section yield strength

f_{us} = Steel section ultimate strength ,

f_{yr} = yield strength of longitudinal reinforcement bars

V_f = Steel fiber volume percentage

Table 2. Geometric and material properties of test specimens



Fig. 3. test setup

سرعت بارگذاری در حدود ۲۰ مگاپاسکال بر دقیقه به صورت یکنواخت بر کلیه نمونه‌های SRFC اعمال شد و بسته به ظرفیت باربری نمونه‌ها، بارگذاری ۳ الی ۵ دقیقه به طول انجامید. بارگذاری تا زمانی که ظرفیت تغییر شکل LVDT به انتها برسد، ادامه یافت تا به‌طور کامل رفتار فشاری نمونه‌ها پس از بار حداکثر نیز مورد بررسی قرار گیرد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشاهدات آزمایشگاهی و مد شکست

الگوی گسیختگی نمونه‌های SRFC مطالعه شده تحت بار محوری در شکل (۴) نمایش داده شده است. در این مطالعه از آنجایی که در ابتدای بارگذاری، نمونه‌ها در مرحله الاستیک قرار دارند، ترک‌های آشکاری در ستون‌ها ملاحظه نشد. هنگامی که بارگذاری تا ۸۰ درصد P_u انجام گرفت (P_u نشان‌دهنده بار در نقطه اوج)، برخی از ترک‌های جزئی عمودی در نزدیکی میانه ارتفاع ستون رخ داد و هنگامی که بار تقریباً به ۹۰ درصد P_u رسید، این ترک‌های عمودی گسترش یافته و به تدریج ادامه پیدا

نهایت، حرف F معرف الیاف بوده و عدد پس از آن نشانگر درصد الیاف در مخلوط بتن است. جدول (۲) اطلاعات کلی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. به شکل کلی پارامترهایی که در این پژوهش به عنوان متغیر مورد توجه قرار گرفت شامل درصد الیاف استفاده شده، شکل مقطع فولادی ستون‌ها و نسبت خاموت است.

۲-۴- انجام آزمایش

در این پژوهش، نمونه‌های فشاری استوانه‌ای با توجه به استاندارد [17] ASTM C39 مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین، با توجه به عدم وجود استاندارد مشخص برای انجام آزمایش فشاری روی ستون‌های بتن مسلح SRFC، در این مطالعه از روش آزمایش به کار رفته در سایر پژوهش‌ها [18, 19] استفاده شد. دستگاه استفاده شده به منظور اعمال بارمحوری روی تمامی نمونه‌ها جک بتن‌شکن هیدرولیکی با ظرفیت فشاری ۲۰۰۰ کیلو نیوتن بود. برای انجام آزمایش فشاری نمونه‌های SRFC، ۴ عدد LVDT_۲ برای اندازه‌گیری جابه‌جایی نسبی و کرنش در نظر گرفته شد که ۲ تای آن‌ها برای محاسبه کرنش محوری و ۲ تای دیگر برای محاسبه کرنش جانبی استفاده شد. شکل (۳) تصویری از نمونه SRFC تحت بار محوری فشاری به همراه ابزارهای نصب شده روی آن را نمایش می‌دهد. ظرفیت

کرد. به دلیل شکستگی پوشش بیرونی بتن (کاور بتن) خرد شدن و پاشیدگی روکش بتنی به اطراف مشاهده شد و ظرفیت محوری نمونه‌ها کاهش یافت. در همه نمونه‌ها پیشرفت خرابی تا انتهای

همچنین همان‌گونه که از شکل (۴.ب) مشخص است، افزایش فاصله خاموت در شکل شکست و تخریب ستون‌ها بسیار تأثیرگذار است به گونه‌ای که با کاهش فاصله خاموت‌ها

شکل ۴. حالت‌های خرابی نمونه‌ها و الگوی خرابی داخلی

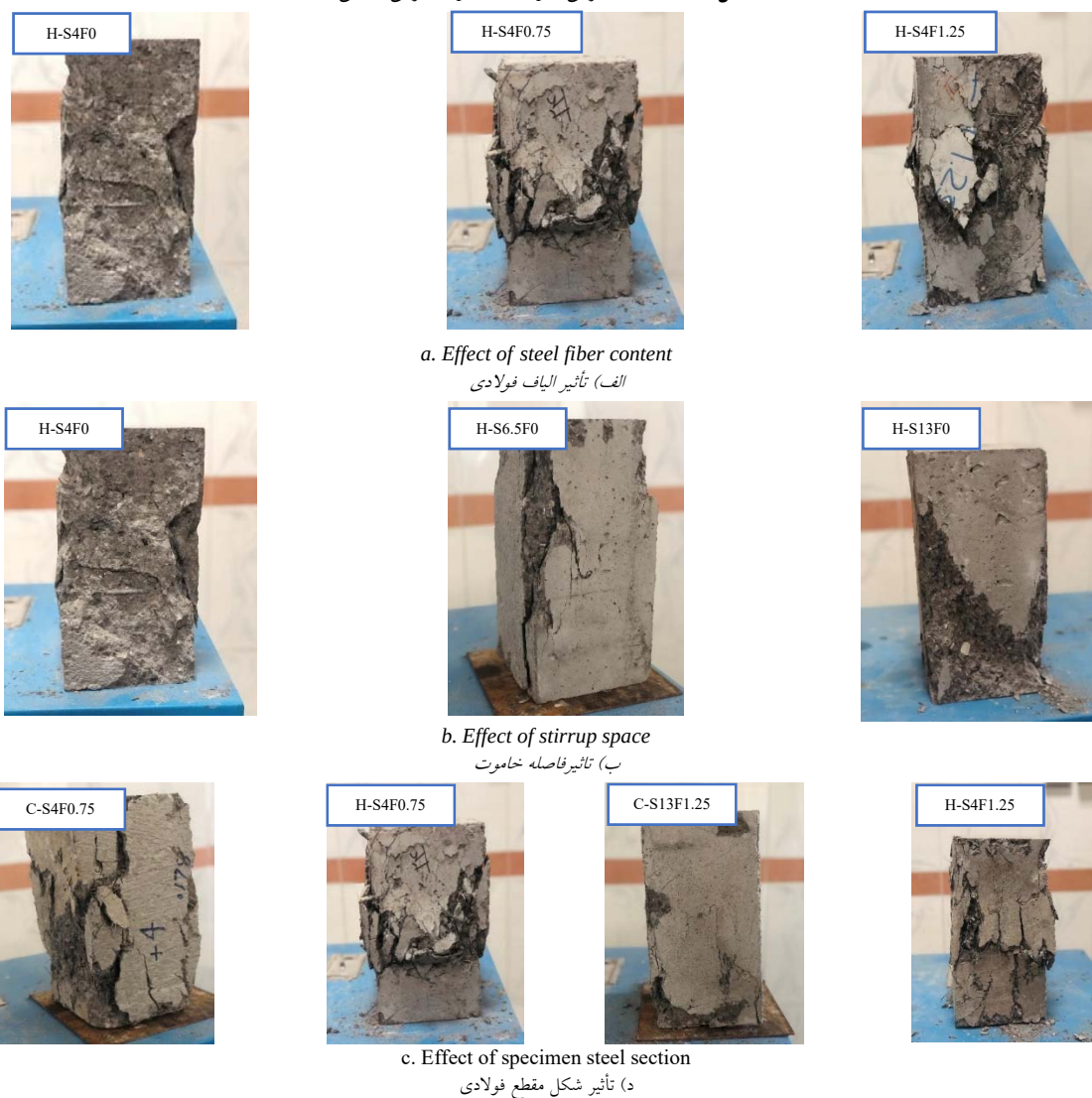


Fig. 4. Failure modes of the specimens and the internal failure pattern.

هسته بتنی به دلیل محصورشدگی ایجادشده توسط خاموت‌ها، از مقاومت بسیار بالایی برخوردار می‌شود و شکست ترد اتفاق نمی‌افتد. همچنین تفاوت شکست در نوع پروفیل استفاده‌شده در داخل ستون‌ها (شکل ۴.د)، تغییرات محسوسی را به همراه نداشت و تنها در نمونه‌های C شکل، شکل نمونه پس از بارگذاری از خرد شدگی کمتری در مقایسه با نمونه‌های هم‌تراز خود با پروفیل H شکل برخوردار است. مشاهدات بررسی شده در این مطالعه مشابه با نتایج به دست‌آمده توسط لای و همکاران

شکست نمونه تقریباً مشابه بود با این تفاوت که همان‌گونه که در شکل (۴.الف) نشان داده‌شده است، شکست نمونه‌های حاوی الیاف به دلیل پیوستگی بیشتر در ساختار بتن نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف، بیشتر به صورت خرد شدن و جدا شدن از قسمت میانه ارتفاع ستون انجام گرفت. در نمونه‌های فاقد الیاف، قسمت بسیار زیادی از کاور بتن کاملاً از ستون جداشده و حتی در میانه ستون می‌توان خاموت‌های ستون‌ها را نیز مشاهده کرد.

[20] و هانگ و همکاران [9] است. برای مثال نتایج لای و همکاران [20] نشان داد که شکست نمونه‌ها صرف‌نظر از مقاومت بتن دارای الگوهای شکست یکسان است اما در صورت استفاده از الیاف فولادی در بتن الگوی شکست نمونه‌ها یکپارچه‌تر و متمایز از نمونه‌های فاقد الیاف است. همچنین، از عدم باز شدگی یا گسیختگی خاموت‌ها در طول بارگذاری نتیجه گرفته شد که در صورت عدم امکان دستیابی به فاصله کمتر در خاموت، استفاده از میلگرد عرضی با قطر بزرگتر می‌تواند یک روش محصور کننده کار آمد باشد. از طرفی مشاهدات هانگ و همکاران [9] نشان داد که فاصله زیاد در خاموت‌های ستون‌های تحت بار محوری، در نقطه پیک (نقطه تنش محوری بیشینه) با لغزش میان بخش بتنی و بخش فولادی مقطع مرکب و به دنبال آن کاهش محصورشدگی کلی در صورت عدم استفاده از الیاف، اجزای مقطع کامپوزیتی به صورت کامل از یکدیگر جدا می‌شوند و روند شکست کامل نمونه به شدت افزایش می‌یابد. این مشاهدات بیشتر در نمونه‌های SRFC این مطالعه نیز قابل مشاهده است.

۳-۲- ظرفیت محوری

نتایج حاصل از آزمایش ظرفیت محوری روی کلیه نمونه‌های SRFC به‌طور متوسط در شکل (۵) و جدول (۳) ارائه شده است. همچنین، تأثیر پارامترهای مختلف شکل پروفیل فولادی (اعم از H شکل و C شکل)، فاصله خاموت‌ها (۴۰، ۶۵ و ۱۳۰ میلی‌متر) و کسر حجمی الیاف فولادی (۰٪، ۰/۷۵٪ و ۱/۲۵٪)، روی ظرفیت محوری نمایش داده شده است. از شکل (۵الف) و جدول (۳)، می‌توان دریافت که به‌طور کلی در این مطالعه در شرایط یکسان (ستون‌هایی دارای درصد الیاف فولادی و نسبت فاصله خاموت برابر)، ستون‌هایی که دارای مقطع فولادی H شکل هستند، دارای ظرفیت باربری بیشتری نسبت به ستون‌هایی با مقطع C شکل هست که علت این امر محصورشدگی بیشتر در نمونه‌های H شکل نسبت به C شکل است. افزایش مقدار ظرفیت محوری ستون‌های H شکل نسبت به C شکل از ۱ تا ۵/۵ درصد متغیر است که بیشترین اختلاف مربوط به نمونه‌های S6.5F1.25 و کمترین اختلاف مربوط به نمونه‌های S13F1.25 است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که کمترین اختلاف در نمونه‌ها،

مربوط به نمونه‌هایی با نسبت خاموت ۰/۹ است (شکل ۵الف). در نمونه‌هایی با مقطع C شکل از دسته نمونه‌های C-S4، با افزایش کسر حجمی الیاف از ۰٪ به ۰/۷۵٪ و ۱/۲۵٪، مقاومت فشاری مقطع مرکب به میزان به ترتیب ۲٪ و ۴٪ افزایش می‌یابد و این افزایش در سری نمونه‌های C-S6.5 برابر ۳٪ و ۵٪ و C-S13 برابر ۳٪ و ۴٪ است. همچنین در نمونه‌هایی با مقطع H شکل از دسته نمونه‌های H-S4، با افزایش کسر حجمی الیاف از ۰٪ به ۰/۷۵٪ و ۱/۲۵٪، ظرفیت محوری مقطع مرکب به میزان به ترتیب ۲٪ و ۴٪ افزایش می‌یابد و این افزایش در سری نمونه‌های H-S6.5 برابر ۵٪ و ۶٪ و H-S13 برابر ۲٪ و ۳٪ است (شکل ۵ب). نتایج نشان می‌دهد که افزایش الیاف به میزان ۱/۲۵٪، در تمامی نسبت‌های خاموت مختلف، بهترین حالت برای افزایش ظرفیت محوری نمونه‌های SRFC است. به‌طور کلی می‌توان دریافت که افزودن الیاف به دور از بهبود رفتار فشاری و کششی بتن، اثر قابل ملاحظه‌ای روی ظرفیت محوری نمونه‌های SRFC ندارد اما می‌تواند تا سطح ۶ درصد آن را بالا ببرد. مقاومت قسمت بتنی با افزایش کسر حجمی الیاف مرتب در حال افزایش است که نشان از بهبود ویژگی‌های چسبندگی سطحی و افزایش مقاومت ماتریکس بتن با اضافه کردن الیاف و افزایش درصد آن را دارد [21].

هدف اصلی استفاده از میلگرد عرضی در ستون‌های SRFC، ایجاد محصورشدگی بتن به منظور جلوگیری از کنده شدن بتن در اطراف پروفیل فولادی و تأمین شرایط مناسب تکیه‌گاهی برای میلگردهای طولی برای جلوگیری از کمانش میلگردها است. از طرف دیگر میلگرد عرضی می‌تواند باعث افزایش ظرفیت برشی مقطع شود. بنابراین، فاصله بین خاموت‌ها پارامتر تأثیرگذار بر ظرفیت نهایی و رفتار ستون‌ها است. همان‌گونه که پیشتر گفته شد، سه مقدار نسبت خاموت برابر با ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۹ به‌منظور تعیین تأثیر این پارامتر بر رفتار کلی ستون در نظر گرفته شد. همان‌گونه که در شکل (۵د) نشان داده شده است در نمونه‌هایی که در آن‌ها تنها فاصله خاموت متغیر است، با افزایش نسبت خاموت‌ها ظرفیت محوری به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد.

شکل ۵. ظرفیت محوری ستون‌های کوتاه محاط شده در بتن

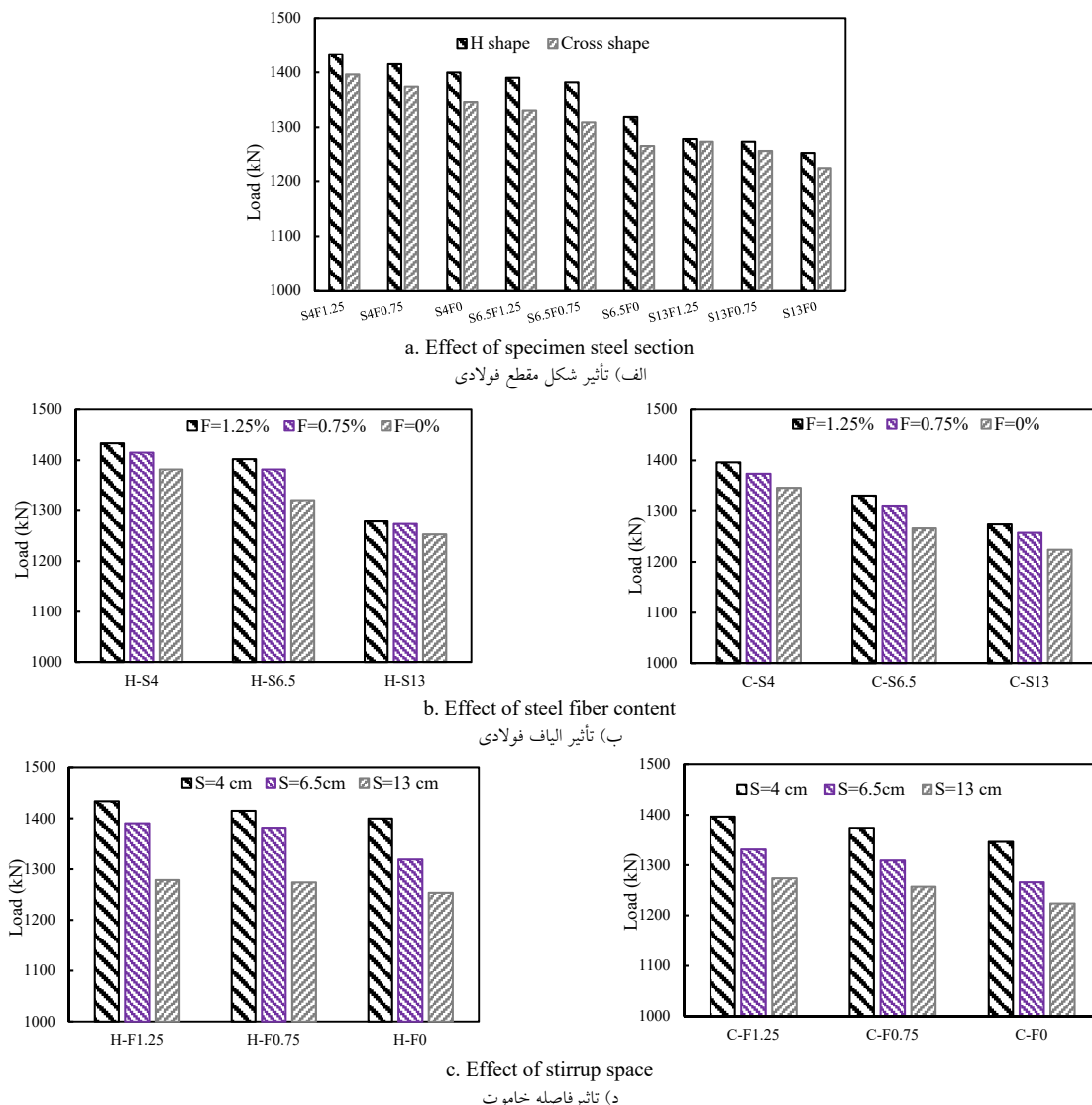


Fig. 5. Axial capacity of concrete encased steel composite stub column

ظرفیت محوری ستون‌ها در دو مقطع H شکل و در نسبت خاموت ۰/۴ (فاصله خاموت ۶۵ میلی‌متر) کاهش کمتری نسبت به مقطع C شکل دارد. به‌طور کلی با افزایش فاصله خاموت از ۴۰ میلی‌متر به ۱۳۰ میلی‌متر، ظرفیت محوری ستون به‌شدت کاهش می‌یابد و دلیل این امر نیز کاهش قابل توجه محصورشدگی بتن است.

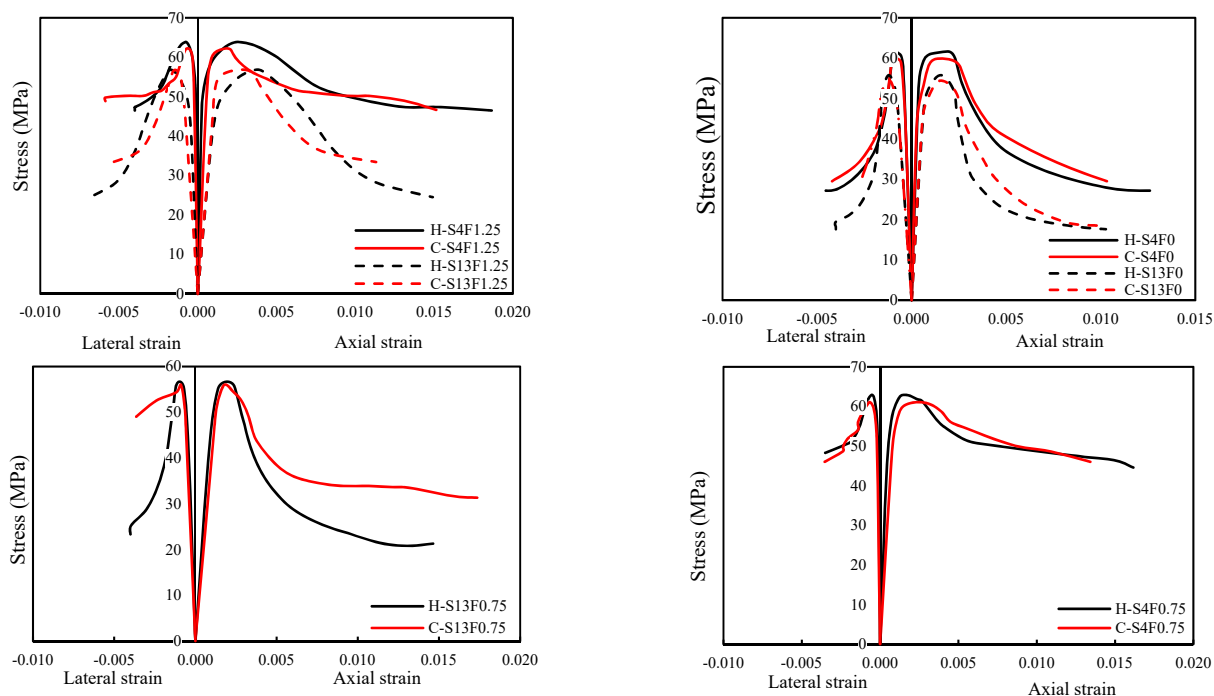
۳-۲-۱- روابط تنش کرنش

نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های SRFC در دو راستای محوری و جانبی پس از آزمایش فشاری و ارزیابی تأثیر شکل پروفیل مقطع، تأثیر کسر حجمی الیاف فولادی و فاصل خاموت ها در شکل (۶)

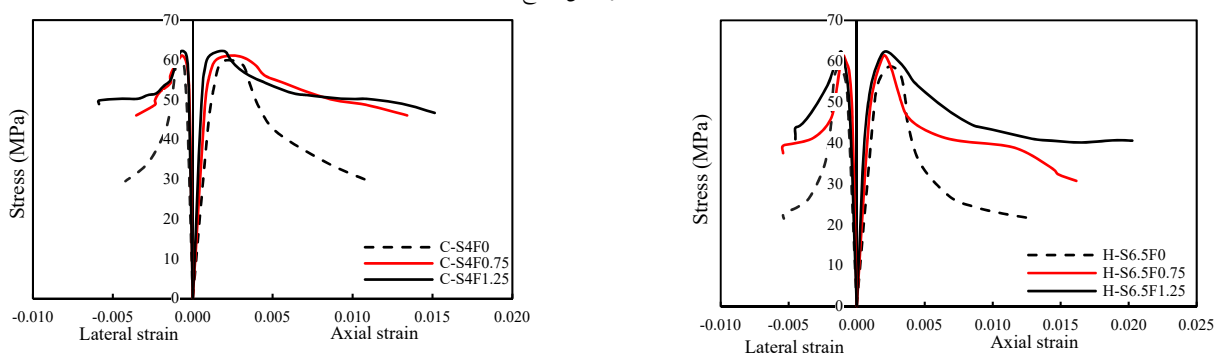
در افزایش نسبت خاموت، میزان کاهش ظرفیت محوری ستون‌ها در نمونه های H شکل و C شکل تفاوت ناچیزی بایکدیگر دارند. با افزایش نسبت خاموت از ۰/۳ به ۰/۴ و ۰/۹ (فاصله خاموت از ۴۰ میلی‌متر به ۶۵ و ۱۳۰ میلی‌متر) در نمونه‌های C-F0، ظرفیت محوری مقطع مرکب به میزان به ترتیب ۶٪ و ۹٪ کاهش می‌یابد این کاهش در سری نمونه‌های C-F0.75 و C-F1.25 نیز به ترتیب ۵٪، ۹٪ و ۵٪، ۹٪ است. همچنین برای نمونه‌های H-F0 نیز ظرفیت محوری مقطع مرکب به میزان به ترتیب ۵٪ و ۹٪ کاهش می‌یابد و این کاهش در نمونه‌های H-F0.75 و H-F1.25 نیز به ترتیب ۲٪، ۱۰٪ و ۲٪، ۱۱٪ است. همان‌گونه که از نتایج مشخص شد، کاهش

نمایش داده شده است. کرنش‌های به دست آمده، مقادیر حاصل از میانگین‌گیری داده‌های دو عدد LVDT قائم و

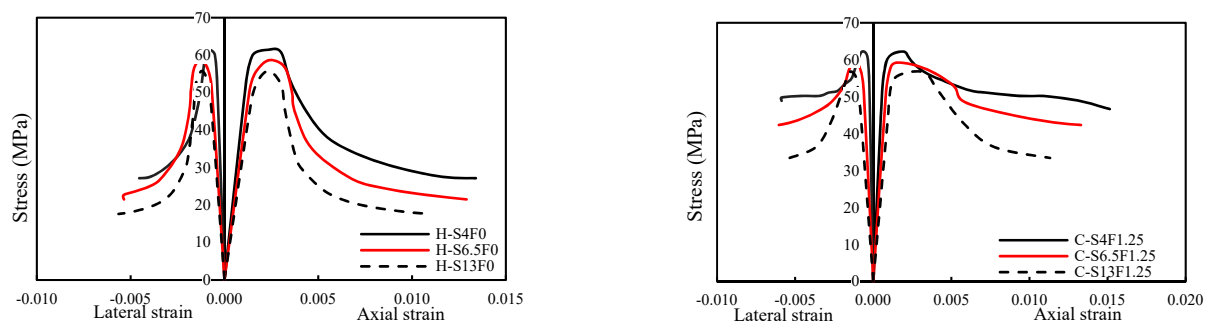
شکل ۶. تأثیر پارامترهای مختلف روی رفتار تنش-کرنش ستون‌های کوتاه محاط شده در بتن



الف) تأثیر شکل مقطع فولادی



ب) تأثیر الیاف فولادی



د) تأثیر فاصله خاموت

Fig. 6. Effect of various parameters on behavior of stress-strain concrete encased steel composite stub column

دو عدد LVDT جانبی است. طبق قرارداد در این پژوهش، در قسمت مثبت محورهای افقی، کرنش های محوری و در قسمت منفی محورهای افقی، کرنش های جانبی نمایش داده می شود. شکل (۶) منحنی های تنش-کرنش نمونه های ستون SRFC را نشان می دهد. از آنجایی که نمونه ها، در ابتدای بارگذاری در مرحله الاستیک قرار دارند، از این رو نمودار تنش-کرنش آنها تقریباً خطی است. از منحنی هایی که در شکل (۶) ترسیم شده است، می توان مشاهده کرد که روند رفتاری کلیه نمونه ها به چهار مرحله مجزا تقسیم می شود: شاخه الاستیک، الاستو-پلاستیک، نزولی و ناحیه نرم شوندگی.

از شکل (۶.الف) می توان دریافت رفتار ستون ها در حالت معمولی (بدون حضور الیاف) در دو مقطع H شکل و C شکل مشابه یکدیگر هستند به شکلی که بعد از رسیدن به نقطه اوج در نمودار تنش-کرنش، ستون ها به سرعت ظرفیت محوری خود را ازدست داده و با شیب زیاد به سمت ناحیه شکست کامل نمونه حرکت می کنند. اما این روند در ستون های الیافی متفاوت است به شکلی که کاهش ظرفیت محوری در ستون های الیافی با شیب بسیار کمتری همراه است. همچنین کاهش ظرفیت محوری در ستون هایی با مقطع H شکل حاوی ۱/۲۵ درصد الیاف کمتر از ستون هایی با مقطع C شکل می باشد که دلیل این امر نیز می تواند محصورشدگی بیشتر، در مقاطع H شکل باشد. همچنین همان گونه که از نمودارهای شکل (۶.الف) مشخص است، شیب در نمودارهای H شکل بیشتر از C شکل است که نشانگر سختی بیشتر این نوع ستون ها می باشد.

همان گونه که از نمودارهای شکل (۶.ب) مشخص است، کاربرد اصلی افزودن الیاف به مخلوط بتن در ستون ها و سازه های مهندسی برای ایجاد رفتار شکل پذیرتر در ستون ها، بعد از نقطه اوج است. با افزودن الیاف فولادی، شکل پذیری ستون ها به طرز قابل توجهی افزایش می یابد. بهبود رفتار ستون های SRFC در نقطه پیک و پس از آن، ناشی از عمل پل انداختگی الیاف فولادی بین ترک ها و در نتیجه بهبود عملکرد مقطع بتنی است، همان گونه که در منحنی های تنش-کرنش بتن در شکل (۶.ب) مشاهده می شود. این تغییر خصلت ترد بودن بتن در اثر افزودن

الیاف فولادی، استفاده از الیاف را در آن ها بسیار ضروری می سازد.

همچنین از شکل (۶.د) می توان مشاهده کرد که فاصله خاموت ها تأثیر مستقیمی بر ظرفیت محوری نمونه های SRFC دارد به شکلی که با افزایش نسبت خاموت (فاصله خاموت) علاوه بر کاهش مقاومت فشاری ستون، شکل پذیری پس از نقطه اوج ستون نیز کاهش می یابد و این کاهش در نسبت خاموت ۰/۳ تا ۰/۹ تا ۱۱ درصد برای ستون های H شکل و ۹ درصد برای ستون های C شکل می رسد. دلیل این امر این است که خاموت ها با ایجاد تنش حاصل از محصورشدگی روی بتن، موجب بهبود عملکرد ستون تحت بار محوری می شود در نتیجه محصورشدگی حاصل سبب می شود بتن رفتار شکل پذیرتری از خود نشان دهد.

۳-۲-۲- کرنش پیک (نقطه اوج)

کرنش پیک در نمودار تنش-کرنش، به کرنشی محوری گفته می شود که نمونه SRFC در نقطه بارمحوری بیشینه به آن می رسد. برای مقایسه راحت تر کرنش پیک در نمودارها، از پارامتر P به عنوان نسبت کرنش پیک باقیمانده استفاده می شود. پارامتر P برای منحنی های ارائه شده در جدول (۴) برای نمونه هایی با حجم های مختلف الیاف فولادی به صورت رابطه ۱ تعریف می شود:

$$\epsilon_F = \frac{\epsilon_F}{\epsilon_{0F}} \quad (1)$$

که در آن، ϵ_F کرنش پیک نمونه SRFC حاوی F درصد الیاف و ϵ_{0F} کرنش پیک نمونه SRFC فاقد الیاف هست. در اینجا نمونه های فاقد الیاف نمونه های C-S6.5F0، C-S4F0، H-S13F0 و H-S6.5F0 هستند. برای نمونه در دسته نمونه های C-S4F0، مقادیر P_0 ، $P_{0.75}$ و $P_{1.25}$ برابر ۱، ۱/۰۶ و ۱/۶۱ و در دسته نمونه های H-S4F0، مقادیر P_0 ، $P_{0.75}$ و $P_{1.25}$ برابر ۱، ۱/۱۱ و ۱/۶۵ بوده است. تمام مقادیر مربوط به کرنش پیک در تمامی نمونه ها در جدول (۴) آورده شده است. این روند، افزایش تغییر شکل در ناحیه قبل نقطه پیک نمونه ها را با افزودن الیاف فولادی به مخلوط بتن نشان می دهد. از آنجاکه ترک خوردگی در هسته بتنی قبل از نقطه پیک

S, F و shape به ترتیب بیانگر الیاف فولادی، فاصله خاموت (نسبت خاموت) و شکل مقطع هستند. مقادیر نسبت چقرمگی باقی مانده برای کلیه نمونه‌های SRFC در جدول (۴) ارائه شده است.

با توجه به جدول (۴)، با افزایش حجم الیاف از ۰/۷۵ به ۰/۲۵، نسبت چقرمگی باقی مانده T_F در دسته نمونه‌ها C-S4 به ۱/۴۶ و ۱/۹۳ و در دسته نمونه‌های H-S4 به ۱/۶۳ و ۱/۹۵ می‌رسد. این نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف فولادی به مخلوط بتن و افزایش حجم آن می‌تواند به‌طور قابل توجهی نسبت چقرمگی باقی مانده نمونه‌های SRFC ستون‌ها را بهبود ببخشد (شکل ۷.الف). که علت آن شیب ملایم‌تر شاخه نزولی منحنی تنش-کرنش در نمونه‌های SRFC حاوی الیاف در مقایسه با نمونه متناظر فاقد الیاف است. این بهبود در نمونه‌های SRFC با الیاف ۱/۲۵ درصد بسیار بیشتر است. مطابق جدول (۴) و شکل (۷.ب)، با افزایش نسبت خاموت (فاصله خاموت) از ۰/۳ به ۰/۴ و ۰/۹، نسبت چقرمگی باقی مانده در نمونه‌های بدون الیاف C-F0 به ترتیب ۰/۹۰ و ۰/۸۴ و H-F0 به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۸۴ است. نسبت چقرمگی باقی مانده در تمامی نمونه‌ها در جدول (۴) نشان داده شده است. مطابق نتایج فوق، با افزایش نسبت خاموت (فاصله خاموت) میزان نسبت چقرمگی باقی مانده T_S کاهش می‌یابد که این ناشی از کاهش قابل توجه مقاومت فشاری و همچنین شیب تندتر در شاخه نزولی منحنی تنش-کرنش است. از طرفی همان گونه که پیشتر گفته شد، نمونه‌های دارای ۱/۲۵ درصد الیاف فولادی همواره نسبت چقرمگی باقی مانده بالاتری نسبت به نمونه‌های مشابه بدون الیاف دارند. این نشان می‌دهد که افزایش نسبت خاموت (فاصله خاموت) همراه با افزودن الیاف فولادی به مقطع بتنی می‌تواند در بهبود نسبت چقرمگی باقی مانده به شکل قابل توجهی مؤثر واقع شود. با توجه به نتایج، میزان جذب انرژی در تمامی نمونه‌ها با مقطع H شکل بیشتر از C شکل است (شکل ۷.د). علت این امر آن است که از آنجایی که میزان فولاد سازه‌ای در مقطع ستون‌های H شکل بیشتر از C شکل هست، مقاومت ستون و در نتیجه جذب انرژی آن بالاتر

شروع می‌شود، الیاف در عرض ترک مانند یک پل عمل کرده و نیروی برشی را در عرض صفحات ترک خورده منتقل می‌کند که منجر به توانایی تغییر شکل محوری بیشتر برای نمونه‌های SRFC در مرحله قبل از پیک می‌شود.

پارامتر P برای منحنی‌های ارائه شده در جدول (۴) برای نمونه‌هایی با نسبت خاموت مختلف (فاصله خاموت) به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$P_S = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{S4}} \quad (2)$$

که در آن، ϵ_s کرنش پیک نمونه‌ی SRFC با نسبت خاموت (فاصله خاموت) S و ϵ_{S4} کرنش پیک نمونه SRFC نسبت خاموت ۰/۳ (فاصله خاموت ۴۰ میلی‌متر) می‌باشد. در اینجا نمونه‌هایی با نسبت خاموت ۰/۳ (فاصله خاموت ۴۰ میلی‌متر)، نمونه‌های H-S4F0، C-S4F0.75، C-4F1.25، H-S4F0.75 و H-S4F1.25 است. برای نمونه در دسته نمونه‌های C-S4F0، مقادیر P_4 ، $P_{6.5}$ و P_{13} برابر ۱، ۰/۷۱ و ۰/۸۶ و در دسته نمونه‌های H-S4F0، مقادیر P_4 ، $P_{6.5}$ و P_{13} برابر ۱، ۰/۹۸ و ۰/۹۶ بوده است. تمام مقادیر مربوط به کرنش پیک در تمامی نمونه‌ها در جدول (۴) آورده شده است. همچنین همان گونه که از شکل (۶) نیز می‌توان مشاهده کرد، منحنی تا نقطه پیک خطی است و شکل پذیری منحنی نقش اساسی در مقدار کرنش پیک ایفا می‌کند. از این رو نمونه با نسبت خاموت ۰/۴ و ۰/۹ (فاصله خاموت ۶۵ و ۱۳۰ میلی‌متر) با داشتن شکل پذیری کمتر نسبت به نمونه با نسبت خاموت ۰/۳ (فاصله خاموت ۴۰) و نیز داشتن مقاومت فشاری کمتر، کرنش پیک کمتری به دست می‌آورد. این روند برای تمام نمونه‌های SRFC صادق است.

۳-۲-۳- چقرمگی

چقرمگی اعضای SRFC یکی از پارامترهای مهم سازه‌ای است که وابسته به ظرفیت تغییر شکل و مقاومت آن‌ها است. این ویژگی در اعضای سازه باعث می‌شود که در هنگام زلزله، انرژی در اثر میرایی ذاتی مواد تشکیل دهنده‌ی المان مستهلک شود. جذب انرژی به صورت سطح زیر نمودار تنش-کرنش محوری تا نقطه نهایی تعریف می‌شود. در شکل (۷)، محور قائم نشان دهنده پارامتر نسبت چقرمگی باقی مانده (T) و اندیس‌های

JGJ 138-2016 مقایسه شد. هر دو آیین نامه طراحی مقدار مشابهی را برای پیش بینی ظرفیت بارمحوری با جمع بندی مقاومت فشاری هر یک از اجزای ماده انجام می دهند. تفاوت آیین نامه ها، در اعمال ضریب آن ها است که در هر آیین نامه متفاوت است. روابط موجود در دو آیین نامه طراحی در معادله های (۳ و ۴) آورده شده است.

$$EN\ 1994-1-1\ P_{EC4} = 0.85 A_c f_c + A_s f_{ys} + A_r f_{yr} \quad (3)$$

$$JGJ\ 138-2016\ P_{JGJ} = 0.9(A_c f_c + A_s f_{ys} + A_r f_{yr}) \quad (4)$$

که در آن A_c ، A_s و A_r به ترتیب مساحت بخش بتنی، مساحت بخش پروفیل فولادی و مساحت بخش میلگردهای طولی است.

مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج پیش بینی شده در جدول (۳) آورده شده است. اگرچه مقدار P_{test} / P_{JGJ} کمی پایین تر از P_{test} / P_{EC4} است اما مقادیر EN 1994-1-1 و JGJ 138-2016 پیش بینی بسیار مشابهی ارائه می دهند. ظرفیت های تئوریک به دست آمده از آیین نامه ها، گاهی کمتر از ظرفیت های به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی است. این امر می تواند به این دلیل باشد که ضریب کاهش مقاومت برای این آیین نامه ها در نظر گرفته شده است.

جدول ۴. پارامترهای نمونه های مورد آزمایش

Specimen ID	P_F	P_S	I_F	I_S	I_{shape}
C-S4F0	-	-	-	-	-
C-S4F0.75	1.06	-	1.46	-	-
C-S4F1.25	1.61	-	1.93	-	-
C-S6.5F0	-	0.71	-	0.90	-
C-S6.5F0.75	1.33	0.89	1.59	0.98	-
C-S6.5F1.25	1.62	0.72	2.11	0.98	-
C-S13F0	-	0.86	-	0.84	-
C-S13F0.75	1.20	0.97	1.11	0.64	-
C-S13F1.25	1.84	0.99	1.89	0.82	-
H-S4F0	-	-	-	-	1.06
H-S4F0.75	1.11	-	1.63	-	1.19
H-S4F1.25	1.65	-	1.95	-	1.07
H-S6.5F0	-	0.98	-	0.87	1.03
H-S6.5F0.75	1.01	0.89	1.58	0.84	1.02
H-S6.5F1.25	1.16	0.69	2.11	0.94	1.03
H-S13F0	-	0.96	-	0.84	1.09
H-S13F0.75	1.11	0.96	1.46	0.77	1.23
H-S13F1.25	1.65	0.96	1.81	0.80	1.05

Table 4. Parameters of SFRC specimens

۱- ظرفیت بار محوری ستون های فولادی محاط شده در بتن تأثیر پذیر از شکل فولاد داخل آن است. بدین صورت که ظرفیت بارمحوری ستون های با مقطع H شکل بیشتر از ستون هایی با

می باشد. نسبت شکل پذیری مقاطع H شکل به C شکل T_{Shape} تمامی نمونه ها در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۳. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با آیین نامه ها

Specimen ID	P_{EC4}	P_{JGJ}	P_{test}	P_{test} / P_{EC4}	P_{test} / P_{JGJ}
	(kN)	(kN)	(kN)		
C-S4F0	1271	1309	1346	1.059	1.028
C-S4F0.75	1292	1331	1374	1.064	1.032
C-S4F1.25	1309	1349	1396	1.067	1.035
C-S6.5F0	1222	1257	1266	1.036	1.007
C-S6.5F0.75	1261	1298	1309	1.039	1.008
C-S6.5F1.25	1278	1316	1331	1.042	1.011
C-S13F0	1232	1268	1224	0.994	0.966
C-S13F0.75	1283	1322	1257	0.980	0.951
C-S13F1.25	1305	1345	1274	0.976	0.947
H-S4F0	1289	1320	1382	1.072	1.047
H-S4F0.75	1316	1349	1415	1.075	1.049
H-S4F1.25	1325	1358	1434	1.082	1.056
H-S6.5F0	1256	1285	1319	1.050	1.026
H-S6.5F0.75	1315	1348	1382	1.051	1.025
H-S6.5F1.25	1334	1368	1402	1.052	1.025
H-S13F0	1264	1293	1253	0.992	0.969
H-S13F0.75	1320	1354	1274	0.965	0.941
H-S13F1.25	1336	1370	1279	0.957	0.934

Table 3. Comparison of test results with Codes.

۳-۳- مقایسه آیین نامه ای

در آیین نامه ها، راه حل های متفاوتی برای پیش بینی مقاومت ظرفیت باربری ستون های مرکب محاط شده در بتن (ستون های SRC) ارائه شده است. در برخی از آن ها اثر محصورشدگی در ستون های مرکب لحاظ شده در صورتی که در برخی دیگر، از آن چشم پوشی شده است. در جدول (۳) مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی این پژوهش و نتایج حاصل از پیش بینی برخی آیین نامه ها و پژوهشگران آورده شده است که در زیر هر یک از آن ها تشریح می شود.

بیشینه بار به دست آمده از منحنی تنش-کرنش با پیش بینی های تحلیلی ارائه شده در آیین نامه های EN 1994-1-1 و

۴- نتیجه گیری

اهمیت وجود الیاف فولادی در اعضای SFRC به دلیل بهبود برخی خواص مکانیکی سازه بسیار زیاد بوده اما به دلیل عدم وجود پژوهش کافی، کمتر استفاده شده است. در این پژوهش، رفتار فشاری ستون های کوتاه SFRC حاوی الیاف فولادی و دارای پروفیل های فولادی مختلف (اعم از H و C شکل) و فاصله خاموت های متفاوت (۴۰، ۶۵ و ۱۳۰ میلی متر) مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر است.

۵- در همه نمونه‌ها پیشرفت خرابی تا انتهای شکست نمونه تقریباً مشابه با یکدیگر بود؛ با این تفاوت که نمونه‌های حاوی الیاف به دلیل پیوستگی بیشتری که در ساختار بتن نسبت به نمونه‌های بدون الیاف داشتند، شکست آن‌ها بیشتر به صورت خرد شدن و جدا شدن پوشش بتن فقط در ناحیه میانی ارتفاع ستون صورت گرفته در صورتی که در نمونه‌های فاقد الیاف، قسمت بسیار زیادی از پوشش بتن از ستون جدا شد.

۶- منحنی‌های تنش-کرنش محوری نمونه‌های ستون SRFC، به صورت مشابه و دارای روند خاصی چه در نمونه‌های فاقد الیاف و چه نمونه‌های الیافی بود و همگی دارای چهار مرحله مجزا شامل شاخه الاستیک، الاستو-پلاستیک، ناحیه نزولی و ناحیه نرم شوندگی بودند.

مقطع C شکل می‌باشد که علت آن محصورشدگی بیشتر در این نوع مقاطع هست.

۲- ظرفیت باربری ستون‌های SRFC با افزایش نسبت خاموت (افزایش فاصله خاموت) کاهش قابل ملاحظه‌ای یافت به گونه‌ای که با افزایش نسبت خاموت این کاهش تا ۱۱ درصد برای ستون‌های H شکل و ۹ درصد برای ستون‌های C شکل رسید.

۳- افزایش کسر حجمی الیاف موجب افزایش ظرفیت باربری ستون‌های SRFC تا ۶ درصد شد. مقدار این افزایش از شکل پروفیل‌های فولادی محاط در ستون‌ها تبعیت نمی‌کند.

۴- با افزایش کسر حجمی الیاف در بتن، کرنش پیک نمونه‌های SRFC افزایش یافت، شیب شاخه نزولی منحنی تنش-کرنش آن‌ها هموارتر شد، و شکل‌پذیری نمونه‌ها (به ویژه در نمونه‌های با نسبت خاموت کمتر) بهبود یافت. علاوه بر این، نسبت چقرمگی نمونه‌ها با افزودن الیاف فولادی به مخلوط بتن و افزایش حجم آن به طور قابل توجهی بهبود یافت.

شکل ۷. نسبت چقرمگی ستون‌های کوتاه محاط شده در بتن

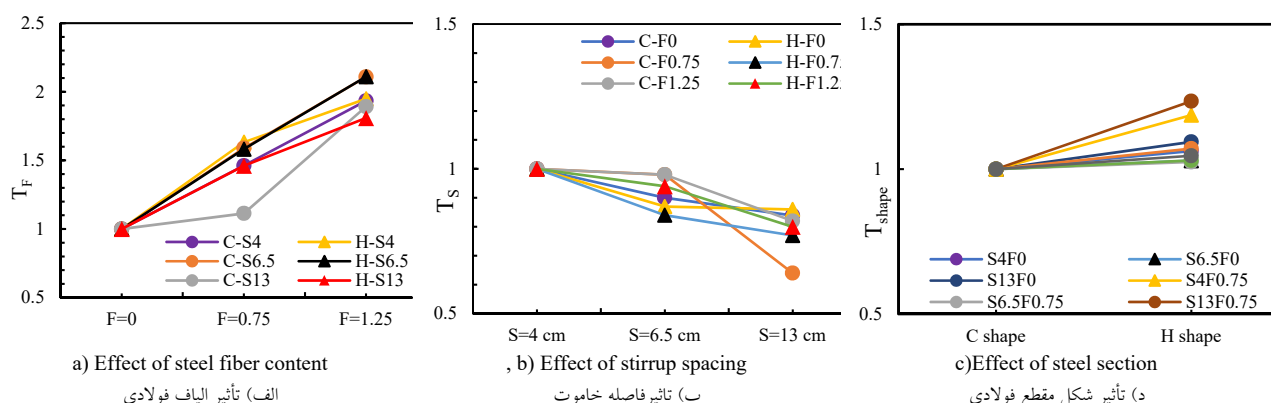


Fig. 7. Toughness ratio of concrete encased steel composite stub column

مراجع

- [1] Matsui, C., 1979. Study on elasto-plastic behaviour of concrete-encased columns subjected to eccentric axial thrust. *Annual Assembly of Architectural Institute of Japan*, pp.1627-8.
- [2] Nematzadeh, M. and Fazli, S., 2020. Effect of axial loading conditions and confinement type on concrete-steel composite behavior. *Computers and Concrete*, 25(2), pp.95-109.
- [3] Park, S., 1994. EN 1994-Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures.
- [4] Nematzadeh, M., Memarzadeh, A. and Karimi, A., 2020. Post-fire elastic modulus of rubberized fiber-reinforced concrete-filled steel tubular stub columns: Experimental and theoretical study. *Journal of Constructional Steel Research*, 175, p.106310.
- [5] ANSI, A., 2005. AISC 341-05 "Seismic provisions for structural steel buildings.". American Institute of Steel Construction Inc, *American Institute of Steel Construction, Chicago, IL*.

- [15] Lau, A. and Anson, M., 2006. Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete. *Cement and concrete research*, 36(9), pp.1698-1707.
- [16] ASTM, C., 2003. 143: Standard test method for slump of hydraulic cement concrete. *ASTM International*.
- [17] ASTM C39/C39M, 2005. Standard test method for compressive strength of cylindrical test specimens.
- [18] Xiao, J., Huang, Y., Yang, J. and Zhang, C., 2012. Mechanical properties of confined recycled aggregate concrete under axial compression. *Construction and Building Materials*, 26(1), pp.591-603.
- [19] Yu, Q., Tao, Z. and Wu, Y.X., 2008. Experimental behaviour of high performance concrete-filled steel tubular columns. *Thin-Walled Structures*, 46(4), pp.362-370.
- [20] 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.
- [21] Tao, Z., Han, L.H. and Wang, D.Y., 2007. Experimental behaviour of concrete-filled stiffened thin-walled steel tubular columns. *Thin-Walled Structures*, 45(5), pp.517-527.
- [6] Sheikh, S.A. and Uzumeri, S.M., 1982. Analytical model for concrete confinement in tied columns. *Journal of the Structural Division*, 108(12), pp.2703-2722.
- [7] Mander, J.B., Priestley, M.J. and Park, R., 1988. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), pp.1804-1826.
- [8] Griffis, L.G., 1992. *Load and resistance factor design of W-shapes encased in concrete* (Vol. 6). American Institute of Steel Construction.
- [9] Huang, Z., Huang, X., Li, W., Zhou, Y., Sui, L. and Liew, J.Y., 2018, June. Experimental behaviour of very high-strength concrete-encased steel composite column subjected to axial compression and end moment. In *Proceedings of the 12th International Conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures*. ASCCS 2018 (pp. 323-329). Editorial Universitat Politècnica de València.
- [10] Li, K.W., Li, Z.Y., Wan, X. and Liu, F., 2015. Non-Linear Numerical Simulation on Hysteretic Behavior of SRC Columns. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 723, pp. 382-386). Trans Tech Publications Ltd.
- [11] Zhou, X. and Liu, J., 2010. Seismic behavior and strength of tubed steel reinforced concrete (SRC) short columns. *Journal of constructional steel research*, 66(7), pp.885-896
- [12] Chen, C.C. and Lin, N.J., 2006. Analytical model for predicting axial capacity and behavior of concrete encased steel composite stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(5), pp.424-433.
- [13] Mirza, S.A. and Skrabek, B.W., 1992. Statistical analysis of slender composite beam-column strength. *Journal of Structural Engineering*, 118(5), pp.1312-1332.
- [14] Wang, H.T. and Wang, L.C., 2013. Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 38, pp.1146-1151.

Compressive performance of steel fiber-reinforced concrete-encased steel composite stub columns

Armin Memarzadeh¹, Mahdi Nematzadeh^{2*}, Mohsen Ahmadi³

1 M.Sc. Student., Civil Eng. Dept., University of Mazandaran

2 Associate Prof., Civil Eng. Dept., University of Mazandaran

3 Assistant Prof., Civil Eng. Dept., Islamic Azad University

* m.nematzadeh@umz.ac.ir

Abstract

Concrete and steel are materials with extensive use in human construction activities. Concrete is a material with high stiffness which is less expensive than other available construction materials, and steel is a material with high strength and ductility. Steel-concrete composite structural systems have been utilized in the construction of high-rise buildings due to their superior structural behavior. Fibrous concrete-encased steel columns are one of the most important composite structural members in which the axial load is carried by the steel and concrete at the same time. These columns are attracting the interest of many researchers due to their excellent structural performance under both static and seismic loading conditions. The steel-concrete interaction enhances the performance when carrying monotonous and earthquake loading. Reinforcing steel fibers help control crack propagation and prevent brittle failure in concrete through improving aggregate interlocking and thus enhance the properties of concrete including the tensile strength and ductility. This paper aims to investigate the axial capacity of fibrous concrete-encased steel composite stub columns. A total of 36 specimens with different cross-sectional shapes of steel profiles, including H-shaped and C-shaped, were tested, and axial parameters and compressive behavior were investigated. The variables of the research included the shape of the steel profile (H-shaped and C-shaped), steel fiber volume ratio (0%, 0.75%, and 1.25%), and the stirrup spacing (40, 65, and 130 mm). The results showed that the loading capacity of fibrous concrete-encased steel columns was affected by the shape of the steel profile inside. In this regard, the use of the H-shaped steel profile in the columns led to a higher axial loading capacity than the use of the C-shaped steel profile, due to greater confinement provided by concrete in columns with this section type (H-shape). Moreover, the addition of fibers significantly increased the ductility of these columns in comparison with those without fibers, and also, the addition of fibers increased the axial capacity of the steel-concrete composite columns by 6%. On the other hand, given the results, it is found that the stirrup spacing had a considerable effect on the load-carrying capacity of these columns, in that by increasing the stirrup spacing, due to the lower confinement of the column, the axial load-carrying capacity declined. In this regard, as the stirrup spacing increased, the decline in this parameter reached up to 11% for the columns with the H-shaped profile and 9% for the columns with the C-shaped profiles. Furthermore, the results of this study showed that the specimen with the H-shaped steel sections, 1.25% fibers, and the stirrup spacing of 40 mm generally were the optimal specimens in terms of the axial load-carrying capacity and ductility in comparison with the other specimens under study. All the specimens had almost similar damage patterns up to their failure. The difference was that the specimens containing fibers experienced failure mainly in the form of the crushing of concrete cover and its breakage from the middle of the column height, due to greater integrity of the concrete structure in these specimens. However, in the specimens without fibers, a considerable portion of the concrete cover was completely detached from the column.

Keywords: Composite Steel-Concrete Columns, Confinement, Steel Reinforced Concrete, Axial load-carrying capacity, Fibrous concrete, Ductility