

Elastic Modulus of Steel Stub Columns Encased in RC Containing Steel Fibers

Armin Memarzadeh¹, Mahdi Nematzadeh^{2*}, Hamed Jafarzadeh¹

1- M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

2 -Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

ABSTRACT

Today the use of concrete and steel columns is expanding rapidly. Therefore, the importance of studying these types of columns and providing solutions to improve the performance of these columns, is considered very important. Elastic modulus is a key parameter employed to estimate the deformation of structures and structural members and is typically expressed in terms of the compressive strength. Understanding the modulus of elasticity of reinforced concrete steel columns (SRCs) containing steel fibers and especially their behavioral changes during axial load application is an important issue. This paper tries to evaluate four moduli of elasticity of reinforced concrete columns containing steel fibers (SRFC). To achieve this goal, 36 SRFC specimens were constructed and various types of modulus of elasticity including the initial modulus, the sequential modulus, the yield point modulus, and the peak point modulus were examined. The research variables include the shape of steel section (H-shaped and C-shaped volume ratio of steel fibers (0, 0.75, and 1.25%), and stirrup spacing (40, 65, and 130 mm). The results showed that the modulus of elasticity of the SRFC columns was affected by the shape. Thus, the modulus of elasticity of columns with H-shaped cross-section was higher than columns with C-shaped cross-section due to more confinement in this type of cross-section. Also, increasing the percentage of steel fibers in the concrete of these types of columns can, in addition to increasing the ductility, increase the modulus of elasticity of the column by an average of up to 6%. In addition, the distance of the arches has a very significant effect on the modulus of elasticity of this type of columns, so that with increasing the distance of the arches, the modulus of elasticity of the columns decreases (about 35%) sharply.

ARTICLE INFO

Receive Date: 10 May 2021

Revise Date: 31 May 2021

Accept Date: 10 June 2021

Keywords:

Steel-Concrete Composite Column
Stress-Strain Curve
Elastic Modulus
Stirrup Ratio
Steel Fiber Reinforced Concrete

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.285696.2452>

*Corresponding author: Mahdi Nematzadeh
Email address: m.nematzadeh@umz.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی مدول الاستیسیته ستون‌های کوتاه فولادی محصورشده در بتن مسلح حاوی الیاف فولادی

آرمین معمارزاده^۱، مهدی نعمت زاده^{۲*}، حامد جعفرزاده^۱

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

چکیده

امروزه استفاده از ستون‌های مرکب بتن و فولاد به سرعت در حال گسترش می‌باشد. از این رو اهمیت مطالعه بر روی این نوع ستون‌ها، عوامل مؤثر بر آن‌ها و ارائه راهکارهایی به منظور ارتقاء عملکرد این ستون‌ها، بسیار مهم تلقی می‌شود. مدول الاستیسیته یک عامل کلیدی برای تخمین تغییر شکل ساختمان‌ها و اعضای سازه‌ای است. شناخت مدول الاستیسیته ستون‌های فولادی تقویت شده بتنی حاوی الیاف فولادی و علی‌الخصوص تغییرات رفتاری آن‌ها در طی اعمال بار محوری از موضوعات مهم و قابل بررسی می‌باشد. این مقاله سعی دارد مدول الاستیسیته چهارگانه ستون‌های فولادی تقویت شده بتنی حاوی الیاف فولادی را مورد ارزیابی قرار دهد. برای نیل به این هدف، تعداد ۳۶ نمونه ساخته شد و انواع مختلف مدول الاستیسیته شامل مدول الاستیسیته اولیه، مدول الاستیسیته سکانتی، مدول الاستیسیته نقطه تسلیم و مدول الاستیسیته نقطه اوج مورد بررسی قرار گرفتند. متغیرهای تحقیق شامل نوع شکل نیمرخ فولادی (اعم از H شکل و C شکل)، کسر حجمی الیاف فولادی (۰٪، ۰٫۰۷۵٪ و ۱٫۲۵٪) و فاصله خاموت‌ها (۴۰، ۶۵ و ۱۳۰ میلی‌متر) می‌باشد. نتایج نشان داد که مدول الاستیسیته ستون‌های فولادی محاط شده در بتن از شکل فولاد داخل آن تأثیر می‌پذیرد. بدین صورت که مدول الاستیسیته 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، مدول الاستیسیته ستون را به طور متوسط تا ۶ درصد افزایش دهد. علاوه بر این، فاصله خاموت‌ها تأثیر بسیار چشم‌گیری بر روی مدول الاستیسیته این نوع ستون‌ها دارد به طوری که با افزایش فاصله خاموت‌ها مدول الاستیسیته ستون‌ها به شدت کاهش (در حدود ۳۵ درصد) می‌یابد.

کلمات کلیدی: ستون مرکب فولادی-بتنی، منحنی تنش- کرنش، مدول الاستیسیته، نسبت خاموت، بتن مسلح به الیاف فولادی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.285696.2452	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2021.285696.2452	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۳/۲۰	۱۴۰۰/۰۳/۲۰	۱۴۰۰/۰۳/۱۰	۱۴۰۰/۰۲/۲۰
مهدی نعمت زاده m.nematzadeh@umz.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

در مهندسی سازه، مرسوم‌ترین نوع ترکیب مصالح، ترکیب فولاد و بتن می‌باشد. این دو ماده، سازه مرکب مناسبی از نظر مقاومت، سختی و مدول الاستیسیته ایجاد می‌کند که در آن تحمل نیروی فشاری بر عهده بتن و تحمل نیروی کششی بر عهده فولاد می‌باشد. ترکیب هوشمندانه بتن و فولاد، یک سیستم موثر و کارآمد نسبت به استفاده مجزا آن‌ها را نتیجه می‌دهد [۱-۳]. در سال‌های اخیر، ستون‌های مرکب به واسطه خصوصیات آن‌ها اعم از ظرفیت باربری بالا، مدول الاستیسیته و سختی زیاد به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴]. ستون‌های فولادی تقویت‌شده بتنی^۱ (SRC) به عنوان نوعی از ستون‌های مرکب دارای مزایای قابل توجهی نسبت به ستون‌های فولادی می‌باشند. از جمله این مزایا می‌توان به مقاومت محوری و مقاومت در برابر حریق این نوع ستون‌ها، با توجه به پوششی بتنی محاط شده فولاد اشاره کرد [۵، ۶]. 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 پوشش^۲ بتنی و قسمت سهمی بتن میان میلگردهای تقویتی است. در ستون‌های SRC محصورشده بتن به وسیله مقطع فولادی و میلگردهای تقویتی فراهم می‌شود. محصورشده بتن به عوامل زیادی اعم از شکل مقطع فولادی، قطر، شبکه‌بندی، فاصله و تعداد آرماتورهای طولی و همچنین قطر و فاصله آرماتورهای عرضی بستگی دارد.

از دیگر عوامل موثر بر محصورشده بتن می‌توان به تنش تسلیم مقطع فولادی و آرماتورهای تقویتی نیز اشاره کرد [۷، ۸]. تحقیقات نشان داده است که ستون‌های SRC می‌توانند در حالی که سطح بالایی از بارهای محوری را تحمل می‌کنند، یک پاسخ شکل‌پذیر از خود نشان دهند. چن و لین^۳ [۹]، یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی ظرفیت محوری ستون فولادی مدفون در بتن ارائه دادند. در این مدل تحلیلی، دو نوع رفتار برای آرماتورهای طولی و مقطع فولادی ارائه گردید. در مدل‌سازی عددی انجام شده از روابط مندر^۴ [۸] برای لحاظ نمودن اثر محصورشده استفاده شد. نتایج نشان داد که اعمال نمودن اثر محصورشده، باعث افزایش ظرفیت باربری، سختی ستون‌های مرکب می‌شود که شکل مقطع فولادی و نحوه قرارگیری آرماتورها، در آن مؤثر هستند. همچنین نتایج نشان داد که چنانچه مقطع I شکل^۵ کوتاه‌تر باشد، اثر محصورشده آن بیشتر است. کنگ^۶ و همکاران [۱۰] به اثر فاکتورهای مؤثر بر روی رفتار قاب با ستون-های مرکب SRC پرداختند که نتایج نشان می‌دهد نسبت شکل مقطع فولادی تأثیر به‌سزایی روی بهبود باربری نهایی و عملکرد لرزه‌ای قاب سازه دارد در حالی که نسبت نیروی محوری تأثیر آنچنانی بر عملکرد سازه ندارد.

مدول الاستیسیته یک عامل کلیدی است که برای تخمین تغییر شکل ساختمان‌ها و اعضای سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد و غالباً برحسب مقاومت فشاری بیان می‌شود [۵، ۱۱، ۱۲]. هر گونه تخمین بیش از حد این پارامتر ممکن است منجر به نتایج نادرست و ناامن شود زیرا مدول الاستیسیته در تعیین تغییر شکل‌های الاستیک و تعیین تغییر مکان جانبی نسبی در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها نقش کلیدی را ایفا می‌کند [۱۳، ۱۴]. مقدار مدول الاستیسیته به طور کلی به خصوصیات مواد و خصوصیات هندسی این نوع ستون‌های بستگی دارد [۶]. به طور کلی مدول الاستیسیته از نسبت تنش مهندسی به کرنش مهندسی متناظر با آن و یا نسبت افزایشی از آن‌ها به دست می‌آید که به ترتیب مدول الاستیسیته سکانتی^۷ و مدول الاستیسیته مماسی^۸ نامیده می‌شوند که در لحظات مختلف بارگذاری قابل محاسبه است. طبق تحقیقات انجام گرفته توسط نعمت زاده و همکاران [۶] مدول الاستیسیته به ۴ نوع مختلف از جمله مدول الاستیسیته اولیه^۹، مدول الاستیسیته سکانتی، مدول الاستیسیته نقطه تسلیم فولاد^{۱۰} و مدول الاستیسیته نقطه اوج^{۱۱} تقسیم می‌شود (شکل ۱ را ببینید). در این مطالعه نیز به بررسی مدول الاستیسیته چهارگانه ذکر شده پرداخته می‌شود.

¹ Steel reinforced concrete (SRC)

² Cover

³ Chen & Lin

⁴ Mander

⁵ I-Shaped

⁶ Kong

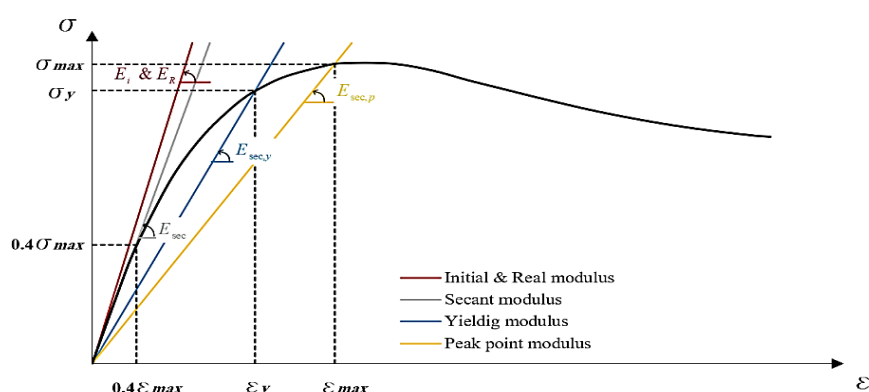
⁷ Secant elastic modulus

⁸ Tangent elastic modulus

⁹ Initial elastic modulus

¹⁰ Elastic modulus at steel yielding point

¹¹ Elastic modulus at peak point



شکل ۱: نمودار شمایک مدول الاستیسیته چهارگانه [۶].

کنگ و همکاران [۱۰] در یک تحلیل پارامتری به وسیله مدل سازی به بررسی رفتار قاب تحت بار یکنواخت پرداختند که نتایج نشان داد افزایش نسبت فولاد تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر ظرفیت نهایی، سختی و مدول الاستیسیته قاب دارد. ژو^{۱۲} و همکاران [۱۵] تحقیقات تجربی در مورد رفتار ستون‌های SRC با مقاومت بالا انجام دادند و نتایج نشان داد در استفاده از بتن با مقاومت بالا افزایش فاصله خاموت‌ها در مدول الاستیسیته اولیه ستون‌ها تاثیر خاصی ندارد اما روی اتلاف انرژی و ظرفیت تغییر شکل تاثیر مثبتی دارند. همچنین، کایون^{۱۳} و همکاران [۱۶] در تحقیقی به مطالعه بر روی رفتار مکانیکی ستون‌های مرکب فولادی محاط در بتن در مقایسه با ستون‌های بتنی مسلح تحت بارگذاری استاتیکی پرداختند که نتایج نشان می‌دهد مدول الاستیسیته، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون‌های SRC تحت بارگذاری استاتیکی به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از ستون‌های بتنی مسلح می‌باشد.

بتن ساده به دلیل مزایایی مانند هزینه کم و در دسترس بودن، به طور گسترده در ساختار اصلی اکثر سازه‌ها استفاده می‌شود. اما در کنار این مزایا، معایبی از جمله رفتار شکننده، مقاومت کششی کم و ظرفیت کرنش اندک را نیز دارا می‌باشد [۱۷]. با پیشرفت تکنولوژی و توسعه مهندسی سازه، تقاضا برای ساخت انواع جدیدی از بتن‌ها که دارای خصوصیات بهبود یافته‌ای باشند، افزایش یافت. از انواع این بتن‌ها می‌توان به بتن مسلح به الیاف فولادی^{۱۴} اشاره کرد که نسبت به بتن معمولی دارای رفتار شکل‌پذیرتر با کنترل رشد و انتشار ترک و قابلیت باربری بعد از ترک خوردگی می‌باشد [۱۸-۲۰]. استفاده از الیاف در مخلوط بتن علاوه بر بهبود خواص مکانیکی از قبیل مقاومت فشاری، کششی و خمشی، رفتار شکننده بتن را کاهش داده و رشد و انتشار ترک‌ها را از طریق مکانیزم پل زدن^{۱۵} الیاف کنترل می‌کند [۴]. لای^{۱۶} و همکاران [۲۱] در تحقیقی به مطالعه بر روی رفتار ستون‌های کوتاه مرکب فولادی محصورشده^{۱۷} حاوی الیاف فولادی ۰/۵ درصد پرداختند. تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش نشان می‌دهد که نسبت سهم فولاد نقش غالب در شکل‌پذیری دارد، در حالی که افزودن الیاف فولادی ۰/۵ درصد اثر ناچیزی در بر دارد. همچنین دریافتند، افزودن کسر حجمی ۰/۵ درصد الیاف فولادی برای رفع خرابی ناشی از تخریب پوشش بتنی ستون‌ها تحت فشار محوری کافی نیست.

در این مقاله مدول الاستیسیته چهارگانه ستون‌های SRC حاوی الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. تا به حال، حضور الیاف فولادی در این ستون‌ها و بررسی توام اثرات تاثیر فاصله خاموت و شکل نیمرخ^{۱۸} مقطع بر محصورشدگی و عملکرد مدول الاستیسیته نمونه‌ها، کمتر مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که الیاف شکل‌پذیری المان سازه‌ای را پس از بار اوج، افزایش می‌دهد در نتیجه ستون پس از تحمیل بار حداکثر تا شکست کامل، زمان بیشتری را طی می‌کند. تحقیقات زیادی به ستون‌های SRC اختصاص داده شده است و در این بین استفاده از نیمرخ با اشکال مختلف اعم از نیمرخ‌های متقارن بسیار متداول بوده است. بر این اساس، درصد کسر حجمی الیاف فولادی (۰/۰، ۰/۰۷۵، ۱/۲۵)، نوع شکل نیمرخ فولادی (اعم از H شکل^{۱۹} و C شکل^{۲۰}) و فاصله خاموت‌ها (۴۰، ۶۵ و ۱۳۰

¹² Zhu

¹³ Kaiwen

¹⁴ Steel fiber reinforced concrete (SFRC)

¹⁵ Bridging

¹⁶ Lai

¹⁷ Encased steel composite stub columns

¹⁸ Profile

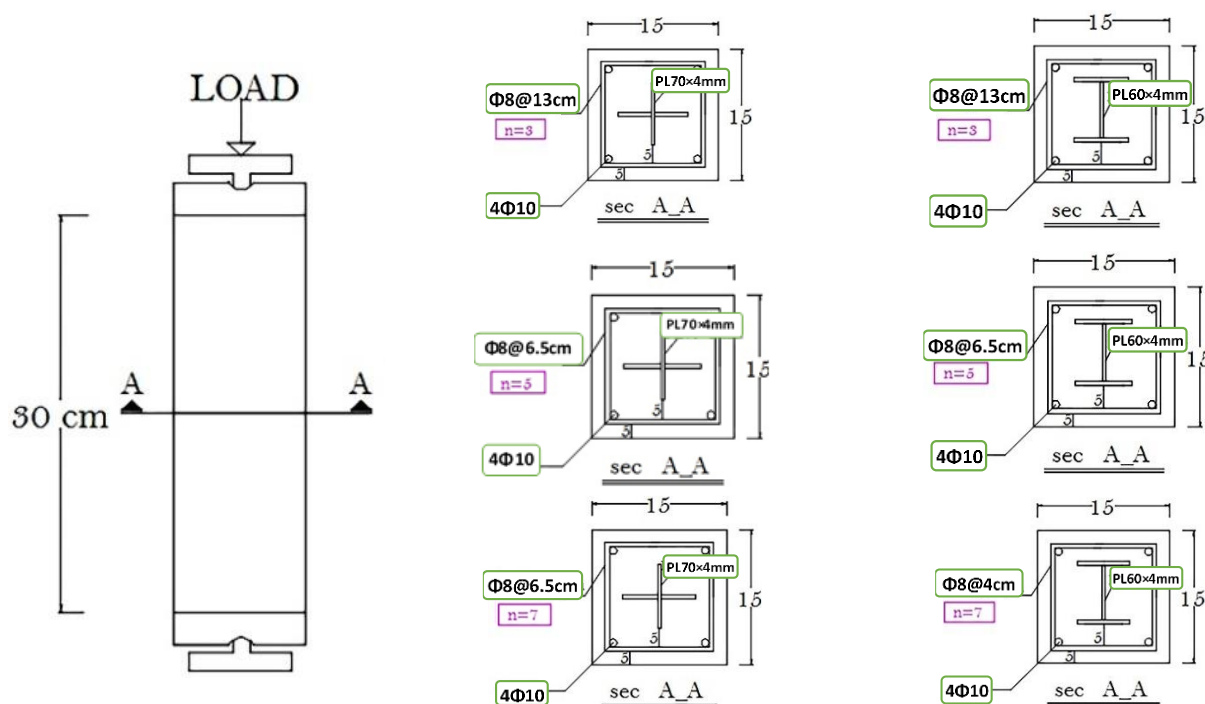
¹⁹ H-Shaped

میلی متر) به عنوان متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق در نظر گرفته شده اند. دلیل وجود این متغیرها در بالا به اختصار ذکر شده که به واسطه آن، پارامترهایی شامل مقاومت فشاری، منحنی های تنش-کرنش و مدول الاستیسیته چهارگانه در ستون های کوتاه SRC بررسی می شود. مولفین این تحقیق معتقدند که نتایج و اطلاعات مطالعه حاضر می تواند زمینه مناسبی برای مطالعات آینده فراهم سازد و برای محققان و مهندسان سازه در طراحی ستون های SRC مسلح به الیاف فولادی مفید باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- آماده سازی نمونه ها و نسبت های اختلاط

در این تحقیق تعداد ۳۶ نمونه در ۳ طرح مختلف ساخته شده است، تمام نمونه ها دارای هندسه ی یکسان هستند. مقطع عرضی مربعی ستون ها برابر 150×150 میلی متر به ارتفاع کلی 3000 میلی متر در نظر گرفته شده است و درصد الیاف استفاده شده در این طرح به ترتیب برابر 0 ، $0/75$ و $1/25$ هست. چرا که معمولا کارآمدترین میزان الیاف موجود در بتن تا محدوده ی $1/5$ درصد حجمی بوده [۲۲] و بیش تر از این میزان الیاف، اثر چندانی روی بهبود عملکرد بتن ندارد [۲۳]. همچنین نیمرخ استفاده شده در ستون ها در دو شکل H شکل و C شکل تهیه شده است. در چهارگوشه ی هر یک از ستون ها 1 میلگرد طولی $\Phi 10$ قرار داده شده است و برای خاموت ها از میلگرد $\Phi 8$ استفاده 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 40 ، 65 و 130 میلی متر می باشد 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) مطالعه می شود. با توجه به فاصله خاموت ها، سه مقدار نسبت S/D برابر $0/3$ ، $0/4$ و $0/9$ می باشد. به طور کلی پارامترهایی که در این آزمایش به عنوان متغیر مورد توجه قرار گرفت شامل درصد الیاف استفاده شده، شکل مقطع فولادی ستون ها و نسبت خاموت می باشد. در این تحقیق از ورق های فولادی برای ساخت نیمرخ استفاده شده است. برای ساخت نیمرخ فولادی H شکل از 54 عدد صفحاتی به ابعاد $4 \times 60 \times 300$ میلی متر و جوش دادن این صفحات به شکل H استفاده شده است و همچنین برای ساخت نیمرخ فولادی C شکل از دو سری ورق به ابعاد مختلف و اتصال آن ها به وسیله ی دستگاه جوش به یکدیگر استفاده شده است (18 عدد صفحاتی به ابعاد $4 \times 70 \times 300$ میلی متر و 36 عدد صفحاتی به ابعاد $4 \times 30 \times 300$ میلی متر). جزئیات مقطع ستون ها در شکل ۲ نشان داده شده است. تنش تسلیم و تنش نهایی نیمرخ ها و میلگردها با استفاده از آزمون های استاندارد اندازه گیری شد و مقدار آن برای نیمرخ ها به ترتیب برابر 253 و 371 مگاپاسکال و برای میلگردها به ترتیب برابر 312 و 443 مگاپاسکال می باشد.



شکل ۲: جزئیات مقطع ستون.

جهت شناسایی نمونه‌های SRC، حرف C و H نشان‌دهنده‌ی شکل مقطع می‌باشد. همچنین حرف S نشانگر خاموت^{۲۱} است و حرف F نشانگر الیاف^{۲۲} می‌باشد. اعداد پس از حروف S و F به ترتیب نشانگر فاصله خاموت (برحسب سانتی‌متر) و درصد الیاف می‌باشد. جدول ۱ اطلاعات کلی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

²¹ Stirrup

²² Fiber

جدول ۱: خصوصیات هندسی و مصالح نمونه‌های آزمایش

نام نمونه	$B \times B$ (mm)	f_c (MPa)	f_{ys} (MPa)	f_{us} (MPa)	f_{yr} (MPa)	L (mm)	S (mm)	V_f (%)	P_{test} (kN)
C-S4F0	۱۵۰×۱۵۰	۵۵,۷۵	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۴۰	۰	۱۳۴۶
C-S4F0.75	۱۵۰×۱۵۰	۵۶,۸۵	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۴۰	۰,۷۵	۱۳۷۴
C-S4F1.25	۱۵۰×۱۵۰	۵۷,۷۶	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۴۰	۱,۲۵	۱۳۹۶
C-S6.5F0	۱۵۰×۱۵۰	۵۳,۱۲	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۶۵	۰	۱۲۶۶
C-S6.5F0.75	۱۵۰×۱۵۰	۵۵,۱۸	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۶۵	۰,۷۵	۱۲۹۹
C-S6.5F1.25	۱۵۰×۱۵۰	۵۶,۰۹	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۶۵	۱,۲۵	۱۳۲۱
C-S13F0	۱۵۰×۱۵۰	۵۳,۶۳	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۱۳۰	۰	۱۲۲۴
C-S13F0.75	۱۵۰×۱۵۰	۵۶,۳۹	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۱۳۰	۰,۷۵	۱۲۵۷
C-S13F1.25	۱۵۰×۱۵۰	۵۷,۵۶	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۱۳۰	۱,۲۵	۱۲۷۴
H-S4F0	۱۵۰×۱۵۰	۵۴,۴۹	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۴۰	۰	۱۳۸۲
H-S4F0.75	۱۵۰×۱۵۰	۵۵,۹۶	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۴۰	۰,۷۵	۱۴۱۵
H-S4F1.25	۱۵۰×۱۵۰	۵۶,۴۳	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۴۰	۱,۲۵	۱۴۳۴
H-S6.5F0	۱۵۰×۱۵۰	۵۲,۶۹	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۶۵	۰	۱۳۱۹
H-S6.5F0.75	۱۵۰×۱۵۰	۵۵,۹۰	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۶۵	۰,۷۵	۱۳۷۲
H-S6.5F1.25	۱۵۰×۱۵۰	۵۶,۹۰	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۶۵	۱,۲۵	۱۳۹۲
H-S13F0	۱۵۰×۱۵۰	۵۳,۱۲	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۱۳۰	۰	۱۲۵۳
H-S13F0.75	۱۵۰×۱۵۰	۵۶,۱۹	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۱۳۰	۰,۷۵	۱۲۸۴
H-S13F1.25	۱۵۰×۱۵۰	۵۷,۰۱	۲۵۳	۳۷۱	۳۱۲	۳۰۰	۱۳۰	۱,۲۵	۱۳۰۰

تفسیر علائم:

 f_{yr} = مقاومت تسلیم میلگرد طولی f_c = مقاومت فشاری هسته بتنی V_f = درصد حجمی الیاف فولادی f_{ys} = مقاومت تسلیم مقطع فولادی

S = فاصله خاموت

 f_{us} = مقاومت نهایی مقطع فولادی P_{test} = مقاومت فشاری ستون SRFC

L = طول ستون

نسبت‌های طرح اختلاط برای بتن مقاومت بالا حاوی الیاف فولادی برای حجم یک مترمکعب در جدول ۲ 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. در کلیه مخلوط‌های بتنی از ریزدانه و درشت‌دانه شکسته طبیعی و سیمان پرتلند نوع I استفاده شد. حداکثر اندازه درشت‌دانه ۹/۵ میلی‌متر و وزن مخصوص 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 فوق‌روان‌کننده در درصد‌های مختلف، استفاده شد [۲۴]. الیاف استفاده شده از جنس فولادی و از نوع دو انتها قلاب‌دار بود و دارای طول ۳۰ میلی‌متر و قطر ۰/۶ میلی‌متر بود. مقاومت کششی الیاف فولادی ۱۱۰۰ مگاپاسکال بود.

برای ساخت بتن حاوی الیاف، ابتدا مصالح سنگی شامل شن و ماسه درون میکسر به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شد. سپس سیمان با پوزولان مورد استفاده (دوده‌سیلیس) ترکیب شده و به مخلوط اضافه شد تا به مدت ۱ دقیقه درون میکسر مخلوط شود. پس از آن مخلوطی از فوق‌روان‌کننده و آب که شامل آب لازم برای رساندن رطوبت سنگدانه‌ها به وضعیت اشباع با سطح خشک نیز می‌باشد، به آرامی درون میکسر ریخته و به مدت ۲ دقیقه مخلوط شد. نهایتاً، الیاف فولادی به مخلوط اضافه شد و تا ۲ دقیقه دیگر در داخل میکسر مخلوط شد. پس از اختلاط بتن، برای تعیین کارایی بتن تازه، آزمایش اسلامپ مخلوط‌های بتنی مطابق با ASTM C143 [۲۵] اندازه‌گیری شد که مقدار آن در جدول ۲ ذکر شده است. به منظور ساخت و بتن‌ریزی این ستون‌ها ابتدا مقطع فولادی از پیش ساخته شده به اندازه‌ی ارتفاع ستون بریده می‌شود. قبل از ریختن بتن در قالب، قطعه فولادی با دقت تنظیم می‌شود تا این اطمینان حاصل شود که در مرکز قالب قرار دارد تا ستون در زمان بارگذاری، یکپارچه عمل کند. تمام ستون کوتاه‌های ساخته شده به‌صورت عمودی تا زمان تست شدن، مورد عمل‌آوری قرار

گرفتند. این شرایط عمل‌آوری در محیط آزمایشگاه تا حداقل ۲۸ روز ادامه یافت. بعد از اتمام عمل‌آوری، نمونه‌های SRFC مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

جدول ۲: طرح اختلاط

نام طرح	شن	ماسه	سیمان	آب	دوده سیلیس	فوق روان کننده	الیاف فولادی	اسلامپ
	۹۲۸	۸۲۳	۴۰۵	۱۵۵	۴۵	(%)	(%)	(mm)
الگو ۱	۹۲۸	۸۲۳	۴۰۵	۱۵۵	۴۵	۰٫۸	۰	۱۰
الگو ۲	۹۲۸	۸۲۳	۴۰۵	۱۵۵	۴۵	۱	۰٫۷۵	۱۲
الگو ۳	۹۲۸	۸۲۳	۴۰۵	۱۵۵	۴۵	۱٫۱	۱٫۲۵	۱۲

۲-۲- ابزار اندازه‌گیری و دستگاه آزمایش

در این تحقیق، نمونه‌های فشاری استوانه‌ای با توجه به استاندارد ASTM C39 [۲۶] مورد آزمایش قرار گرفتند که این عبارت به مقاله اضافه شده است. اما برای ستون‌های بتن مسلح ساخته شده در این مطالعه با توجه به عدم وجود استاندارد مشخص جهت انجام آزمایش فشاری بر روی آن‌ها، از روش آزمایش به کار رفته در سایر تحقیقات [۲۷، ۲۸] استفاده شده است. جک استفاده شده به منظور اعمال بار محوری بر روی تمام نمونه‌ها جک بتن شکن با ظرفیت فشاری ۲۰۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد که بار محوری بر روی نمونه‌ها را به صورت یکنواخت اعمال می‌کند. برای هر نمونه ۲ حسگر LVDT^{۲۳} عمودی در نظر گرفته شد که برای محاسبه تغییر شکل محوری مورد استفاده قرار گرفته است. مکان قرارگیری نمونه‌ها و ابزارها به همراه LVDT و بار اعمال شده در شکل ۳ نشان داده شده است. جابجایی افقی با LVDT در محدوده ۵۰ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. سرعت بارگذاری در حدود ۲۰ مگاپاسکال بر دقیقه (مشابه با سایر تحقیقات [۲۷، ۲۸]) بود و بسته به ظرفیت باربری نمونه‌ها از ۳ الی ۵ دقیقه به طول انجامید. بارگذاری تا زمانی که ظرفیت تغییر شکل LVDT به انتها برسد، ادامه یافت تا به طور کامل رفتار پس از اوج^{۲۴} فشاری نمونه‌ها مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۳: دستگاه آزمایش.

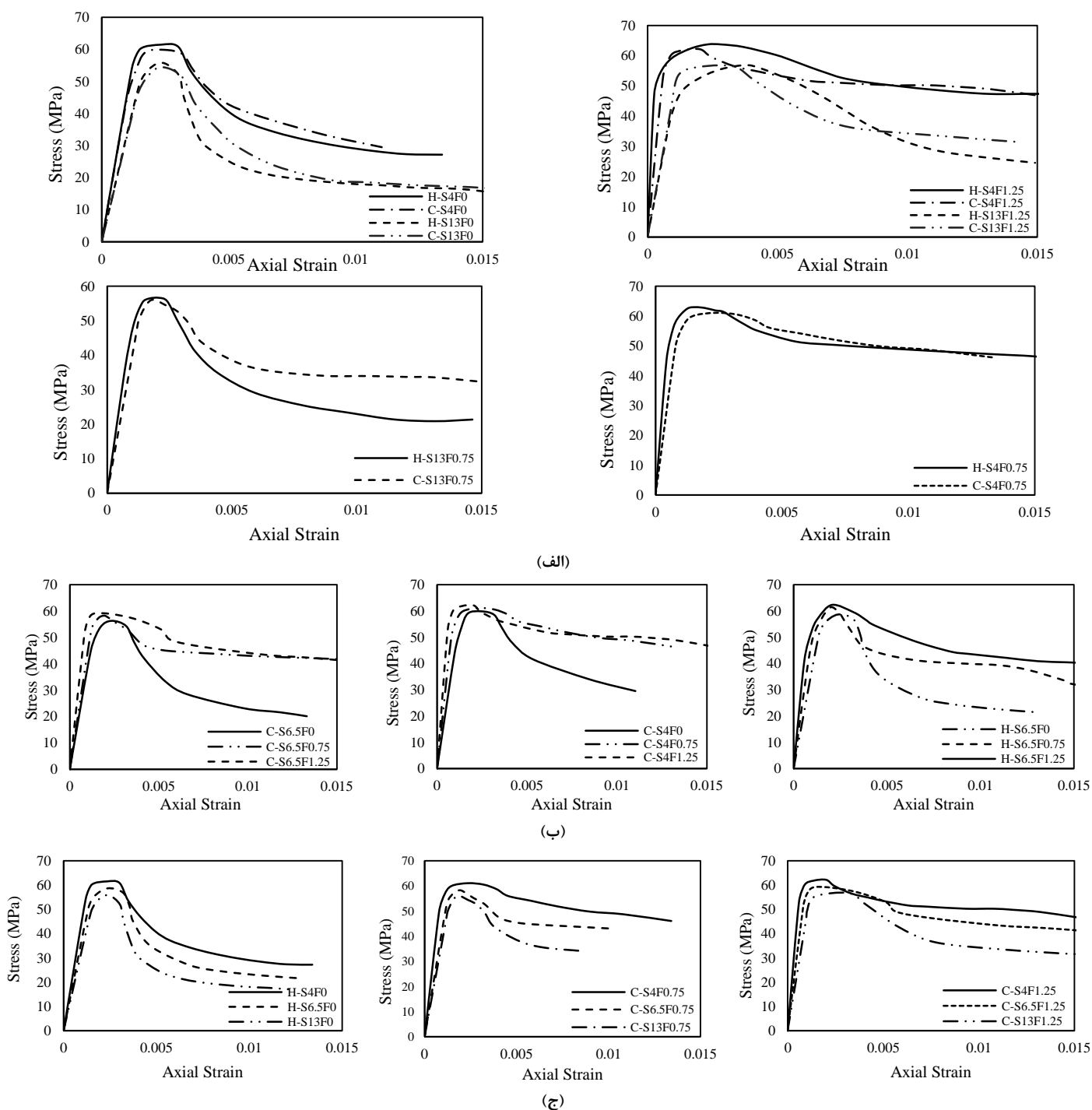
۳- نتایج و بحث

۳-۱- روابط تنش-کرنش

²³Linear variable defereential transformers

²⁴ Post peak

نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های SRFC در راستای محوری پس از آزمایش فشاری و ارزیابی تأثیر شکل نیمرخ مقطع، تأثیر کسر حجمی الیاف فولادی و فاصله خاموت‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است. کرنش‌های به دست آمده، مقادیر حاصل از میانگین‌گیری داده‌های دو عدد LVDT قائم می‌باشد. این شکل منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های ستون SRFC را نشان می‌دهد. از آنجایی که نمونه‌ها، در ابتدای بارگذاری در مرحله الاستیک قرار دارند، از این رو نمودار تنش-کرنش آن‌ها تقریباً خطی است. از منحنی‌هایی که در شکل ۴ ترسیم شده است، می‌توان مشاهده کرد که روند رفتاری کلیه نمونه‌ها به چهار مرحله مجزا عبارتند از: شاخه الاستیک، الاستو-پلاستیک، نزولی و ناحیه نرم شوندگی تقسیم می‌شود.



شکل ۴: تأثیر الف) (شکل مقطع فولادی، ب) الیاف فولادی، ج) فاصله خاموت بر منحنی بار - تغییر شکل جانبی ستون‌های مرکب فولادی محاط شده در بتن.

از شکل ۴-الف می‌توان دریافت رفتار ستون‌ها در حالت معمولی (بدون حضور الیاف) در دو مقطع H شکل و C شکل مشابه یکدیگر می‌باشند به طوری که بعد از رسیدن به نقطه اوج در نمودار تنش-کرنش، ستون‌ها به سرعت ظرفیت محوری خود را از دست داده و با شیب زیاد به سمت ناحیه شکست کامل نمونه حرکت می‌کند. اما این روند در ستون‌های الیافی متفاوت است به طوری که کاهش ظرفیت محوری در ستون‌های الیافی با شیب بسیار کمتری همراه است. همچنین کاهش ظرفیت محوری در ستون‌هایی با مقطع H شکل حاوی ۱٫۲۵ درصد الیاف کمتر از ستون‌هایی با مقطع C شکل می‌باشد که دلیل این امر نیز می‌تواند محصورشدگی بیشتر، در مقاطع H شکل باشد. همچنین همان‌طور که از نمودارهای شکل ۴-الف مشخص است، شیب در نمودارهای H شکل بیشتر از C شکل می‌باشد که نشانگر سختی بیشتر این نوع ستون‌ها است.

همان‌طور که از نمودارهای شکل ۴-ب مشخص است، کاربرد اصلی افزودن الیاف به مخلوط بتن برای ایجاد رفتار شکل‌پذیرتر در ستون‌ها، بعد از نقطه اوج می‌باشد. با افزودن الیاف فولادی، شکل‌پذیری ستون‌ها به طرز قابل توجهی افزایش می‌یابد. بهبود رفتار ستون‌های SRFC در نقطه اوج و پس از اوج، ناشی از عمل پل زدن الیاف فولادی بین ترک‌ها و در نتیجه بهبود عملکرد مقطع بتنی است، همان‌طور که در منحنی‌های تنش-کرنش بتن در شکل ۴-ب مشاهده می‌شود. این تغییر رفتار ترد بودن بتن در اثر افزودن الیاف فولادی، استفاده از الیاف را در آن‌ها بسیار ضروری می‌سازد.

همچنین از شکل ۴-ج می‌توان مشاهده کرد که فاصله خاموت‌ها تأثیر مستقیمی بر ظرفیت محوری نمونه‌های SRFC دارد به طوری که با افزایش فاصله خاموت علاوه بر کاهش مقاومت فشاری ستون، شکل‌پذیری پس از اوج ستون نیز کاهش می‌یابد و این کاهش در نسبت خاموت ۰/۳ تا ۰/۹ تا ۱۱ درصد برای ستون‌های H شکل و ۹ درصد برای ستون‌های C شکل می‌رسد. دلیل این امر این است که خاموت‌ها با ایجاد تنش حاصل از محصورشدگی بر روی بتن، موجب بهبود عملکرد ستون تحت بار محوری می‌شود در نتیجه محصورشدگی حاصل سبب می‌شود بتن رفتار شکل‌پذیرتری از خود نشان دهد.

۲-۳ - مقاومت فشاری

مقاومت فشاری مقطع مرکب کلیه نمونه‌های SRFC و 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، ۰/۰۷۵ و ۱/۲۵)، در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد به‌طور کلی در این مطالعه در شرایط یکسان (ستون‌هایی دارای نسبت الیاف و نسبت فاصله‌ی خاموت برابر)، ستون‌هایی که مقطع فولادی آن‌ها H شکل می‌باشد، دارای ظرفیت محوری بیشتری نسبت به ستون‌هایی با مقطع C شکل می‌باشد که علت این امر محصورشدگی و مساحت بیشتر مقطع فولادی در نمونه‌های H شکل نسبت به C شکل می‌باشد. 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 می‌باشد.

در نمونه‌هایی با مقطع C شکل از دسته نمونه‌های C-S4، با افزایش کسر حجمی الیاف از ۰/۰ به ۰/۰۷۵ و ۱/۲۵، مقاومت فشاری مقطع مرکب به میزان به ترتیب ۰/۲٪ و ۰/۴٪ افزایش می‌یابد و این افزایش در سری نمونه‌های C-S6.5 برابر ۰/۳٪ و ۰/۵٪ و C-S13 برابر ۰/۳٪ و ۰/۴٪ می‌باشد. همچنین در نمونه‌هایی با مقطع H شکل از دسته نمونه‌های H-S4، با افزایش کسر حجمی الیاف از ۰/۰ به ۰/۰۷۵ و ۱/۲۵، مقاومت فشاری مقطع مرکب به میزان به ترتیب ۰/۲٪ و ۰/۴٪ افزایش می‌یابد و این افزایش در سری نمونه‌های H-S6.5 برابر ۰/۵٪ و ۰/۶٪ و H-S13 برابر ۰/۲٪ و ۰/۳٪ می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان دریافت که افزودن الیاف فولادی فارغ از بهبود رفتار فشاری و کششی بتن، اثر قابل‌ملاحظه‌ای روی ظرفیت محوری نمونه‌های SRFC ندارد اما می‌تواند تا سطح ۶ درصد آن را بالا ببرد.

فاصله‌ی بین خاموت‌ها پارامتر تأثیرگذار بر مقاومت فشاری و رفتار ستون‌ها می‌باشد. همان‌طور که پیشتر گفته شد، سه مقدار نسبت خاموت برابر با ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۹ به منظور تعیین تأثیر این پارامتر بر رفتار کلی ستون در نظر گرفته شد. افزایش نسبت خاموت‌ها مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. در افزایش نسبت خاموت، میزان کاهش ظرفیت محوری ستون‌ها در ستون‌های H شکل و C شکل تفاوت ناچیزی با هم دارند که برای مثال 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، مقاومت فشاری مقطع مرکب به میزان به ترتیب ۶٪ و ۹٪ کاهش می‌یابد این کاهش در سری نمونه‌های C-F0.75 و C-F1.25 برابر ۵٪، ۹٪ می‌باشد.

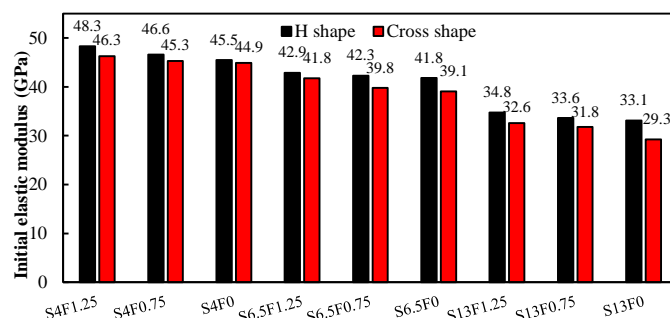
۳-۳- مدول الاستیسیته اولیه

با استفاده از منحنی‌های تنش-کرنش محوری نمونه‌های SRFC در شکل ۴ می‌توان انواع مدول الاستیسیته تعریف شده در این مطالعه را بدست آورد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. نتایج تمام مدول‌های الاستیسیته در جدول ۳ جمع‌آوری شده است.

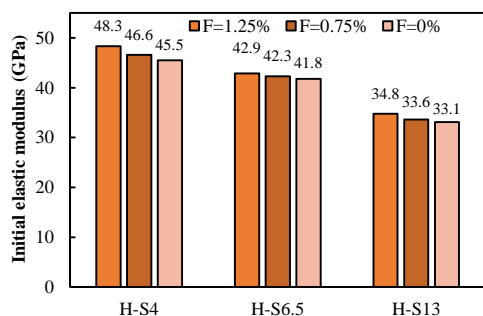
جدول ۳: مدول الاستیسیته چندگانه ستون‌های SRFC

شماره نمونه	نام نمونه	مدول الاستیسیته اولیه (GPa)	مدول الاستیسیته سکانتی (GPa)	مدول الاستیسیته نقطه تسلیم (GPa)	مدول الاستیسیته نقطه اوج (GPa)
۱	C-S4F0	۴۴٫۹	۴۲٫۹	۳۶٫۲	۲۴٫۴
۲	C-S4F0.75	۴۵٫۳	۴۳٫۹	۳۸٫۶	۲۶٫۰
۳	C-S4F1.25	۴۶٫۳	۴۵٫۲	۳۹٫۲	۲۳٫۳
۴	C-S6.5F0	۳۹٫۱	۳۶٫۷	۳۱٫۸	۲۲٫۱
۵	C-S6.5F0.75	۳۹٫۸	۳۷٫۰	۳۲٫۲	۲۴٫۴
۶	C-S6.5F1.25	۴۱٫۸	۳۷٫۲	۳۳٫۸	۲۲٫۰
۷	C-S13F0	۲۹٫۳	۲۸٫۳	۲۳٫۹	۱۸٫۷
۸	C-S13F0.75	۳۱٫۸	۲۹٫۷	۲۴٫۷	۲۱٫۱
۹	C-S13F1.25	۳۲٫۶	۳۰٫۷	۲۵٫۱	۱۷٫۷
۱۰	H-S4F0	۴۵٫۵	۴۳٫۹	۳۸٫۲	۲۶٫۴
۱۱	H-S4F0.75	۴۶٫۶	۴۵٫۳	۳۹٫۴	۳۰٫۰
۱۲	H-S4F1.25	۴۸٫۳	۴۵٫۵	۴۰٫۱	۲۴٫۶
۱۳	H-S6.5F0	۴۱٫۸	۴۰٫۰	۳۳٫۱	۲۳٫۸
۱۴	H-S6.5F0.75	۴۲٫۳	۴۰٫۳	۳۳٫۹	۲۵٫۱
۱۵	H-S6.5F1.25	۴۲٫۹	۴۰٫۹	۳۴٫۷	۲۲٫۳
۱۶	H-S13F0	۳۳٫۱	۳۰٫۱	۲۴٫۴	۱۹٫۰
۱۷	H-S13F0.75	۳۳٫۶	۳۰٫۹	۲۵٫۳	۱۹٫۵
۱۸	H-S13F1.25	۳۴٫۸	۳۱٫۲	۲۷٫۱	۱۵٫۸

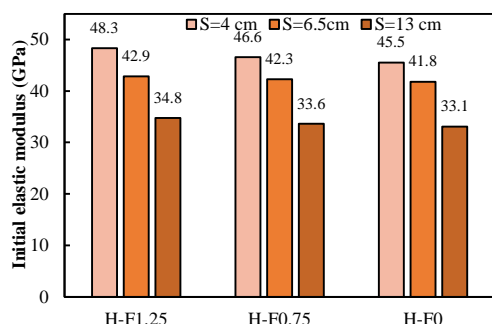
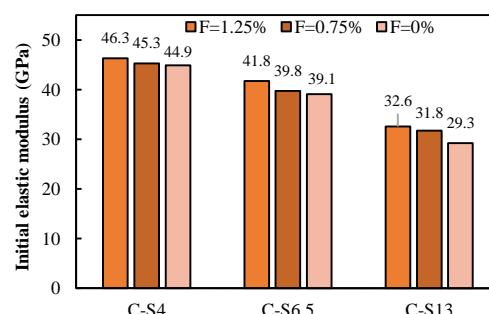
مدول الاستیسیته اولیه (E_i) ستون‌های SRFC با استفاده از شیب اولیه منحنی تنش-کرنش محوری بدست می‌آید. در اینجا کرنش از نسبت تغییر شکل کل ستون بدست آمده از LVDT‌های طولی بر ارتفاع کل ستون محاسبه می‌شود. نتایج آزمایشگاهی مدول الاستیسیته اولیه (E_i) برای کلیه نمونه‌های SRFC در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، تاثیر پارامترهای مختلف شامل شکل نیمرخ داخلی آن‌ها، کسر حجمی الیاف فولادی، و خاموت‌های مختلف، روی مقدار مدول الاستیسیته اولیه در شکل ۵ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۵-الف با تغییر شکل نیمرخ داخلی آن‌ها از ستون با مقطع H شکل به ستون با مقطع C شکل، مدول الاستیسیته نمونه‌های SRFC، کاهش یافت. زیرا کاهش نسبت سطح مقطع فولاد به سطح بتن منجر می‌شود تا رفتار مقطع مرکب^{۲۵} از رفتار فولاد دور شود و با توجه به بالا بودن مدول الاستیسیته فولاد، سختی مقطع مرکب کاهش یابد. در این خصوص بیشترین مقدار کاهش مدول الاستیسیته اولیه ناشی از تغییر شکل نیمرخ داخلی آن‌ها از ستون با مقطع H شکل به ستون با مقطع C شکل، مربوط به نمونه S13F0 با ۱۱ درصد کاهش و کم‌ترین مقدار مربوط به نمونه S4F0 با ۴ درصد کاهش، بوده است.



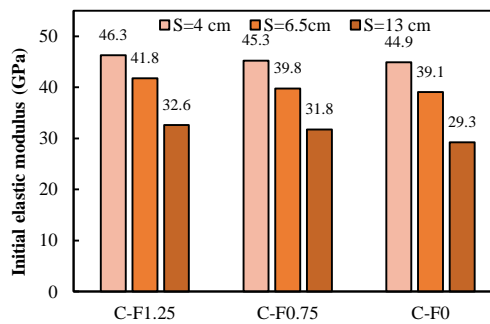
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۵: تاثیر الف) شکل مقطع فولادی، ب) الیاف فولادی، ج) فاصله خاموت بر مدول الاستیسیته اولیه ستون های مرکب فولادی محاط شده در بتن.

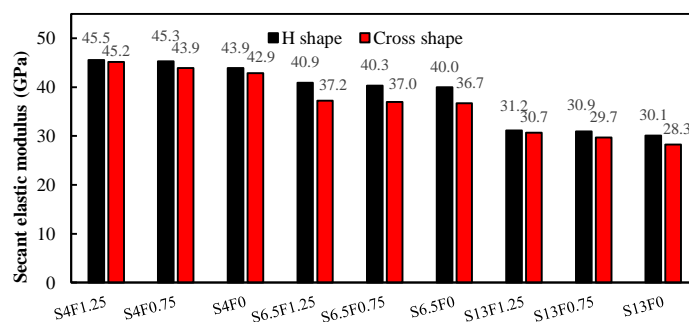
با توجه به شکل ۵-ب می توان دریافت که تاثیر الیاف فولادی بر روی مدول الاستیسیته اولیه نمونه های SRFC چندان قابل توجه نمی باشد. برای سری نمونه های H شکل این افزایش از ۳ تا ۵ درصد در نمونه ها مشاهده می شود و در نمونه های C شکل این مقدار بین ۳ تا ۵ درصد متغیر است. H-S4 و C-S13، دارای بیشترین افزایش مدول الاستیسیته اولیه به ترتیب برای مقاطع H شکل و C شکل است. علت تاثیر اندک حضور الیاف در بتن روی مدول الاستیسیته اولیه مقاطع مرکب را شاید بتوان در فعال نشدن مکانیزم پل زدن در محدوده الاستیک در شروع بارگذاری دانست. الیاف، به علت توانایی بالا در مهار گسترش ترک های ایجاد شده و حفظ انسجام اجزای بتن، با افزایش کسر حجمی الیاف، تا حداکثر ۶ درصد مدول الاستیسیته اولیه را بهبود می بخشد.

با توجه به شکل ۵-ج می توان دریافت که تغییرات فاصله خاموت بر روی مدول الاستیسیته اولیه نمونه های SRFC تاثیر قابل توجهی را به همراه دارد. به طوری که با افزایش فاصله خاموت مدول الاستیسیته اولیه ستون به طرز قابل توجهی کاهش می یابد. برای سری نمونه های H شکل این کاهش تا ۲۸ درصد مشاهده می شود و در نمونه های C شکل این مقدار تا ۳۴ درصد می رسد. H-F0 و C-F1.25، دارای بیشترین کاهش مدول الاستیسیته اولیه به ترتیب برای مقاطع H شکل و C شکل است. علت افت شدید مدول الاستیسیته با افزایش فاصله خاموت را می توان از دست رفتن محصورشدگی حاصل از کاهش تعداد میلگردهای عرضی (خاموت ها) دانست. این کاهش موجب

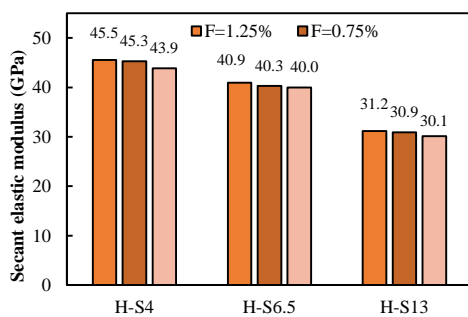
کاهش سختی نمونه‌ها شده با توجه به کاهش شدید ظرفیت باربری ستون‌ها می‌باشد. خاموت‌ها به علت توانایی بالا در حفظ محصورشدگی در حین بارگذاری و کاهش ترک‌های ایجاد شده و حفظ انسجام اجزای بتن، در حفظ مدول الاستیسیته ستون‌ها بسیار دارای اهمیت می‌باشند.

۴-۳- مدول الاستیسیته سکانتی

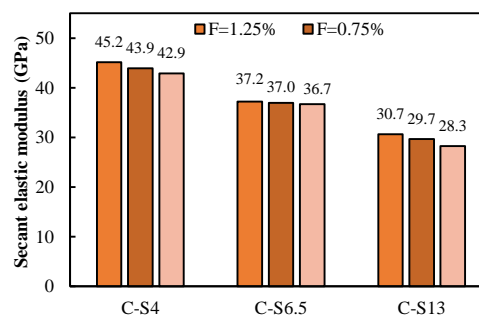
مدول الاستیسیته سکانتی در ۰٫۴ تنش ماکزیمم (E_{sec}) به عنوان یک مدول الاستیسیته متداول شناخته می‌شود [۲۹، ۳۰] و از شیب سکانتی منحنی تنش-کرنش محوری در نقطه ۰٫۴ تنش ماکزیمم بدست می‌آید [۳۱]. در اینجا نیز از کرنش حاصل از LVDTها جهت تعیین منحنی تنش-کرنش و در نتیجه مدول الاستیسیته سکانتی استفاده شده است. نتایج آزمایشگاهی مدول الاستیسیته سکانتی در ۰٫۴ تنش ماکزیمم (E_{sec}) برای کلیه نمونه‌های SRFC در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، تاثیر پارامترهای مختلف شامل شکل نیمرخ داخلی آن‌ها، کسر حجمی الیاف فولادی و خاموت‌های مختلف، روی مقدار مدول الاستیسیته سکانتی در شکل ۶ نمایش داده شده است.



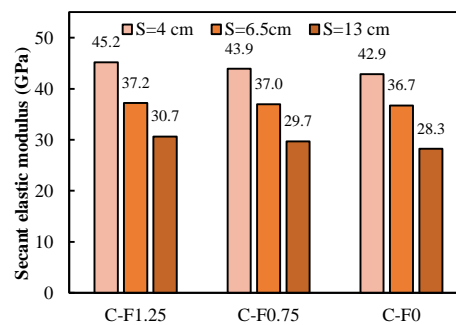
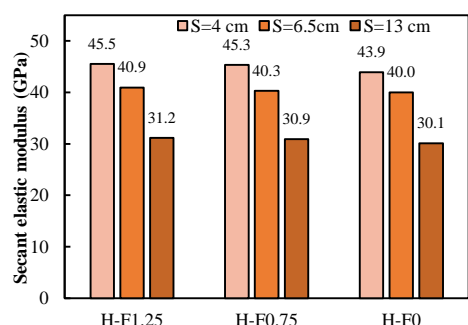
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۶- تاثیر (الف) شکل مقطع فولادی، (ب) الیاف فولادی، (ج) فاصله خاموت بر مدول الاستیسیته سکانتی ستون‌های مرکب فولادی محاط شده در بتن

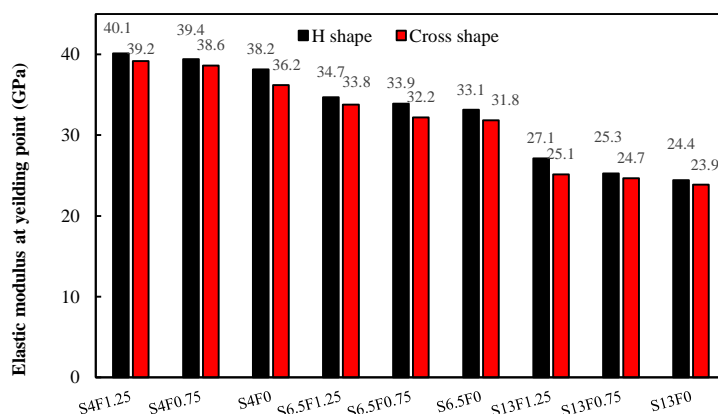
با توجه به شکل ۶-الف با تغییر شکل نیمرخ داخلی آن‌ها از ستون با مقطع H شکل به ستون با مقطع C شکل، مدول الاستیسیته نمونه‌های SRFC، کاهش یافت. در اینجا نیز کاهش نسبت سطح مقطع فولاد به سطح بتن منجر می‌شود تا رفتار مقطع مرکب از رفتار فولاد دور شود و با توجه به بالا بودن مدول الاستیسیته فولاد، سختی مقطع مرکب کاهش می‌یابد. در این خصوص بیشترین مقدار کاهش مدول الاستیسیته سکانتی ناشی از تغییر شکل نیمرخ داخلی آن‌ها از ستون با مقطع H شکل به ستون با مقطع C شکل، مربوط به نمونه S6.5F0 با ۸ درصد افزایش و کمترین مقدار مربوط به نمونه S4F0 با ۳ درصد کاهش، بوده است.

با توجه به شکل ۶-ب می‌توان دریافت که تاثیر الیاف فولادی بر روی مدول الاستیسیته سکانتی نمونه‌های SRFC از روند مشخصی تبعیت نمی‌کند به طوری که برای سری نمونه‌های H شکل این افزایش از ۲ تا ۴ درصد در نمونه‌ها مشاهده می‌شود و در نمونه‌های C شکل این مقدار بین ۱ تا ۴ درصد متغیر است. H-S4 و C-S13، دارای بیشترین افزایش مدول الاستیسیته سکانتی به ترتیب برای مقاطع H شکل و C شکل است.

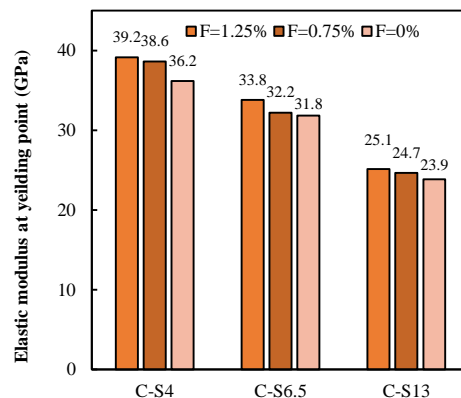
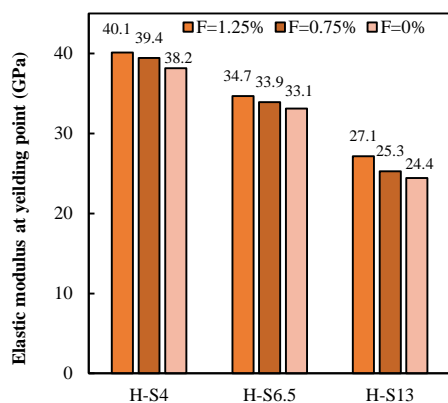
با توجه به شکل ۶-ج می‌توان دریافت که تغییرات فاصله خاموت بر روی مدول الاستیسیته سکانتی نمونه‌های SRFC تاثیر قابل توجهی را به همراه دارد. به طوری که با افزایش فاصله خاموت مدول الاستیسیته سکانتی ستون به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابد. برای سری نمونه‌های H شکل این کاهش تا ۳۲ درصد مشاهده می‌شود و در نمونه‌های C شکل این مقدار تا ۳۴ درصد می‌رسد. H-F1.25 و C-F1.25، دارای بیشترین کاهش مدول الاستیسیته سکانتی به ترتیب برای مقاطع H شکل و C شکل است.

۵-۳- مدول الاستیسیته نقطه تسلیم

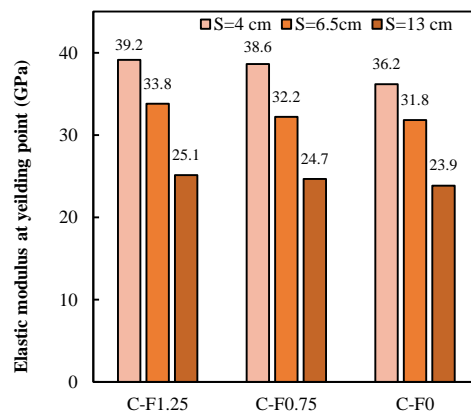
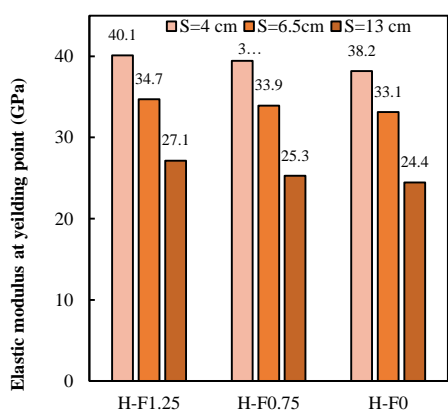
مدول الاستیسیته نقطه تسلیم فولاد ($E_{sec,y}$) مدول الاستیسیته سکانتی تسلیم مقطع مرکب ($E_{sec,y}$) مدول الاستیسیته در نقطه تسلیم مقطع فولادی است که از نسبت مقاومت فشاری تسلیم به کرنش محوری نظیر آن بدست می‌آید. در واقع این مدول الاستیسیته، شیب سکانتی منحنی تنش-کرنش است که مبدا مختصات را به نقطه تسلیم مقطع فولادی متصل می‌کند. در اینجا نیز از کرنش حاصل از LVDT جهت تعیین مدول الاستیسیته سکانتی تسلیم استفاده شده است. نتایج آزمایشگاهی مدول الاستیسیته نقطه تسلیم فولاد ($E_{sec,y}$) برای کلیه نمونه‌های SRFC در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، تاثیر پارامترهای مختلف شامل شکل نیمرخ داخلی آن‌ها، کسر حجمی الیاف فولادی و خاموت‌های مختلف، روی مقدار مدول الاستیسیته در نقطه تسلیم فولاد در شکل ۷ نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷- تاثیر (الف) شکل مقطع فولادی، (ب) الیاف فولادی، (ج) فاصله خاموت بر مدول الاستیسیته نقطه تسلیم ستون‌های مرکب فولادی محاط شده در بتن

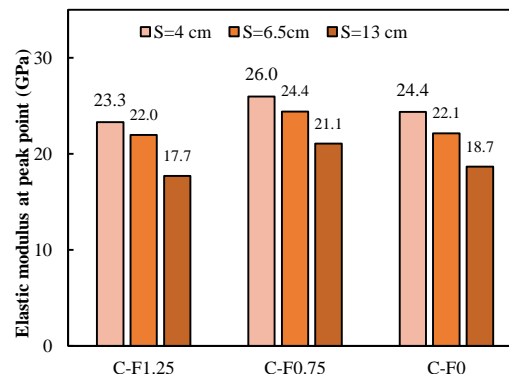
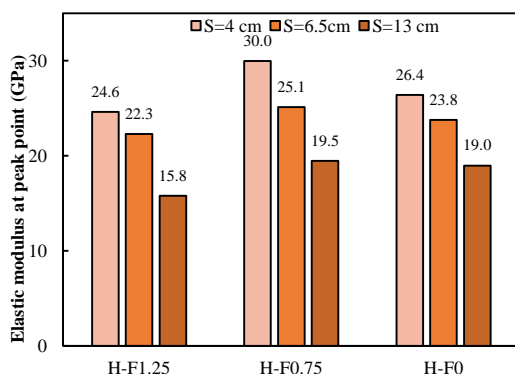
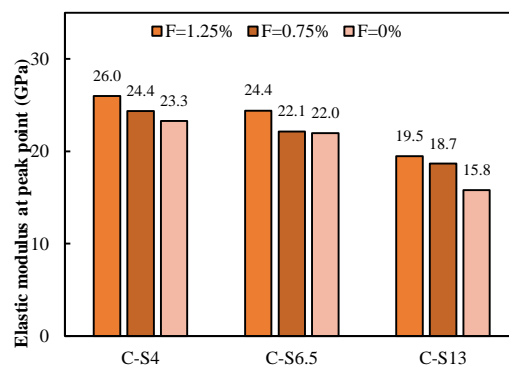
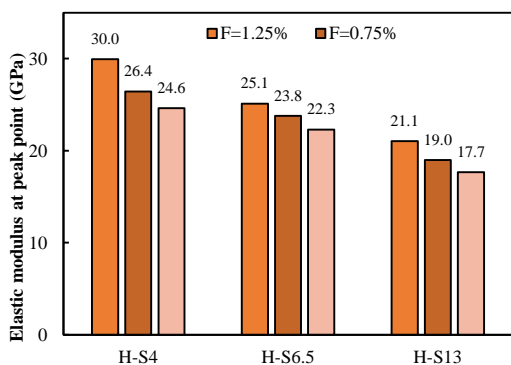
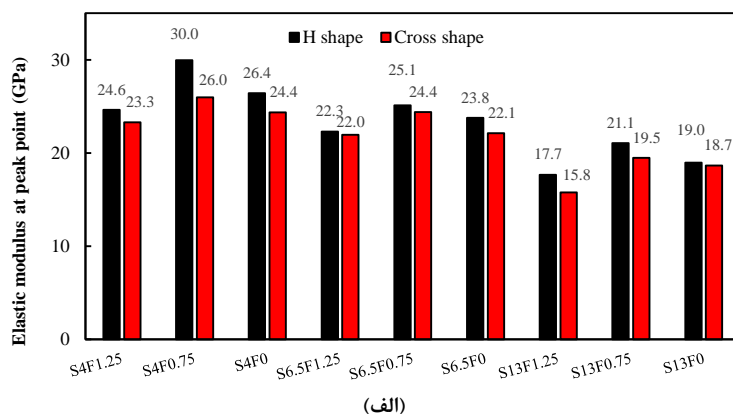
با توجه به شکل ۷-الف با تغییر شکل نیمرخ داخلی آن‌ها از ستون با مقطع H شکل به ستون با مقطع C شکل، مدول الاستیسیته نمونه‌های SRFC، کاهش یافت. بیشترین مقدار کاهش مدول الاستیسیته نقطه تسلیم فولاد ناشی از تغییر شکل نیمرخ داخلی آن‌ها از ستون با مقطع H شکل به ستون با مقطع C شکل، مربوط به نمونه S13F1.25 با ۷ درصد افزایش و کمترین مقدار مربوط به نمونه‌ها با نام S13F0، S4F1.25، S13F0.75 و S4F0.75 با ۳ درصد کاهش بوده است.

با توجه به شکل ۷-ب می‌توان دریافت که تاثیر الیاف فولادی بر روی مدول الاستیسیته نقطه تسلیم فولاد نمونه‌های SRFC دارای اثر قابل توجهی می‌باشد. برای سری نمونه‌های H شکل این افزایش از ۹ تا ۱۷ درصد در نمونه‌ها مشاهده می‌شود و در نمونه‌های C شکل این مقدار بین ۸ تا ۱۳ درصد متغیر است. H-S13 و C-S4، دارای بیشترین افزایش مدول الاستیسیته نقطه تسلیم فولاد به ترتیب برای مقاطع H شکل و C شکل است. دلایل این افزایش ناشی از عمل پل زدن الیاف فولادی بین ترک‌ها و در نتیجه بهبود عملکرد مقطع بتنی می‌باشد.

با توجه به شکل ۷-ج می‌توان دریافت که تاثیر فاصله خاموت بر روی مدول الاستیسیته نقطه تسلیم فولاد نمونه‌های SRFC تاثیر قابل توجهی را به همراه دارد. به طوری که با افزایش فاصله خاموت مدول الاستیسیته نقطه تسلیم فولاد ستون به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابد. برای سری نمونه‌های H و C شکل این مقدار تا ۳۶ درصد می‌رسد. H-F1.25 و C-F1.25، دارای بیشترین کاهش مدول الاستیسیته در نقطه تسلیم فولاد به ترتیب برای مقاطع H شکل و C شکل است.

۳-۶- مدول الاستیسیته نقطه اوج

مدول الاستیسیته نقطه اوج ($E_{sec,p}$) به صورت منحنی تنش-کرنش است که از نسبت مقاومت فشاری نقطه اوج به کرنش نظیر آن بدست می‌آید. در اینجا نیز از کرنش حاصل از LVDTها جهت تعیین مدول الاستیسیته نقطه اوج استفاده شده است. نتایج آزمایشگاهی مدول الاستیسیته نقطه اوج ($E_{sec,p}$) برای کلیه نمونه‌های SRFC در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، تاثیر پارامترهای مختلف شامل شکل نیمرخ داخلی آن‌ها، کسر حجمی الیاف فولادی و خاموت‌های مختلف، روی مقدار مدول الاستیسیته نقطه اوج در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸- تاثیر (الف) شکل مقطع فولادی، (ب) الیاف فولادی، (ج) فاصله خاموت بر مدول الاستیسیته نقطه اوج ستون‌های مرکب فولادی محاط شده در بتن

با توجه به شکل ۸-الف با تغییر شکل نیمرخ داخلی آن‌ها از ستون با مقطع H شکل به ستون با مقطع C شکل، مدول الاستیسیته نمونه‌های SRFC، کاهش یافت. بیشترین مقدار کاهش مدول الاستیسیته نقطه اوج ناشی از تغییر شکل نیمرخ داخلی آن‌ها از ستون با مقطع H شکل به ستون با مقطع C شکل، مربوط به نمونه S4F0.75 با ۱۳ درصد افزایش و کمترین مقدار مربوط به نمونه S6.5F1.25 با ۱ درصد کاهش، بوده است. از این میزان اختلاف، می‌توان نتیجه گرفت که مدول الاستیسیته ستون‌ها در نقطه اوج تقریباً فارغ از شکل مقطع فولادی آن‌ها است.

با توجه به شکل ۸-ب می‌توان دریافت که تاثیر الیاف فولادی بر روی مدول الاستیسیته نقطه اوج ناشی نمونه‌های SRFC نیز قابل توجه می‌باشد. برای سری نمونه‌های H شکل این افزایش از ۵ تا ۱۱ درصد در نمونه‌ها مشاهده می‌شود و در نمونه‌های C شکل این مقدار تا ۱۰ درصد متغیر است. H-S4 و C-S13، دارای بیشترین افزایش مدول الاستیسیته نقطه اوج ناشی به ترتیب برای مقاطع H شکل و C شکل است. دلایل این افزایش مشابه آنچه پیش از این برای مدول الاستیسیته نقطه تسلیم فولاد ذکر شده است، می‌باشد.

با توجه به شکل ۸-ج می‌توان دریافت که تاثیر فاصله خاموت بر روی مدول الاستیسیته نقطه اوج ناشی نمونه‌های SRFC تاثیر قابل توجهی را به همراه دارد. به طوری که با افزایش فاصله خاموت مدول الاستیسیته نقطه اوج ناشی ستون به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابد. برای سری نمونه‌های H شکل این کاهش تا ۳۰ درصد مشاهده می‌شود و در نمونه‌های C شکل این مقدار تا ۳۲ درصد می‌رسد. H-F1.25 و C-F1.25، دارای بیشترین کاهش مدول الاستیسیته نقطه اوج به ترتیب برای مقاطع H شکل و C شکل است.

۴- نتیجه گیری

با توجه به وجود اطلاعات اندک در خصوص سختی محوری ستون‌های SRFC در ادبیات فنی، در این پژوهش، مدول الاستیسیته ستون‌های SRFC حاوی الیاف فولادی به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. موارد زیر را می‌توان از مقاله ارائه شده نتیجه گرفت.

- منحنی‌های تنش-کرنش محوری ستون‌های 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 نرم‌شوندگی بودند.
- مقاومت فشاری ستون‌های فولادی محاط شده در بتن تأثیرپذیر از شکل فولاد داخل آن می‌باشد. بدین صورت که مقاومت فشاری ستون‌های با مقطع H شکل، بیشتر از ستون‌هایی با مقطع C شکل، می‌باشد که علت آن محصورشدگی بیشتر در این نوع مقاطع می‌باشد. همچنین مقاومت فشاری ستون‌ها با افزایش نسبت خاموت از ۰/۳ به ۰/۹ (افزایش فاصله خاموت از ۴۰ میلی‌متر به ۱۳۰ میلی‌متر) کاهش می‌یابد به طوری که این کاهش تا ۱۲ درصد برای ستون‌های H شکل و ۹ درصد برای ستون‌های C شکل می‌رسد.
- مدول الاستیسیته چهارگانه تمامی نمونه‌های SRFC با مقطع H شکل بیشتر از ستون‌های با مقطع C شکل است که این اختلاف بین مدول الاستیسیته اولیه، سکانتی و نقطه تسلیم فولاد به طور متوسط بین ۳ تا ۸ درصد می‌باشد اما در مدول الاستیسیته نقطه اوج روند اختلافی ۱ تا ۱۳ درصد مشاهده شد، چرا که این امر می‌تواند به این دلیل باشد که مدول الاستیسیته ستون‌ها در نقطه اوج تقریباً فارغ از شکل مقطع فولادی آن‌هاست.
- تاثیر الیاف فولادی بر روی مدول‌های الاستیسیته مختلف متفاوت است. به این صورت که این تاثیر در مدول الاستیسیته اولیه به علت فعال نشدن مکانیزم پل زدن الیاف در محدوده الاستیک در شروع بارگذاری اثر چندانی ندارد و بررسی‌ها نشان داد مدول الاستیسیته سکانتی با افزایش درصد الیاف در کلیه نمونه‌ها (نمونه‌ها با مقطع H شکل و C شکل) از روند افزایشی خاصی تبعیت

نمی‌کند. تاثیر ییاف فولادی در مدول الاستیسیته در نقطه تسلیم فولاد و نقطه اوج بسیار قابل توجه است چرا که در نقاط مذکور این افزایش، ناشی از عمل پل زدن ییاف فولادی بین ترک‌ها و در نتیجه بهبود عملکرد مقطع بتنی می‌باشد.

- افزایش فاصله خاموت‌ها به طور کلی موجب کاهش قابل توجه مدول الاستیسیته چهارگانه مورد بررسی در این مطالعه شد. کاهش مدول الاستیسیته در تمامی نقاط به دلیل کاهش قابل توجه محصورشدگی حاصل از افزایش فاصله خاموت در حدود ۳۵ درصد می‌باشد.

سپاسگزاری

کلیه آزمایش‌های این تحقیق با همکاری آزمایشگاه بتن دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه مازندران انجام شده است. نویسندگان این مقاله بدین وسیله از همکاری عوامل یاد شده تقدیر و تشکر می‌نمایند.

مراجع

- [1] Awati, M., and Khadiranaikar, R. (2012) Behavior of concentrically loaded high performance concrete tied columns, *Engineering structures* 37, 76-87
- [2] Tavakoli, D., Fakharian, P., and de Brito, J. (2021) Mechanical properties of roller-compacted concrete pavement containing recycled brick aggregates and silica fume, *Road Materials and Pavement Design*, 1-22. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1924236>
- [3] Kakavand, M. R. A., Neuner, M., Schreter, M., and Hofstetter, G. (2018) A 3D continuum FE-model for predicting the nonlinear response and failure modes of RC frames in pushover analyses, *Bulletin of Earthquake Engineering* 16, 4893-4917. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0388-7>
- [4] Bengar, H. A., and Shahmansouri, A. A. (2021) Post-fire behavior of unconfined and steel tube confined rubberized concrete under axial compression, *Structures* 32, 731-745. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.041>
- [5] BEng, S. H., and Park, S. (1994) EN 1994-Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, Report of e Steel Construction Institute, Berkshire, UK.
- [6] 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, 106310. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106310>
- [7] Sheikh, S. A., and Uzumeri, S. (1982) Analytical model for concrete confinement in tied columns, *Journal of the structural division* 108, 2703-2722. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0006100>
- [8] Mander, J. B., Priestley, M. J., and Park, R. (1988) Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of structural engineering* 114, 1804-1826
- [9] 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, 424-433. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.04.021>
- [10] Kong, J., Zou, Y., Li, C., and Wan, Z. W. (2013) Nonlinear numerical analysis of SRC Frame end Joint, In *Advanced Materials Research*, pp 1151-1155, Trans Tech Publ.
- [11] Hasan-Nattaj, F., and Nematzadeh, M. (2017) The effect of forta-ferro and steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete with and without silica fume and nano-silica, *Construction and Building Materials* 137, 557-572
- [12] Sharbatdar, M. K., Abbasi, M., and Fakharian, P. (2020) Improving the properties of self-compacted concrete with using combined silica fume and metakaolin, *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 64, 535-544. <https://doi.org/10.3311/PPci.11463>
- [13] Shahmansouri, A. A., Bengar, H. A., and Jafari, A. (2021) Modeling the lateral behavior of concrete rocking walls using multi-objective neural network, *Journal of Concrete Structures and Materials* 5(2), 127-147. <https://doi.org/10.30478/jcsm.2021.272480.1192>
- [14] Kakavand, M. R. A., and Allahvirdizadeh, R. (2019) Enhanced empirical models for predicting the drift capacity of less ductile RC columns with flexural, shear, or axial failure modes, *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 13, 1251-1270
- [15] Zhu, W., Jia, J., Gao, J., and Zhang, F. (2016) Experimental study on steel reinforced high-strength concrete columns under cyclic lateral force and constant axial load, *Engineering Structures* 125, 191-204. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.018>

- [16] Kaiwen, L., and Zhiyang, L. (2014) Non-linear Numerical Simulation on Hysteretic Behavior of SRC Columns, *Applied Mechanics & Materials* 723
- [17] Kakavand, M. R. A., and Taciroglu, E. (2020) An enhanced damage plasticity model for predicting the cyclic behavior of plain concrete under multiaxial loading conditions, *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 14, 1531-1544. <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0675-7>.
- [18] 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, 105765. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105765>.
- [19] Feng, D.-C., Cetiner, B., Azadi Kakavand, M. R., and Taciroglu, E. (2021) Data-Driven Approach to Predict the Plastic Hinge Length of Reinforced Concrete Columns and Its Application, *Journal of Structural Engineering* 147, 04020332. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002852](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002852).
- [20] Azadi Kakavand, M. R., Sezen, H., and Taciroglu, E. (2021) Data-Driven Models for Predicting the Shear Strength of Rectangular and Circular Reinforced Concrete Columns, *Journal of Structural Engineering* 147, 04020301. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002875](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002875).
- [21] Lai, B., Liew, J. R., and Le Hoang, A. (2019) Behavior of high strength concrete encased steel composite stub columns with C130 concrete and S690 steel, *Engineering Structures* 200, 109743. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109743>
- [22] Wang, H., and Wang, L. (2013) Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 38, 1146-1151. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.016>
- [23] Lau, A., and Anson, M. (2006) Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete, *Cement and concrete research* 36, 1698-1707. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.024>
- [24] Nematzadeh, M., Shahmansouri, A. A., and Zabihi, R. (2021) Innovative models for predicting post-fire bond behavior of steel rebar embedded in steel fiber reinforced rubberized concrete using soft computing methods, *Structures*. 31, 1141-1162. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.015>
- [25] ASTM, C. (2012) Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete, ASTM International West Conshohocken, PA.
- [26] ASTM, C. (2012) Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.
- [27] 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, 591-603. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.062>.
- [28] Yu, Q., Tao, Z., and Wu, Y.-X. (2008) Experimental behaviour of high performance concrete-filled steel tubular columns, *Thin-Walled Structures* 46, 362-370. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.10.001>.
- [29] Xiong, M.-X., and Liew, J. R. (2016) Mechanical behaviour of ultra-high strength concrete at elevated temperatures and fire resistance of ultra-high strength concrete filled steel tubes, *Materials & Design* 104, 414-427. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.050>.
- [30] Li, W., Luo, Z., Tao, Z., Duan, W. H., and Shah, S. P. (2017) Mechanical behavior of recycled aggregate concrete-filled steel tube stub columns after exposure to elevated temperatures, *Construction and Building Materials* 146, 571-581
- [31] Huo, J., Huang, G., and Xiao, Y. (2009) Effects of sustained axial load and cooling phase on post-fire behaviour of concrete-filled steel tubular stub columns, *Journal of Constructional Steel Research* 65, 1664-1676