

Experimental study on the behavior of steel tubular columns filled with concrete containing iron filings

Shirin Esmaeili Niari^{1,*}, Saeid yaghoubi², Vahid Akrami³

1- Asistant Professor of structural engineering, Faculty of engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Master graduate of structural engineering, Faculty of engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3- Assistant Professor of structural engineering, Faculty of engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

Iron filings are industrial by-products that have harmful effects on the environment. To handle this issue, iron filings can be used in concrete production as a substitute for part or all of the sand. This study investigates, the compressive performance of concrete-filled steel tubular columns (CFST) with a circular cross section. The concrete used inside the CFST columns contained 0, 10, 20 and 30% iron filings as replacement of sand with two different water to cement ratios. After fabrication and curing for 28 days, CFST columns, were subjected to compressive axial load and the results were obtained as load-displacement curves and load-bearing capacity of the specimens. The parameters studied in this research include diameter to thickness ratio of steel tubes, water to cement ratio (mixing plan) and different percentages of iron filings as replacement of sand. In order to estimate the compressive strength of concrete, standard cube specimens were prepared and their 28-day compressive strength was measured. The results were extracted as compressive strength of concrete cube samples and stress-strain curves. Also, the effect of water to cement ratio (mixing plan) and percentage of iron filings on the compressive strength and efficiency of concrete cube samples, has been studied. The results show that the addition of iron filings up to 20% of the sand weight increases the compressive strength of concrete and CFST columns to an acceptable level. This also increases the initial stiffness of the samples. Increasing the amount of iron filings from 20% to 30% of the sand weight, showed a decrease in compressive strength of the specimens, according to which it can be concluded that the optimal percentage for the amount of iron filings is 20%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 15 November 2021

Revise Date: 25 January 2022

Accept Date: 27 January 2022

Keywords:

Experimental Study
Axial Compressive strength
CFST column
Iron Filings
D/t ratio

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.315129.2641>

*Corresponding author: Shirin Esmaeili Niari
Email address: sh_esmaeili@uma.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی رفتار ستون‌های فولادی پر شده با بتن حاوی براده‌های آهن

شیرین اسماعیلی نیاری^{۱*}، سعید یعقوبی^۲، وحید اکرمی^۳

۱- استادیار مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- استادیار مهندسی عمران-سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

براده آهن از جمله ضایعات صنعتی می باشد که اثرات مضر بر محیط زیست دارد. به منظور کاهش اثرات منفی این ضایعات، می توان از آنها در ساخت بتن حاوی براده آهن به عنوان جایگزین بخشی یا تمام ماسه استفاده نمود. در این پژوهش عملکرد فشاری ستون‌های فولادی پر شده با بتن (CFST) با مقطع دایره‌ای، مورد بررسی قرار گرفته است. بتن مورد استفاده در داخل ستون‌ها، حاوی براده آهن به مقدار ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی ماسه با دو نسبت مختلف آب به سیمان، در نظر گرفته شده است. نمونه‌های ستون CFST پس از ساخت و عمل‌آوری ۲۸ روزه، تحت اثر بار محوری فشاری قرار گرفته و نتایج به صورت منحنی‌های بار-تغییر مکان و ظرفیت باربری نمونه‌ها بدست آمده‌اند. پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق نسبت قطر به ضخامت فولاد محصور کننده، نسبت آب به سیمان (طرح اختلاط) و درصد‌های مختلف براده آهن جایگزین ماسه می‌باشد که تاثیر هر کدام بر مقاومت فشاری نمونه‌های CFST بررسی شده است. به منظور برآورد مقاومت فشاری بتن، نمونه‌های مکعبی بتن نیز تهیه شده و آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه انجام شده است. نتایج به صورت مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتن و منحنی‌های تنش-کرنش بتن، استخراج شده و تاثیر نسبت آب به سیمان (طرح اختلاط) و درصد براده آهن بر مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتن و همچنین کارایی آن، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزودن براده آهن به مقدار ۲۰ درصد وزنی ماسه، مقاومت فشاری بتن و ستون‌های CFST را تا حد قابل قبولی افزایش می‌دهد. این مسئله همچنین افزایش سختی اولیه نمونه‌ها را در پی دارد. افزایش مقدار براده آهن از مقدار ۲۰ درصد به ۳۰ درصد وزنی ماسه، باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود، که بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت درصد بهینه برای مقدار براده آهن، ۲۰ درصد می‌باشد.

کلمات کلیدی:

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.315129.2641	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.315129.2641	۱۴۰۱/۰۸/۳۱	۱۴۰۰/۱۱/۰۷	۱۴۰۰/۱۱/۰۷	۱۴۰۰/۱۱/۰۵	۱۴۰۰/۰۸/۲۴
شیرین اسماعیلی نیاری sh_esmaeili@uma.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

استفاده مجدد از ضایعات صنعتی، از جنبه‌های مختلف نظیر کاهش آلودگی و کمک به حفظ محیط زیست می‌تواند مفید واقع شود [۱]. براده آهن نیز از جمله موادی است که از ضایعات آهن بدست می‌آید و اثرات مضر بر محیط زیست دارد [۲]. این در حالیست که به منظور کاهش اثرات منفی این ضایعات، می‌توان از آنها در ساخت بتن حاوی براده آهن به عنوان جایگزین بخشی از ماسه یا تمام ماسه استفاده نمود [۱-۶]. این مسئله از نظر کاهش تأثیرات منفی استخراج شن و ماسه بر محیط زیست نیز موثر خواهد بود. در همین راستا، بررسی رفتار مقاطع مرکب پر شده با بتن حاوی براده آهن می‌تواند مفید واقع شود. مقاطع مرکب، قابلیت مناسبی برای استفاده در سازه‌های مهندسی از قبیل ساختمان‌های بلند، پل‌ها، سازه‌های دریایی و صنعتی دارند [۷، ۸]. این مقاطع عملکرد سازه‌های بهتری نسبت به مقاطع صرفاً فولادی و بتنی دارند [۹-۱۱]. جداره‌های فولادی پر شده با بتن^۱ (CFST)، از جمله مقاطع مرکب می‌باشند که در بسیاری از سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۲]. با توجه به محصور شدن بتن در داخل جداره فولادی در این مقاطع، از گسیختگی ناگهانی بتن جلوگیری شده و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد [۱۳]. همچنین به سبب وجود بتن، از کمانش جداره فولادی به طرف داخل مقطع جلوگیری به عمل آمده و در نتیجه پایداری و مقاومت آن افزایش می‌یابد [۷، ۱۴].

تأثیر وجود افزودنی‌های مختلف نظیر یون آهن [۱۵]، الیاف فولادی، پلی اتیلن یا شیشه [۱۶]، ضایعات آهن [۱۷]، خرده لاستیک [۱۸] و ... در ساختار بتن توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله این مطالعات می‌توان به بررسی‌های رویدونگ و همکاران^۲ [۱۷] در مورد تأثیر ضایعات آهن بر مشخصات مکانیکی بتن اشاره کرد. طبق نتایج این تحقیق، افزودن ضایعات آهن به بتن باعث افزایش کارایی و مقاومت فشاری آن می‌شود. همچنین خلیلی و همکاران [۱۶] تأثیر الیاف فولادی بر رفتار بتن سبک پلاستیک تحت حرارت را بررسی نمودند که بر این اساس، افزودن الیاف فولادی مقاومت فشاری و کششی بتن پس از حرارت را به بیش از ۴۰٪ افزایش می‌دهد. در کنار این مطالعات، بررسی‌هایی نیز در مورد مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی براده آهن انجام شده است که در آن بخشی از ماسه با براده آهن جایگزین می‌شود [۱-۶، ۱۹-۲۱]. در همین راستا، سینگ و صدیق^۳ [۱۹] نیز، با جایگزین کردن براده آهن با ماسه به این نتیجه رسیدند که با افزایش درصد براده آهن اسلامپ نمونه‌ها کاهش یافته و مقاومت فشاری بهبود می‌یابد. این افزایش مقاومت با افزایش براده آهن تا ۴۰ درصد وزنی ماسه، ادامه می‌یابد. الهاشمی و همکاران^۴ [۲۰]، مطالعه‌ای را در مورد بتن‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد براده آهن انجام دادند تا امکان استفاده از براده آهن به عنوان یکی از مواد تشکیل‌دهنده مخلوط بتنی را ارزیابی کنند. راجسوار^۵ [۲۱]، مطالعه‌ای در مورد بتن‌های حاوی ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درصد وزنی ماسه انجام دادند. در نهایت ملاحظه شد که افزایش درصد براده آهن در بتن باعث افزایش کارایی مخلوط بتنی می‌شود. ساتیپراکاش^۶ و همکاران [۴] نیز، مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی براده آهن، که در آن براده آهن به مقدار ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد وزنی ماسه جایگزین ریزدانه‌ها می‌شود؛ را مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که با جایگزینی کامل ریزدانه‌ها با براده آهن، مقاومت فشاری و کششی بتن افزایش قابل توجهی دارد. همچنین ملاحظه شد که با افزایش براده آهن، سایش بتن کاهش می‌یابد و می‌توان از بتن بدست آمده در روسازی‌ها و کف‌ها استفاده کرد.

رفتار ستون‌های CFST با بتن‌های مختلف داخل جداره فولادی و تحت بارگذاری‌های متفاوت به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است [۷-۱۴]. استفاده از بتن ساخته شده با مواد ضایعاتی، از جمله بتن بازیافتی که در آن پسماندهای بدست آمده از تخریب بتن قدیمی جایگزین سنگدانه‌ها می‌شود [۲۲-۲۸]، استفاده از خرده لاستیک یا ضایعات لاستیک در بتن [۲۹-۳۱]، استفاده از خرده آجر در بتن [۳۲]، در مطالعات پیشین ستون‌های CFST مورد توجه قرار گرفته است. با بررسی پیشینه تحقیقات انجام شده، ملاحظه می‌شود که مطالعات زیادی در مورد رفتار ستون‌های CFST با انواع بتن‌های پرکننده وجود دارد، ولی در مورد رفتار این ستون‌ها با بتن حاوی براده آهن مطالعات جامعی انجام نشده است. تنها تحقیق موجود در این راستا، بررسی‌های آزمایشگاهی مهاوی و داوود^۷ [۱۴] در

¹ Concrete filled steel tube

² Ruidong et al.

³ Singh & Siddique

⁴ Al-Hashimi et al.

⁵ Rajeswari

⁶ Satyaprakash et al.

⁷ Mhawi & Dawood

مورد تاثیر بتن حاوی براده آهن بر ظرفیت محوری ستون‌های CFST با پروفیل قوطی می‌باشد. بتن مورد استفاده در داخل ستون‌ها حاوی براده آهن به مقدار ۰، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد وزنی ماسه بوده است. در این بررسی از سه نوع ستون با طول کوتاه، متوسط و زیاد استفاده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، افزایش درصد براده آهن تا ۱۰٪ وزنی ماسه، ظرفیت محوری ستون مرکب را تا ۲۵٪ افزایش داده است. با توجه به اینکه در این تحقیق تنها ستون با مقطع مربعی مورد بررسی قرار گرفته و همچنین محدوده درصد براده آهن مورد استفاده جامع نمی‌باشد، انجام تحقیقات تکمیلی در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش از بتن حاوی براده آهن در داخل ستون‌های CFST با مقطع دایره استفاده شده است تا چگونگی تاثیر براده آهن بر رفتار فشاری این ستون‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

۲- روش تحقیق

نمونه‌های ستون CFST با مقطع دایره‌ای و با در نظر گرفتن دو مقدار برای نسبت قطر به ضخامت جداره فولادی در مقیاس کوچک ساخته شده و به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفتند. بدین منظور ابتدا جداره فولادی استوانه‌ای که به روش خم کردن ورق و جوشکاری درز تا رسیدن به ابعاد مشخص شده ساخته شده بود، از بازار تهیه شد. سپس با استفاده از بتن ساخته شده با طرح اختلاط مشخص پر شد. بدین منظور با در نظر گرفتن دو مقدار متداول برای نسبت آب به سیمان و همچنین نسبت‌های مختلف براده آهن به صورت جایگزین بخشی از ماسه، طرح اختلاط مناسب بتن طراحی شد. سپس نمونه‌های CFST تحت بارگذاری محوری فشاری قرار گرفته و رفتار آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق به صورت مقدار کارایی، مقاومت فشاری و سختی بتن و همچنین مقاومت فشاری و سختی نمونه‌های CFST ارائه شده است. همچنین انواع خرابی بوجود آمده در نمونه‌های CFST تحت بار محوری فشاری نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه را می‌توان به دو مجموعه دسته‌بندی کرد. دسته اول، نمونه‌های مکعبی بتن برای انجام آزمایش مقاومت فشاری بتن و دسته دوم نمونه‌های CFST که تحت بارگذاری محوری فشاری مورد آزمایش قرار خواهند گرفت. در بخش ۲-۲ و ۳-۲، ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و در بخش ۳ برنامه آزمایشات به تفصیل شرح داده شده است.

۲-۱- نمونه‌های مکعبی بتن

در طرح اختلاط مورد استفاده برای بتن حاوی براده آهن در این تحقیق، مقدار شن در تمامی نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است که مقدار آن، ۱۰۵۰ گرم می‌باشد. وزن ماسه در نمونه شاهد (بدون براده آهن) ۶۵۰ گرم است که در نمونه‌های حاوی براده آهن، مقداری از ماسه کم شده و براده آهن جایگزین ماسه می‌شود. براده آهن به مقدار ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی ماسه، جایگزین ماسه شده است. با توجه به اینکه جایگزین کردن بخشی از ماسه با براده آهن، بر میزان کارایی بتن تهیه شده، تاثیر می‌گذارد، برای بررسی چگونگی تاثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت و کارایی بتن از دو مقدار متداول ۰/۴ و ۰/۵ برای نسبت آب به سیمان استفاده شده است. بدین منظور مقدار سیمان ثابت و ۵۰۰ گرم در نظر گرفته شده و با تغییر مقدار آب در مخلوط بتنی، دو مقدار برای نسبت آب به سیمان بدست آمده است. بنابراین در مجموع ۸ طرح اختلاط برای بتن مطابق جدول ۱ بدست می‌آید. سیمان مورد استفاده در مخلوط بتن، سیمان پرتلند پوزولانی شرکت سیمان آرتا اردبیل و آب مورد استفاده، آب آشامیدنی شهر اردبیل می‌باشد. براده آهن مورد استفاده از شرکت صنایع شیمیایی آروین در تهران تهیه شده است که در شکل ۱-الف نمایش داده شده است.

برای برآورد مقاومت فشاری بتن لازم است نمونه‌های بتن ساخته شده و تحت آزمایش فشاری قرار گیرند. در این تحقیق از نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰ سانتی‌متر (شکل ۱-ب) استفاده شده است. از هر طرح اختلاط ۳ نمونه و در مجموع ۲۴ نمونه‌ی مکعبی از بتن با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی‌متر برای انجام آزمایش فشاری ساخته شدند. نمونه‌های مکعبی، ۲۴ ساعت پس از بتن ریزی از قالب خارج شده و به منظور عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز در داخل حوضچه آب نگهداری شدند. در جدول ۲ نامگذاری نمونه‌های مکعبی نمایش داده شده است. نمونه بدون براده آهن (درصد براده آهن، صفر می‌باشد) به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته می‌شود و مقایسه نمونه‌ها با آن انجام خواهد شد. پس از اختلاط کافی مصالح در مخلوط کن، کارایی مخلوط بتن تازه توسط آزمایش اسلامپ اندازه‌گیری گردید. شکل ۱-ج اندازه‌گیری کارایی بتن را نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۳ مقدار کارایی برای هر کدام از طرح اختلاط‌ها آورده شده است. با توجه به جدول ۳، کارایی با نسبت آب به سیمان و درصد براده آهن مصرف شده رابطه مستقیم دارد. در واقع هرچه نسبت آب به سیمان افزایش یابد کارایی

نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین با استفاده بیشتر از براده آهن جایگزین ماسه، کارایی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در تحقیق انجام شده توسط راجسواری [۲۱] نیز این نتیجه گرفته شده بود که با افزایش مقدار براده آهن کارایی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

جدول ۱: طرح اختلاط مصالح برای ساخت بتن

ردیف	نام نمونه	نسبت آب به سیمان	آب (gr)	درصد براده آهن	تعداد نمونه
۱	10-1	۰/۴	۲۰۰	۰	۳
۲	110-1	۰/۴	۲۰۰	۱۰	۳
۳	120-1	۰/۴	۲۰۰	۲۰	۳
۴	130-1	۰/۴	۲۰۰	۳۰	۳
۵	10-2	۰/۵	۲۵۰	۰	۳
۶	110-2	۰/۵	۲۵۰	۱۰	۳
۷	120-2	۰/۵	۲۵۰	۲۰	۳
۸	130-2	۰/۵	۲۵۰	۳۰	۳

جدول ۲: نام گذاری نمونه‌های مکعبی

I (0, 10, 20, 30) – (1, 2)– (a, b, c)

I (0, 10, 20, 30)	(1, 2)	(a, b, c)
درصد براده آهن	نوع طرح اختلاط	تکرار نمونه‌ها

جدول ۳: کارایی نمونه‌ها

ردیف	نمونه	کارایی cm	نسبت آب به سیمان	درصد براده آهن
۱	10-1	۱/۵	۰/۴	۰
۲	10-2	۲/۵	۰/۵	۰
۳	110-1	۲/۳	۰/۴	۱۰
۴	110-2	۳/۹	۰/۵	۱۰
۵	120-1	۳/۴	۰/۴	۲۰
۶	120-2	۵	۰/۵	۲۰
۷	130-1	۸	۰/۴	۳۰
۸	130-2	۱۲	۰/۵	۳۰



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱: (الف) براده آهن استفاده شده؛ (ب) نمونه‌های مکعبی بتن؛ (ج) اندازه‌گیری کارایی نمونه‌ها

۲-۲- نمونه‌های CFST

نمونه‌های CFST در مقیاس کوچک به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر ساخته شدند. از دو لوله فولادی، یکی به قطر ۷۶ میلی‌متر و ضخامت ۱/۲۵ میلی‌متر (شکل ۲) و دیگری به قطر ۸۸ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر در ساخت نمونه‌ها استفاده شد، که به ترتیب نسبت قطر به ضخامت (D/t) ۶۰/۸ و ۴۴ را نتیجه می‌دهد. برای نگهداری شیرابه بتن در داخل لوله، یک صفحه فولادی به ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی‌متر به قسمت تحتانی لوله‌ها جوش شد. نمونه‌های مذکور با بتن حاوی براده آهن و طرح اختلاط‌های ذکر شده در جدول ۱، پر شدند. از هر نمونه، دو مورد مشابه ساخته شد تا آزمایش فشاری برای هر نمونه دو بار تکرار شود. دو نمونه لوله توخالی نیز تحت آزمایش فشاری قرار گرفتند تا رفتار جداره فولادی توخالی نیز مورد بررسی قرار گیرد. در مجموع ۳۲ نمونه CFST و ۲ نمونه جداره خالی برای آزمایش فشاری ساخته شدند. برای نامگذاری نمونه‌های CFST از الگوی جدول ۴ استفاده شده است. مشخصات نمونه‌های CFST در جدول ۵ آورده شده است.

نمونه‌های CFST مطابق شکل ۳ در محیط آزمایشگاه عمل‌آوری شدند. در ۲۴ ساعت اولیه سطح بالایی با نایلون پوشانده شد تا مانع تبخیر آب بتن و خشک شدن بتن شود (شکل ۳-الف). بعد از گذشت ۲۴ ساعت نایلون برداشته شد. از آنجایی که سطح جانبی و بخش زیرین این نمونه‌ها با جداره فولادی پوشیده شده است، امکان تبخیر آب از این سطوح وجود ندارد. جهت عمل‌آوری بهتر و حفظ رطوبت سطح بالایی نمونه‌ها، از قرار دادن اسفنج مرطوب بر روی سطح بالای نمونه‌ها استفاده شد. در مدت عمل‌آوری هر روز اسفنج‌ها در آب غوطه‌ور می‌شد و پس از جذب مقدار زیادی آب، در قسمت بالایی لوله‌های فولادی پر شده با بتن قرار داده می‌شد تا به حفظ رطوبت بتن کمک کرده و عمل‌آوری کامل انجام پذیرد (شکل ۳-ب).



شکل ۲: نمونه‌های ساخته شده از لوله فولادی ۷۶×۱/۲۵

جدول ۴: نام گذاری نمونه های CFST

(A,B)- I (0, 10, 20, 30) – (1, 2) –(a, b)			
مقطع ۸۸×۲ A:	I (0, 10, 20, 30)	(1, 2)	(a, b, c)
مقطع ۷۶×۱,۲۵ B:	معرف درصد براده آهن	نوع طرح اختلاط	تکرار نمونه ها

جدول ۵: مشخصات نمونه های CFST

نام نمونه CFST	قطر مقطع D (mm)	ضخامت جداره t (mm)	نسبت قطر به ضخامت D/t	براده آهن %
A - I0 - 1	۸۸	۲	۴۴	۰
A - I10 - 1	۸۸	۲	۴۴	۱۰
A - I20 - 1	۸۸	۲	۴۴	۲۰
A - I30 - 1	۸۸	۲	۴۴	۳۰
B - I0 - 1	۷۶	۱/۲۵	۶۰/۸	۰
B - I10 - 1	۷۶	۱/۲۵	۶۰/۸	۱۰
B - I20 - 1	۷۶	۱/۲۵	۶۰/۸	۲۰
B - I30 - 1	۷۶	۱/۲۵	۶۰/۸	۳۰
A - I0 - 2	۸۸	۲	۴۴	۰
A - I10 - 2	۸۸	۲	۴۴	۱۰
A - I20 - 2	۸۸	۲	۴۴	۲۰
A - I30 - 2	۸۸	۲	۴۴	۳۰
B - I0 - 2	۷۶	۱/۲۵	۶۰/۸	۰
B - I10 - 2	۷۶	۱/۲۵	۶۰/۸	۱۰
B - I20 - 2	۷۶	۱/۲۵	۶۰/۸	۲۰
B - I30 - 2	۷۶	۱/۲۵	۶۰/۸	۳۰
A	۸۸	۲	۴۴	-
B	۷۶	۱/۲۵	۶۰/۸	-



(ب)



(الف)

شکل ۳: عمل آوری نمونه ها؛ (الف) عمل آوری ۲۴ ساعت اولیه. (ب) عمل آوری تا ۲۸ روز پس از بتن ریزی

۳- برنامه آزمایش‌ها

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری بتن

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی بر اساس آیین‌نامه ASTM^۸ C 39 [۳۳] انجام شد. جهت بارگذاری نمونه‌های مکعبی بتنی، از دستگاه بتن شکن با ظرفیت ۲۰۰ تن (شکل ۴-الف) موجود در آزمایشگاه دانشگاه محقق اردبیلی استفاده گردید. نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در حوضچه آب، داخل دستگاه قرار داده شده و تحت نیروی فشاری قرار گرفتند. با استفاده از داده‌های بدست آمده از این آزمایش، منحنی تنش-کرنش بتن و مقاومت فشاری بتن بدست آمد.

۳-۲- آزمایش مقاومت کششی فولاد

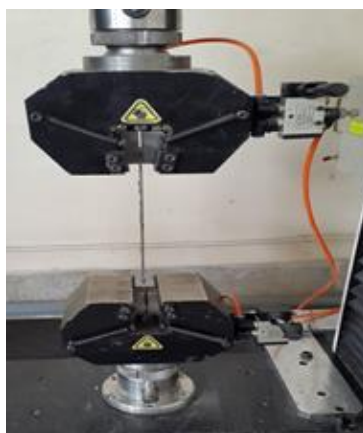
به منظور تعیین مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی در لوله‌های مورد استفاده در نمونه‌های CFST، نمونه‌هایی از هر کدام از لوله‌ها تهیه شده و تحت آزمایش کشش مستقیم قرار داده شد. این آزمایش جهت تعیین تنش تسلیم، تنش نهایی، مدول الاستیسیته و منحنی تنش-کرنش فولاد می‌باشد. آزمایش کشش مستقیم فولاد با دستگاه آزمایش کشش-فشار^۹ ASTM-150 دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد (شکل ۴-ب). آزمایش کشش با سرعت ۱۰ mm/min انجام شده و منحنی تنش-کرنش فولاد استخراج گردید.

۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری ستون‌های CFST و جداره‌های فولادی توخالی

برای آزمایش مقاومت فشاری ستون‌های CFST و جداره‌های فولادی توخالی، از دستگاه بتن شکن مطابق شکل ۴-ج استفاده شد. دستگاه بتن شکن دارای سیستم اعمال نیرو و کنترل سرعت بارگذاری متناسب با ابعاد نمونه بوده و از دقت کافی ابزار اندازه‌گیری نیرو متناسب با ابعاد و مقاومت نمونه طبق آیین‌نامه ASTM E4^{۱۰} [۳۴] برخوردار است. داده‌های مربوط به نیرو-تغییر مکان نمونه‌ها از طریق پردازشگر متصل به کامپیوتر برای تمامی نمونه‌های آزمایش شده، ثبت شد.



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۴: (الف) آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتن؛ (ب) آزمایش مقاومت کششی نمونه فولادی؛ (ج) آزمایش مقاومت فشاری ستون‌های CFST

^۸ Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Specimens

^۹ Universal testing machine

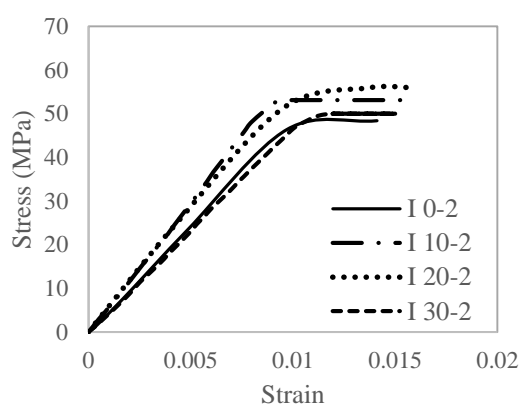
^{۱۰} Standard Practices for Force Verification of Testing Machines

۴- نتایج

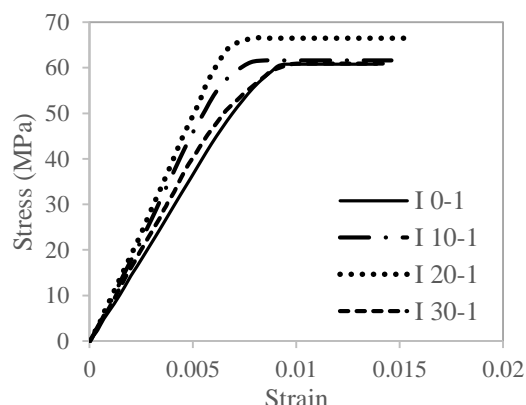
۴-۱- مقاومت فشاری بتن

مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه مکعبی بتنی در جدول ۶ و منحنی تنش- کرنش بتن در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به نمودار شکل ۵-الف، نمونه بتنی حاوی ۲۰ درصد براده آهن دارای بیشترین مقاومت فشاری، با مقدار ۶۶/۵ مگاپاسکال است. افزودن ۱۰ درصد براده آهن جایگزین ماسه در نمونه‌های مکعبی بتنی افزایش مقاومت فشاری ۱/۳۲ درصد نسبت به نمونه بدون براده (نمونه شاهد) را نشان می‌دهد. همچنین افزودن ۲۰ درصد براده آهن باعث افزایش مقاومت فشاری تا ۹/۳۷۵ درصد شده است. مشاهده می‌شود با افزودن ۳۰ درصد براده آهن افزایش مقاومت به ۰/۱۶ درصد کاهش یافته است. اگرچه نتایج دستگاه بتن‌شکن برای محاسبه سختی و مدول الاستیسیته بتن نامعتبر است و باید از آزمایش‌های دیگری برای بدست آوردن مدول الاستیسیته بتن استفاده کرد، ولی به صورت مقایسه‌ای می‌توان سختی نمونه‌ها را با هم مقایسه کرد و چگونگی تاثیر درصد براده آهن در سختی نمونه‌ها را بررسی کرد. از نمودارهای شکل ۵-الف، ملاحظه می‌شود که سختی نمونه بدون براده آهن کمتر از دیگر نمونه‌ها است. با افزودن ۱۰ درصد براده آهن سختی به مقدار ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزودن ۲۰ درصد براده آهن، میزان افزایش سختی در حدود ۳۰ درصد می‌باشد. اضافه کردن ۳۰ درصد براده آهن تاثیر زیادی در افزایش سختی نمونه ندارد و باعث افزایش سختی در حدود ۹ درصد شده است. بنابراین افزایش براده آهن تا ۲۰ درصد وزنی ماسه، بهترین نتیجه را از نظر مقاومت و سختی بدست داده است.

با توجه به نمودار شکل ۵-ب، در طرح اختلاط ۲ نیز، نمونه بتنی حاوی ۲۰ درصد براده آهن دارای بیشترین مقاومت فشاری است که مقدار آن ۵۵/۹ مگاپاسکال می‌باشد. با افزودن ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد براده آهن در طرح اختلاط ۲، به ترتیب افزایش مقاومت فشاری تا ۷/۶۴ درصد، ۱۶ درصد و ۳/۳۰ درصد رخ داده است. در این حالت نیز مشاهده می‌شود که با افزودن ۱۰ و ۲۰ درصد براده آهن، سختی نسبت به نمونه بدون براده آهن، به ترتیب به مقدار ۱۴ درصد و ۲۱ درصد افزایش می‌یابد. سختی نمونه حاوی ۳۰ درصد براده آهن، تقریباً ۶ درصد کمتر از سختی نمونه بدون براده آهن است. بنابراین می‌توان گفت مناسب‌ترین مقدار برای افزودن براده آهن در طرح اختلاط ۲، ۲۰ درصد است که بیشترین مقدار مقاومت و سختی را دارد.



(ب)



(الف)

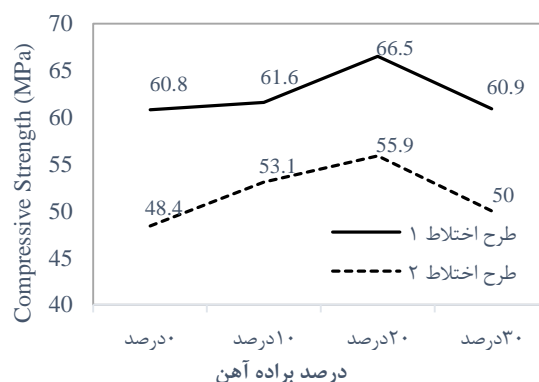
شکل ۵: نمودار تنش-کرنش نمونه‌های مکعبی بتن (الف) طرح اختلاط ۱ (نسبت آب به سیمان ۰/۴) (ب) طرح اختلاط ۲ (نسبت آب به سیمان ۰/۵)

در شکل ۶ نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی به ازای درصدهای مختلف براده آهن آورده شده است. با توجه به شکل ۶ می‌توان مشاهده نمود که در هر دو طرح اختلاط، نمونه با ۲۰ درصد براده آهن، بیشترین مقاومت فشاری را دارد. اضافه کردن مقدار بیشتری براده آهن (۳۰ درصد) تاثیر ناچیزی در افزایش مقاومت نمونه شاهد داشته است، بنابراین می‌توان گفت مقدار بهینه برای افزودن

براده آهن، ۲۰ درصد وزنی ماسه می باشد. طرح اختلاط ۱، با داشتن نسبت آب به سیمان کمتر، مقاومت بیشتری نسبت به طرح اختلاط ۲ دارد که به ازای درصدهای مختلف براده آهن، این افزایش مقاومت مشاهده می شود. افزایش مقاومت طرح اختلاط ۱ نسبت به طرح اختلاط ۲، به ازای درصدهای براده آهن، ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد به ترتیب ۲۵، ۱۶، ۱۹ و ۲۱ درصد می باشد که می توان گفت به طور میانگین افزایش ۲۰ درصدی مقاومت طرح اختلاط ۱ نسبت به طرح اختلاط ۲ وجود دارد.

جدول ۶: مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های مکعبی بتن

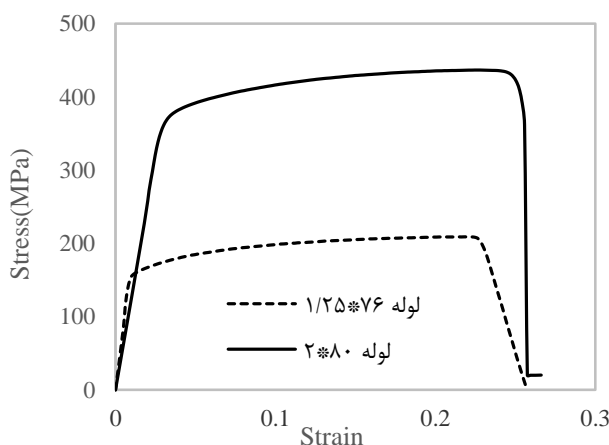
نمونه بتنی	مقاومت نمونه مکعبی (۲۸ روزه) MPa	نمونه بتنی	مقاومت نمونه مکعبی (۲۸ روزه) MPa
I0-1-a	۶۰/۸	I20-1-a	۶۶/۵
I0-1-b	۶۰/۵	I20-1-b	۶۵/۲
I0-1-c	۵۸	I20-1-c	۶۶
I0-2-a	۴۸/۴	I20-2-a	۵۵/۹
I0-2-b	۴۶/۸	I20-2-b	۵۴/۲
I0-2-c	۴۹/۳	I20-2-c	۵۶
I10-1-a	۶۱/۶	I30-1-a	۶۰/۹
I10-1-b	۶۱/۳	I30-1-b	۶۱
I10-1-c	۶۳	I30-1-c	۵۸/۳
I10-2-a	۵۳/۱	I30-2-a	۵۰
I10-2-b	۵۱/۱	I30-2-b	۴۹/۸
I10-2-c	۵۴/۵	I30-2-c	۵۱



شکل ۶: نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه های بتنی به ازای درصدهای مختلف براده آهن

۴-۲- مقاومت کششی فولاد

نتایج آزمایش کششی مصالح فولادی به صورت منحنی‌های تنش-کرنش در شکل ۷ آورده شده است. با توجه به اینکه جنس فولاد مورد استفاده در لوله‌های ۸۸*۲ و ۷۶*۱/۲۵ با هم متفاوت بوده و هرکدام از شرکت‌های متفاوتی تهیه شده است، مقاومت کششی فولادها اختلاف قابل توجهی با هم دارند.

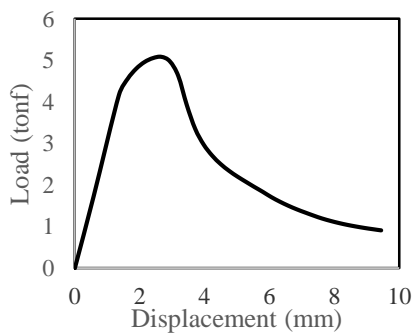
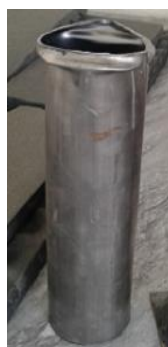


شکل ۷: نمودار مقایسه‌ای منحنی تنش-کرنش لوله ۷۶×۱/۲۵ و ۸۸×۲

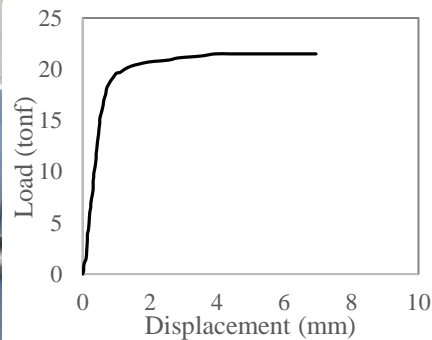
۴-۳- نتایج آزمایش فشاری ستون‌های فولادی توخالی

برای فهم رفتار جداره‌های فولادی توخالی، ابتدا نمونه‌های بدون بتن تحت آزمایش فشاری قرار گرفتند. منحنی بار-تغییر مکان و مودهای خرابی نمونه‌ها استخراج شده و در شکل ۸ آورده شده است. با توجه به اینکه مقطع A، در دستگاه بتن‌شکن تحت حالت نیرو کنترل آزمایش شده است، شاخه نزولی در منحنی بار-تغییر مکان مشاهده نمی‌شود. در حالی که مقطع B، در دستگاه آزمایش کشش-فشار تحت بارگذاری به صورت تغییر مکان کنترل مورد آزمایش قرار گرفته و شاخه نزولی منحنی به وضوح در آن مشخص است.

با توجه به نمودار تنش-کرنش مقطع A، لوله فولادی توخالی به قطر ۸۸ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر، ظرفیت تحمل نیروی محوری ۲۱/۵ تن را دارد. همچنین تحت بار فشاری محوری در این مقطع، هم کمانش به سمت داخل و هم کمانش به سمت خارج رخ می‌دهد (شکل ۸-الف). کمانش به سمت داخل مقطع در ستون CFST به دلیل وجود بتن داخل لوله رفع می‌شود. مقطع B، لوله فولادی توخالی به قطر ۷۶ و ضخامت ۱/۲۵ میلی‌متر، ظرفیت تحمل نیروی محوری تا حدود ۵/۰۸ تن را دارد. در تصویر کمانش یافته مقطع B (شکل ۸-ب) کمانش به سمت داخل و خارج به وضوح مشخص است.



(ب)



(الف)

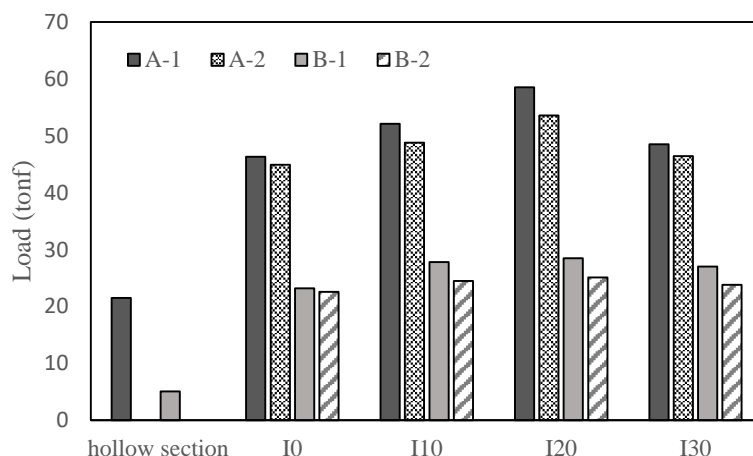
شکل ۸: نمودار بار-تغییر مکان و مودهای خرابی نمونه‌ها (الف) مقطع A، لوله ۸۸×۲، (ب) مقطع B، لوله ۷۶×۱/۲۵.

۴-۴- نتایج آزمایش فشاری ستون‌های CFST

نمونه‌های CFST، ۲۸ روز بعد از بتن‌ریزی و عمل‌آوری، تحت آزمایش فشاری قرار گرفتند. نتایج آزمایش به صورت مقاومت فشاری نمونه‌ها و منحنی‌های بار-تغییرمکان استخراج شدند. در جدول ۷ مقاومت فشاری نمونه‌ها آورده شده است. همچنین در شکل ۹، مقاومت فشاری نمونه‌های CFST در مقایسه با نمونه توخالی رسم شده است. در ادامه به منظور بررسی چگونگی تاثیر پارامترهای مختلف در رفتار ستون‌های CFST، منحنی‌های بار-تغییرمکان نمونه‌ها به تفکیک پارامترها آورده شده است.

جدول ۷: ظرفیت باربری نمونه‌های CFST

نام نمونه CFST	ظرفیت باربری (tonf)	سختی (tonf/mm)	درصد تغییرات نسبت به نمونه بدون براده		نام نمونه CFST	ظرفیت باربری (tonf)	سختی (tonf/mm)	درصد تغییرات نسبت به نمونه بدون براده	
			ظرفیت باربری	سختی				ظرفیت باربری	سختی
A - I0 - 1	۴۶/۳	۲۷/۴۲	-	-	A - I0 - 2	۴۴/۹	۱۹/۶۱	-	-
A - I10 - 1	۵۲/۱	۲۹	۱۲/۵۲	۵/۷	A - I10 - 2	۴۸/۸	۲۶/۴	۸/۶۸	۳۴/۶۲
A - I20 - 1	۵۸/۵	۳۳/۳۳	۲۶/۳۵	۲۱/۵	A - I20 - 2	۵۳/۶	۲۷/۵	۱۹/۳۷	۴۰/۲۳
A - I30 - 1	۴۸/۵	۲۸/۲	۴/۷۵	۲/۹	A - I30 - 2	۴۶/۴	۲۶/۶	۳/۳۴	۳۵/۶۴
B - I0 - 1	۲۳/۲	۱۰/۱۳	-	-	B - I0 - 2	۲۲/۶	۱۰	-	-
B - I10 - 1	۲۷/۸	۱۸	۱۹/۳۸	۷۷/۶	B - I10 - 2	۲۴/۵	۱۶/۷۵	۸/۴۱	۶۷/۵
B - I20 - 1	۲۸/۵	۱۹/۶	۲۲/۸۴	۹۳/۵	B - I20 - 2	۲۵/۱	۱۸/۷	۱۱/۰۶	۸۷
B - I30 - 1	۲۷	۱۸/۹	۱۶/۳۸	۸۶/۶	B - I30 - 2	۲۳/۸	۱۸/۳	۵/۳۱	۸۳
A	۲۱/۵	-	-	-					
B	۵/۰۸	-	-	-					



شکل ۹: ظرفیت باربری نمونه‌های CFST

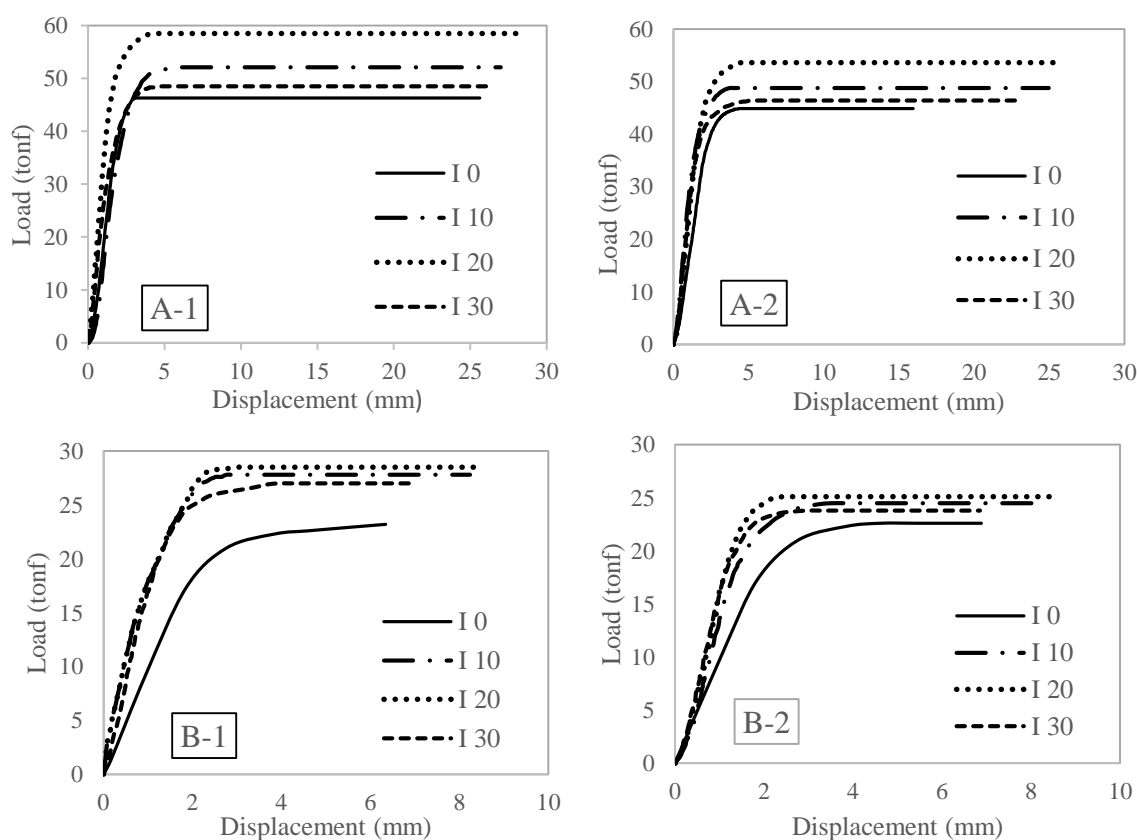
۴-۴-۱- اثر درصد براده آهن

در شکل ۱۰ منحنی‌های بار-تغییرمکان برای دو مقطع A و B به ازای دو طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان‌های مختلف و همچنین درصد‌های مختلف براده آهن برای بتن هسته، آورده شده است. با توجه به نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش نمونه‌های CFST با مقطع A ($D/t=44$) و طرح اختلاط ۱ (A-1) ظرفیت باربری در نمونه‌ی CFST بدون براده آهن، $46/3$ تن می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزودن ۱۰ درصد براده آهن افزایش مقاومت فشاری تا $12/5$ درصد و با افزودن ۲۰ درصد براده آهن افزایش مقاومت فشاری در

حدود ۲۶/۳۵ درصد اتفاق می‌افتد. این در حالی است که افزودن ۳۰ درصد براده آهن، تاثیر کمتری در افزایش مقاومت فشاری نمونه CFST دارد. برای مقطع A و طرح اختلاط ۲ (A-2)، ظرفیت تحمل بار محوری برای نمونه CFST بدون براده آهن در حدود ۴۴/۹ تن بوده است. ملاحظه می‌شود با افزودن ۱۰ درصد براده آهن، افزایش ظرفیت باربری تا ۸/۷ درصد و با افزودن ۲۰ درصد براده آهن افزایش ظرفیت باربری در حدود ۱۹/۳۴ درصد اتفاق می‌افتد و با افزودن ۳۰ درصد براده آهن تاثیر کمتری در افزایش ظرفیت تحمل نیروی محوری مشاهده می‌شود.

با افزودن براده آهن سختی نمونه‌های CFST نسبت به نمونه بدون براده آهن افزایش می‌یابد، به طوری که با افزودن ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد براده آهن به نمونه‌های مقطع A در طرح اختلاط ۱، سختی به ترتیب در حدود ۶، ۲۱ و ۳ درصد افزایش داشته است. افزایش سختی در نمونه‌های مقطع A با طرح اختلاط ۲، به ترتیب در حدود ۳۴، ۴۰ و ۳۵ درصد می‌باشد. چنانچه ملاحظه می‌شود افزایش سختی در طرح اختلاط ۲، نسبت به طرح اختلاط ۱ بیشتر است. همچنین در هر دو طرح اختلاط، سختی نمونه با ۲۰ درصد براده آهن بیشتر از نمونه‌های دیگر است، که بهینه بودن مقدار براده آهن ۲۰ درصد از نظر سختی نمونه را نشان می‌دهد.

با توجه به نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های CFST با مقطع B ($D/t=60/8$) و طرح اختلاط ۱ (B-1)، ظرفیت باربری در نمونه‌ی بدون براده آهن، ۲۳/۲ تن بوده است. مشاهده می‌شود که با افزودن ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد براده آهن افزایش ظرفیت نیروی محوری به ترتیب ۱۹/۸ درصد، ۲۲/۸۴ درصد و ۱۶/۳۷ درصد می‌باشد. برای مقطع B و طرح اختلاط ۲ (B-2)، ظرفیت تحمل بار محوری برای نمونه‌ی بدون براده آهن در حدود ۲۲/۶ تن بوده است. در این نمونه نیز با افزودن ۱۰ درصد براده آهن افزایش ظرفیت باربری تا ۸/۴ درصد و با افزودن ۲۰ درصد براده آهن افزایش ظرفیت باربری تا حدود ۱۱/۰۶ درصد رسیده است ولی با افزودن ۳۰ درصد براده آهن افزایش ظرفیت باربری به حدود ۵/۳ درصد افت کرده است.



شکل ۱۰: نمودار نیرو-جابجایی به ازای درصدهای مختلف براده آهن

همانطور که مشاهده می‌شود افزودن براده آهن تاثیر قابل توجهی در افزایش سختی نمونه‌های مقطع B دارد. سختی نمونه‌های

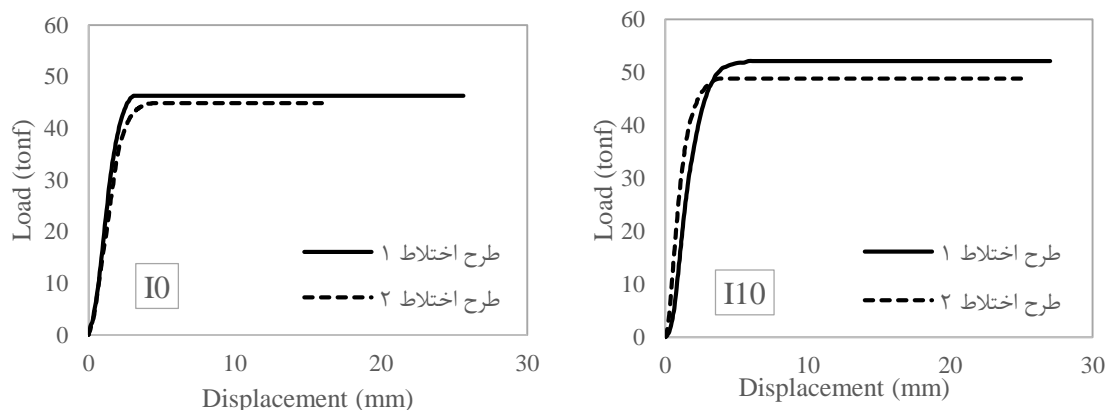
مقطع B، بدون براده آهن نسبت به سختی نمونه‌های حاوی براده آهن به مراتب کمتر است به طوری که افزودن ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد براده آهن در طرح اختلاط ۱ به ترتیب باعث افزایش سختی به میزان ۷۷ درصد، ۹۳ درصد و ۸۶ درصد می‌شود. در طرح اختلاط ۲ نیز سختی به ترتیب در حدود ۶۷، ۸۷ و ۸۳ درصد افزایش دارد.

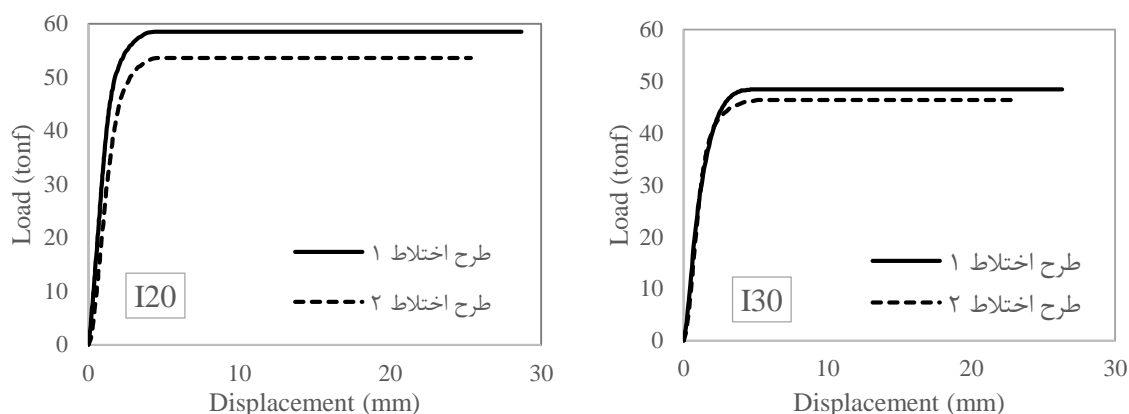
در تحقیق مهاوی و همکاران [۱۴] که بر روی نمونه‌های CFST کوتاه (طول ۳۰ سانتیمتر) با مقطع مربع شکل انجام شده است، اضافه کردن ۱۰ درصد براده آهن سبب افزایش ۹ درصدی ظرفیت فشاری محوری نسبت به نمونه بدون براده آهن شده است. در تحقیق حاضر نیز با افزودن ۱۰ درصد براده آهن جایگزین ماسه، افزایش ۱۲ درصدی و ۸/۵ درصدی برای نمونه‌های مقطع A با طرح اختلاط ۱ و ۲ و افزایش ۱۹ درصدی و ۸ درصدی در نمونه‌های مقطع B با طرح اختلاط ۱ و ۲ مشاهده می‌شود.

با توجه به اینکه نمونه‌ها به صورت نیرو-کنترل بارگذاری شده‌اند، نتایج منحنی‌های بار-تغییرمکان، کاهش بار بعد از مقاومت نهایی (ناحیه پس‌کمانشی) را نشان نمی‌دهد، بنابراین مقدار شکل‌پذیری نمونه‌ها را به کمک معیارهای متداول شکل‌پذیری (به عنوان مثال نسبت تغییرمکان در نقطه ۱۵ درصد کاهش بار در ناحیه پس‌کمانشی به تغییرمکان حد تسلیم) نمی‌توان بدست آورد.

۴-۴-۲- اثر طرح اختلاط

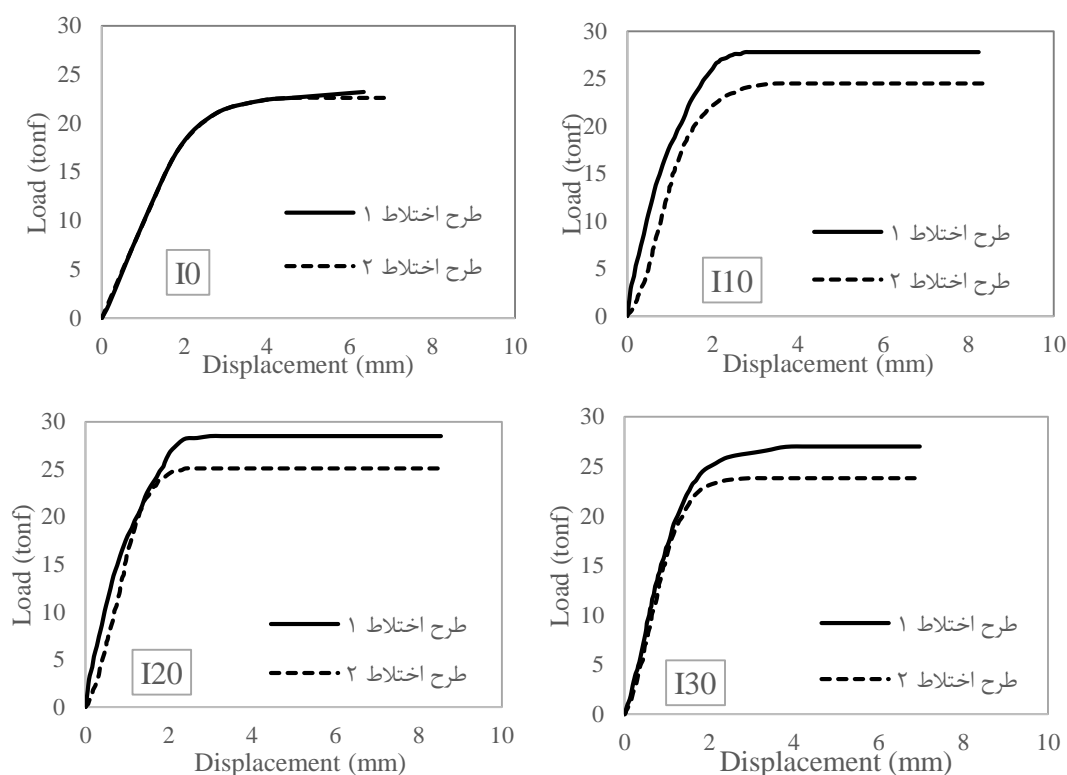
شکل ۱۱ و شکل ۱۲، اثر طرح اختلاط بتن (نسبت آب به سیمان بتن هسته) در مقاومت فشاری نمونه‌های CFST با مقطع A و B را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بار-تغییرمکان نمونه‌ی CFST با مقطع A و بدون براده آهن (I0) مشاهده می‌شود که نمونه‌ی ساخته شده با طرح اختلاط ۱ که نسبت آب به سیمان کمتری نسبت به طرح اختلاط ۲ دارد، دارای ظرفیت تحمل نیروی محوری بیشتری نسبت به نمونه طرح اختلاط ۲ است که این افزایش تحمل نیروی محوری تا ۳/۱۲ درصد قابل مشاهده است. در نمونه با ۱۰ درصد براده آهن (II0)، افزایش تحمل نیروی محوری طرح اختلاط ۱ نسبت به طرح اختلاط ۲ تا ۶/۷۶ درصد، در نمونه با ۲۰ درصد براده آهن (I20)، افزایش تحمل نیروی محوری تا ۹/۱۴ درصد و در نمونه با ۳۰ درصد براده آهن (I30)، افزایش تحمل نیروی محوری تا ۴/۵ درصد مشاهده می‌شود.





شکل ۱۱: نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های CFST با مقطع A (D/t=44) به ازای طرح اختلاط‌های مختلف

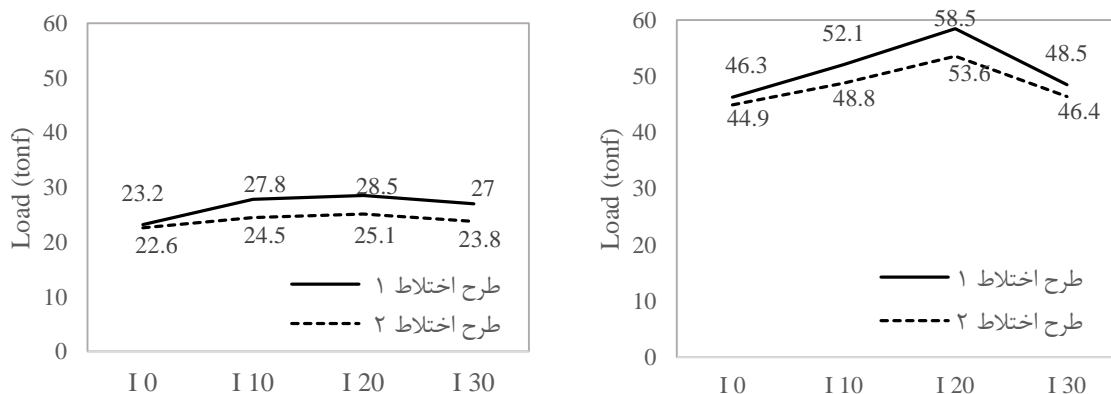
با توجه به نمودارهای شکل ۱۲ به طور کلی مشاهده می‌شود که نمونه‌های ساخته شده با طرح اختلاط ۱ (نسبت آب به سیمان ۰/۴) نسبت به نمونه‌های طرح اختلاط ۲ (نسبت آب به سیمان ۰/۵) ظرفیت باربری بیشتری دارند. در نمونه‌های CFST با مقطع B و بتن بدون براده آهن (I0)، نمودار بار-تغییر مکان طرح اختلاط ۱ و ۲ اختلاف ناچیزی با هم دارند. به طوری که افزایش مقاومت طرح اختلاط ۱ نسبت به طرح اختلاط ۲، در حدود ۲/۶۵ درصد می‌باشد. این مقدار در نمونه‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد براده آهن، به ترتیب ۱۳/۴۵ درصد، ۱۳/۵۴ درصد و ۱۳/۴۴ درصد می‌باشد. در شکل ۱۳، مقادیر ظرفیت باربری نمونه‌ها برای مقاطع A و B، به ازای طرح اختلاط‌های مختلف آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود اثر طرح اختلاط در نمونه بدون براده آهن، کم بوده که با افزایش مقدار براده آهن، اختلاف مقادیر ظرفیت باربری دو طرح اختلاط زیاد می‌شود. در مقدار براده آهن ۲۰ درصد، اختلاف نتایج دو طرح اختلاط بیشترین مقدار را دارد. با افزایش براده آهن به مقدار ۳۰ درصد و کاهش ظرفیت‌های باربری نمونه‌ها، اختلاف نتایج دو طرح اختلاط نیز کاهش می‌یابد که این مورد در مقطع A بیشتر مشهود است. روند افزایش ظرفیت باربری تا مقدار براده آهن ۲۰ درصد در تمامی نمونه‌ها مشاهده می‌شود، ولی درصد افزایش ظرفیت در مقطع A بیشتر از مقطع B است. همچنین با افزایش براده آهن از ۲۰ به ۳۰ درصد، کاهش ظرفیت باربری در تمامی نمونه‌ها مشهود است که درصد کاهش ظرفیت در نمونه با مقطع A بیشتر است (شکل ۱۳-الف) و در نمونه با مقطع B کاهش ظرفیت با شیب ملایم‌تری اتفاق می‌افتد (شکل ۱۳-ب).



شکل ۱۲: نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های CFST با مقطع B ($D/t=60/8$)

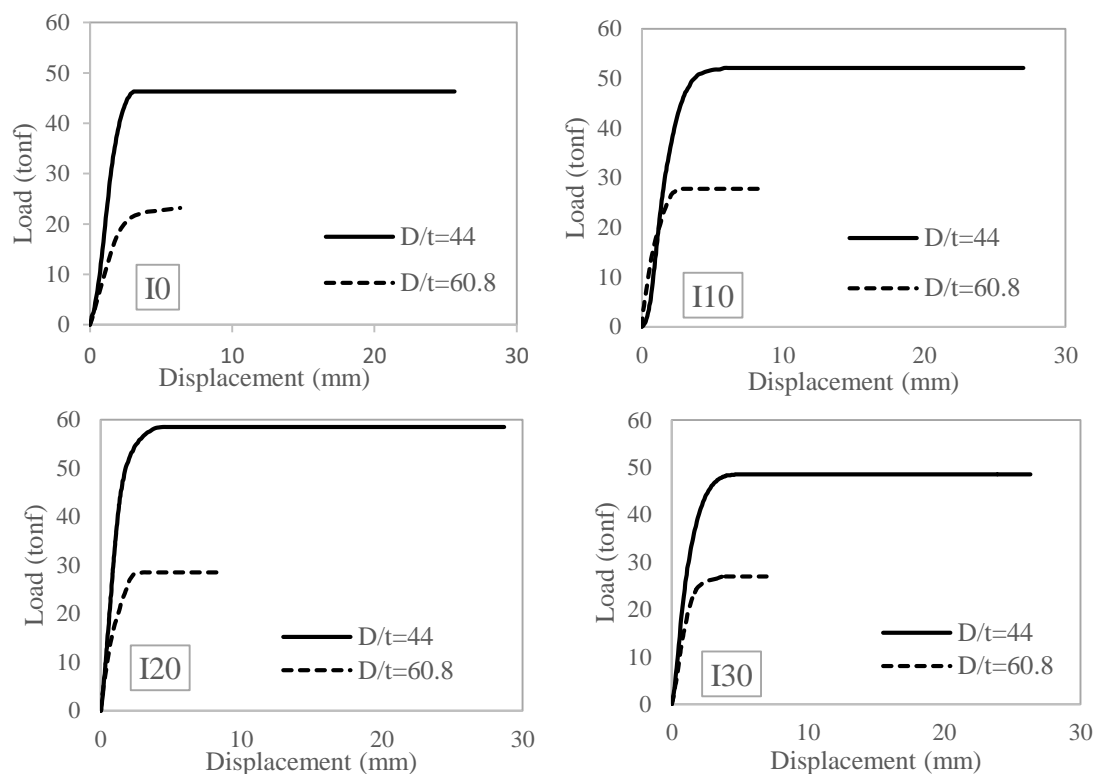
۴-۳-۴- اثر D/t

شکل ۱۴ و شکل ۱۵، اثر D/t (نسبت قطر به ضخامت) مقطع در ظرفیت تحمل نیروی محوری ستون‌های CFST را برای طرح اختلاط‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهد. با توجه به نمودار شکل ۱۴، برای نمونه با طرح اختلاط ۱ و بدون براده آهن (I0)، ظرفیت تحمل بار محوری برای نمونه با $D/t=44$ ، $46/3$ تن بوده است که نسبت به نمونه با $D/t=60/8$ افزایش $99/5$ درصد ظرفیت باربری را نشان می‌دهد. برای بتن با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد براده آهن، افزایش ظرفیت باربری محوری مقطع A با $D/t=44$ ، نسبت به نمونه مقطع B با $D/t=60/8$ به ترتیب در حدود $87/41$ درصد، $105/26$ درصد و $79/6$ درصد را نشان می‌دهد.

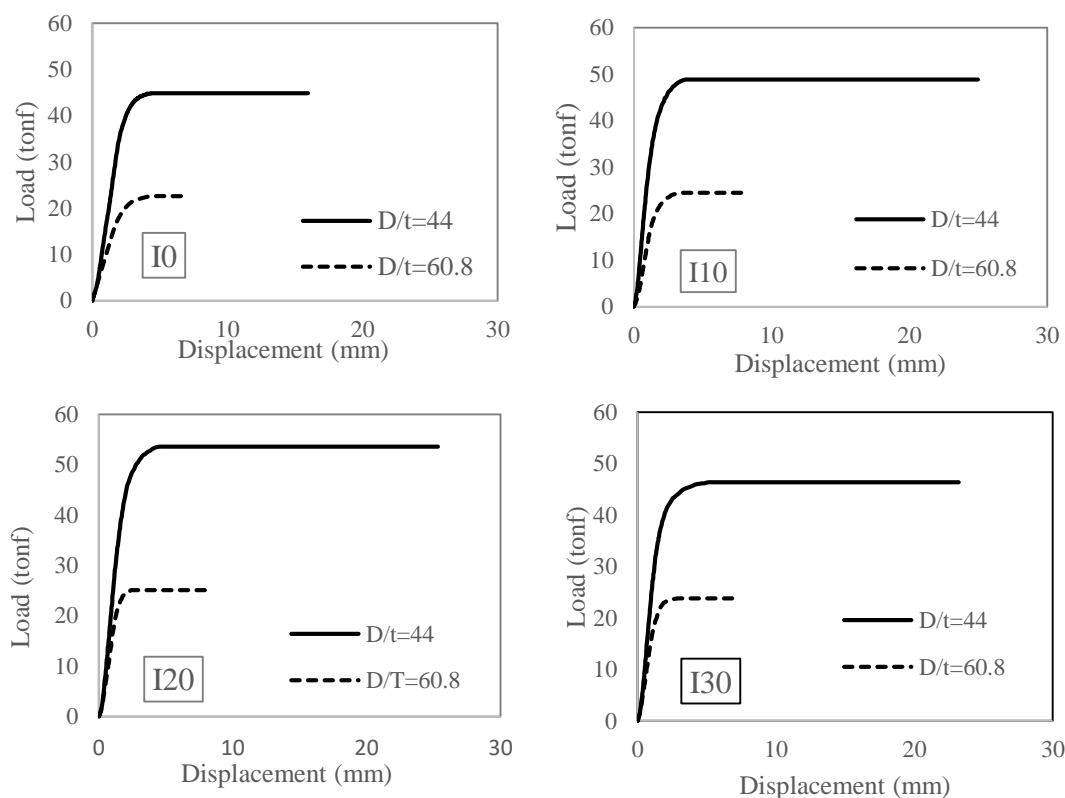


شکل ۱۳: ظرفیت باربری نمونه‌های CFST: (الف) مقطع A، (ب) مقطع B.

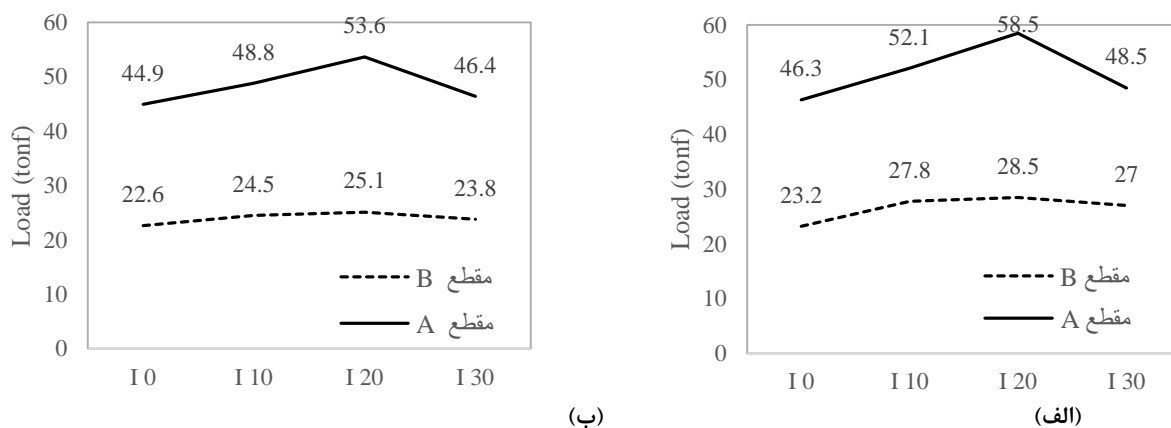
با توجه به نمودار شکل ۱۵، برای نمونه با طرح اختلاط ۲ و بدون براده آهن، ظرفیت تحمل بار محوری به ازای $D/t=44$ ، $44/9$ تن بوده است که نسبت به نمونه با $D/t=60.8$ افزایش $98/67$ درصد ظرفیت باربری را نشان می‌دهد. برای نمونه با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد براده آهن، افزایش ظرفیت محوری مقطع A نسبت به مقطع B، به ترتیب $99/18$ درصد، $113/5$ درصد و $94/95$ درصد را نشان می‌باشد. در شکل ۱۶، مقادیر ظرفیت باربری نمونه‌های ستون CFST، با درصدهای مختلف براده آهن و طرح اختلاط و نسبت قطر به ضخامت، آورده شده است.



شکل ۱۴: نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های CFST برای طرح اختلاط ۱



شکل ۱۵: نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های CFST برای طرح اختلاط ۲



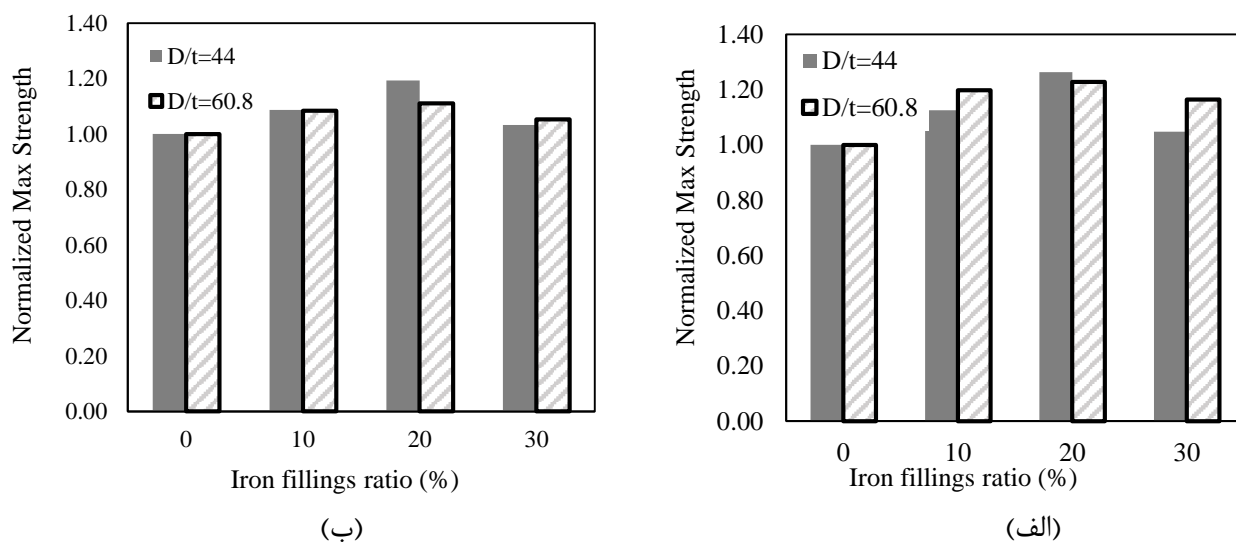
شکل ۱۶: ظرفیت باربری نمونه‌های CFST: (الف) طرح اختلاط ۱، (ب) طرح اختلاط ۲

مطابق شکل ۱۶، مقطع A با ۲۰ درصد براده آهن دارای بیشترین ظرفیت باربری می‌باشد که مقدار آن ۵۸/۵ تن است. این مقدار نسبت به نمونه CFST بدون براده آهن ۲۶/۳۴ درصد افزایش ظرفیت باربری، نسبت به نمونه CFST با ۱۰ درصد براده آهن ۱۲/۲۸ درصد افزایش ظرفیت باربری و نسبت به نمونه CFST با ۳۰ درصد براده آهن ۲۰/۶۱ درصد افزایش ظرفیت باربری داشته است. ظرفیت باربری نمونه CFST با مقطع A و طرح اختلاط ۱ و با ۲۰ درصد براده آهن، نسبت به نمونه مشابه با مقطع B که ظرفیت تحمل نیروی آن ۲۸/۵ تن است، ۱۰۵/۲۰ درصد بیشتر است. در مقطع B نمونه با ۲۰ درصد براده آهن دارای بیشترین ظرفیت تحمل نیرو با مقدار ۲۸/۵ تن است که نسبت به نمونه CFST بدون براده آهن ۲۲/۸۳ درصد افزایش، نسبت به نمونه CFST با ۱۰ درصد براده آهن ۲/۵۱ درصد افزایش و نسبت به

نمونه CFST با ۳۰ درصد براده آهن ۵/۵۴ درصد افزایش ظرفیت تحمل نیرو را نشان می‌دهد.

در حالت طرح اختلاط ۲، مقطع A با نسبت $D/t=44$ ، دارای ظرفیت تحمل نیروی بالاتری نسبت به نمونه مقطع B با $60/8$ بوده است. همچنین مقطع A با ۲۰ درصد براده آهن دارای بیشترین ظرفیت باری است که مقدار آن $53/6$ تن می‌باشد. این مقدار نسبت به نمونه بدون براده آهن $19/38$ درصد افزایش تحمل نیرو، نسبت به نمونه CFST با ۱۰ درصد براده آهن $9/84$ درصد افزایش ظرفیت باربری و نسبت به نمونه CFST با ۳۰ درصد براده آهن افزایش ظرفیت باربری $15/5$ درصد داشته است. نمونه CFST با مقطع A و ۲۰ درصد براده آهن در طرح اختلاط ۲ دارای ظرفیت تحمل نیروی $53/6$ تن بوده است که نسبت به نمونه مشابه با مقطع B که بیشترین ظرفیت باربری را با مقدار $25/1$ تن دارد، $113/54$ درصد تحمل نیروی بیشتری دارد. همچنین در مقطع B نمونه با ۲۰ درصد براده آهن دارای بیشترین مقاومت نیروی محوری است که مقدار آن $25/1$ تن می‌باشد. این مقدار نسبت به نمونه بدون براده آهن ۱۱ درصد افزایش مقاومت، نسبت به نمونه با ۱۰ درصد براده آهن $2/46$ درصد افزایش مقاومت و نسبت به نمونه CFST با ۳۰ درصد براده آهن $5/47$ درصد افزایش مقاومت را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۷، نمودار نرمالیزه شده ظرفیت باربری نمونه‌ها با D/t های مختلف آورده شده است که در آن مقادیر ظرفیت باربری نمونه‌ها، نسبت به ظرفیت باربری نمونه با درصد براده آهن صفر (نمونه شاهد)، نرمالیزه شده است.



شکل ۱۷: ظرفیت باربری نرمالیزه شده نمونه‌های CFST؛ (الف) طرح اختلاط ۱، (ب) طرح اختلاط ۲.

مطابق شکل ۱۷، با افزایش درصد براده آهن، تغییرات مقاومت (افزایش یا کاهش مقاومت) نسبت به نمونه بدون براده آهن (نمونه شاهد)، در طرح اختلاط ۱، نسبت به طرح اختلاط ۲ بیشتر است. در هر دو طرح اختلاط، بیشترین افزایش مقاومت برای نمونه با ۲۰ درصد براده آهن، اتفاق می‌افتد که این افزایش برای مقطع A با $D/t=44$ بیشتر از مقطع B با $D/t=66/8$ است. در هر دو طرح اختلاط، با افزودن براده آهن، تغییرات مقاومت در مقطع A با $D/t=44$ بیشتر از مقطع B با $D/t=66/8$ است، به طوری که در طرح اختلاط ۱، در مقطع A با $D/t=44$ ، با افزودن ۱۰ درصد براده آهن، ۱۲ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد مشاهده می‌شود. با تغییر مقدار براده آهن از ۱۰ به ۲۰ درصد، ۱۴ درصد افزایش مقاومت بیشتر و با تغییر مقدار براده آهن از ۲۰ به ۳۰ درصد، ۲۱ درصد کاهش در مقاومت مشاهده می‌شود. این مقادیر برای مقطع B با $D/t=66/8$ ، به ترتیب ۱۹ و ۳ درصد افزایش و ۶ درصد کاهش مقاومت است. برای طرح اختلاط ۲، در مقطع A با $D/t=44$ ، با افزودن ۱۰ درصد براده آهن، ۹ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد مشاهده می‌شود. با تغییر مقدار براده آهن از ۱۰ به ۲۰ درصد، ۱۱ درصد افزایش مقاومت بیشتر و با تغییر مقدار براده آهن از ۲۰ به ۳۰ درصد، ۱۶ درصد کاهش در مقاومت مشاهده می‌شود. این مقادیر برای مقطع B با $D/t=66/8$ ، به ترتیب ۸ و ۳ درصد افزایش و ۶ درصد کاهش در مقاومت است.

۵- شکل های خرابی

در شکل ۱۸ شکل های خرابی نمونه های آزمایش شده، ارائه شده است. مشاهده می شود که کمانش به سمت خارج در جداره های فولادی در بیشتر نمونه ها اتفاق افتاده است. برای نمونه های A با $D/t=44$ ، خرابی به صورت کمانش موضعی در میانه ارتفاع ستون رخ می دهد، در حالی که برای نمونه های B با $D/t=66/8$ ، کمانش موضعی در قسمت فوقانی ستون و چاق شدگی مقطع در نزدیکی تکیه گاه فوقانی اتفاق می افتد.



شکل ۱۸: شکل خرابی نمونه ها

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی عملکرد ستون های CFST، با دو مقطع لوله فولادی 88×2 و $76 \times 1/25$ میلی متر و به ارتفاع ۳۰۰ میلی - متر و بتن داخلی حاوی براده آهن پرداخته شد. بدین منظور، تاثیر پارامترهایی مانند نسبت D/t ، طرح اختلاط (با نسبت آب به سیمان های مختلف) و درصد های مختلف براده آهن بر مقاومت فشاری ستون های CFST به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.

برای مطالعه بیشتر چگونگی تاثیر براده آهن در رفتار ستون های CFST، پیشنهاد می شود در مطالعات آتی، نمونه های CFST با بتن حاوی درصد های دیگر براده آهن (محدوده بیشتری از مقادیر براده آهن) ساخته شده و مورد آزمایش قرار گیرد. همچنین ستون با ابعاد هندسی دیگر (مقطع دایره ای با نسبت D/t های متفاوت و طول های مختلف) و شکل مقطع های متفاوت (مربع، مستطیل، بیضی و ...) مورد آزمایش قرار گیرند. همچنین انواع دیگر بارگذاری (بارگذاری فشاری با خروج از مرکزیت، بارگذاری لرزه ای و ...) بر روی این ستون ها اعمال شده و تاثیر براده آهن در هر کدام مورد ارزیابی قرار گیرد.

بر اساس مطالعات انجام یافته در این تحقیق نتایج زیر بدست آمده است:

- با افزودن براده آهن به بتن، مقاومت فشاری نمونه های مکعبی افزایش یافته است. افزودن براده آهن تا ۲۰ درصد وزنی ماسه، باعث افزایش قابل توجه مقاومت فشاری شده است. افزودن ۲۰ درصد براده آهن، سبب افزایش ۹،۳۷۵ درصدی مقاومت فشاری در طرح اختلاط ۱ (با نسبت آب به سیمان ۰/۴) و سبب افزایش ۱۶ درصدی مقاومت فشاری در طرح اختلاط ۲ (با نسبت آب به سیمان ۰/۵)، نسبت به نمونه بدون براده آهن می شود. ولی اضافه کردن ۳۰ درصد براده آهن، تاثیر کمتری در افزایش مقاومت فشاری نمونه ها داشته است. بنابراین افزودن بیش از ۲۰ درصد براده آهن توصیه نمی شود.
- نمونه های ستون CFST، با بتن طرح اختلاط ۱ و ۲ دارای ۲۰ درصد براده آهن (A-I 20، B-I 20)، بیشترین مقاومت فشاری را نسبت به سایر نمونه ها داشتند، به طوری که برای ستون های CFST با مقطع A ($D/t=44$)، برای طرح اختلاط ۱، افزایش ۲۶،۳۵ درصدی مقاومت فشاری و برای طرح اختلاط ۲، افزایش ۱۹،۳۷ درصدی مقاومت فشاری و برای ستون های CFST با مقطع B ($D/t=60/8$)، برای طرح اختلاط ۱، افزایش ۲۲،۸۴ درصد و برای طرح اختلاط ۲، افزایش ۱۱،۰۶ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه بدون براده آهن مشاهده گردید. بنابراین می توان گفت درصد بهینه برای افزودن براده آهن ۲۰ درصد می باشد.

- با مقایسه سختی نمونه‌های CFST، مشاهده شد که سختی نمونه‌های حاوی بتن طرح اختلاط ۲ بیشتر از نمونه‌های حاوی بتن طرح اختلاط ۱ بوده و سختی نمونه‌های مقطع A بیشتر از سختی نمونه‌های مقطع B است. با افزودن براده آهن، درصد افزایش سختی در نمونه‌های مقطع B بیشتر از نمونه‌های با مقطع A است به طوری که سختی نمونه‌های مقطع B، بدون براده آهن نسبت به سختی نمونه‌های حاوی براده آهن به مراتب کمتر است. همچنین در بین نمونه‌های CFST آزمایش شده، سختی نمونه با ۲۰ درصد براده آهن بیشتر از نمونه‌های دیگر است، که بهینه بودن مقدار براده آهن ۲۰ درصد از نظر سختی نمونه را نشان می‌دهد.
- به طور کلی، نمونه‌های ستون CFST با بتن طرح اختلاط ۱ (با نسبت آب به سیمان ۰/۴)، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های با بتن طرح اختلاط ۲ (با نسبت آب به سیمان ۰/۵) داشتند. در ستون‌های CFST، برای نمونه با ۲۰ درصد براده آهن (که دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به درصد‌های مختلف استفاده شده براده آهن است) افزایش مقاومت فشاری طرح اختلاط ۱ نسبت به طرح اختلاط ۲، در حدود ۹/۱۴ درصد برای مقطع A با $D/t=44$ و ۱۳/۵۴ درصد برای مقطع B با $D/t=60/8$ بوده است.
- کارایی نمونه‌های بتنی در طرح اختلاط ۲ نسبت به طرح اختلاط ۱، به دلیل داشتن نسبت آب به سیمان بالاتر، بیشتر است. جایگزین کردن بخشی از ماسه با براده آهن، کارایی بتن را افزایش می‌دهد که با زیاد شدن مقدار براده آهن، مقدار کارایی نیز افزایش می‌یابد.
- با افزایش درصد براده آهن، تغییرات مقاومت (افزایش یا کاهش مقاومت) نسبت به نمونه بدون براده آهن (نمونه شاهد)، در طرح اختلاط ۱، نسبت به طرح اختلاط ۲ بیشتر می‌باشد.
- روند افزایش ظرفیت باربری تا مقدار براده آهن ۲۰ درصد در تمامی نمونه‌های ستون CFST مشاهده می‌شود، ولی درصد افزایش ظرفیت در مقطع A با $D/t=44$ بیشتر از مقطع B با $D/t=60/8$ است. همچنین با افزایش براده از ۲۰ به ۳۰ درصد، کاهش ظرفیت باربری (نسبت به حالت با ۲۰ درصد براده آهن) در تمامی نمونه‌ها مشهود است که کاهش ظرفیت در نمونه با مقطع A (با $D/t=44$) بیشتر و در نمونه با مقطع B (با $D/t=60/8$) با شیب ملایم‌تری اتفاق می‌افتد.
- شکل‌های خرابی نمونه‌های ستون CFST به صورت کمانش‌های موضعی جداره به سمت بیرون و خردشدگی بتن داخلی در محل بروز کمانش، می‌باشد.

مراجع

- [1] Jabar Hussain, A., Al-Khafaji, Z. S. (2021). Experimental investigation on applying waste iron filings in the engineering fields for protection the environment from contamination. *Materials Today: Proceedings*, online, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.039>.
- [2] Olawale, S. O., Kareem, M. A., Muritala, H. T., Adebajo, A. U., Alabi, O. O., Olawuyi, O. A., Fadipe, O. O. (2021). Utilization of Iron Filings as Partial Replacements for Sand in Self-Compacting Concrete. *Tanzania Journal of Science*, 47(3): 906-916.
- [3] Garg, H. (2022). Durability of concrete made with steel filings as a replacement of fine aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 49(8): 3217-3221.
- [4] Prakash, S., Helmand, P., Saini, S. (2019). "Mechanical properties of concrete in presence of Iron filings as complete replacement of fine aggregates." *Materials Today: Proceedings*, 15(3): 536-545.
- [5] Alsaad, A. J., Radhi, M. S., Taher, M. J. (2019). Eco-friendly utilizing of iron filings in production reactive powder concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 518(2): 022051.
- [6] Alserai, S. J., Alsaraj, W. K., Abass, Z. W. (2018). Effect of iron filings on the mechanical properties of different types of sustainable concrete. *The Open Civil Engineering Journal*, 12(1): 441-457.
- [7] Barghlame, H., Ferdousi, A., Mousavi Ghasemi, S. A. (2021). Investigation into the behavior of a upgraded section used for Concrete-Filled Steel tubular Columns (Upgraded CFT) Under Cyclic Loading. *Journal of Structural and Construction Engineering*, online, DOI: <https://doi.org/10.22065/jsce.2021.309337.2601>.
- [8] Shi, Q., Ying, Y., Wang, B. (2021). Experimental investigation on the seismic performance of concrete-filled steel tubular joints in diagrid structures. *Structures*, 31: 230-247.
- [9] Aghamaleki, S. T., Naghipour, M., Vaseghi Amiri, J., Nematzadeh, M. (2021). Experimental and numerical study on double skin steel tube filled with concrete using supporting vector machines and tree decision model. *Journal of Structural and Construction Engineering*, online, DOI: <https://doi.org/10.22065/jsce.2021.301313.2546>.

- [10] Naghipour, M., Mahdavi, S., Maedeh, S., Ebrahimzadeh, S. M. (2021). Numerical analysis of concrete-filled double skin tubular slender columns with internal circular and external hexagonal tubes. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(2): 56-69.
- [11] Ehsani, r., Zibaei Aliabad, r. (2021). Numerical study of progressive failure mechanism in steel frames with CFST columns. *Journal of Structural and Construction Engineering*: online, DOI: <https://doi.org/10.22065/jsce.2021.265113.2321>.
- [12] Kolmi Zadeh, V., Saberi, H., Mokhtari, A., Saberi, V. (2021). Investigating the Effect of Concrete Compressive Strength on Axial Performance of Double-Edged Steel Columns Filled with Concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(4), 106-123. doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2019.192744.1895>.
- [13] Gholizad, A., Shiri, B., Makkiabadi, M. S. (2015). Hollow Ratio and Stiffeners Effects Concrete Filled Double Steel Tubes Behaviour. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2(3): 34-47.
- [14] Mhawi, A. L., Dawood, A. O. (2020). Experimental investigation of some properties of square concrete-filled steel tubular columns containing iron filings as replacement of sand. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 888(1): 012045.
- [15] John, A. T., Orumu, S. T., Nelson, T. A. (2019). The Effect of the Presence of Ferric Iron in Water used for the Production of Concrete on Its Compressive Strength. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 4(8), 95-98.
- [16] Khalily, M., Saberi, V., Saberi, H., Mansouri, V., Sadeghi, A., Pachideh, G. (2022). An Experimental Study on the Effect of High Temperatures on Performance of the Plastic Lightweight Concrete Containing Steel, Polypropylene and Glass Fibers. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(12).
- [17] Ruidong, W., Yu, S., Juanhong, L., Linian, C., Guangtian, Z., Yueyue, Z. (2021). Effect of iron tailings and slag powders on workability and mechanical properties of concrete. *Frontiers in Materials*, 8, 258.
- [18] Nadi, S., Beheshti Nezhad, H., Sadeghi, A. (2022). Experimental study on the durability and mechanical properties of concrete with crumb rubber. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 7(1), 1-12.
- [19] Singh, G., Siddique, R. (2016). Strength properties and micro-structural analysis of self-compacting concrete made with iron slag as partial replacement of fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 127: 144-152.
- [20] Noori, M., AL-Hashimi, H., Najim, W., Hameed, A. (2018). Performance of Concrete Containing Iron Fillings. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 26(6): 384-391.
- [21] Rajeswari V. (2021). Strength Behaviour of Iron Fillings in Concrete by Partial Replacement of Sand. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 10(05): 839-841.
- [22] Azevedo, V. D. S., Lima, L. R., Vellasco, P. C. D. S., Tavares, M. E. D. N., Chan, T. M. (2021). Experimental investigation on recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns under axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 187: 106930.
- [23] Yang Y. F., Hou C. (2015). Behaviour and design calculations of recycled aggregate concrete filled steel tube (RACFST) members. *Magazine of Concrete Research*, 67(11): 611-20.
- [24] Lyu, W. Q., Han, L. H., Hou, C. (2021). Axial compressive behaviour and design calculations on recycled aggregate concrete-filled steel tubular (RAC-FST) stub columns. *Engineering Structures*, 241: 112452.
- [25] Tam V. W., Wang Z. B., Tao Z. (2014). Behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel stub columns. *Materials and Structures*, 47(1-2): 293-310.
- [26] Wang Y., Chen J., Geng Y. (2015). Testing and analysis of axially loaded normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns. *Engineering Structures*, 86: 192-212.
- [27] Chen Z., Xu J., Xue J., Su Y. (2014). Performance and calculations of recycled aggregate concrete-filled steel tubular (RACFST) short columns under axial compression. *International Journal of Steel Structures*, 14(1): 31-42.
- [28] Nour, A., Mete Güneysisib, E. (2019). Prediction model on compressive strength of recycled aggregate concrete filled steel tube columns. *Composites Part B: Engineering*, 173: 106938.
- [29] Karimi, A., Nematzadeh, M. (2020). Axial compressive performance of steel tube columns filled with steel fiber-reinforced high strength concrete containing tire aggregate after exposure to high temperatures, *Engineering Structures*, 219: 110608.
- [30] Dong, M., Elchalakani, M., Karrech, A., Fahmi Hassanein, M., Xie, T., Yang, B. (2019). Behaviour and design of rubberised concrete filled steel tubes under combined loading conditions, *Thin-Walled Structures*, 139: 24-38.
- [31] Dong, M., Elchalakani, M., Karrech, A., Fawzia, S., MohamedAli, M., Yang, B., Xu, SH. (2019). Circular steel tubes filled with rubberised concrete under combined loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 162: 105613.
- [32] Chen, J., Zhang, S., Wang, Y., Geng, Y. (2020). Axial compressive behavior of recycled concrete filled steel tubular stub columns with the inclusion of crushed brick. *Structures*, 26: 271-283.
- [33] ASTM, C.39 (2014). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[34] ASTM E4-21 (2021). Standard Practices for Force Calibration and Verification of Testing Machines. West Conshohocken, PA: ASTM International.