

بررسی آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل آماری خواص مکانیکی بتن‌های الیافی فولادی تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی دو نیم شدن و ضربه (وزنه افتان) با نسبت ابعادی مختلف

آیدین نماز زاده^۱، محمد کاظم شربتدار^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

msharbatdar@semnan.ac.ir

چکیده

با پیشرفت پرسرعت دانش ساخت و ساختمان، نیاز به بهبود مصالح نیز برای تحقق نیازهای مرتبط با آن به شدت احساس می‌گردد. بتن الیافی از جمله تکنولوژی‌هایی است که به علت دارا بودن خواص متعدد نسبت به بتن ساده، مورد توجه بسیاری از کارشناسان و محققان عرصه ساخت و ساز قرار گرفته است. از جمله خواصی که الیاف فولادی در بتن ایجاد می‌کنند می‌توان به بهبود مقاومت‌های فشاری، کششی، خمشی، ضربه و جذب انرژی و جلوگیری از گسترش ترک جمع شدگی اشاره کرد. مقاومت نمونه‌های مختلف با ابعاد گوناگون طبق روابط ارائه شده در آیین‌نامه مقررات ملی مبحث ۹ متفاوت می‌باشد، اما این ضرایب برای بتن بدون الیاف صادق بوده و برای بتن الیافی ضریبی برای تبدیل ذکر نشده است. در این مقاله از دو نوع بتن بدون الیاف (شاهد) و الیافی با الیاف فولادی استفاده و ۲۰ نمونه مکعبی با ابعاد ۲۰cm، ۵ نمونه با ابعاد ۱۵cm، ۲۰ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰cm، ۵ نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۵cm و ۲۰ قرص بتنی به ازای هر طرح اختلاط، برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و ضربه (وزنه افتان) ساخته شد. با استفاده از نتایج بدست آمده، بررسی آماری و تجزیه و تحلیل متناسب با تاثیر الیاف در نمونه‌هایی با ابعاد مختلف و ارائه نسبت‌های تبدیل مقاومت آن‌ها به یکدیگر انجام گردیده است. مشاهده می‌شود که با کاهش ابعاد نمونه مقاومت آن افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: بتن الیافی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت ضربه، نسبت ابعادی

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان ، aidin.namazzadeh@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان ، msharbatdar@semnan.ac.ir

۱. مقدمه

در طراحی یک پروژه، استفاده از مصالح مناسب، مقاوم و با صرفه اقتصادی از اصلی‌ترین وظایف یک مهندس محسوب می‌شود. یکی از مصالحی که کاربرد وسیعی در صنعت ساخ و ساز دارد بتن است. به کارگیری بتن‌گیر مسلح به علت خاصیت تردی آن، به غیر از سازه‌های وزنی، کاربرد چندانی ندارد. این عیب بتن باعث گردیده است تا از میله‌های فولادی یا مشابه آن برای مسلح کردن و جبران خاصیت تردی بتن استفاده گردد [۱]. اما از آنجا که آرماتور منحصراً بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می‌دهد، تصور اینکه مقطع بتن یک مقطع ایزوتوپ است چندان صحیح نمی‌باشد. به منظور ایجاد شرایط ایزوتوپ و نیز ضعف بتن در شکنندگی و تردی، در چند دهه اخیر از رشته‌های نازک که در تمام حجم بتن به طور همگن پراکنده می‌گردد و به آن الیاف می‌گویند استفاده می‌شود. افزودن الیاف به بتن باعث کاهش تردی و شکنندگی بتن می‌گردد [۲]. همچنین این الیاف باعث بهبود خواص مکانیکی بتن می‌گردد [۳]. تحقیقات گسترده‌ای بر روی خواص الیاف مختلف بر روی بتن‌ها صورت گرفته است [۴]. یکی از پرکاربردترین این الیاف، الیاف فولادی می‌باشد که در ایران، کارخانه‌های زیادی در حال تولید آن در طرح‌ها و اشکال مختلف می‌باشند. لیر و همکاران در سال ۲۰۱۱ پژوهشی در رابطه با خواص مکانیکی بتن‌های الیافی سبک ساخته شده با پومیس انجام داده و دریافته‌اند که بیشترین مقاومت کششی، مربوط به بتن حاوی ۱٪ حجمی الیاف فولادی با ۱۱۶٪ افزایش مقاومت می‌باشد [۵]. گانسن و همکاران نیز در سال ۲۰۱۳ پژوهشی در زمینه استحکام کششی و ترک در بتن‌های الیافی انجام داده و دریافته‌اند که ۱٪ الیاف فولادی بهترین عملکرد را در نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی ارائه می‌دهد [۶]. ونکاتسن و همکاران در سال ۲۰۱۵ در پژوهشی با موضوع رفتار خمشی تیرهای ساخته شده با بتن الیافی فولادی با مقاومت بالا دریافته‌اند که بیشترین مقاومت خمشی در حالت ۱٪ الیاف فولادی اتفاق می‌افتد که حدود ۳۰٪ افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد را نشان می‌دهد [۷].

در این پژوهش از ترکیب الیاف فولادی با بتن و ساخت نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای و قرص، با نسبت‌های ابعادی متغیر برای بررسی تاثیر این الیاف بر روی آن‌ها استفاده و آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و ضربه (وزنه افتان) بر روی آن‌ها صورت گرفته است. تمامی مراحل آزمایش در دانشگاه سمنان انجام گرفته شده است. با توجه به کارهای تحقیقاتی گذشته در این زمینه، مقدار ۱٪ حجمی برای استفاده از الیاف فولادی به عنوان بهینه‌ترین درصد در بتن انتخاب گردید. پس از بررسی آماری و تجزیه تحلیل داده‌های مربوط به این آزمایش‌ها، نسبت‌ها و روابطی برای مقایسه نمونه‌ها با یکدیگر و تبدیل مقاومت آن‌ها به نمونه‌های استاندارد ارائه گردیده است، همچنین نسبت‌هایی برای تبدیل مقاومت بتن‌های الیافی نیز ذکر گردیده است.

۲. رویه انجام آزمایش

در این پژوهش از دو طرح اختلاط بتن بدون الیاف یا شاهد (A1) و بتن الیافی با ۱٪ الیاف فولادی (A2)، با نسبت آب به سیمان ۰/۵ استفاده گردید. آزمایش مقاومت فشاری بر روی ۲۰ نمونه مکعبی (C10) به ابعاد ۱۰۰mm، ۵ نمونه مکعبی (C15) به ابعاد ۱۵۰mm و ۵ نمونه استوانه‌ای (Cy10) به ارتفاع ۲۰۰mm و قطر ۱۰۰mm و همچنین آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن نیز بر روی ۲۰ نمونه استوانه‌ای (Cy10) به ارتفاع ۲۰۰mm و قطر ۱۰۰mm و ۵ نمونه استوانه‌ای (Cy15) به ارتفاع ۳۰۰mm و قطر ۱۵۰mm برای هر طرح اختلاط انجام گردید. برای آزمایش مقاومت ضربه (وزنه افتان) نیز از ۲۰ عدد قرص بتنی (D15) به قطر ۱۵۰mm و ارتفاع ۶۴mm به ازای هر طرح اختلاط ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

۳. خصوصیات مصالح

در ساخت نمونه‌ها از سیمان تیپ ۲ تولید کارخانه سیمان شاهرود استفاده گردید. سنگدانه درشت دانه استفاده شده در ساخت بتن دارای حداکثر اندازه ۱۲ میلیمتر با وزن مخصوص ۲/۶ و جذب آب ۰/۵۶ درصد و همچنین ریزدانه استفاده شده دارای مدول ریزی ۳/۶ با وزن مخصوص ۲/۵۷ و درصد جذب آب ۱/۸۳ درصد می‌باشد. برای افزایش کارایی و روانی بتن و همچنین جبران کاهش اسلامپ به علت استفاده از الیاف، از فوق روان کننده ای با نام تجاری BPAS-R-361 استفاده گردید. برای افزایش مقاومت و دوام بتن از میکروسیلیس ساخت کارخانه فروسیلیس سمنان استفاده شد. مقدار مولفه های طرح اختلاط بر اساس استاندارد ACI-

211-89 تعیین گردید. درصد مصالح استفاده شده برای ساخت نمونه ها در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. الیاف استفاده شده در این پژوهش از نوع دو سر قلاب با طول ۳۵mm و به مقدار ۱ درصد حجمی بتن می باشد. مشخصات فنی این الیاف نیز در جدول شماره ۲ و تصویر آن ها در شکل ۱ نشان داده شده است. مراحل اختلاط مواد و ساخت بتن با این صور انجام گردید که در ابتدا شن و ماسه با یکدیگر در داخا میکسر مخلوط شده و سپس ۹۰ درصد آب به همراه فوق روان کننده حل شده در آن به مخلوط ماسه و سیمان اضافه گردید و ۳۰ ثانیه مخلوط شد. سپس مخلوط سیمان، میکروسیلیس و پودر سیلیس به میکسر اضافه شد و حدود ۱ دقیقه مخلوط گردید و در نهایت نیز ۱۰ درصد باقی مانده آب به میکسر اضافه و ۲ دقیقه مخلوط شد. پس از آن برای ساخت نمونه با بتن الیافی فولادی، الیاف به درون میکسر ریخته شده و حدود ۲ دقیقه دیگر مخلوط گردیدند. به علت استفاده از نسبت آب به سیمان زیاد و همچنین فوق روان کننده، الیاف به آسانی و بدون هر گونه جمع شدگی، به صورت یکنواخت و همگن در بتن پراکنده گردیدند.

جدول ۱- میزان مصالح استفاده شده در نمونه ها به ازای یک مترمکعب بتن.

نمونه بتن	آب (Kg)	فوق روان کننده (Kg)	سیمان (Kg)	شن (Kg)	ماسه (Kg)	میکروسیلیس (Kg)	پودر سیلیس (Kg)	الیاف فولادی (Kg)	w/c
بدون الیاف	۲۸۴/۹۷۱	۵/۹۹۵	۴۹۹/۹۵	۷۶۹/۹۲۳	۷۶۹/۹۲۳	۸۱/۴۹۱	۲۴/۹۹۷	۰/۰	۰/۵
الیافی	۲۸۴/۹۷۱	۵/۹۹۵	۴۹۹/۹۵	۷۶۹/۹۲۳	۷۶۹/۹۲۳	۸۱/۴۹۱	۲۴/۹۹۷	۷۷/۹۹۲	۰/۵

جدول ۲- مشخصات فنی الیاف فولادی.

نوع الیاف	جرم حجمی (Kg/m ³)	مقاومت کششی (MPa)	قطر (mm)	طول (mm)	L/D
فولادی دوسر قلاب	۷۸۵۰	۱۲۰۰	۱	۳۵	۳۵



شکل ۱- الیاف فولادی دو سر قلاب استفاده شده در این پژوهش

۴. تفسیر نتایج آزمایش‌ها

• مقاومت فشاری

جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری از دستگاه Toni Technik ساخت آلمان که در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان موجود می‌باشد استفاده گردید. نمونه‌های ساخته شده داخل دو کفه جک گذاشته شده و تحت نیروی فشاری قرار گرفته تا به مرحله شکست برسند. در شکل ۲ نمونه‌های مکعبی C10 و در شکل ۳ نمونه‌های استوانه‌ای Cy10 ساخته شده در این پژوهش، نشان داده شده است.



شکل ۳- نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰×۲۰cm



شکل ۲- نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰cm

مقاومت فشاری نمونه‌ها (f'_c) از رابطه ۱ محاسبه می‌شود که در آن P حداکثر بار قرائت شده از روی دستگاه بر حسب نیوتن و A سطح مقطع نمونه‌ها بر حسب میلی‌متر مربع می‌باشد.

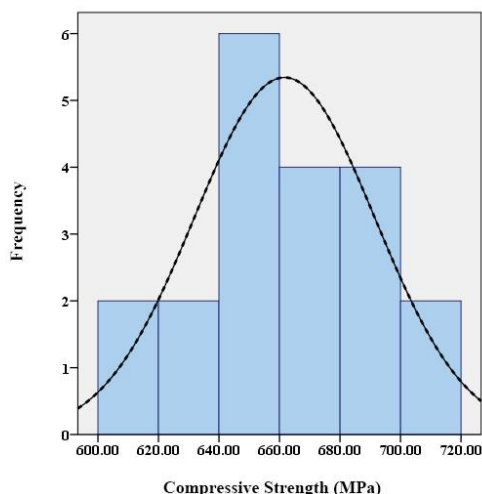
$$f'_c = \frac{P_{max}}{A} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

نتایج بدست آمده از انجام این آزمایش بر روی نمونه‌های مکعبی C10 و C15 و استوانه‌ای Cy10، در دو طرح اختلاط A1 (بدون الیاف) و A2 (با الیاف فولادی) در جدول ۳ و ۴ آورده شده است.

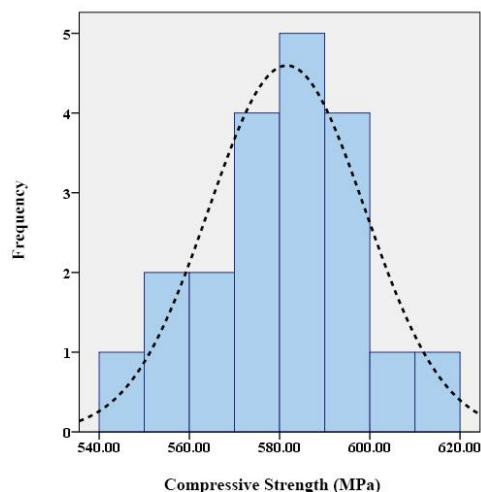
جدول ۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی C15 و استوانه‌ای Cy10

Cy10A2		Cy10A1		C15A2		C15A1		شماره نمونه
مقاومت (MPa)	بار نهایی (kN)	مقاومت (MPa)	بار نهایی (kN)	مقاومت (MPa)	بار نهایی (kN)	مقاومت (MPa)	بار نهایی (kN)	
۵۰/۲۶۵	۳۹۴/۵۸	۴۵/۷۹۶	۳۵۹/۵۰	۶۰/۷۹۸	۱۳۶۷/۹۵	۵۴/۰۴۳	۱۲۱۵/۹۶	۱
۴۹/۱۱۵	۳۸۵/۵۵	۴۷/۱۸۵	۳۷۰/۴۰	۶۰/۰۰۷	۱۳۵۰/۱۶	۵۲/۸۸۷	۱۱۸۹/۹۶	۲
۴۸/۱۵۸	۳۷۸/۰۴	۴۴/۰۱۵	۳۴۵/۵۲	۵۹/۶۵۹	۱۳۴۲/۳۲	۵۵/۷۳۵	۱۲۵۴/۰۳	۳
۵۳/۶۸۳	۴۲۱/۴۱	۴۷/۶۸۴	۳۷۴/۳۲	۵۶/۸۳۵	۱۲۷۸/۷۸	۵۳/۳۲۱	۱۱۹۹/۷۲	۴
۵۱/۹۴۸	۴۰۷/۷۹	۴۸/۶۳۹	۳۸۱/۸۲	۶۰/۷۱۶	۱۳۶۶/۱۲	۵۲/۶۰۶	۱۱۸۳/۶۴	۵
۵۰/۶۳	۳۹/۷۴۷	۴۶/۶۶	۳۶۶/۳۱	۵۹/۶۰۳	۱۳۴۱/۰۶	۵۳/۷۱۸	۱۲۰۸/۶۶	میانگین مقاومت

با توجه به نتایج بدست آمده در جداول ۳ و ۴، مشاهده می‌گردد که مقاومت فشاری در اثر افزودن ۱ درصد حجمی الیاف فولادی دوسر قلاب به بتن افزایش یافته است، درصد این افزایش در جدول ۵ گزارش گردیده است. همچنین با بررسی آماری نتایج جدول ۴ مشاهده می‌گردد که انحراف از معیار داده‌ها در نمونه‌های بدون الیاف برابر با ۱۷/۳۶ (MPa) و در نمونه‌های الیافی برابر با ۲۹/۸۶ (MPa) می‌باشد. همچنین ضریب تغییرات داده‌ها در نمونه بدون الیاف برابر با ۲/۹ درصد و در نمونه‌های الیافی برابر با ۴/۵ درصد می‌باشد. هیستوگرام مربوط به داده‌های نمونه‌های C10A2 و C10A1 در شکل ۵ مشاهده می‌شود.



ب- C10A2



الف- C10A1

شکل ۵- هیستوگرام مربوط به داده‌های آزمایش مقاومت فشاری

جدول ۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی C10

C10A2		C10A1		شماره نمونه
مقاومت (MPa)	بار نهایی (kN)	مقاومت (MPa)	بار نهایی (kN)	
۶۳/۲۰۸	۶۳۲/۰۸	۵۵/۸۱۸	۵۵۸/۱۸	۱
۶۵/۳۳۱	۶۵۳/۳۱	۵۷/۸۷۸	۵۷۸/۷۸	۲
۶۷/۶۵۷	۶۷۶/۵۷	۵۷/۹۳۹	۵۷۹/۳۹	۳
۶۶/۴۰۳	۶۶۴/۰۳	۵۴/۸۷۱	۵۴۸/۷۱	۴
۶۸/۳۴۲	۶۸۳/۴۲	۵۷/۶۱۲	۵۷۶/۱۲	۵
۶۹/۲۵۷	۶۹۲/۵۷	۵۹/۲۹۹	۵۹۲/۹۹	۶
۶۴/۱۰۹	۶۴۱/۰۹	۵۶/۱۴۱	۵۶۱/۴۱	۷
۶۵/۹۶۸	۶۵۹/۶۸	۶۱/۷۸۴	۶۱۷/۸۴	۸
۶۶/۳۴۸	۶۶۳/۴۸	۶۰/۵۴۹	۶۰۵/۴۹	۹
۶۵/۲۶۴	۶۵۲/۶۴	۵۸/۴۹۲	۵۸۴/۹۲	۱۰
۷۰/۰۳۱	۷۰۰/۳۱	۵۷/۷۷۳	۵۷۷/۷۳	۱۱
۶۰/۵۲۴	۶۰۵/۲۴	۵۸/۶۰۳	۵۸۶/۰۳	۱۲
۷۱/۷۶۸	۷۱۷/۶۸	۵۹/۸۴۱	۵۹۸/۴۱	۱۳
۷۱/۳۴۲	۷۱۳/۴۲	۵۸/۲۸۸	۵۸۲/۸۸	۱۴
۶۶/۸۷۰	۶۶۸/۷۰	۵۹/۵۲۳	۵۹۵/۲۳	۱۵
۵۹/۲۱۳	۵۹۲/۱۳	۵۶/۵۷۹	۵۶۵/۷۹	۱۶
۶۷/۲۰۹	۶۷۲/۰۹	۵۴/۶۳۹	۵۴۶/۳۹	۱۷
۶۰/۳۴۹	۶۰۳/۴۹	۵۹/۲۰۳	۵۹۲/۰۳	۱۸
۶۴/۷۴۰	۶۴۷/۴۰	۵۸/۷۳۴	۵۸۷/۳۴	۱۹
۶۹/۳۸۰	۶۹۳/۸۰	۵۹/۶۳۰	۵۹۶/۳۰	۲۰
۶۶/۱۶۶	۶۶۱/۶۶	۵۸/۱۶۰	۵۸۱/۶۰	میانگین مقاومت

جدول ۵- بررسی میانگین مقاومت نمونه ها در آزمایش مقاومت فشاری

استوانه ۲۰×۱۰		مکعب ۱۵×۱۵×۱۵		مکعب ۱۰×۱۰×۱۰		
Cy10A2	Cy10A1	C15A2	C15A1	C10A2	C10A1	
۵۰/۶۳	۴۶/۶۶	۵۹/۶۰۳	۵۳/۷۱۸	۶۶/۱۶۶	۵۸/۱۶۰	مقاومت فشاری متوسط (MPa)
۱/۰۸۵		۱/۱۰۹		۱/۱۳۷		نسبت مقاومت فشاری نمونه الیافی به نمونه بدون الیاف
۸/۵		۱۰/۹		۱۳/۷		درصد افزایش (%)

• مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن بر روی نمونه های Cy10 و Cy15 در دو طرح اختلاط بدون الیاف (A1) و با الیاف فولادی (A2) صورت گرفت و نتایج آن در جدول ۶ و ۷ گزارش شده است. نمونه های استوانه ای ساخته شده به صورت افقی داخل دو کفه جک گذاشته شده و تحت نیروی فشاری قرار گرفته تا به مرحله شکست برسند. شکل ۵ نمونه ای از این استوانه ها را پس از انجام آزمایش کششی دونیم شدن در داخل جک نشان می دهد. برای محاسبه مقاومت کششی دونیم شدن نمونه ها از رابطه ۲ استفاده می گردد که در آن P حداکثر بار قرائت شده از روی دستگاه بر حسب نیوتن و L و D به ترتیب طول و قطر نمونه ها بر حسب میلی متر می باشد.

$$f_t = \frac{2 P_{max}}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

مقاومت کششی نمونه های استوانه ای



ب- نمونه با ۱٪ الیاف فولادی



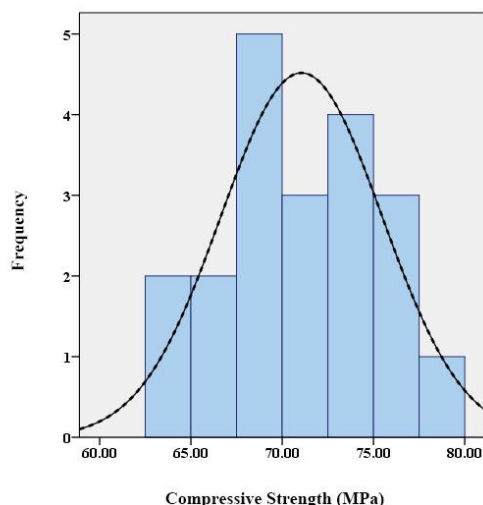
الف- نمونه بدون الیاف (شاهد)

شکل ۵- نمونه استوانه ای پس از انجام آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن

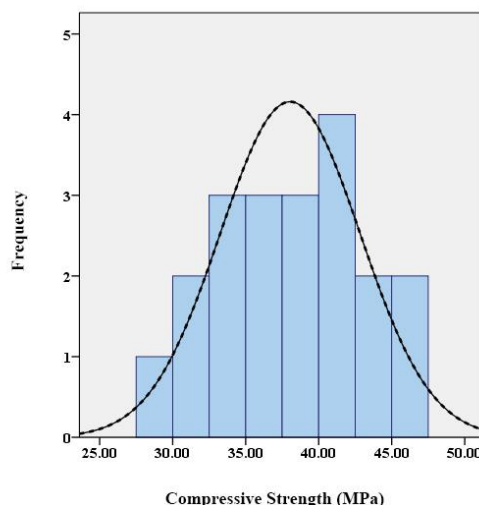
جدول ۶- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای Cy15

Cy15A2		Cy15A1		شماره نمونه
مقاومت (MPa)	بار نهایی (kN)	مقاومت (MPa)	بار نهایی (kN)	
۶/۴۵۹	۴۵۶/۳۴	۴/۲۳۱	۲۹۸/۹۵	۱
۶/۳۲۸	۴۴۷/۱	۳/۶۴۲	۲۵۷/۲۹	۲
۶/۶۴۹	۴۶۹/۷۷	۳/۵۲۰	۲۴۸/۷۲	۳
۶/۷۰۲	۴۷۳/۴۸	۳/۷۵۵	۲۶۵/۳	۴
۶/۳۲۶	۴۴۶/۹	۳/۱۰۴	۲۱۹/۲۸	۵
۶/۴۹	۴۵/۸۷	۳/۶۵۱	۲۵۷/۹۱	میانگین مقاومت

نتایج حاصل از بررسی میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها در جدول ۸ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد درصد افزایش مقاومت کششی در استوانه ۲۰×۱۰، به میزان ۸/۹ بیشتر از درصد افزایش مقاومت کششی در استوانه ۳۰×۱۵ می‌باشد. همچنین با بررسی آماری نتایج جدول ۷ مشاهده می‌گردد که انحراف از معیار داده‌ها در نمونه‌های بدون الیاف برابر با (MPa) ۴/۸۰ و در نمونه‌های الیافی برابر با (MPa) ۴/۴۲ می‌باشد. همچنین ضریب تغییرات داده‌ها در نمونه بدون الیاف برابر با ۱۲/۶ درصد و در نمونه‌های الیافی برابر با ۶/۲ درصد می‌باشد. هیستوگرام مربوط به داده‌های نمونه‌های C10A2 و C10A1 در شکل ۶ مشاهده می‌گردد.



ب- Cy10A2



الف- Cy10A1

شکل ۶- هیستوگرام مربوط به داده‌های آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن

جدول ۷- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای Cy10

Cy10A2		Cy10A1		شماره نمونه
مقاومت (MPa)	بار نهایی (kN)	مقاومت (MPa)	بار نهایی (kN)	
۶/۴۰۰	۲۰۰/۹۵	۲/۹۵۸	۹۲/۸۸	۱
۷/۶۰۶	۲۳۸/۸۲	۴/۲۹۰	۱۳۴/۷	۲
۷/۱۲۶	۲۲۳/۷۶	۴/۲۲۵	۱۳۲/۶۷	۳
۶/۹۶۹	۲۱۸/۸۴	۴/۳۵۴	۱۳۶/۷۳	۴
۶/۸۹۱	۲۱۶/۳۹	۳/۴۸۰	۱۰۹/۲۸	۵
۷/۹۹۶	۲۵۱/۰۸	۴/۰۳۹	۱۲۶/۸۴	۶
۷/۳۰۴	۲۲۹/۳۶	۴/۰۱۰	۱۲۵/۹۱	۷
۶/۳۵۳	۱۱۹/۴۸	۴/۶۳۴	۱۴۵/۵۱	۸
۶/۸۸۰	۲۱۶/۰۳	۳/۱۳۲	۹۸/۳۶	۹
۷/۵۷۲	۲۳۷/۷۷	۳/۳۰۱	۱۰۳/۶۶	۱۰
۷/۲۹۳	۲۲۹/۰۱	۲/۹۹۷	۹۴/۱	۱۱
۷/۴۸۱	۲۳۴/۸۹	۳/۷۵۲	۱۱۷/۸۲	۱۲
۶/۵۲۰	۲۰۴/۷۳	۳/۳۶۶	۱۰۵/۶۹	۱۳
۷/۶۳۰	۲۳۹/۵۷	۳/۱۳۱	۹۸/۳	۱۴
۷/۱۶۹	۲۲۵/۱۲	۳/۷۳۶	۱۱۷/۳	۱۵
۶/۶۴۴	۲۰۸/۶۳	۳/۹۶۱	۱۲۴/۳۹	۱۶
۶/۹۲۳	۲۱۷/۳۸	۳/۸۰۰	۱۱۹/۳۲	۱۷
۷/۰۶۰	۲۲۱/۶۹	۳/۹۰۵	۱۲۲/۶۱	۱۸
۷/۴۴۳	۲۳۳/۷۱	۴/۴۹۱	۱۴۱/۰۲	۱۹
۶/۸۵۳	۲۱۵/۱۹	۴/۵۲۹	۱۴۲/۲۲	۲۰
۷/۱۰۶	۲۲۳/۱۲	۳/۸۰۵	۱۱۹/۴۷	میانگین مقاومت

جدول ۸- بررسی میانگین مقاومت نمونه ها در آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن

استوانه ۳۰×۱۵		استوانه ۲۰×۱۰		
Cy15A2	Cy15A1	Cy10A2	Cy10A1	
۶/۴۹۳	۳/۶۵۱	۷/۱۰۶	۳/۸۰۵	مقاومت فشاری متوسط (MPa)
۱/۷۷۸		۱/۸۶۷		نسبت مقاومت فشاری نمونه الیافی به نمونه بدون الیاف
۷۷/۸		۸۶/۷		درصد افزایش (/.)

• مقاومت ضربه (سقوط افتان)

دستگاه این آزمایش طبق استاندارد ACI544 از یک چکش به جرم ۴/۵۴ کیلوگرم، یک گوی فولادی به قطر ۶۳/۵ میلیمتر و همچنین یک نگهدارنده فولادی برای جلوگیری از تکان خوردن گوی از محل اعمال وزنه تشکیل شده است. چگونگی این آزمایش به این گونه است که چکش ۴،۵۴ کیلوگرمی از ارتفاع ۴۵/۷ سانتی متری به طور متناوب روی گوی فولادی که در مرکز دایره سطح بالایی نمونه استوانه‌ای قرار دارد رها می‌شود. برای کاهش اثر گیرداری و اصطکاک بین نمونه صفحه‌ی زیرین با گریس چرب می‌شود. تعداد ضربات مورد نیاز برای ایجاد اولین ترک را بر روی سطح نمونه را مقاومت ضربه‌ای اولین ترک و همچنین تعداد ضربات مورد نیاز برای ایجاد ترک گسیختگی نهایی مقاومت ضربه‌ای نهایی نامیده می‌شود. نتایج مقاومت (تعداد ضربات) ترک اولیه و ترک انهدام نمونه‌های DA1 و DA2 در جدول ۹ گزارش شده است. نمونه‌های قرص ساخته شده برای انجام این آزمایش در شکل ۷ مشاهده می‌شود همچنین در شکل ۸ نمونه دیسک‌های بتنی پس از انجام آزمایش مقاومت ضربه آورده شده است.



شکل ۷- نمونه‌های قرص ساخته شده برای انجام آزمایش وزنه افتان



ب- نمونه بتن با ۱٪ الیاف فولادی



الف- نمونه با بتن بدون الیاف

شکل ۸- نمونه دیسک‌های بتنی پس از انجام آزمایش مقاومت ضربه (وزنه افتان)

جدول ۹- نتایج آزمایش مقاومت ضربه قرص‌های بتنی DA1 و DA2

	شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	میانگین
DA1	ترک اول	۴	۵	۴	۹	۶	۴	۵	۴	۵	۷	۵	۴	۴	۶	۵	۶	۴	۶	۵	۸	۵/۳
	ترک انهدام	۵	۶	۵	۱۱	۷	۵	۷	۶	۶	۸	۷	۵	۵	۸	۶	۷	۵	۷	۶	۹	۶/۵۵
DA2	ترک اول	۱۲	۲۵	۱۳	۱۷	۱۹	۱۱	۸	۲۰	۱۵	۱۹	۱۸	۳۰	۲۳	۱۹	۱۲	۱۲	۱۶	۲۱	۱۷	۱۶	۱۷/۱۵
	ترک انهدام	۳۰	۵۷	۴۱	۳۹	۶۴	۴۵	۴۲	۷۶	۳۶	۴۳	۴۸	۶۶	۵۸	۴۹	۴۵	۴۳	۴۸	۵۶	۴۹	۴۴	۴۸/۹۵

همانطور که مشاهده می‌گردد، افزودن الیاف فولادی به بتن باعث افزایش ۳/۲۳۵ برابری مقاومت ترک اولیه و ۷/۴۷۳ برابری مقاومت ترک انهدام در نمونه‌ها گردیده است و این موضوع تاثیر چشمگیر الیاف فولادی بر مقاومت ضربه‌ای بتن را چه در ایجاد ترک اولیه و چه در ایجاد ترک انهدام نشان می‌دهد.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و ضربه مشاهده می‌گردد که الیاف فولادی باعث بهبود عملکرد بتن در تمامی این موارد شده‌اند. همچنین هم در آزمایش مقاومت فشاری و هم در آزمایش مقاومت کششی، با افزایش ابعاد نمونه، میزان تاثیر الیاف فولادی نسبت به نمونه بدون الیاف با ابعاد متناظر، کاهش یافته است. اما با بررسی تاثیر ابعادی در نمونه‌ها با الیاف فولادی مشاهده می‌گردد که اختلاف مقاومتی ایجاد شده ناشی از تفاوت ابعادی، بیش از نمونه‌های بدون الیاف می‌باشد. در نهایت برای تبدیل مقاومت‌های فشاری و کششی نمونه‌های غیر استاندارد به استاندارد، با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، روابط زیر پیشنهاد می‌گردد.

جدول ۱۰- ضرایب تبدیل نمونه‌ها به یکدیگر در آزمایش مقاومت فشاری

بدون الیاف	با الیاف فولادی	
۵۸/۱۶	۶۶/۱۶۶	FC10 = مقاومت فشاری مکعب ۱۰ cm (MPa)
۵۳/۷۰۹	۵۹/۶۰۳	FC15 = مقاومت فشاری مکعب ۱۵ cm (MPa)
۴۶/۶۶۴	۵۰/۶۳۴	FCy10 = مقاومت فشاری استوانه ۲۰×۱۰ cm (MPa)
۳/۸۰۵	۷/۱۰۶	Ft Cy10 = مقاومت کششی استوانه ۲۰×۱۰ cm (MPa)
۳/۶۵۱	۶/۴۹۳	FtCy15 = مقاومت کششی استوانه ۳۰×۱۵ cm (MPa)
۱/۰۸۲	۱/۱۱۰	$\frac{FC10}{FC15}$
۱/۱۵۰	۱/۱۷۷	$\frac{FC15}{FCy10}$
۱/۰۴۲	۱/۰۹۴	$\frac{F_tCy10}{F_tCy15}$

۶. مراجع

1. Yan, H., Sun, W., Chen, H. (1999). "The effect of silica fume and steel fiber on the dynamic mechanical performance of high-strength concrete". Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 3, Pages 423–426.
2. Banthia, N., Sappakittipakorn, M. (2007). "Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization". Cement and Concrete Research, Volume 37, Issue 9, Pages 1366–1372.
3. Andrzej, M., Brand, S. (2008). "Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 45 years of development in building and civil engineering". Composite Structures, Volume 66, Issues 1–3, Pages 3-9.
4. Teng, T., Chu, Y., Chang, F., Shen, B., Cheng, D. (2008). "Development and validation of numerical model of steel fiber reinforced concrete for high-velocity impact". Computational Materials Science, Volume 42, Issue 1, Pages 95–99.
5. Libre, N. A., Shekarchi, M., Mahoutian, M., Soroushian, P. (2011). "Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice". Construction and Building Materials, Vol. 25, No 5, pp. 2458-2464.
6. Ganesan, N., Indira, P.V., Sabeena, M.V. (2013). "Tension Stiffening and Cracking of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete". ACI materials journal, Vol. 110, pp. 715-721.
7. Venkatesan, K.R., Raghunath, P.N., Suguna, K. (2015). "Flexural Behavior of High Strength Steel Fibre Reinforced Concrete Beams". International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT), Vol. 4, No 1.