



Laboratory Investigation of the Effect of Steel Fibers at Different Volume Fractions on the Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete

Allah dad Ahmadi *

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Payam Noor University (PUN), Tehran, Iran.

Babak mansoori

2 Department of Civil Engineering, Fir. C, Islamic Azad University, Firoozabad, Iran

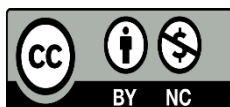
arastoo588@gmail.com

Keywords:

Steel fibers,
mix design,
fiber-reinforced concrete,
mechanical properties of
concrete,
fiber aspect ratio

Abstract

This study investigates the mechanical properties of concrete containing hooked-end steel fibers at various fiber volume fractions. For this purpose, concrete mix designs were prepared without fibers and with different volume fractions of hooked-end fibers (0.6%, 0.8%, 0.9%, and 1.2%). The investigations have shown that several variables influence the mechanical characteristics of steel fiber reinforced concrete, including the type and percentage of fibers used, the aspect ratio of the fibers (length/diameter), the matrix strength, and the size of the aggregates. If a high amount of fibers (more than 2% by volume or an aspect ratio greater than 100) is used, or if the fibers are added rapidly to a mix that lacks proper workability, balling occurs, which reduces the strength of the concrete. The mechanical parameters identified for evaluating fiber-reinforced concrete behavior are compressive and tensile strengths. For each mix, cubic specimens with dimensions of 15×15×15 cm were prepared and cured for compressive strength testing, while cylindrical specimens with dimensions of 30×15 cm were prepared for tensile strength testing. The evaluation of compressive and tensile strengths was carried out at the age of 28 days, which accords with structural design standards. The results indicate that with an increase in steel fiber content, the tensile strength of concrete increases such that adding 1.2% steel fibers by volume resulted in a 32% increase in tensile strength. However, increasing the content of steel fibers has little effect on the compressive strength of concrete, and with a higher fiber content, the compressive strength tends to decrease. Specifically, adding 1.2% steel fibers led to a 1.9% decrease in compressive strength.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

این نشریه تحت قانون بین‌المللی کپی‌رایت Creative Commons: BY-NC است.

بررسی آزمایشگاهی اثر الیاف فولادی با درصدهای حجمی مختلف بر مشخصات مکانیکی بتن های الیافی

الله داد احمدی*

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیامنور، تهران، ایران

بابک منصوری

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران

arastoo588@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۲۰ فروردین ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: ۲۵ آذر ۱۴۰۳

چکیده

این تحقیق به بررسی مشخصات مکانیکی بتن های حاوی الیاف فولادی قلابدار با درصدهای حجمی مختلف الیاف پرداخته است. برای این منظور، طرح های اختلاط بتن بدون الیاف و با درصدهای حجمی مختلف الیاف قلابدار با مقادیر $(0/6, 0/8, 0/9, 1/2)$ درصد ساخته شده است. بررسی ها نشان داده است چندین متغیر بر خصوصیات مکانیکی بتن با الیاف فولادی تاثیر گذاشته است، این متغیرها شامل: نوع و درصد الیاف مصرفی، نسبت ظاهری الیاف (قطر/طول)، مقاومت ماتریس و اندازه سنگدانه ها می باشد. در صورت استفاده از مقادیر زیاد الیاف (بیش از ۲ درصد حجمی یا نسبت ظاهری الیاف بیش از ۱۰۰ درصد) و یا اضافه کردن فوری الیاف به مخلوطی که کارایی کافی ندارد، مشکل گلوله ای شدن به وجود آمده و باعث کاهش مقاومت بتن می گردد. پارامترهای مقاومتی به منظور شناسایی رفتار بتن الیافی شامل: مقاومت های فشاری و کششی هستند. برای هر طرح، نمونه های مکعبی به ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی متر برای مقاومت فشاری و نمونه های استوانه های به ابعاد 15×30 سانتی متر برای مقاومت کششی تهیه و عمل آوری شده است همچنین ارزیابی مقاومت فشاری و کششی نمونه ها در سن ۲۸ روزه بر اساس مبنای طراحی سازه ها می باشد انجام شده است. بررسی نتایج نشان داده است، با افزایش الیاف فولادی مقاومت کششی بتن افزایش می یابد بنحوی که اضافه کردن الیاف فولادی به میزان ۱/۲ درصد حجمی بتن، مقاومت کششی بتن ۳۲ درصد افزایش یافت. اما افزایش الیاف فولادی تاثیر اندکی بر افزایش مقاومت فشاری بتن دارد و با افزایش میزان الیاف فولادی مقاومت فشاری بتن کمتر می شود. بنحوی که ضافه کردن الیاف فولادی به میزان ۱/۲ درصد، مقاومت فشاری بتن ۱/۹ درصد کاهش یافت.

کلیدواژگان: الیاف فولادی، طرح اختلاط، بتن الیافی، مشخصات مکانیکی بتن، نسبت ظاهری الیاف

۱- مقدمه

بتن یکی از پرمصرف‌ترین مواد در صنعت ساخت‌وساز است که تحت فشار عملکرد خوبی دارد، اما دارای ضعف‌هایی از جمله مقاومت کششی و ظرفیت کرنشی کم در هنگام گسیختگی همچنین رفتار ترد و غیرقابل پیش‌بینی در هنگام بارگذاری است. برای بهبود رفتار و مشخصات مکانیکی بتن، از آرماتور و یا پیش‌تیندگی برای مسلح کردن بتن استفاده می‌شود. در بتن مسلح، کرنش گسیختگی کششی بتن بسیار کوچک‌تر از کرنش تسلیم آرماتورها بوده و به همین دلیل پیش از انتقال بار قابل توجه به آرماتورها، بتن دچار ترک‌خوردگی می‌گردد علاوه بر تحمل تنش‌های کششی نظیر بار نهایی وارد شده به عضو بتن مسلح، نقش دیگر آرماتورها محدود نمودن عرض ترک‌های به وجود آمده در سازه تحت شرایط بهره‌برداری است. تکنولوژی بتن پر مقاومت توسعه‌ای جدید در صنعت ساخت سازه‌های بتنی محسوب می‌شود در بتن سخت شده، مقاومت و دوام دو عامل اصلی بوده و هر چه مقاومت فشاری بتن بیشتر می‌شود بتن تردتر شده و در نتیجه مقاومت کششی آن، به نسبت افزایش مقاومت فشاری، افزایش نمی‌یابد و نیز از تحمل کرنش پایین‌تر برخوردار است. بدین دلیل نیاز به استفاده از الیاف در بتن پر مقاومت کاملاً مشهود است. جهت افزایش مقاومت کششی و جلوگیری از گسترش ترک و به‌ویژه افزایش نرمی از الیاف در بتن استفاده می‌شود. مقدار افزایش یا تغییر این مقاومت‌ها بستگی به مقاومت بتن بدون الیاف، شکل الیاف و درصد الیاف دارد [۱].

محققان در سرتاسر جهان از روش‌ها و فناوری‌های نوین برای بهبود خصوصیات بتن بهره می‌برند. یکی از مواد جدید و پرکاربرد در صنعت ساخت‌وساز، الیاف تقویت‌کننده است که می‌تواند از جنس فولاد، شیشه، مواد طبیعی یا مواد مصنوعی باشد. هدف از استفاده از الیاف در بتن، افزایش مقاومت کششی و جلوگیری از توسعه ترک‌ها است. میزان تأثیرگذاری این الیاف بر مقاومت‌ها بستگی به مقاومت بتن بدون الیاف، شکل الیاف و درصد حجمی آن‌ها دارد. در سال‌های اخیر، استفاده از بتن الیافی در ساخت سازه‌ها روبه‌افزایش است. غالب تحقیقات نشان می‌دهند که توزیع تصادفی الیاف، روشی مناسب برای بهبود خواص مکانیکی بتن محسوب می‌شود. بخشی از این پژوهش‌ها به مقایسه انواع الیاف از نظر جنس، نوع، شکل، درصد حجمی و عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف اختصاص یافته است. دسته دیگر بر اثر نوع الیاف بر خواص مکانیکی بتن و مقایسه این انواع تمرکز دارند، درحالی‌که پژوهش‌های دیگری به دنبال یافتن کاربردهای نوین برای الیاف و ارائه روابط و مدل‌های مختلف مربوط به بتن الیافی هستند. گروهی هم با افزودن افزودنی‌های فولادی، آزمایش‌های تخصصی خود را انجام داده‌اند [۳].

در سال ۲۰۱۷ با بررسی خستگی در آزمایش بارگذاری کشش مستقیم در بتن الیافی دریافتند که نحوه تغییر شکل در بتن الیافی و بتن معمولی شبیه یکدیگر است و به رابطه‌ای بین کرنش ثانویه و عمرخستگی برای بتن معمولی و بتن الیافی پی برده‌اند و همچنین تحت اثر بارگذاری یکسان عمر خستگی با افزایش درصد حجمی الیاف در بتن (از صفر تا ۱/۵ درصد)، افزایش می‌یابد [۳]. در سال ۲۰۱۸ بر روی رفتار بتن مسلح حاوی الیاف فولادی درشت بازیافتی تحقیق نموده‌اند و به نتیجه رسیده‌اند که هر چند الیاف مقاومت پیچشی و تراکم بتن را نسبت به بتن معمولی بالا می‌برند، لیکن با افزایش این الیاف مقاومت فشاری و پیچشی بتن حاوی الیاف کاهش می‌یابد [۴]. در سال ۲۰۱۹ به مطالعه تأثیر الیاف فولاد و کربن در توانایی جلوگیری از ترک بتن تحت بارهای خمشی پرداخته‌اند و دریافت‌اند که استفاده از الیاف درشت باعث تردی بتن و ترک‌های مضاعف گردیده است لیکن طاقت نمونه در برابر ایجاد ترک‌های اولیه در اثر خمش بالا می‌رود [۵]. در سال ۲۰۲۲ اثر مقادیر مختلف الیاف فولادی بین ۲۵/۰ تا ۵/۱ درصد حجمی بر خواص مکانیکی و دوام بتن با مقاومت بالا بررسی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد افزودن الیاف فولادی، مقاومت خمشی را تا ۳۸ درصد و مقاومت کششی را تا ۲۷ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش می‌دهد. همچنین بهترین عملکرد مربوط به ۱ درصد حجمی الیاف بود و مقاومت فشاری تقریباً ۱۲ درصد بهبود یافت [۶]. در سال ۲۰۲۲ تأثیر ترکیبی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن بر رفتار خمشی و مقاومت شکست بتن فوق پر مقاومت بررسی شد. نتایج نشان داد با به‌کارگیری همزمان ۵/۱ درصد الیاف فولادی و ۵/۰ درصد پلی‌پروپیلن، مقاومت برشی و شاخص چقرمگی نسبت به نمونه فاقد الیاف تا ۴۵ درصد افزایش یافته و کنترل بهتری بر ریزترک‌ها و افت بار پس از شکست اولیه ایجاد می‌شود [۷]. در سال ۲۰۲۳ مقاومت ضربه‌ای تیرهای بتن مسلح شده با الیاف فولادی با استفاده از آزمون افت وزنه و آنالیز ریزساختاری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از الیاف فولادی قلاب‌دار با درصدهای مختلف به‌ویژه ۱ درصد، ظرفیت جذب انرژی را تا ۵/۲ برابر نسبت به بتن معمولی افزایش داده و زمان شروع و رشد ترک‌ها را به‌طور قابل ملاحظه‌ای به تعویق انداخت [۸]. در سال ۲۰۲۴ بررسی بتن حاوی الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و نانوسیلیس نشان داد افزودن این مواد موجب افزایش چشمگیر مقاومت‌های خمشی، فشاری و کششی بتن می‌شود. بهترین عملکرد مربوط به طرح شامل ۷ درصد الیاف فولادی و ۳ درصد نانوسیلیس بود که نسبت به نمونه شاهد، افزایش قابل توجه مقاومت‌ها را نشان داد و افزودن نانوسیلیس باعث کاهش جذب آب بتن گردید [۹].

۲- بتن الیافی

بتن ساخته شده از سیمان، آب، شن، ماسه و الیاف تفکیک شده و مجزا بتن الیافی نامیده می‌شود. پخش تصادفی الیاف در بتن، با بهبود خصوصیات مکانیکی بتن، به عنوان یک راه حل مؤثر و اقتصادی برای کاهش بارهای خستگی و انتقال نیروی استاتیکی مطرح شده است. الیاف برای کنترل و جلوگیری از تشکیل ریز ترک‌ها، که در اثر تغییرات حجمی ناشی از انقباض و تنش‌های حرارتی بوجود می‌آیند باعث افزایش مقاومت کششی، خمشی، فشاری، قابلیت جذب انرژی و تردی بتن می‌شوند.

ایده اضافه کردن الیاف به مخلوط‌های ترد و شکننده که توان کششی ناچیزی دارند از روزگاران قدیم وجود داشته است. ایرانیان باستان از کاه برای مسلح کردن آجر و خشت‌های گلی استفاده می‌کردند. علاوه بر این از الیاف طبیعی همانند پنبه و موی اسب نیز برای تسلیح بناها و تقویت مصالح چسباننده در معماری باستانی ایران استفاده می‌شده است. در واقع بتن الیافی نوع پیشرفته این تکنولوژی است که الیاف طبیعی و مصنوعی جدید، جانشین کاه و سیمان جانشین گل به کاررفته در ترکیب کاهگل شده‌اند.

آیین نامه ASTM C1116 (مشخصات استاندارد برای بتن تقویت شده با الیاف)، بتن تقویت شده با الیاف را بر اساس نوع ماده الیاف مورد استفاده، به چهار دسته مختلف طبقه بندی می‌کند:

نوع I- بتن تقویت شده با الیاف فولادی: این الیاف شامل الیاف فولاد ضدزنگ، فولاد آلیاژی یا الیاف فولاد کربنی مطابق با استاندارد ASTM A820 است.

نوع II - بتن تقویت شده با الیاف شیشه: شامل الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیایی (AR) مطابق با استاندارد ASTM C1666

نوع III - بتن تقویت شده با الیاف مصنوعی: شامل الیاف مصنوعی از جمله الیاف پلی الفین است. الیاف پلی الفین باید مطابق با ASTM D7508 باشد.

نوع IV- بتن تقویت شده با الیاف طبیعی: شامل الیاف طبیعی از جمله الیاف سلولز است. الیاف سلولز باید مطابق با ASTM D7357 باشند. بتن الیافی در حقیقت نوعی کامپوزیت است که با به کارگیری الیاف تقویت کننده داخل مخلوط بتن، مقاومت کششی و فشاری آن، به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. این ترکیب کامپوزیتی، یکپارچگی و پیوستگی مناسبی داشته و امکان استفاده از بتن به عنوان یک ماده شکل پذیر جهت تولید سطوح مقاوم پړانچنا را فراهم می‌آورد. بتن الیافی از قابلیت جذب انرژی بالایی نیز برخوردار است و تحت اثر بارهای ضربه ای به راحتی از هم پاشیده نمی‌شود [۱۰]. اصلی ترین عواملی که عملکرد مواد کامپوزیتی را کنترل می‌کنند، خصوصیات فیزیکی الیاف و ماتریس و مقاومت پیوند بین الیاف و ماتریس است. بتن‌های الیافی برای شکل‌های مقطع نازک که قرار دادن صحیح آرماتورهای معمولی بسیار دشوار است، مناسب ترین هستند.

در خصوص استفاده از بتن الیافی موارد متعددی وجود دارد که بیشتر آن‌ها به افزایش استحکام کششی بتن در برابر شرایط مختلف بر می‌گردد. اگرچه هر کدام از مواد الیافی ممکن است تأثیر خاص خود را داشته باشد، اما مزایای کلی این نوع بتن پرکاربرد عبارتست از: افزایش مقاومت کششی بتن در برابر ضربه و تنش، کاهش حفره‌های هوا در داخل بتن و از بین بردن آب محصور شده در قسمت‌های داخلی بتن، افزایش دوام بتن، افزایش مقاومت بتن در برابر خزش و بهبود طول عمر بتن الیافی مانند شیشه مقاومت بتن در برابر خزش را افزایش می‌دهند. بنابراین، نحوه جهت گیری الیاف و همچنین حجم الیاف استفاده شده تأثیر قابل توجهی در عملکرد بتن در برابر خزش دارند. استفاده از الیاف با مقاومت حرارتی مشابه با بتن باعث می‌شود که همزمان با افزایش مقاومت تنشی بتن، تنش حرارتی بتن نیز به شدت کاهش یابد و بتن الیافی کمتر تحت تأثیر تغییرات دمایی قرار گیرد. استفاده از مواد الیافی کوچک و هم اندازه باعث می‌شود که بتن الیافی ترک خوردگی کمتری داشته باشد و خصوصیات استاتیکی بتن را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. قابلیت ضربه پذیری و باربری بالا با حضور الیاف در این بتن باعث می‌شود که بتن در حالت ترک خورده نیز مقاومت بالایی از خود نشان دهد.

امروزه با استفاده از انواع الیاف شیشه، پلی پروپیلن، فولاد و بعضاً کربن، تولید انواع بتن‌های کامپوزیتی در کاربردهای مختلف صنعتی ممکن گردیده و به کارگیری آن‌ها در کشورهای پیشرفته دنیا، مورد قبول بخش ساختمان و عمران واقع شده است. بتن الیافی خواص مناسبی همچون شکل پذیری بالا، مقاومت فوق العاده، قابلیت جذب انرژی و پایداری در برابر ترک خوردن را دارا می‌باشد.

۲-۱- الیاف فولادی

امروزه در دنیا انواع بسیار متنوعی از الیاف برای کاربردهای گوناگون در بتن وجود دارد که یکی از پرکاربردترین آن‌ها، الیاف فولادی می‌باشد [۱۱]. در بیشتر اعضای سازه‌ای و غیر سازه‌ای الیاف فولادی بیشتر از انواع دیگر الیاف مورد استفاده قرار می‌گیرد. الیاف فولادی دارای طول‌های کوتاه و گسسته فولادی با نسبت ابعاد (نسبت طول به قطر) از حدود ۲۰ به ۱۰۰ و با مقاطع و پروفیل‌های متنوع است. بعضی از الیاف فولادی برای بهبود مقاومت در برابر خروج از ماتریس مبتنی بر سیمان، انتهای قلاب دارند. حجم الیاف فولاد مورد استفاده در بتن معمولاً از ۰.۲۵٪ تا ۲٪ است. الیاف فولادی دارای مدول الاستیسیته و کرنش شکست بالایی بوده که با توجه به قابلیت شکل پذیری مناسب و مقاومت کششی بالا از مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین نوع الیاف به حساب می‌آید [۱۲]. الیاف فولادی دارای اشکال متفاوتی است از جمله (مستقیم، صاف با انتهای قلابدار، موجدار و...) که جهت بهبود رفتار بتن قابل ساخت هستند.

الیاف فولادی جهت مسلح نمودن انواع بتن به عنوان جایگزین و یا مکمل آرماتورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصرف الیاف موجب بهبود

نوع IV: الیاف برش آسیاب^۵: این الیاف فولادی ساخته شده توسط یک روتور پرسرعت مجهز به صفحات مخصوص برش که مواد نمونه را از طریق تکنیک‌های مخصوص فرز خرد می‌کند. این امر منجر به الیافی با پیچ طولی مثلثی، سطح خشن، انتهای قلاب و پیچ خوردگی طولی نرم می‌شود.

نوع V: الیاف سیم سیم سرد شده اصلاح شده: این الیاف فولادی با برش سیم‌های کشیده سرد به الیاف کوتاه با توجه به طول تنظیم شده با چاقو، پانچ یا ابزار چرخشی ساخته می‌شود.

۲-۲- بتن الیاف فولادی

الیاف فولادی مورد استفاده در بتن الیافی مطابق استاندارد ACI 544 [۱۳] باید نسبت طول به ضخامت (L/d) در محدوده ۲۰ تا ۱۰۰ داشته باشد تا بتواند به‌طور مناسب در بتن توزیع شود و همچنین الیاف فولادی اضافه‌شده به بتن درجا باید در محدوده ۰/۲۵ تا ۲ درصد حجمی بتن باشد تا ساخت بتن تسهیل شود. در صورت استفاده از مقادیر زیاد الیاف (بیش از ۲ درصد حجمی یا نسبت طول به قطر بالا) و یا اضافه کردن خیلی سریع الیاف به مخلوطی که آب کافی و یا کارایی کافی ندارد مشکل گلوله ای شدن به وجود می‌آید [۱۴]. در این پدیده الیاف نزدیک به هم جمع شده، سبب کاهش کارایی مخلوط بتن و در نتیجه کاهش مقاومت و نرمی بتن سخت شده می‌گردد.

بطور کلی الیاف فولادی می‌توانند نقش مکملی برای میلگرد داشته باشند. الیاف فولادی با پخش ترک‌ها مقابله می‌کنند و مقاومت بتن را در برابر خستگی، ضربه، جمع شدگی و تنشهای حرارتی افزایش می‌دهند. الیاف فولادی می‌توانند در همه مدهای شکست روی خواص مکانیکی بتن تأثیر بگذارند. مکانیزم تقویت بتن بوسیله الیاف فولادی را می‌توان بصورت زیر توجیه کرد:

تنش‌ها بوسیله برش محیطی و در صورتیکه رویه الیاف آچاردار باشد بوسیله مقاومت چسبندگی (درون سطحی) از ماتریس بتن به الیاف منتقل می‌شود. بنابراین مادامی که ماتریس بتن ترک نخورده است، تنش کششی بین الیاف و ماتریس تقسیم می‌شود. پس از ایجاد ترک، همه تنش به الیاف انتقال می‌یابد.

امروزه بتن الیاف فولادی کاربردهای صنعتی فراوانی دارد. به طور مثال، در ساخت کف سالن‌های صنعتی می‌توان از این نوع بتن به جای بتن مسلح متداول استفاده کرد. این نوع بتن از بهترین مصالح مورد استفاده برای مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی برای حفظ یکپارچگی دیوار و همچنین ساخت بناهای مقاوم به ضربه، همچون سازه پناهگاه‌ها و انبارهای نگهداری مواد منفجره به شمار می‌رود. مواردی دیگری از به کارگیری این نوع بتن، ساخت قطعات پیش‌ساخته ساختمانی و یا پاشیدن بتن روی سطوح انحنادار همچون تونل‌ها است.

عملکرد و مقاومت‌های مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری، خمشی، کششی، برشی، شکل پذیری، جذب انرژی، خستگی و مقاومت در برابر ضربه خواهد شد. وجود الیاف فولادی در بتن نخست موجب جلوگیری از ایجاد و گسترش ترک‌ها در سنین اولیه یا آغاز بارگذاری شده و در ادامه نیز پس از وقوع ترک‌ها ظرفیت بابری همچنان وجود داشته و مانند پلی میان دو طرف ترک‌ها در انتقال ترک‌ها عمل می‌نماید. الیاف فولادی دارای انواع مختلفی برحسب شکل مقطع شامل: دایره‌ای، مستطیلی، نیم‌دایره‌ای و مقاطع نامنظم یا متغییر در طول هستند. همچنین این الیاف می‌توانند صاف و یا خمیده با ابعاد مختلف باشند. برای توصیف این پارامتر، از فاکتوری به نام نسبت تصویر^۱ استفاده می‌شود. این پارامتر، حاصل تقسیم طول به قطر (L/d) است (در صورتی که مقطع دایره ای نباشد، میتوان قطر دایره معادل با سطح مقطع مورد نظر را محاسبه نمود). همچنین این الیاف در دو حالت قلابدار و ساده موجود هستند. نوع قلابدار آن بسیار بهتر از نوع ساده آن است و به لحاظ کیفیتی و کمیتی موجب بهبود خواص بیشتری از بتن می‌شود. همچنین این نوع شکل الیاف (دو سر قلاب دار) موجب توزیع یکنواخت‌تر آن‌ها در حجم بتن و حین اختلاط گردیده و اتصال بهتر حجم اجزاء بتن سخت شده شامل سنگدانه‌ها و خمیر سیمان را در هنگام بارگذاری فراهم می‌کند.

امروزه الیاف فولادی کاربردهای صنعتی فراوانی دارد. به طور مثال، در ساخت کف سالن‌های صنعتی می‌توان از این نوع بتن به جای بتن مسلح متداول استفاده کرد. این نوع بتن از بهترین مصالح مورد استفاده برای مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی برای حفظ یکپارچگی دیوار و همچنین ساخت بناهای مقاوم به ضربه، همچون سازه پناهگاه‌ها و انبارهای نگهداری مواد منفجره به شمار می‌رود. مواردی دیگری از به کارگیری این نوع بتن، ساخت قطعات پیش‌ساخته ساختمانی و یا پاشیدن بتن روی سطوح انحنادار همچون تونل‌ها است.

الیاف فولادی مطابق مشخصات استاندارد ASTM A820 پنج نوع می‌باشد:

- نوع I: الیاف سیمی سرد کشیده شده^۲: این نوع در دسترس ترین محصول تجاری که از سیم‌های فولادی کشیده شده تولید می‌شود.
- نوع II: الیاف ورق برش خورده^۳: همانطور که از نام آن پیداست این الیاف فولادی به طور جانبی از ورق‌های فولادی بریده می‌شود.
- نوع III: الیاف استخراج شده از مذاب^۴: این الیاف فولادی با تکنیک نسبتاً پیچیده ای تولید می‌شود که در آن از چرخ دوار برای بلند کردن فلز از سطح فلز مذاب با عمل مویرگی استفاده می‌شود. سپس فلز مذاب استخراج شده به سرعت در الیاف منجمد شده و از چرخ خارج می‌شود. الیاف بدست آمده دارای مقطعی به شکل هلال است.

¹ Aspect Ratio

² Cold-drawn wire fibers

³ Cut sheet fibers

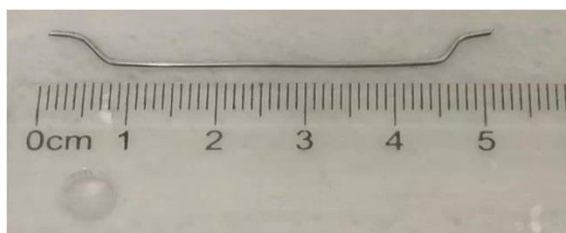
⁴ Melt-extracted fibers

⁵ Mill cut fibers

۳- برنامه آزمایشگاهی و روش تحقیق

تحقیق حاضر با هدف بررسی تاثیر میزان الیاف و رده مقاومتی بتن بر پارامترهای مقاومت بتن الیافی، با مطالعات آزمایشگاهی جهت تعیین مقاومت کششی و مقاومت فشاری نمونه‌های سخت شده بتن الیافی با مقدار الیاف فولادی مختلف و بررسی اثر الیاف بر بتن پرداخته است. مشخصات مصالح مصرفی و جزئیات ساخت نمونه‌ها در این بخش ارائه شده است.

۳-۱- مصالح مصرفی و طرح اختلاط



شکل ۱- الیاف فولادی مورد استفاده در تحقیق
جدول ۱- مشخصات الیاف فولادی مصرفی

چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	مقاومت کششی (مگا پاسکال)	نسبت طول به قطر	قطر (میلی‌متر)	طول (میلی‌متر)	رنگ	نوع الیاف فولادی
۷۸۵۰	۱۲۰۰	۶۳/۷۵	۰/۸	۵۱	خاکستری متال	دو سر قلابدار

کننده فرکو پلاست شرکت شیمی ساختمان با نام تجاری P200-3R استفاده شده است.

طرح اختلاط سنگدانه‌ی مورد استفاده بعد از بررسی چندین طرح اختلاط مختلف با سنگدانه‌های مختلف و میزان آب به سیمان‌های (W/C) مختلف با مقدار الیاف فولادی متفاوت، مطابق جدول ۲ برحسب وزن مصالح مصرفی در یک مترمکعب بتن در آزمایشگاه تکنولوژی بتن مقاوم سازان شیراز بدست آمد.

سنگدانه‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها از معدن‌های قلات و دوکوهک شیراز تهیه شده است. که شامل ریزدانه طبیعی شکسته (۵-۲۰ mm) و درشت دانه شکسته (۲۰-۵۰ mm) مطابق با الزامات استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ می‌باشد. حداکثر اندازه سنگدانه‌های مصرفی ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. سنگدانه‌های مورد استفاده عاری از خاک و مواد اضافی می‌باشند (شکل ۲). سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند تیپ دو کارخانه سیمان فیروزآباد است. آب مصرفی در ساخت کلیه نمونه‌ها آب شرب شهر شیراز می‌باشد. برای رسیدن به کارایی مورد نظر و کاهش نسبت آب به سیمان (w/c) از فوق روان

جدول ۲- مقادیر مصالح بکار رفته طرحهای اختلاط بتن سبک (kg/m³)

شماره طرح	سیمان (kg)	نسبت آب به سیمان (w/c)	شن بادی (kg)	شن نخودی (kg)	ماسه (kg)	الیاف فولادی (kg)
۱	۴۰۰	۰/۴	۴۸۰	۱۸۰	۱۲۰۰	۲۸-۲۲-۱۵-۰
۲	۴۰۰	۰/۵	۴۸۰	۱۸۰	۱۲۰۰	۲۰-۰
۳	۳۵۰	۰/۴	۴۸۰	۱۸۰	۱۲۰۰	۰

۳-۲- ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

مقاومت فشاری و مقاومت کششی (برزیلی) بتن الیاف فولادی با هفت طرح اختلاط مختلف مطابق جدول ۲ بررسی شده است. طرح‌های اختلاط شامل بتن بدون الیاف و بتن با الیاف فولادی قلابدار با درصدهای حجمی برابر ۰/۶، ۰/۸، ۰/۹ و ۱/۲ درصد به شرح زیر ساخته و نمونه‌گیری شده است. لازم به ذکر است شرایط محیطی برای تمامی طرح اختلاط‌ها یکسان بوده است. برای ساخت بتن الیافی بر اساس استاندارد ACI-211 [۱۵] ابتدا سنگدانه‌ها، سیمان و آب داخل خراطه‌ی ۵۰ لیتری آزمایشگاه مخلوط شده‌اند و سپس الیاف فولادی با سرعت ثابت به مخلوط اضافه شده است تا الیاف فولادی به‌صورت یکنواخت در همه جای بتن پخش شود. بعد از نمونه‌گیری سطح نمونه‌ها با استفاده از کمچه صاف گردیده است و به مدت ۱۶ الی ۲۴ ساعت با پوشش پارچه کرباسی نم دار درون قالب نگهداری شده است لذا با دقت زیاد و بدون ضربه به قالب و صدمه خوردن، نمونه‌ها از قالب‌ها خارج شده و در حوضچه آب به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری کرده تا مورد آزمایش قرارگرفته سپس داده‌های مورد نیاز ثبت شده است (شکل ۲ تا ۴).

عملیات نمونه‌گیری نمونه‌های مکعبی فشاری با قالب ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متری طبق استاندارد BS1881-108:1983 [۱۶] انجام شده است. طبق این استاندارد قالب با عمق ۱۵۰ میلی‌متر در سه لایه که هر لایه به‌طور تقریبی ۵۰ میلی‌متر است با یک میله فولادی با مقطع مربع شکل به اندازه ۲۵ میلی‌متر مربع، ۳۵ ضربه در هر لایه زده شده است و در نهایت با چکش پلاستیکی ضربه به سطح خارجی قالب زده شده است تا حباب هوا به سطح بتن نیاید.

عملیات نمونه‌گیری نمونه‌های استوانه‌ای با قالب استوانه‌ای شکل به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر مطابق استاندارد ASTM C39-16 [۱۷] انجام شده است. مطابق این استاندارد چون بتن الیافی دارای اسلامپ پایین است باید در دو لایه و با استفاده از مرتعش کننده داخلی و خارجی تراکم انجام شود. به علت محدودیت مرتعش کننده در آزمایشگاه، بتن الیافی در سه لایه ریخته شد و برای تراکم میلگرد با قطر ۱۶ میلی‌متر که یکسر آن به صورت نیم‌کره است و در هر لایه با ۲۵ ضربه انجام شده است. در انتها قالب نمونه را تکان داده و به سطح خارجی آن با چکش پلاستیکی ضربه زده شده است تا دیگر حباب هوا به سطح بتن نیاید.



شکل ۲- اضافه کردن الیاف فولادی به بتن در حین اختلاط بتن در دستگاه بتو نیر



شکل ۳- اسلامپ گرفتن و نمونه گیری بتن



شکل ۴- عمل آوری و نگهداری نمونه های بتنی در داخل حوضچه های آب در دمای آزمایشگاهی

۴- نتایج آزمایش

۴-۱- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه های مکعبی با ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی متر در سنین هفت و بیست و هشت روزه بر اساس استاندارد ASTM C39 مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۸] و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه گردیده است. اما مبنای داده ها و پایه این تحقیق

این تحقیق با هدف بررسی تاثیر میزان الیاف و رده مقاومتی بتن همچنین تاثیر نسبت آب به سیمان (W/C) بر پارامترهای مقاومتی بتن بدون الیاف فولادی و با الیاف فولادی به انجام آزمایش هایی بر روی بتن با مقادیر مختلف الیاف می پردازد. در ادامه به شرح هر کدام از مولفه های مقاومتی بتن در این تحقیق پرداخته می شود.

P: نیروی وارد بر نمونه مکعبی
A: سطح مقطع تحت بارگذاری

براساس استاندارد ASTM C39 بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه استوار است. مقاومت فشاری نمونه‌ها با بارگذاری سطوحی که در تماس با قالب هستند در دستگاه بارگذاری تعیین می‌شود. سپس از تقسیم حداکثر نیروی ثبت شده بر سطح مقطع نمونه به دست می‌آید (رابطه ۱). شکل ۵ و جدول شماره ۳ نتایج مقاومت فشاری حاصل از آزمایشات را نشان داده است.

$$f = P/A \quad (1)$$

f: مقاومت فشاری نمونه‌ی مکعبی



شکل ۵- آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی

جدول ۳- مشخصات نمونه‌های ۲۸ روزه مکعبی

شماره طرح							۳	۲
میزان الیاف (kg/cm^3)							۰	۲۰
مقاومت فشاری (kg/cm^2)							۳۸۵	۳۳۴
							۴۲۲	۳۵۶
							۴۱۰	۳۳۳
							۳۷۸	۳۳۳
							۲۲	۲۰
							۲۸	۲۰

به منظور ارزیابی مقاومت کششی بتن با الیاف فولادی، نمونه‌های استوانه‌ای بتن مسلح به الیاف فولادی با استفاده از آزمایش کششی (آزمایش برزلی) در سنین هفت و بیست و هشت روزه مورد ارزیابی قرار گرفته است، نتایج با یکدیگر و با نمونه بدون الیاف مقایسه شده‌اند

۴-۲- مقاومت کششی (برزلی)

این آزمایش با نام مقاومت کششی بتن^۶ به روش دو نیم کردن یا تست برزلی در استاندارد ASTM C496 شرح داده شده است [۱۹].

^۶ Splitting Tensile Strength

در این آزمایش نمونه استوان‌های داخل گیره نگهدارنده بصورت افقی در دستگاه بارگذاری تحت فشار از ناحیه سطح جانبی قرار می‌گیرد به گونه‌ای که نمونه استوان‌های حین گسیختگی دو نیم شود (شکل ۶ و ۷).

مبنای اصلی اطلاعات آزمایش اندازه گیری مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه براساس استاندارد ASTM C496 می‌باشد.



شکل ۶- دستگاه آزمایش مقاومت کششی نمونه استوانه ای (برزیلی)



ب (بتن بدون الیاف

الف) بتن الیافی

شکل ۷- نمونه استوانه ای بعد از آزمایش مقاومت کششی (برزیلی)

$F =$

$$\frac{2P}{\pi LD} \quad (2)$$

مقاومت کششی نمونه‌ها پس از بارگذاری و گسیختگی نمونه‌های استوان‌های در دستگاه بارگذاری تعیین شده است (جدول ۴). جهت محاسبه مقاومت کششی (F) از رابطه زیر استفاده گردید (رابطه ۲).

P: بار اعمال شده به نمونه

L: طول نمونه بر حسب سانتیمتر

D: قطر نمونه بر حسب سانتیمتر

F: مقاومت کششی نمونه استوانه ای بر حسب کیلوگرم بر سانتیمتر

مربع

جدول ۴- مشخصات نمونه‌های ۲۸ روزه استوانه‌ای

شماره طرح							۳
میزان الیاف (kg/cm^3)							۲۰
مقاومت کششی (برزلی) (kg/cm^2)							۳۵/۷
۰	۱۵	۲۲	۲۸	۰	۰	۰	۰
۴۰/۷	۴۵/۲	۴۹/۱	۵۳/۶	۳۵/۸	۴۰/۳	۳۵/۷	۳۵/۷

الیاف می‌تواند ناشی از گلوله‌ای شدن الیاف‌ها باشد. با توجه به نتایج فوق (جدول ۳) الیاف در حجم پایین تاثیر بهتری داشته است.

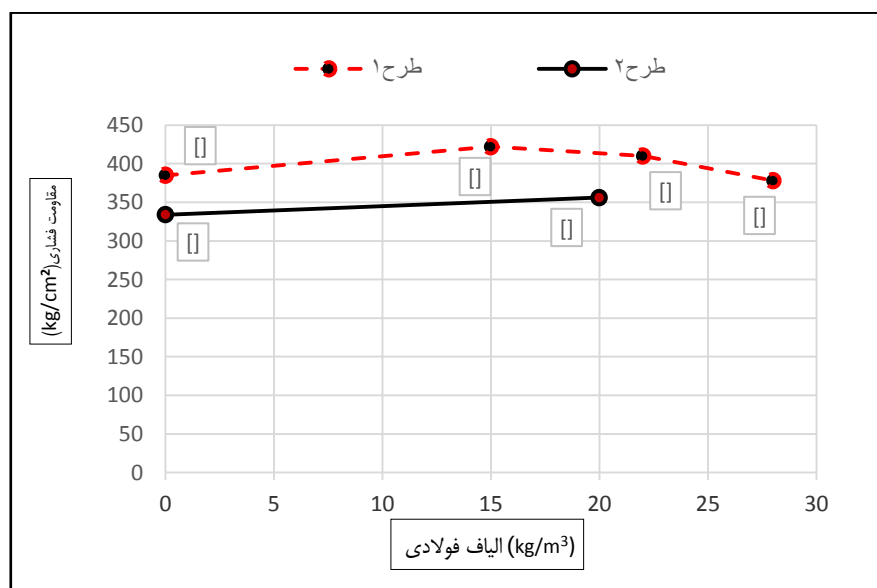
با توجه به مقایسه نتایج نمونه‌های حاصل از طرح اختلاط شماره ۳ و ۲، ۱ (جدول ۲) مشاهده گردیده است افزایش نسبت آب به سیمان (w/c) به میزان ۰/۱ مقاومت فشاری بتن را به اندازه کاهش ۵۰ kg سیمان کاهش داده است. بنحوی که بتن بدون الیاف (الیاف صفر) در طرح ۱ (مقاومت فشاری ۳۸۵ کیلو گرم بر سانتی متر مکعب) و طرح ۲ (مقاومت فشاری ۳۳۴ کیلو گرم بر سانتی متر مکعب) با مقدار سیمان ثابت (۴۰۰ کیلو گرم) در طرح ۱ و ۲ و افزایش نسبت آب به سیمان (w/c) به میزان ۰/۱ در طرح ۲، مقاومت فشاری ۵۰ کیلو گرم بر سانتی متر مکعب در طرح دو نسبت به طرح یک کاهش داشته و به مقاومت فشاری طرح ۳ (مقاومت فشاری ۳۳۳ کیلو گرم بر سانتی متر مکعب) با ۵۰ کیلوگرم سیمان کمتر (۳۵۰ کیلو گرم) رسیده است (جدول ۳ و ۲). بنابراین میزان تغییرات آب طرح اختلاط بتن، تاثیر زیادی در مقاومت فشاری خواهد داشت.

۴-۳- تحلیل و بررسی نتایج

در این مطالعه آزمایشگاهی به منظور بررسی تأثیر الیاف فولادی با مقادیر مختلف و تغییرات نسبت آب به سیمان (w/c) بر مقاومت فشاری و کششی بتن، بیش از ۶۴ نمونه‌های مکعبی و استوانه ای بدون الیاف و با الیاف الیاف فولادی صاف با انتهای قلابدار تولید شده است و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

۴-۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

طبق مشاهدات آزمایشگاهی با اضافه نمودن الیاف فولادی قلابدار به بتن با مقدار ۰/۶، ۰/۸، ۰/۹ درصد حجمی بتن، مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به بتن بدون الیاف به ترتیب ۹/۷، ۶/۶، ۶/۵ درصد افزایش یافته است همچنین با افزایش الیاف به مقدار ۱/۲ درصد، مقاومت فشاری نمونه الیافی نسبت به نمونه بدون الیاف به میزان ۱/۹ درصد کاهش داشته است (شکل ۸). کاهش مقاومت فشاری با توجه به افزایش مقدار

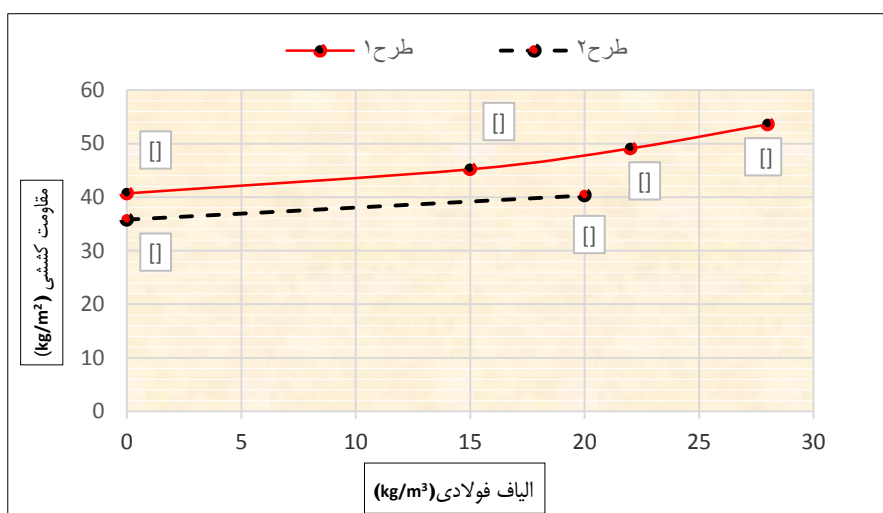


شکل ۸- نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه مکعبی بتن الیافی

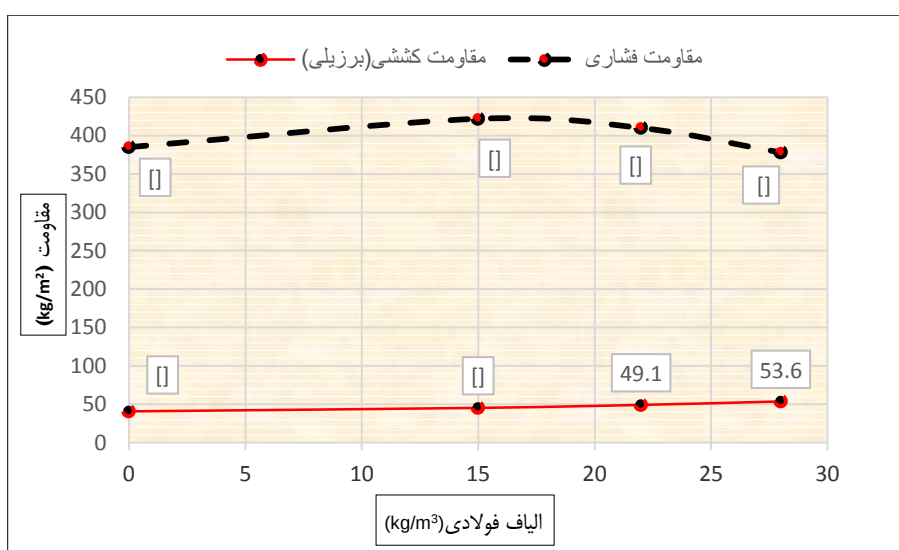
۴-۳-۲- آزمایش مقاومت کششی (برزیلی)

با توجه به نتایج آزمایشگاهی (جدول ۴)، مشاهده گردیده است با اضافه نمودن الیاف فولادی قلابدار به بتن با مقدار ۱۵، ۲۰، ۲۲ و ۲۸ کیلوگرم در متر مکعب بتن، مقاومت کششی بتن الیافی نسبت به بتن بدون الیاف به ترتیب حدود ۱۱، ۱۳، ۲۱ و ۳۲ درصد افزایش یافته است (شکل ۹). بنابراین با افزایش الیاف فولادی مقاومت کششی بتن افزایش می‌یابد همچنین مشاهده گردیده است نمونه‌های استوانه‌ای بتن الیافی بعد از تحمل حداکثر بار اعمالی در دستگاه بارگذاری آزمایش برزیلی و گسیختگی، بر خلاف نمونه‌های استوانه‌ای بدون الیاف دو نیمه نشده

است و فقط در نواحی میانی ترک ایجاد شده است (شکل ۸). با توجه به مقایسه نتایج نمونه‌های حاصل از طرح اختلاط شماره ۲ و ۳ (جدول ۲) مشاهده شده است افزایش نسبت آب به سیمان (W/C) به میزان ۰/۱ مقاومت کششی بتن را به اندازه کاهش ۵۰ کیلوگرم سیمان کاهش داده است (جدول ۴ و ۲). بنابراین میزان تغییرات آب طرح اختلاط بتن تاثیر زیادی در مقاومت کششی داشته است. در مقایسه نتایج مقاومت کششی با مقاومت فشاری نمونه‌های بتن الیافی مورد مطالعه همان طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود تاثیر الیاف فولادی در مقاومت کششی بیشتر از مقاومت فشاری می‌باشد.



شکل ۹- نمودار مقایسه مقاومت کششی نمونه‌های استوانه بتن الیافی



شکل ۱۰- نمودار مقایسه تاثیر الیاف فولادی بر مقاومت کششی و فشاری

reinforced carbon nanotubes concrete. *Construction and Building Materials*. 2023; 392: 131880.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131880>

[2] Nematzadeh M, Arjomandi A, Fakoor M, Aminian A, Khorshidi-Mianaei A. Pre-and post-heating bar-concrete bond behavior of CFRP-wrapped concrete containing polymeric aggregates and steel fibers: experimental and theoretical study. *Engineering Structures*. 2024; 321: 118929. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118929>.

[3] Isojeh B, El-Zeghayar M, Vecchio FJ. Assessing the Shear Behaviour of Fibre- Reinforced Concrete Beams. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017; 29(8): 04017056. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001953](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001953)

[4] Abdul Rahim M, Pohan OY. Effects of Steel Fiber Content on the Mechanical Properties of Concrete. *Journal of Civil Engineering and Science Technology*. 2018; 9(2): 47-54. <https://doi.org/10.33736/jcest.1222.2018>

[5] Ding Y, Liu G, Hussain A, Pacheco-Torgal F, Zhang Y. Effects of Steel Fiber Geometry and Content on Mechanical Properties of Concrete. *Construction and Building Materials*. 2019; 204: 327-336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.076>

[6] Peyman S, Hassanzadeh A, Ramezani SR, Hassanzadeh V. Evaluation of mechanical properties of concrete containing steel fibers, polypropylene fibers and nanosilica. *New Approaches in Civil Engineering*. 2024; 8(3): 10-24. <https://doi.org/10.30469/jnace.2024.467903.1115>

[7] Gao J, Sun W, Morino K. Mechanical properties of steel fiber reinforced concrete at low temperature. *Cement and Concrete Research*. 1997; 27(11): 1637-1639. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00021-8)

[8] Yao W, Li J, Wu KR. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cement and Concrete Research*. 2003; 33(2): 245-251. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00913-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00913-3)

[9] Olivito RS, Zuccarello FA. An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2010; 41(8): 673-678. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.01.006>

۵- نتایج

با استناد به داده‌های حاصل از انجام آزمایش بر روی نمونه‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که چندین متغیر بر روی خصوصیات مکانیکی بتن با الیاف فولادی تاثیر می‌گذارند از جمله این متغیرها می‌توان: نوع و درصد الیاف مصرفی، نسبت ظاهری الیاف، مقاومت ماتریس و اندازه سنگدانه‌ها را برشمرد.

با توجه به تحقیق انجام شده افزایش مقاومت فشاری بتن با الیاف قابل ملاحظه نمی‌باشد. به طور کلی در صورتی که نمونه‌ها به خوبی متراکم شده باشند، اضافه کردن الیاف فولادی (بین ۰/۶٪ تا ۱/۲٪ حجمی) تاثیر اندکی بر مقاومت فشاری بتن با الیاف فولادی خواهد داشت. داده‌های حاصل از انجام این تحقیق بر روی مقاومت کششی بر روی بیش از ۲۸ نمونه در رده‌های مختلف و مقدار الیاف مختلف نشان می‌دهد که اضافه کردن ۱/۲٪ حجمی از الیاف فولادی، مقاومت کششی برزلی بتن را حدود ۳۲٪ افزایش می‌دهد. باید در نظر داشت که در صورت استفاده از مقادیر زیاد الیاف (بیش از ۲ درصد حجمی یا نسبت طول به قطر بالا) و یا اضافه کردن خیلی سریع الیاف به مخلوطی که آب کافی و یا کارایی کافی ندارد، مشکل گلوله ای شدن به وجود می‌آید. در این پدیده الیاف نزدیک به هم جمع شده لذا سبب کاهش کارایی مخلوط بتن و در نتیجه کاهش مقاومت بتن سخت شده می‌گردد. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد:

- افزودن الیاف فولادی به بتن باعث بهبود مشخصات مکانیکی بتن می‌شود.

- نمونه‌های استوانه‌ای بتن بدون الیاف بعد از اعمال بارگذاری و گسیختگی در آزمایش کششی برزلی دو نیم می‌شوند اما نمونه‌های با الیاف فولادی به دلیل داشتن خاصیت ارتجاعی و رفتار نرم بتن فقط در ناحیه میانی ترک جزئی بر می‌دارد و دو نیم نمی‌شوند (شکل ۸).

- با بررسی نمونه‌های بتن ۲۸ روزه مشاهده گردیده است که افزودن الیاف به بتن تاثیر اندکی بر مقاومت فشاری بتن خواهد داشت. بطوری که در صورت عدم اختلاط مناسب باعث کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. با بررسی نتایج مشاهده می‌گردد افزایش الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت کششی بتن می‌گردد. هرچه مقدار الیاف بیشتر باشد روند افزایش مقاومت کششی بتن نیز افزایش می‌یابد.

- تغییرات آب طرح اختلاط بتن (w/c) تاثیر زیادی در مشخصات مکانیکی بتن دارد. به نحوی که افزایش نسبت آب به سیمان (w/c) به میزان ۰/۱ مقاومت کششی بتن را به اندازه کاهش ۵۰ کیلوگرم سیمان کاهش می‌دهد.

مراجع

[1] Xing G, Xu Y, Huang J, Lu Y, Miao P, Chindasiriphan P, Jongvivatsakul P, Ma K. Research on the mechanical properties of steel fibers

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1992\)4:4\(415\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1992)4:4(415))

[10] Ding Y, Liu G, Hussain A, Pacheco-Torgal F, Zhang Y. Effects of Steel Fiber Geometry and Content on Mechanical Properties of Concrete. *Construction and Building Materials*. 2019; 204: 327-336.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.076>

[11] Peyman S, Hassanzadeh A, Ramezani SR, Hassanzadeh V. Evaluation of mechanical properties of concrete containing steel fibers, polypropylene fibers and nanosilica. *New Approaches in Civil Engineering*. 2024; 8(3): 10-24.

<https://doi.org/10.30469/jnace.2024.467903.1115>

[12] Yoo DY, Banthia N, Yoon YS. Recent development of innovative steel fibers for ultra-high-performance concrete (UHPC): a critical review. *Cement and Concrete Composites*. 2024; 145: 105359.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105359>

[13] Zhang P, Wang C, Gao Z, Wang F. A review on fracture properties of steel fiber reinforced concrete. *Journal of Building Engineering*. 2023; 67: 105975.

[14] Paje SE, López V, Pardo JM, Rodríguez ME, Tellez C. Effect of steel fiber addition on flexural strength of concrete. *Construction and Building Materials*. 2007; 21(1): 112-116.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.021>

[15] Kang ST, Kim JK. The relation between fiber orientation and tensile behavior in steel fiber reinforced ultra high strength concrete. *Cement and Concrete Research*. 2011; 41(10): 1001-1014.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.013>

[16] Rossi P, Arca A, Parant E, Fiseau E. Bending and compressive behaviour of concrete reinforced with metallic fibres at low volume dosages. *Materials and Structures*. 2005; 38(278): 567-574.

<https://doi.org/10.1617/14267>

[17] Qian C, Stroeven P. Development of hybrid polypropylene-steel fiber-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*. 2000; 30(1): 63-69.

[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00206-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00206-9)

[18] Sivakumar A, Santhanam M. Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres. *Cement and Concrete Composites*. 2007; 29(8): 603-608.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.006>

[19] Ezeldin AS, Balaguru PN. Normal and high-strength fiber-reinforced concrete under compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1992; 4(4): 415-429.