

تأثیر مقدار و نوع الیاف فولادی بر مشخصات مکانیکی بتن‌های الیافی

محمدرضا کریمیان^۱، محمدرضا ضیایی‌نژاد^۱، سید مهدی دهقان^۲، محمد امیر نجفقلی‌پور^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط (mr.karamian@yahoo.com)

چکیده

این تحقیق به بررسی مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی الیاف فولادی موجدار و قلابدار رایج در کشور ایران با درصدهای حجمی الیاف مختلف (الیاف موجدار با درصدهای: ۰، ۰/۵ و ۱ _ الیاف قلابدار با درصدهای: ۰/۳، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲) می‌پردازد. برای این منظور، ابتدا با بررسی چندین طرح اختلاط با مصالح سنگی مختلف طرح اختلاط مناسب جهت پاشش روی سطوح بدست آمد. سپس با اضافه کردن الیاف فولادی در نسبت‌های حجمی مختلف به بتن، ۸ طرح اختلاط با مقدار و نوع الیاف فولادی مختلف بدست آمد. برای هر طرح، نمونه‌ی مکعب مستطیلی جهت تعیین مقاومت خمشی، نمونه‌ی مکعبی برای بدست آوردن مقاومت فشاری، نمونه‌ی استوانه‌ای جهت تعیین مدول ارتجاعی و مقاومت فشاری تهیه و عمل‌آوری شد. با مقایسه‌ی نتایج بتن الیافی مشخص شد که مشخصات مکانیکی بتن با افزودن الیاف بهبود یافته و بیشترین تأثیر را بر مقاومت خمشی داشته است. همچنین افزودن حدود ۱ تا ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی قلابدار به بتن، مناسب‌ترین مشخصات مکانیکی را ایجاد کرد.

کلمات کلیدی: الیاف فولادی، بتن الیافی، مشخصات مکانیکی بتن، مقاومت بتن.

Effect of volume fractions and types of steel fibers on the mechanical properties of fiber-reinforced concrete

M. R. Karamian¹, M. R. Ziaeinejad¹, S. M. Dehghan², M. A. Najafgholipour²

1. MSc. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

2. Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Abstract

In this study, the mechanical properties of concrete reinforced with hooked and crimped steel fibers available in Iran with different volume fractions (for crimped fibers: 0%, 0.5%, 1% & for hooked fibers: 0.3%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%) were investigated. For this purpose, firstly several trial concrete mixes with different aggregate grading was assessed to choose the proper mix for shotcreting on surfaces. Then different amount of steel fibers were added to achieve 8 fiber-reinforced concrete (FRC) mixes. For each mix of the FRC, rectangular beams for determining flexural modulus, cubic samples for finding compression strength and cylindrical specimens for achieving elastic modulus and compressive strength were prepared and cured and tested. Results demonstrate that mechanical properties of concrete improve with addition steel fibers and effect of steel fiber reinforcement is maximum in case of flexural modulus. In addition, adding almost 1-1.5% hooked steel fibers into the concrete give optimal mechanical properties of concrete.

Keywords: Steel Fibers, Fibrous Concrete, Mechanical Properties of Concrete, Strength of Concrete.

۱. مقدمه

بتن یکی از پر مصرف ترین مواد در صنعت ساخت و ساز است که دارای ضعف هایی از جمله مقاومت کششی و ظرفیت کرنشی کم در هنگام گسیختگی و همچنین رفتار ترد و غیر قابل پیش بینی در هنگام بارگذاری است. برای بهبود رفتار و مشخصات مکانیکی بتن، مسلح کردن به وسیله ی میلگرد و یا پیش تنیدگی بتن مطرح شد. محققان در سراسر دنیا از روش های مختلف و نوینی برای بهبود مشخصات بتن استفاده می کنند. از جمله مواد جدیدی که جایگاه ویژه ای در صنعت ساخت و ساز به خود اختصاص داده، الیاف تقویت کننده است که این الیاف ها می تواند از جنس فولاد، شیشه، مواد طبیعی، پلیمر و مواد مصنوعی باشد. الیاف فولادی تقویت کننده از طریق مسلح سازی بتن با افزایش یکپارچگی سنگدانه ها در بتن، کمک به کنترل گسترش ترک ها یا پیشگیری از شکست ترد بتن و همچنین پخش تصادفی در بتن با جذب تنش های کششی با جهت گیری نامعلوم باعث بهبود خواص بتن می شود. اولین بررسی تخصصی بتن الیافی در دهه ی ۱۹۶۰ میلادی در آمریکا گزارش شده است. امروزه الیاف فولادی کاربردهای صنعتی فراوانی دارد. به طور مثال، در ساخت کف سالن های صنعتی می توان از این نوع بتن به جای بتن مسلح متداول سود جست. این نوع بتن از بهترین مصالح مورد استفاده برای مقاوم سازی دیوارهای بنایی برای حفظ یکپارچگی دیوار و همچنین ساخت بناهای مقاوم به ضربه، همچون سازه ی پناهگاه ها و انبارهای نگهداری مواد منفجره به شمار می رود. مواردی دیگری از به کارگیری این نوع بتن، ساخت قطعات پیش ساخته ساختمانی و یا پاشیدن بتن روی سطوح انحنادار همچون تونل ها است.

الیاف فولادی مورد استفاده در بتن الیافی مطابق استاندارد ACI 544 [۱] باید نسبت طول به ضخامت در محدوده ۲۰ تا ۱۰۰ داشته باشد تا بتواند به طور مناسب در بتن توزیع شود و همچنین درصد حجمی الیاف فولادی اضافه شده به بتن درجا باید در محدوده ۰/۲۵ تا ۲ درصد باشد تا ساخت بتن تسهیل شود.

۲. پیشینه تحقیق

نعمان و همکاران در سال ۱۹۸۳ با استفاده از سرعت بارگذاری های مختلف و همچنین الیاف های با نسبت طول به ضخامت مختلف به این نتیجه رسیدند که جذب انرژی بتن الیافی یک تا دو برابر جذب انرژی بتن معمولی است و همچنین با بالا رفتن سرعت بارگذاری، مدول گسیختگی و انرژی جذب شده نیز افزایش می یابد [۲]. بالاسوبرامینیان و همکاران در سال ۱۹۹۶ بیان کردند که الیاف فولادی به طور قابل توجهی مقاومت ضربه ای را افزایش می دهد و همچنین نتیجه گرفتند که مقاومت ضربه ای الیاف موجدار در مقابل الیاف ناودانی شکل و صاف بهتر است [۳]. ناتاراج و همکاران در سال ۲۰۰۵ با بررسی درصد حجمی های مختلف الیاف در بتن و ایجاد ضربه در سن های مختلف بتن به تأثیر قابل توجه مقاومت ضربه ای در اثر افزودن الیاف پی بردند [۴]. نیلی و همکاران در سال ۲۰۱۰ با بررسی آب به سیمان های مختلف، با و بدون سیلیکافوم و همچنین درصد حجمی های مختلف الیاف فولادی در بتن به این نتیجه رسیدند که افزودن الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت کششی و مقاومت خمشی و همچنین افزایش چشمگیری در مقاومت ضربه ای بتن الیافی می شود و الیاف فولادی همراه با سیلیکافوم مقاومت ضربه ای و شکل پذیری را به طور قابل ملاحظه ای افزایش می دهد [۵]. اولیوینو و زوکارو در سال ۲۰۱۰ با بررسی الیاف های با میزان طول به ضخامت مختلف و طرح اختلاط های مختلف به این نتیجه رسیدند که در آزمایش تک محوری فشاری الیافها تأثیر کمی دارند، گرچه نمونه ها به طور کامل شکستند و خردشدگی در بالا و پایین رخ نداد و همچنین با افزایش الیاف فولادی میزان سختی و شکل پذیری نمونه های خمشی افزایش یافت [۶]. علوی نیا و همکاران در سال ۲۰۱۲ با مطالعه ی آزمایشگاهی و عددی به این نتیجه رسیدند که افزایش درصد حجمی الیاف در بتن، افزایش در مقاومت ضربه ای را در پی دارد همچنین به این نتیجه رسیدند که الیاف فولادی خیلی مؤثرتر از الیاف پلی پروپیلن است [۷]. مورالی و همکاران در سال ۲۰۱۴ به این نتیجه رسیدند که الیاف قلابدار در جذب انرژی ضربه بهتر از الیاف موجدار عمل می کند آن ها همچنین نشان دادند که کاهش سرعت امواج آلتراسونیک نشان دهنده ی گسترش گسیختگی داخلی و کاهش مقاومت است [۸]. بولکباچ و همکاران در سال ۲۰۱۴ به این نتیجه رسیدند که نسبت مقاومت کششی دو نیم شدن استوانه به مقاومت فشاری بتن های الیافی در حدود ۰/۸۳ تا ۰/۱ است و همچنین با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی در بتن، مقاومت کششی افزایش می یابد [۹].

نیلی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با بررسی بتن الیاف فولادی تحت اثر ضربات دینامیکی با سرعت بالا (۱۱۳۰-۶۰۰ m/s) و ضربه شبه استاتیکی با سرعت کم (۳ m/s) پی بردند که در هر دو مورد الیاف فولادی نقش اصلی در یکپارچگی نمونه ها دارد، همچنین تحت ضربه ی شبه استاتیکی گسیختگی به شکل شعاعی و قطری است ولی تحت ضربات دینامیکی با سرعت بالا نمونه های بدون الیاف شکست برشی دارند و نمونه های دارای الیاف بدون اینکه گسیخته شوند پرتابه ی ضربه به داخل نمونه فرو می رود [۱۰].

جیسکارون و همکاران در سال ۲۰۱۷ با بررسی مقادیر مختلف میزان الیاف فولادی در بتن و بررسی مقاومت فشاری، خمشی، برشی، کششی (دو نیم شدن استوانه)، مدول ارتجاعی و آزمایش ضربه روی نمونه‌های مکعبی و دال بتن الیافی به این نتیجه رسیدند که تأثیر الیاف فولادی در مقاومت ضربه‌ای و مقاومت برشی بیشتر از تأثیر در مدول ارتجاعی و مقاومت فشاری است. افزایش میزان الیاف در بتن گرچه باعث کنترل بهتر ترک‌ها و افزایش مقاومت کششی می‌شود ولی افزایش آن به ۱/۵ درصد در حین آزمایش احتمال گلوله‌ای شدن (Balling) را افزایش می‌دهد [۱۱].

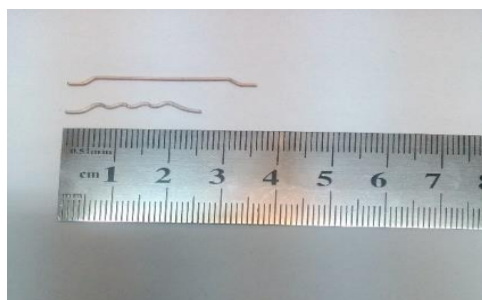
بنار آیسوجه و همکاران در سال ۲۰۱۷ با بررسی خستگی در آزمایش بارگذاری کشش مستقیم در بتن الیافی دریافتند که نحوه تغییر شکل در بتن الیافی و بتن معمولی شبیه یکدیگر است و به رابطه‌ای بین کرنش ثانویه و عمر خستگی برای بتن معمولی و بتن الیافی پی بردند و همچنین تحت اثر بارگذاری یکسان عمر خستگی با افزایش درصد حجمی الیاف در بتن (از صفر تا ۱/۵ درصد)، افزایش می‌یابد [۱۲].

۳. برنامه آزمایشگاهی

مشخصات مصالح مصرفی و جزئیات ساخت نمونه‌ها در این بخش ارائه می‌شود.

۳.۱. مصالح مصرفی

در این تحقیق دو نوع الیاف فولاد تولیدی کارخانه‌ی دنیای بتن پارسیان تهران (شکل-۱) با مشخصات جدول-۱ استفاده شده است. سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند نوع-۲ کارخانه‌ی شهرکرد است که دارای ترکیب مواد جدول-۲ است. سنگدانه‌ها از معدن‌های قلات و دوکوهک شیراز انتخاب شد. با ترکیب وزنی سه به یک از سنگدانه‌های معادن فوق با بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه ۱۰ میلی‌متر، منحنی سنگدانه‌های ترکیبی مطابق شکل-۲ است که در محدوده قابل قبول استاندارد ACI 544 قرار دارد. طرح اختلاط سنگدانه‌ی مورد استفاده بعد از بررسی چندین طرح اختلاط مختلف با سنگدانه‌های مختلف و میزان آب به سیمان‌های مختلف مطابق جدول-۳ برحسب وزن مصالح مصرفی در یک مترمکعب بتن بدست آمد.



شکل-۱- الیاف موجدار و قلابدار

جدول-۱- مشخصات الیاف فولادی مصرفی

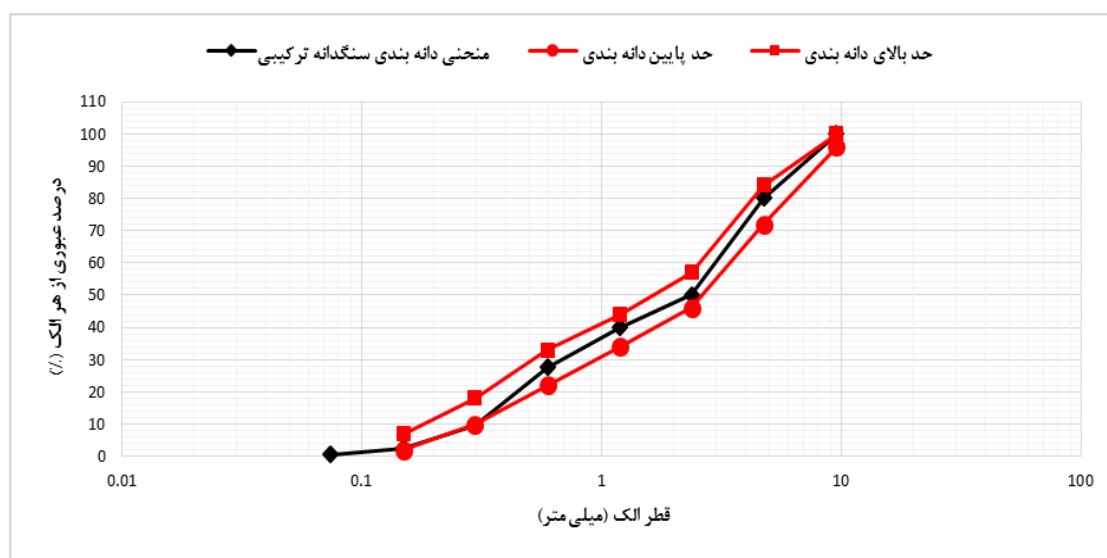
نوع الیاف فولادی	طول (میلی‌متر)	قطر (میلی‌متر)	نسبت طول به قطر	مقاومت کششی (مگا پاسکال)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
قلابدار	۳۵	۰/۴	۸۸	۱۱۰۰	۷۸۵۰
موجدار	۲۵	۰/۴	۶۳	۱۱۰۰	۷۸۵۰

جدول ۲- ترکیبات سیمان پرتلند نوع ۲

درصد جرمی	ترکیبات
۶۳/۲۴	CaO
۲۱/۵۴	SiO ₂
۴/۹۵	Al ₂ O ₃
۳/۸۲	Fe ₂ O ₃
۱/۵۵	Mgo
۲/۴۳	SO ₃
۱/۱۵	L.O.I

جدول ۳- طرح اختلاط وزنی بتن

نسبت آب به سیمان	بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه (میلی‌متر)	آب (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	سنگدانه ترکیبی (کیلوگرم)	الیاف فولادی (درصد حجم الیاف در بتن)
۰/۴۸	۱۰	۱۹۲	۴۰۰	۱۶۰۰	۰/۲



شکل ۲- منحنی دانه بندی سنگدانه ترکیبی

۲.۳. ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها

مقاومت خمشی (مدول گسیختگی)، مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی بتن الیاف فولادی با ۸ طرح اختلاط مختلف با درصد حجمی و یا نوع الیاف فولادی متفاوت، در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه صنعتی شیراز بررسی شد. طرح‌های اختلاط شامل بتن بدون الیاف و بتن با الیاف فولادی قلابدار با درصدهای حجمی برابر ۰/۳، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد و بتن با الیاف فولادی موجدار با درصدهای حجمی ۰/۵ و ۱ درصد مطابق استانداردهای آزمون به شرح زیر ساخته و نمونه‌گیری شد. لازم به ذکر است که شرایط محیطی برای تمامی طرح اختلاط‌ها یکسان بود. برای ساخت بتن الیافی بر اساس استاندارد ACI-211 [۱۳] ابتدا سنگدانه‌ها، سیمان و آب داخل خلاطه‌ی ۵۰ لیتری آزمایشگاه مخلوط شدند و سپس الیاف فولادی با سرعت ثابت به مخلوط اضافه شد تا

الیاف فولادی به صورت یکنواخت در همه جای بتن پخش شود. بعد از نمونه گیری سطح نمونه ها با استفاده از کمچه صاف گردید و یک قطعه شیشه ای یا فلزی روی نمونه گذاشته شد تا موقع باز کردن قالب، رطوبت بتن از دست نرود. پس از ۲۴ تا ۴۸ ساعت قالب ها را باز کرده و در حوضچه آب به مدت ۲۸ روز عمل آوری کرده تا مورد آزمایش قرار گرفته و داده های مورد نیاز ثبت شود.

عملیات نمونه گیری نمونه های خمشی بتن الیافی با قالب $150 \times 150 \times 550$ میلی متری (شکل ۳-۳) بر اساس استاندارد ASTM C1609 [۱۴] باید نمونه ها در یک لایه و به صورت ارتعاش استاندارد خارجی تراکم یابد تا هوا در سطح بتن بالا نیاید، به علت محدودیت مرتعش کننده در آزمایشگاه، طبق استاندارد ASTM C192/192M [۱۵] نمونه ها در دو لایه، که هر لایه نصف ارتفاع قالب است در قالب ریخته شدند و با میلگرد با قطر ۱۶ میلی متر که یکسر آن به صورت نیمکره است، در هر لایه به تعداد سطح قالب (طول در عرض قالب)، برحسب سانتی متر مربع تقسیم بر ۱۴ سانتی متر مربع، ضربه زده شد و در آخر برای تراکم مناسب در حد استاندارد ASTM C1609 قالب نمونه را تکان داده و به سطح خارجی آن ضربه زده شد تا حباب هوا به سطح بتن نیاید. عملیات نمونه گیری نمونه های مکعبی فشاری با قالب $150 \times 150 \times 150$ میلی متری (شکل ۴-۴) طبق استاندارد BS 1881-108:1983 [۱۶] انجام شد. طبق این استاندارد قالب با عمق ۱۵۰ میلی متر در سه لایه که هر لایه به طور تقریبی ۵۰ میلی متر است با یک میله فولادی با مقطع مربع شکل به اندازه ۲۵ میلی متر مربع، ۳۵ ضربه در هر لایه زده شد و در نهایت ضربه به سطح خارجی قالب زده شد تا حباب هوا به سطح بتن نیاید.

عملیات نمونه گیری نمونه های استوانه ای با قالب استوانه ای شکل به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی متر مطابق استاندارد ASTM C39-16 [۱۷] انجام شد. 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 میلی متر که یکسر آن به صورت نیمکره است و در هر لایه ۲۵ ضربه انجام شد. در انتها قالب نمونه را تکان داده و به سطح خارجی آن ضربه زده شد تا دیگر حباب هوا به سطح بتن نیاید.

۴. بررسی و تحلیل نتایج

در این بخش به تشریح نتایج مشخصات مکانیکی بتن الیافی پرداخته می شود.

۴.۱. آزمایش تعیین مدول گسیختگی

در آزمایش بارگذاری خمشی مطابق استانداردهای ASTM C1609 و ASTM C78 [۱۸] در سه نقطه بارگذاری می شود (شکل ۳-۳). مدول گسیختگی بتن الیافی طبق رابطه (۱) محاسبه می شود:

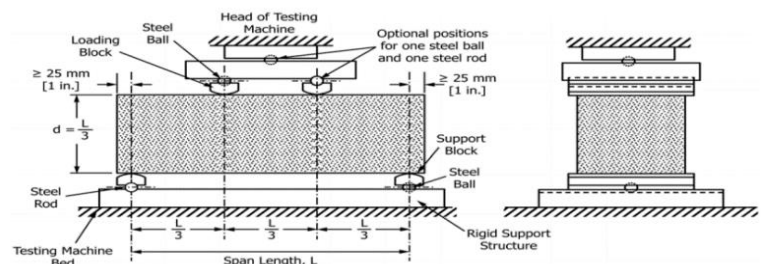
$$fr = \frac{F \times L}{b \times d^2} \quad (1)$$

F: نیروی وارد بر تیر بتنی از طرف دستگاه بارگذاری برحسب نیوتن

L: فاصله بین دو تکیه گاه برحسب میلی متر

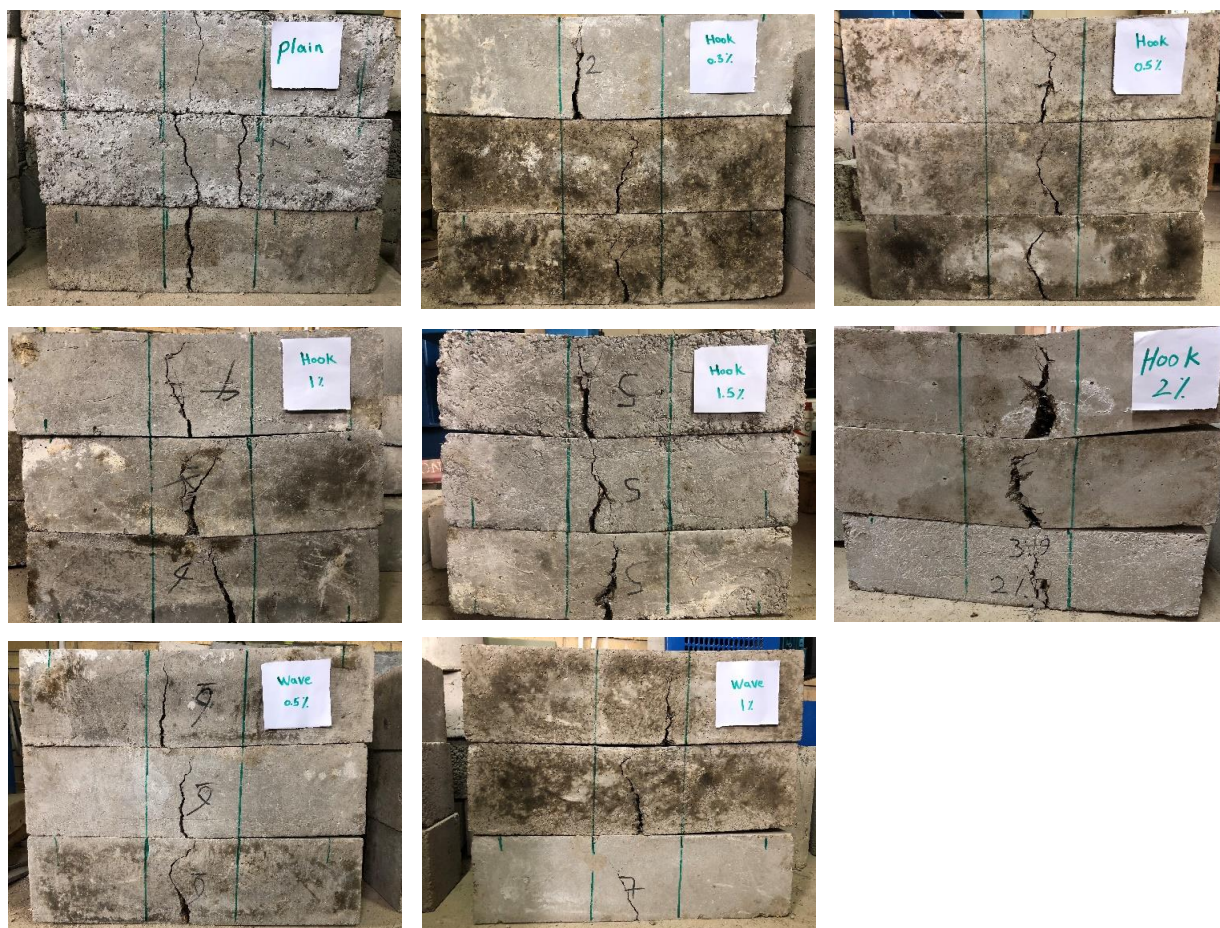
fr: مدول گسیختگی بتن برحسب مگاپاسکال

b: عرض تیر بتنی برحسب میلی متر



شکل ۳-۳ جزئیات آزمایش خمشی بتن الیافی

پس از انجام آزمایش مشاهده گردید همه‌ی نمونه‌ها در یک‌سوم میانی به گسیختگی رسیدند (شکل-۴)، لذا نیاز به اصلاح نتایج طبق استاندارد نیست.



شکل-۴- گسیختگی در یک سوم میانی نمونه خمشی



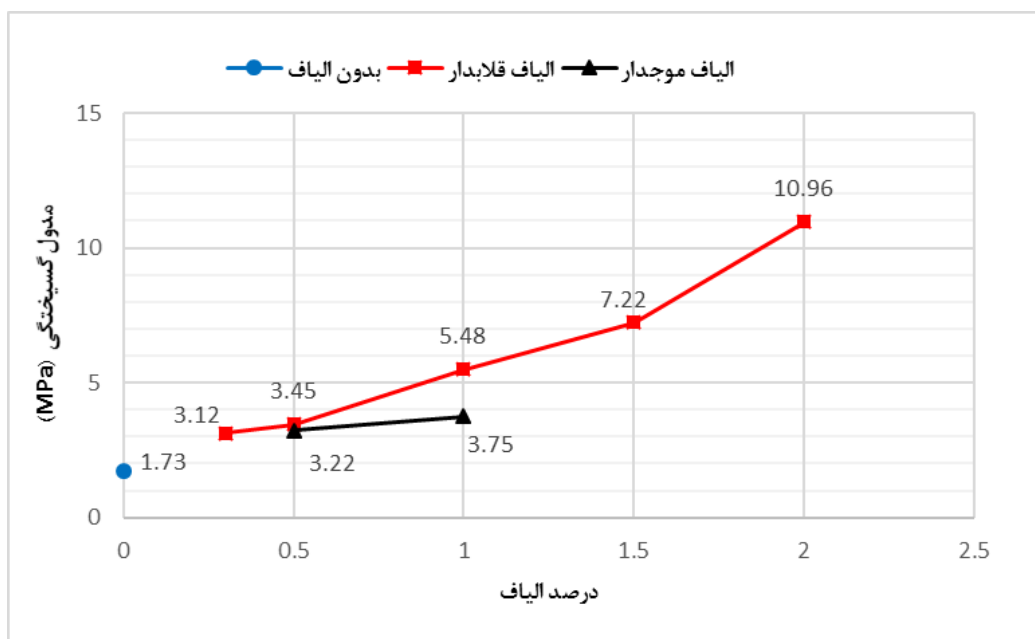
شکل-۵- مقطع گسیخته شده‌ی تیر بتنی با الیاف قلابدار

میانگین مقاومت خمشی ۳ نمونه در جدول-۴ نشان می‌دهد که هرچقدر مقدار درصد الیاف در بتن افزایش می‌یابد مقاومت خمشی یا همان مدول گسیختگی افزایش می‌یابد.

جدول-۴-مدول گسیختگی میانگین نمونه‌های ۲۸ روزه بتن الیافی

الیاف موجدار		الیاف دو سر قلاب دار					بدون الیاف	نوع الیاف
۱	۰/۵	۲	۱/۵	۱	۰/۵	۰/۳	-	میزان الیاف بر حسب درصد حجمی بتن
۳/۷۵	۳/۲۲	۱۰/۹۶	۷/۲۲	۵/۴۸	۳/۴۵	۳/۱۲	۱/۷۳	مدول گسیختگی (MPa)

بر اساس شکل-۶، مشاهده می‌گردد نمونه‌های با ۰/۳ و ۲ درصد حجمی الیاف فولادی قلابدار، به ترتیب ۸۰ و ۵۳۴ درصد افزایش مقاومت خمشی نسبت به نمونه بدون الیاف داشته‌اند و در مقایسه‌ی الیاف فولادی قلابدار با موجدار، نمونه‌های با درصد الیاف‌های ۰/۵ و ۱ در حالت قلابدار مقاومتی در حدود ۷ و ۴۶ درصد بیشتر از مقاومت خمشی الیاف موجدار دارد.



شکل-۶-مقایسه‌ی مدول گسیختگی بتن الیافی

۴. ۲. مقاومت فشاری نمونه مکعبی

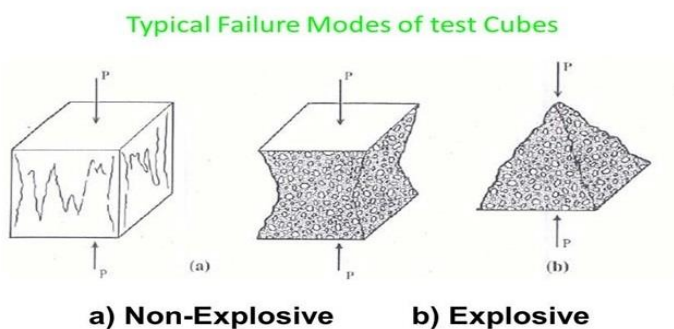
طبق استاندارد BS 1881-108:1983 با بارگذاری سطوحی که در تماس با قالب هستند و در نظر گرفتن حالت‌های خرابی صحیح نمونه‌های مکعبی (شکل-۷)، مقاومت فشاری طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$f = \frac{P}{A} \quad (2)$$

P : نیروی وارد بر نمونه‌ی مکعبی از طرف دستگاه بارگذاری برحسب نیوتن

f : مقاومت فشاری نمونه‌ی مکعبی برحسب مگاپاسکال

A : سطح مقطع تحت بارگذاری نمونه‌ی مکعبی بر حسب میلی‌متر مربع



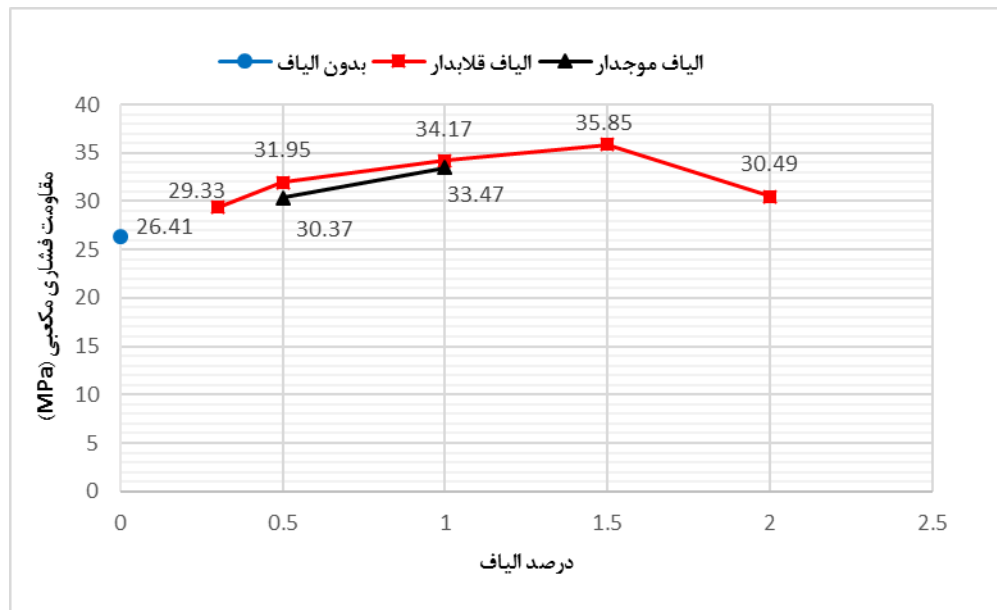
شکل ۷- جزئیات آزمایش فشاری نمونه مکعبی

نتایج حاصل از میانگین ۳ نمونه‌ی فشاری مکعبی در سن ۲۸ روزه در جدول ۵- ارائه شده است.

جدول ۵- مقاومت فشاری مکعبی ۲۸ روزه بتن الیافی

الیاف موجودار		الیاف دو سر قلاب دار					بدون الیاف	نوع الیاف
۱	۰/۵	۲	۱/۵	۱	۰/۵	۰/۳	-	میزان الیاف برحسب درصد حجمی بتن
۳۳/۴۷	۳۰/۳۷	۳۰/۴۹	۳۵/۸۵	۳۴/۱۷	۳۱/۹۵	۲۹/۳۳	۲۶/۴۱	مقاومت فشاری (MPa)

طبق مشاهدات آزمایشگاهی با اضافه نمودن الیاف به بتن، مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به بتن معمولی از ۱۱ تا ۳۶ درصد افزایش یافته است. همچنین طبق شکل ۸- با افزایش مقدار درصد الیاف نمونه‌های با الیاف قلابدار (از صفر تا ۱/۵ درصد)، مقاومت نمونه‌های بتن الیافی افزایش می‌یابد، ولی با افزایش الیاف به ۲ درصد کاهش مقاومت فشاری مشهود است. این می‌تواند ناشی از گلوله‌ای شدن الیاف‌ها باشد. در مقایسه‌ی نمونه‌های بتن الیافی قلابدار با موجدار، نمونه‌های با درصد الیاف‌های ۰/۵ و ۱ در حالت قلابدار مقاومتی در حدود ۵ و ۲ درصد بیشتر از مقاومت فشاری الیاف موجدار از خود نشان داده است.



شکل ۸- مقایسه مقاومت فشاری نمونه مکعبی بتن الیافی

۳.۴. تعیین مدول ارتجاعی

نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر درون محفظه‌ی تعیین مدول ارتجاعی دارای ساعت آنالوگ با دقت ۲ هزارم قرار داده شد و سپس با کلاهک مناسب زیر جک هیدرولیکی قرار گرفت (شکل ۹-) و اعداد ساعت آنالوگ همراه با نیروی وارده قرائت شد. مدول ارتجاعی مطابق استاندارد ASTM C469 [۱۹] از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (3)$$

که در این رابطه E مدول ارتجاعی برحسب گیگا پاسکال، σ_1 تنش برحسب گیگا پاسکال متناظر کرنش ϵ_1 ، σ_2 تنش برحسب گیگا پاسکال متناظر ϵ_2 و ϵ_1 کرنش نهایی نمونه، ϵ_2 کرنش تقریبی نزدیک به ۰/۰۰۰۰۵ و ϵ_2 کرنش متناظر σ_2 است.



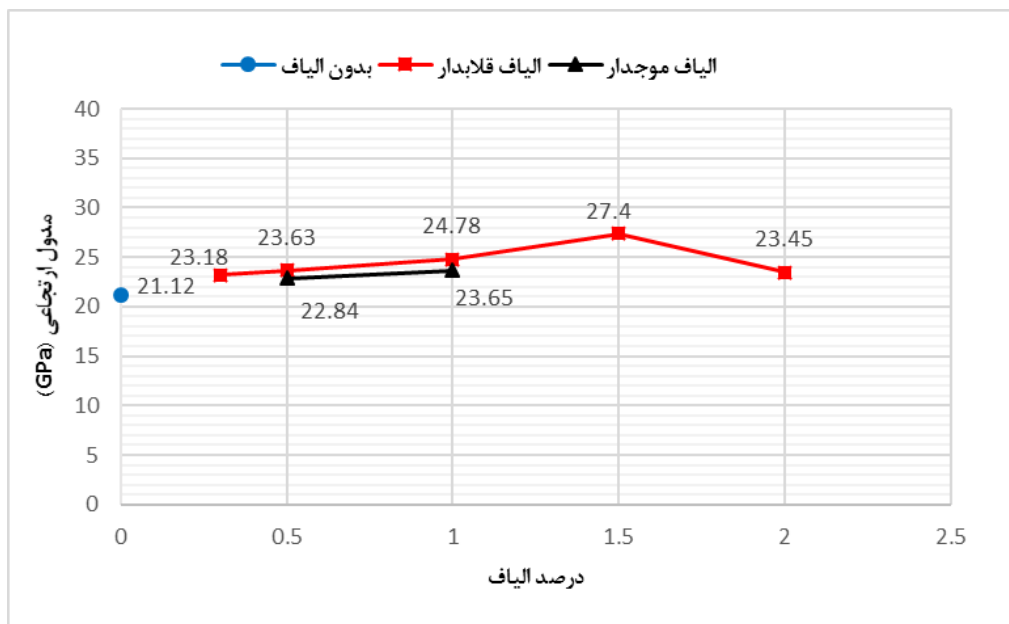
شکل ۹- آزمایش تعیین مدول ارتجاعی

نتایج حاصل از میانگین سه نمونه‌ی استوانه‌ای از هر طرح اختلاط مطابق جدول ۶ است. همانطور که مشاهده می‌شود وجود الیاف باعث افزایش در مدول ارتجاعی شده است و تأثیر درصد حجمی و نوع الیاف بر مقاومت فشاری استوانه‌ای مشابه تأثیر آن بر مقاومت فشاری مکعبی است.

جدول ۶- مدول ارتجاعی و مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ای ۲۸ روزه

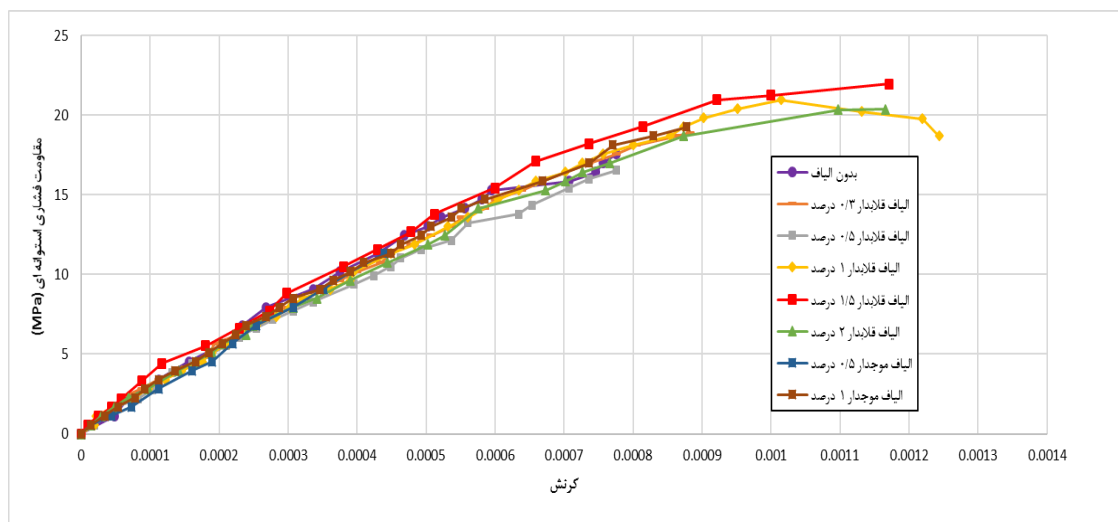
الیاف موجدار		الیاف دو سر قلاب دار					بدون الیاف	نوع الیاف
۱	۰/۵	۲	۱/۵	۱	۰/۵	۰/۳	-	میزان الیاف بر حسب درصد حجمی بتن
۲۳/۶۵	۲۲/۸۴	۲۳/۴۵	۲۷/۴۰	۲۴/۷۸	۲۳/۶۳	۲۳/۱۸	۲۱/۱۲	مدول ارتجاعی (GPa)
۱۹/۳۵	۱۸/۹۵	۲۰/۳۶	۲۱/۹۵	۲۰/۶۴	۱۹/۳۶	۱۸/۹۰	۱۷/۷۶	مقاومت فشاری (MPa)

مطابق شکل ۱۰، الیاف فولادی قلابدار با درصد حجمی ۰/۵ و ۱ درصد نسبت به الیاف موجدار به ترتیب ۳ و ۵ درصد مدول ارتجاعی بیشتری ایجاد کرده است که نشان‌دهنده‌ی تأثیر بیشتر الیاف قلابدار در مدول ارتجاعی بتن است. با افزایش درصد حجمی الیاف قلابدار در بتن، مدول ارتجاعی افزایش می‌یابد اما این روند افزایشی تا افزودن ۱/۵ درصد حجمی (۳۰ درصد افزایش مدول ارتجاعی بتن معمولی) مشاهده می‌شود و با افزودن ۲ درصد حجمی الیاف قلابدار به بتن (۱۱ درصد افزایش مدول ارتجاعی بتن معمولی)، مدول ارتجاعی نسبت به افزودن ۱/۵ درصد حجمی الیاف به بتن کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰- نمودار مدول ارتجاعی بتن الیافی

بر اساس شکل ۱۱، بتن با الیاف قلابدار با درصد حجمی الیاف ۱، ۱/۵ و ۲ درصد میزان شکل پذیری بیشتری نسبت به دیگر طرح‌ها دارد.



شکل ۱۱- نمودار تنش-کرنش نمونه‌های استوانه‌ای

۵. بررسی کلی نتایج

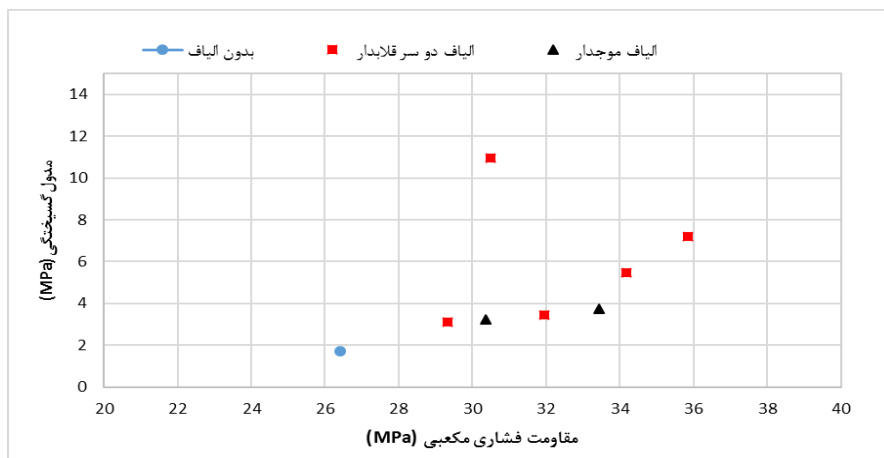
مطابق با جدول ۷- و شکل ۱۲- مدول ارتجاعی به مقاومت فشاری بستگی دارد و با افزایش مقاومت فشاری، مدول ارتجاعی افزایش می‌یابد. تأثیر درصد حجمی و نوع الیاف بر مقاومت فشاری استوانه‌ای مشابه تأثیر آن بر مقاومت فشاری مکعبی است و مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای در حدود ۰/۶ تا ۰/۷ مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی است. افزایش مدول گسیختگی با درصد حجمی الیاف رابطه مستقیم دارد و با افزایش درصد حجمی الیاف، مدول گسیختگی افزایش می‌یابد اما مدول ارتجاعی و مقاومت فشاری تا افزودن ۱/۵ درصد حجمی الیاف به بتن افزایش می‌یابد و با افزودن ۲ درصد حجمی الیاف به بتن، روند کاهشی در مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی مشاهده می‌شود بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با توجه به کاربرد بتن مصرفی، افزودن حدود ۱ تا ۱/۵ درصد حجمی الیاف قلابدار به بتن مناسب‌ترین مشخصات مکانیکی را می‌دهد.

همانطور که در بخش پیشینه تحقیق بیان شد جیسکارون و همکاران در سال ۲۰۱۷ با بررسی تأثیر درصدهای حجمی مختلف الیاف فولادی قلابدار در بتن و بررسی مقاومت فشاری، خمشی، برشی، کششی (دو نیم شدن استوانه)، مدول ارتجاعی و آزمایش ضربه به این نتیجه رسیدند که افزودن الیاف فولادی قلابدار (۰٪، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪) به بتن باعث بهبود مشخصات مکانیکی بتن می‌شود و با افزایش درصد حجمی الیاف در بتن مشخصات مکانیکی افزایش می‌یابد ولی افزودن ۱/۵٪ الیاف به بتن در حین آزمایش احتمال گلوله‌ای شدن الیاف را افزایش می‌دهد و افزودن الیاف به بتن بیشترین تأثیر را بر مقاومت برشی و ضربه دارد و کمترین تأثیر را بر مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی دارد [۱۱].

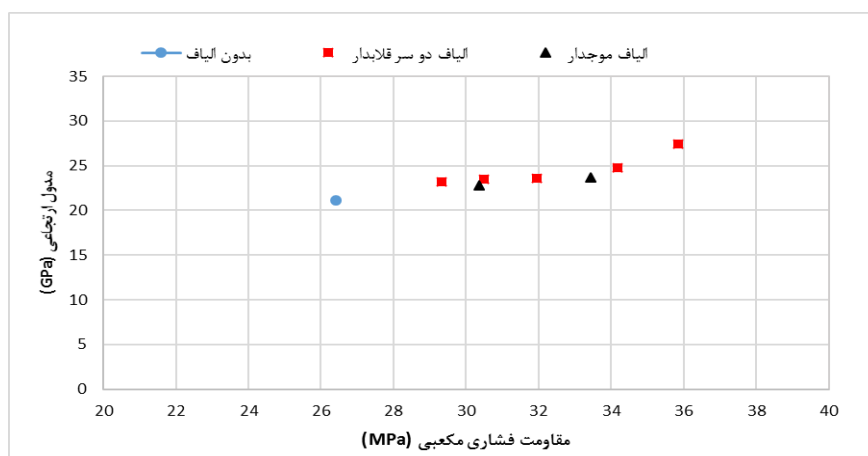
نتایج این تحقیق تأثیر درصدهای حجمی مختلف الیاف فولادی بر مقاومت خمشی، مدول ارتجاعی و مقاومت فشاری تحقیق جیسکارون و همکاران را تأیید می‌کند در ضمن مقادیر عددی مقاومت خمشی، مدول ارتجاعی و مقاومت فشاری بدست آمده از این تحقیق با توجه به مشخصات مصالح مصرفی نیز تحقیق جیسکارون و همکاران را تأیید می‌کند.

جدول ۷- مشخصات نمونه‌های ۲۸ روزه

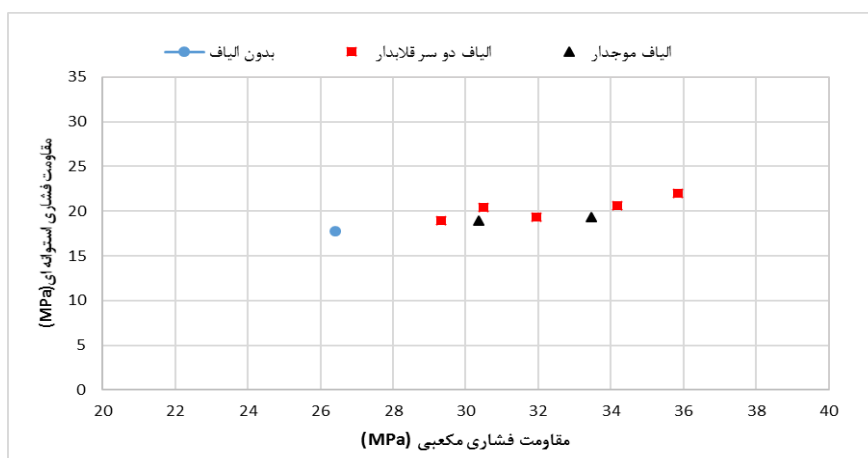
نوع الیاف	بدون الیاف	الیاف دو سر قلاب دار					الیاف موجودار
میزان الیاف برحسب درصد حجمی بتن	-	۰/۳	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۰/۵
مدول گسیختگی (MPa)	۱/۷۳	۳/۱۲	۳/۴۵	۵/۴۸	۷/۲۲	۱۰/۹۶	۳/۲۲
مقاومت فشاری نمونه‌ی مکعبی (MPa)	۲۶/۴۱	۲۹/۳۳	۳۱/۹۵	۳۴/۱۷	۳۵/۸۵	۳۰/۴۹	۳۰/۳۷
مدول ارتجاعی (GPa)	۲۱/۱۲	۲۳/۱۸	۲۳/۶۳	۲۴/۷۸	۲۷/۴۰	۲۳/۴۵	۲۲/۸۴
مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ای (MPa)	۱۷/۷۶	۱۸/۹۰	۱۹/۳۶	۲۰/۶۴	۲۱/۹۵	۲۰/۳۶	۱۸/۹۵



شکل ۱۲- نمودار مقاومت فشاری مکعبی-مدول گسیختگی



شکل ۱۳- نمودار مقاومت فشاری مکعبی-مدول ارتجاعی



شکل ۱۴- نمودار مقاومت فشاری مکعبی-مقاومت فشاری استوانه‌ای

۶. نتیجه گیری

- با بررسی داده‌های این مطالعه‌ی آزمایشگاهی می‌توان به نتایج زیر رسید:
- ۱- افزودن الیاف فولادی به بتن باعث بهبود مشخصات مکانیکی بتن می‌شود.
 - ۲- الیاف فولادی در بتن، افزایش قابل توجهی در مقاومت خمشی ایجاد می‌کند و این روند افزایشی با افزایش درصد حجمی الیاف در بتن افزایش می‌یابد و همچنین الیاف فولادی قلابدار عملکرد خمشی بهتری نسبت به الیاف فولادی موجدار دارد.
 - ۳- با مقایسه‌ی نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی، یک رابطه‌ی مستقیم بین افزایش درصد حجمی الیاف در بتن (از صفر تا ۱/۵ درصد) با مقاومت فشاری وجود دارد که این افزایش در مقاومت فشاری نسبت به افزایش در مقاومت خمشی زیاد نیست. در بررسی مقاومت فشاری بتن، الیاف فولادی قلابدار عملکردی بهتری نسبت به الیاف فولادی موجدار نشان دادند.
 - ۴- بتن الیافی با افزایش درصد حجمی الیاف، سختی بیشتری پیدا می‌کند اما این روند تا افزودن حدود ۱/۵ درصد الیاف به بتن رخ می‌دهد و الیاف فولادی قلابدار نسبت به الیاف موجدار سختی بیشتری نشان می‌دهد.
 - ۵- تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت خمشی بیشتر از مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی است.
 - ۶- الیاف فولادی قلابدار دارای عملکرد خمشی، فشاری و سختی بهتری در بتن است و افزودن حدود ۱ تا ۱/۵ درصد حجمی الیاف قلابدار به بتن مناسب‌ترین مشخصات مکانیکی بتن را ارائه می‌دهد.

۷. تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره ۲۵۷۳۰ تحت حمایت سازمان نظام مهندسی استان فارس انجام شده است. لذا از همکاری این سازمان کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] American Concrete Institute (ACI). (2009). ACI 544.1R-96, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete.
- [2] A. E. Naaman and V. S. Gopalaratnam. (1983). "Impact Properties of Steel Fibre Reinforced Concrete in Bending". International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, vol. 5, no. 4, pp. 225-233.
- [3] K. Balasubramanian, B. H. Bharatkumar, S. Gopalakrishnan and V. S. Parameswara. (May 1996). "Impact Resistance of Steel Fiber Reinforced Concrete". The Indian Concrete Journal, vol. 24, no.3, pp. 257-262.
- [4] M. C. Nataraja, T. S. Nagaraj, and S. B. Basavaraja. (2005). "Reproportioning of steel fibre reinforced concrete mixes and their impact resistance". Cement and Concrete Research, vol. 35, no. 12, pp. 2350-2359.
- [5] M. Nili and V. Afroughsabet. (2010). "Combined Effect of Silica fume and Steel Fibers on the Impact Resistance and Mechanical Properties of Concrete". International Journal of Impact Engineering, vol. 37, no. 8, pp. 879-886.
- [6] Olivito, R.S.; Zuccarello, F.A. (Part B 2010). "An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete". Compos, 41, 246-255.

- [7] A. Alavi Nia, M. Hedayatian, M. Nili, and V. A. Sabet. (2012). "An Experimental and Numerical Study on how Steel and Polypropylene Fibers Affect the Impact Resistance in Fiber-reinforced Concrete". International Journal of Impact Engineering, vol. 46, no. January, pp. 62–73.
- [8] G. Murali, A. S. Santhi, and G. Mohan Ganesh. (2014). "Effect of Crimped and Hooked end Steel Fibers on the Impact Resistance of Concrete". Journal of Applied Science and Engineering, vol. 17, no. 3, pp. 259–266.
- [9] B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk and S. Amziane. (2014). "Failure Mechanism of Fiber Reinforced Concrete Under Splitting test using Digital Image Correlation". Materials and Structure, vol. 48, no.6, pp. 1–14.
- [10] M. Nili, A.H. Ghorbankhani, A. AlaviNia, M. Zolfaghari. (2016). "Assessing the impact strength of steel fibre-reinforced concrete under quasi-static and high velocity dynamic impacts", Constr. Build. Mater. 264–271.
- [11] JAISKARUN,K AND SUJATHA UNNIKRISHNAN. (February 2017). "Experimental and Analytical Investigation on Steel Fiber Reinforced Concrete". International Journal of Earth Sciences and Engineering, Volume 10, No. 01, P.P.17-24.
- [12] B. Isojeh, M. El-Zeghayar, F.J. Vecchio. (2017). "Fatigue behavior of steel fiber concrete in direct tension", J. Mater. Civ. Eng. ASCE 29 (9).
- [13] American Concrete Institute (ACI). (1991). ACI 211.1, "Standard practice for selecting proportions for normal, heavy-weight and mass concrete".
- [14] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2012). ASTM C1609/C1609M– 12. "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)".
- [15] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2016). C192/C192M–16a. "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory".
- [16] BRITISH STANDARD. BS 1881-108:1983- Testing concrete. "Method for making test cubes from fresh concrete".
- [17] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2016). C39/C39M–16b, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens".
- [18] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2016). C78/C78M–16, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)".
- [19] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014). C469/C469M–14, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression".