

## Optimizing the Consumption of Intertwined Macro Synthetic Fibers to Improve the Mechanical Properties of Concrete

Ashkan KhodaBandehLou \*<sup>1</sup>, Amin Asadi Zeynali <sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Faculty Of Engineering, Civil Engineering Department, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran

2- Ph.D. Student Of Civil Engineering-Structure, Faculty Of Engineering, Civil Engineering Department, Urmia Branch, Islamic Azad University, Urmia, Iran

### ABSTRACT

Improving the mechanical properties of concrete with the help of fibers is considered as one of the common methods of concrete processing. Addition of fibers to concrete increases the energy absorption and ductility of concrete and prevents the spread of cracks. Steel, polypropylene and glass fibers are the most widely used fibers. In addition, new types of macro-synthetic fibers have been introduced. In this research, in order to improve the mechanical properties of concrete, a new type of macro-synthetic fibers has been used. Samples reinforced with 2, 4, 6 and 8% of fibers were evaluated using various compressive, flexural, tensile tests as well as elastic coefficient determination tests and their optimal consumption was selected. In this research, it has been tried that the test conditions are as compatible as possible with the industry conditions so that the final results of the research are in good agreement with the current situation of the concrete industry and can be used. Comparison of test results showed that, as expected, fiber-reinforced concretes have higher compressive, flexural, tensile strength and tensile strength than conventional concretes. In addition, between different percentages of fibers in concrete, in samples with percentages greater than 2%, the rate of increase of different strengths is lower than in the case without fibers. Therefore, considering the cost of macro synthetic fibers, the most suitable percentage for reinforcing concrete with them was introduced as 2%.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 10 April 2021

**Revise Date:** 18 May 2021

**Accept Date:** 11 June 2021

### Keywords:

Macro synthetic fibers  
Intertwined  
Mechanical properties  
Optimum percentage  
Mixing design

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.280515.2412>

\*Corresponding author: Ashkan KhodaBandehLou  
Email address: a.khodabandehlou@iaurmia.ac.ir

## بهینه‌یابی میزان مصرف الیاف ماکرو سینتتیک درهم تنیده برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن

اشکان خدابنده لو<sup>۱\*</sup>، امین اسدی زینالی<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

۲- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

### چکیده

بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن به کمک الیاف یکی از روش‌های رایج فراوری بتن در نظر گرفته می‌شود. افزودن الیاف به بتن باعث افزایش میزان جذب انرژی بتن و شکل‌پذیری بتن می‌شود و از گسترش ترک‌ها جلوگیری می‌کند. الیاف فولادی، پلی پروپیلن و شیشه‌ای از پرکاربردترین الیاف مورد استفاده می‌باشند. علاوه بر آن‌ها، گونه‌های نوینی از الیاف ماکرو سینتتیک نیز معرفی شده‌اند. در این پژوهش، به منظور بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن از گونه‌ی نوینی از الیاف ماکرو سینتتیک بهره‌جویی شده است. نمونه‌های مسلح به ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد از الیاف به کمک آزمون‌های مختلف فشاری، خمشی، آزمون کششی و هم‌چنین آزمون تعیین ضریب کشسانی مورد ارزیابی قرار گرفتند و میزان مصرف بهینه‌ی آن‌ها انتخاب شد. در این پژوهش سعی بر آن بوده است که شرایط آزمایش تا حد امکان منطبق بر شرایط صنعت باشد تا نتایج نهایی پژوهش قرابت مناسبی با وضعیت کنونی صنعت بتن داشته و قابلیت استفاده داشته باشند. مقایسه‌ی نتیجه‌های آزمون‌ها نشان دادند که بر طبق انتظار، بتن‌های مسلح به الیاف نسبت به بتن‌های معمولی مقاومت فشاری، خمشی، کششی و ضریب کشسانی بیشتری دارند. علاوه بر آن، بین درصد‌های مختلف الیاف در بتن، در نمونه‌های دارای درصد‌های بیشتر از ۲ درصد، نرخ افزایش مقاومت‌های مختلف نسبت به حالت بدون الیاف کم‌تر است. بنابراین، با توجه به هزینه‌ی الیاف ماکرو سینتتیک، مناسب‌ترین درصد برای مسلح کردن بتن با آن‌ها ۲ درصد معرفی شد.

کلمات کلیدی: الیاف ماکرو سینتتیک، درهم تنیدگی، ویژگی‌های مکانیکی، درصد بهینه، طرح اختلاط

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.280515.2412">https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.280515.2412</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.280515.2412	۱۴۰۰/۱۰/۳۰	۱۴۰۰/۰۳/۲۱	۱۴۰۰/۰۳/۲۱	۱۴۰۰/۰۲/۲۸	۱۴۰۰/۰۱/۲۱
			اشکان خدابنده لو		*نویسنده مسئول:	
			a.khodabandehlou@iaurmia.ac.ir		پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

افزودن الیاف به مخلوط‌های ترد و شکننده که توان کششی اندکی دارند، از گذشته‌های دور مورد توجه قرار داشته است [۱]. برای نمونه، مصریان از کاه برای مسلح کردن خشت‌های گلی استفاده می‌کردند. در برخی از موردها از الیاف پنبه نسوز و موی اسب نیز برای مسلح کردن استفاده شده است [۲]. از آنجا که بتن نیز ماده‌ای ترد می‌باشد، کاربرد بتن الیافی با نرمی بالاتر به گونه‌ای که بتواند تغییرشکل‌های بزرگ را بدون شکست تحمل نماید، مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است [۳]. پژوهش‌های فراوانی درباره‌ی فراهم کردن نرمی لازم در بتن با الیاف مختلف و حتی در برخی موارد حذف آرماتور، در حال انجام است [۴ و ۵]. در برخی از پژوهش‌ها از الیاف مختلف برای تقویت بیرونی بخش‌های مختلف سازه‌های بتنی استفاده شده است [۶ و ۷] و پژوهش‌گرانی نیز به ارایه‌ی رابطه‌های تحلیلی برای آن‌ها پرداخته‌اند [۸ - ۱۱]. افزودن الیاف به بتن، موجب افزایش میزان جذب انرژی بتن و کنترل گسترش ترک است تا قطعه‌ی بتنی بتواند در مقابل بارهای وارده در یک مقطع ترک‌خورده، تغییر شکل‌های بیشتری را پس از ایجاد اولین ترک تحمل نماید. اضافه‌شدن الیاف به بتن، ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مقاومت به ضربه را بهبود می‌بخشد [۱۲ و ۱۳]. علاوه بر این، افزودن الیاف به بتن، به کاهش بازشدگی ترک و افزایش تغییرشکل‌های آن کمک می‌کند. برتری ترکیب الیاف آلی مانند پلی‌پروپیلن و نایلون و الیاف معدنی مانند شیشه، آزبست و کربن، به دست آوردن مقاومت کششی بیشتر و طاقت خمشی بالاتر است که در برخی از پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴].

در پژوهش‌های فراوان دیگری درباره‌ی ویژگی‌های بتن الیافی بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده است که در بیشتر آن‌ها نتیجه‌ها نشان دادند که طرح اختلاط بهینه‌ی یک مخلوط بتنی منجر به برهم‌کنش مثبت الیاف می‌شود و در نتیجه عملکرد بتن الیافی را نسبت به بتن‌های معمولی بهبود می‌بخشد [۱۵]. Shah [۱۶] و Banthia و همکاران [۱۷] بتن الیافی ساخته‌شده از الیافی با جنس یکسان و اندازه‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که الیاف کوچک‌تر رشد ریزترک‌ها را کنترل می‌نماید و از به هم پیوستن آن‌ها جلوگیری می‌نماید. از طرف دیگر، الیاف بزرگ‌تر از ایجاد و گسترش ترک‌های بزرگ و شکست زود هنگام نمونه‌ها جلوگیری می‌کند. در پژوهش Banthia و همکاران [۱۷] از دو دسته الیاف با یک اندازه و دو جنس مختلف برای ساخت بتن الیافی استفاده شد. نتیجه‌های این پژوهش نشان دادند که الیاف با سختی و ضریب کشسانی بیشتر باعث افزایش مقاومت در برابر نخستین ترک و مقاومت نهایی شدند. از طرف دیگر، بهره‌جویی از الیاف انعطاف‌پذیر باعث بهبود طاقت خمشی و ظرفیت کرنشی پس از نخستین ترک می‌شوند. همچنین، نتیجه‌های پژوهش Qian و همکارانش [۱۸] بر روی ویژگی‌های بتن الیافی نشان می‌دهد که استفاده از الیاف در بتن، ویژگی‌های بتن تازه را نیز تغییر می‌دهد، به طوری که علاوه بر بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن، تولید آن نیز آسان‌تر می‌شود و کاهش جمع‌شدگی پلاستیک نیز بهبود می‌یابد.

نتیجه‌های پژوهش Zheng و Feldman [۱۹] نشان می‌دهد که استفاده از الیاف فولادی علاوه بر افزایش کرنش خرابی، جذب انرژی در بتن را نیز افزایش می‌دهد. در یکی از موردها، استفاده‌ی هم‌زمان از این الیاف و الیاف کمکی دیگر، جذب انرژی نمونه‌هایی که در معرض هوا قرار گرفته تا ۱۳ درصد نسبت به نمونه بتن معمولی بیشتر کرده است. در پژوهشی دیگر، Yao و همکاران [۲۰] آزمون‌های مقاومت خمشی بر روی بتن‌های حاوی درصد‌های مختلفی از الیاف فولادی، کربنی و پروپیلن را انجام دادند. نتیجه‌های این آزمون‌ها نشان می‌دهد که در حالت کلی، افزودن الیاف، بتن را نسبت به بتن معمولی مقاوم‌تر و شکل‌پذیرتر می‌کند. از طرف دیگر، بیشترین مقاومت خمشی مربوط به الیاف فولادی است، در حالی که ترکیب الیاف فولادی با الیاف کربنی منجر به بیشترین مقاومت شده است. Sorelli و همکاران [۲۱] آزمایش‌هایی را برای بررسی دقیق‌تر اثر الیاف بر روی مقاومت خمشی بتن الیافی ترتیب دادند. در این آزمایش‌ها، با استفاده از عکس‌های اشعه ایکس پراکندگی الیاف در بتن به طور همگن در نمونه‌های با ابعاد بزرگتر بررسی شده است. نتیجه‌ها نشان دادند که استفاده از هر یک از گونه‌های الیاف ماکرو و میکرو مقاومت بتن را افزایش می‌دهند. Mindess و Bentur [۲۲] آزمایش‌هایی را برای مشخص کردن اثر الیاف فولادی در بتن‌های الیافی انجام دادند. نتیجه‌ی بررسی این آزمایش‌ها نشان داد که الیاف ریزتر مقاومت فشاری را بیشتر افزایش می‌دهند. همچنین، نسبت سطح الیاف پارامتر با اهمیتی در بررسی اثر الیاف است بطوری که با بیشتر شدن نسبت سطح الیاف، مقاومت کششی بیشتری در بتن الیافی ایجاد می‌شود. Selina Ruby و همکاران [۲۳] آزمایش‌هایی را بر روی بتن الیافی با ترکیب الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن انجام

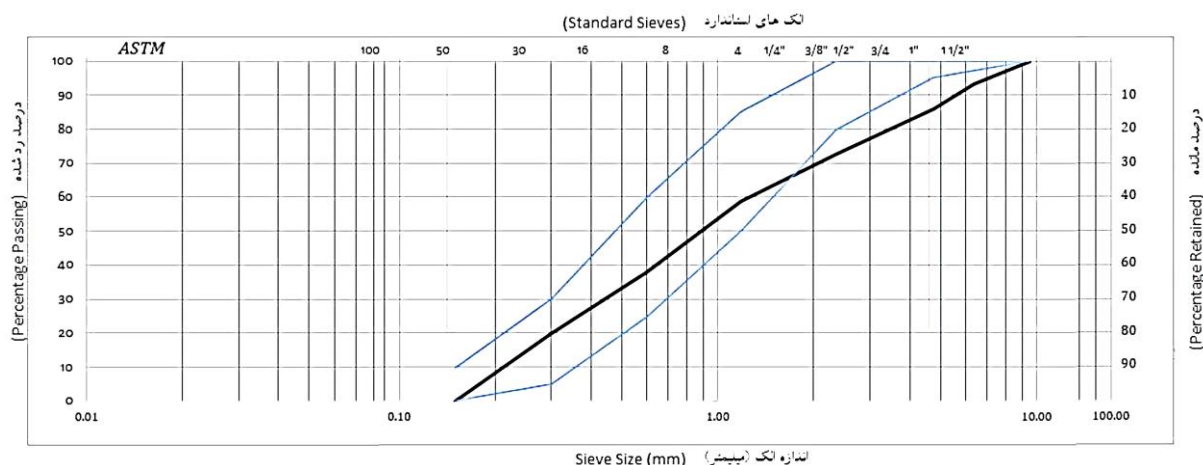
دادند. در این آزمایش‌ها، تلاش شد تا مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن الیافی مورد بررسی قرار گیرد. نتیجه‌های این پژوهش نشان دادند که ترکیب ۰/۲۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۷۵ درصد الیاف فولادی بهترین نتیجه‌های مقاومتی را به دست می‌دهد. با این ترکیب، بیشترین مقاومت فشاری، کششی و خمشی حاصل شده است. Park و همکارانش [۲۴ و ۲۵] با افزودن الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به بتن ساخته شده از خرده‌های لاستیک، رفتار بتن را بررسی کردند. نتیجه‌های این بررسی نشان می‌دهد که با افزودن هم‌زمان الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن مقاومت بتن بیشتر از حالتی است که تنها از یک نوع الیاف در بتن استفاده شود. در پژوهشی دیگر، Serrano و همکاران [۲۶] مقاومت فشاری و کششی بتن‌های حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن را بررسی کردند. نتیجه‌ی پژوهش آن‌ها نشان داد که افزودن الیاف در بتن حدود ۱ الی ۲ درصد مقاومت را افزایش می‌دهد ولی پس از رسیدن به بیشینه مقاومت، شکل‌پذیری آن‌ها کم می‌شود. Alberti و همکاران [۲۷] در پژوهش خود به بررسی رفتار بتن‌های حاوی الیاف ترکیبی پلی‌پروپیلن و فولادی حفره‌دار پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از الیاف به صورت ترکیبی، جذب انرژی و انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به حالتی که به صورت جداگانه استفاده شوند، دارند. Karimipour و همکاران [۲۸ - ۳۲] نیز در پژوهش‌های مختلفی به بررسی اثر الیاف فولادی و پلی‌پاراپیلن در بتن‌های با مصالح بازیافتی پرداخته‌اند. نتیجه‌ی این پژوهش‌ها نشان می‌دهد استفاده از الیاف با درصد بهینه می‌تواند به افزایش ویژگی‌های مختلف بتن مانند مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی و ضریب کشسانی آن کمک کند.

با وجود پژوهش‌های فراوانی که در زمینه‌ی استفاده از گونه‌های مختلف الیاف به منظور بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن انجام شده است، هنوز هم جنبه‌های ناشناخته‌ی بسیاری در این مورد باقی مانده‌اند و اثربخشی الیاف گوناگون دیگری نیاز به ارزیابی دارند. از این رو، در این پژوهش از گونه‌ی نوینی از الیاف ماکروسینتتیک در هم تنیده برای بهبود ویژگی‌های بتن بهره‌جویی شده است. برای این منظور، علاوه بر نمونه‌های شاهد، نمونه‌های آزمایشگاهی با ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد الیاف به کمک آزمون‌های مختلف فشاری، خمشی، کششی و هم‌چنین آزمون تعیین ضریب کشسانی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و درصد بهینه الیاف بر مبنای اثرگذاری آن‌ها انتخاب شده است.

## ۲- طرح اختلاط بتن

در این پژوهش، با استفاده از روش وزنی، طرح اختلاط به منظور بدست آوردن بتن مورد نظر صورت گرفت. در این طرح نسبت آب به سیمان برابر ۰/۴ می‌باشد. هم‌چنین، درصد‌های مختلف ۲، ۴، ۶ و ۸ از الیاف ماکرو سینتتیک در این طرح در نظر گرفته شد. جدول (۱) طرح اختلاط‌ها را نشان می‌دهد. از آنجا که بتن‌های الیافی در حال حاضر در داخل کشور به سرعت رو به توسعه و صنعتی شدن هستند، در این پژوهش سعی بر آن بوده است که شرایط آزمایش تا حد امکان منطبق بر شرایط صنعت باشد تا نتایج نهایی پژوهش قرابت مناسبی با وضعیت کنونی صنعت بتن داشته و قابلیت استفاده داشته باشند. به همین منظور بتن‌های ساخته شده در این پژوهش بر اساس طرح اختلاط کارخانه پایدار بتن شرق تهیه شده‌اند. این طرح اختلاط تا زمان حاضر به مقدار چندین هزار متر تولید و در صنعت ساختمان به مصرف رسیده است.

سنگدانه‌های مورد استفاده در این طرح اعم از ماسه، نخودی و بادامی از یک دپوی ثابت برداشت شده‌اند. این دپوها به مدت یک ماه زیر اثر تابش مستقیم خورشید قرار گرفته‌اند تا رطوبت سطحی و داخلی آنها تا حد امکان خشک شده و همسان گردد. شکل ۱ نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. دانه‌بندی مصالح را با یک شاخص به نام منحنی دانه‌بندی مشخص می‌کنند. منحنی دانه‌بندی عبارت است از یک منحنی که چگونگی توزیع دانه‌ها از نظر ابعاد را مشخص می‌کند. برای اهداف عملی، استفاده از محدوده‌های دانه‌بندی توصیه شده در ASTM C33 [۳۳] مطلوب‌تر است. این محدوده‌ها، نه تنها وسیع بوده و وجه اقتصادی نیز دارد، بلکه بر اساس تجربه عملی و نه مطالعات تئوریک، استوار است. امکان ساخت مخلوط‌های بتن قابل قبول، با هر نوع دانه‌بندی سنگدانه در محدوده مشخصات ASTM C33 [۳۳] امکان پذیر می‌باشد. دانه‌بندی سنگدانه خارج از محدوده‌های مزبور، ممکن است مشکلات کارایی داشته باشد و احتمال غیر اقتصادی بودن آن نیز وجود دارد. دانه‌های سنگی به دو دسته دانه‌های درشت یا شن و دانه‌های ریز یا ماسه تقسیم می‌شود. مرز اندازه شن و ماسه، الک نمره ۴ (#۴) است که اندازه بعد آن ۴/۷۶ میلی‌متر است. دانه‌های عبوری از الک نمره ۴، ماسه و دانه‌های مانده رو الک ۴، شن هستند.



شکل ۱: منحنی دانه بندی

سیمان استفاده شده در این طرح، سیمان تپ دو کارخانه سیمان زاوه تربت بوده است که در یک محیط خشک و به دور از رطوبت دپو گردیده است. سیمان مصرفی تمامی نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش از دپوی یاد شده تأمین گردیده است. همچنین فوق روان کننده استفاده شده در این طرح محصول شرکت KG کره جنوبی [۳۴] بوده است. علت استفاده از این گونه سیمان هزینه اندک و کاهش ترک خوردگی ناشی از حرارت است. طرح اختلاط نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱- طرح اختلاط نمونه‌های آزمایشگاهی

گروه	سیمان	شن	ماسه ریزدانه kg/m <sup>3</sup>	ماسه درشت دانه	آب به سیمان W/C	SP/C	الیاف kg/m <sup>3</sup>	اسلامپ cm	حجم نمونه‌ها Litter
S1	۳۵۰	۱۱۲۰	۲۰۰	۴۸۰	۰/۴	۰/۰۰۵	۰	۲۲	۱۰۰
S2	۳۵۰	۱۱۲۰	۲۰۰	۴۸۰	۰/۴	۰/۰۰۵	۲	۱۵	۱۰۰
S3	۳۵۰	۱۱۲۰	۲۰۰	۴۸۰	۰/۴	۰/۰۰۵	۴	۷	۱۰۰
S4	۳۵۰	۱۱۲۰	۲۰۰	۴۸۰	۰/۴	۰/۰۰۵	۶	۲	۱۰۰
S5	۳۵۰	۱۱۲۰	۲۰۰	۴۸۰	۰/۴	۰/۰۰۵	۸	۱	۱۰۰

به کمک این طرح اختلاط، مصالح مختلف و درصدهای مختلف الیاف در مخلوط کن ریخته شدند و بتن‌های مورد نظر به دست آمدند. شکل ۲ نمونه‌ای از بتن آماده شده با چهار درصد الیاف ماکرو سینتتیک را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمونه‌ای از بتن الیافی با چهار درصد الیاف ماکرو سینتتیک: (الف) الیاف، (ب) مخلوط

به منظور دستیابی به دقت بالاتر و اطمینان از طرح اختلاط ارائه شده، طبق استانداردها، آزمون اسلامپ هم روی بتن‌های به دست آمده انجام شد. به عنوان نمونه شکل ۳ چگونگی انجام این آزمون را برای طرح اختلاط گروه S4 نشان می‌دهد.



شکل ۳: آزمون اسلامپ طرح اختلاط گروه S4

از بتن به دست آمده، نمونه‌های مختلفی برای آزمون‌های مورد نظر آماده شدند. این نمونه‌ها شامل پانزده نمونه‌های مکعبی برای آزمون فشاری، پانزده نمونه‌های مکعب مستطیلی برای آزمون خمشی و سی نمونه‌ی استوانه‌ای برای آزمون کششی و تعیین ضریب کشسانی بودند. شکل ۴ قالب‌های مربوط به این نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۴: قالب‌های مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌ها پس از شکل‌گیری از قالب‌ها خارج شدند و در حوضچه آب قرار گرفتند تا مرحله‌ی عمل‌آوری آن‌ها کامل شود. شکل ۵ چگونگی قرارگیری آن‌ها در این حوضچه را نشان می‌دهد.



شکل ۵: قرارگیری نمونه‌ها در حوضچه‌ی آب

در ادامه به بررسی ویژگی‌های الیاف ماکرو سینتتیک به کار رفته در این پژوهش و هم‌چنین، ارزیابی آزمون‌های مختلف فشاری، خمشی، کششی و تعیین ضریب کشسانی انجام شده بر روی این نمونه‌ها پرداخته می‌شود.

### ۳- الیاف ماکروسینتتیک

الیاف ماکرو سینتتیک به کار رفته در این پژوهش از دو ساختار متفاوت با جنس‌های مختلف تشکیل شده است. یک بخش آن، رشته‌های نازک در هم تابیده شده می‌باشد که جنس آن از کوپلیمر است و بخش دیگر آن، از رشته‌های نازک شبکه‌ای تشکیل شده که از جنس پلی پروپیلن خالص می‌باشد. چگونگی عملکرد این الیاف به این صورت است که بخش شبکه‌ای، مانع ایجاد و گسترش ترک‌های سطحی و ترک‌های نخستین در بتن می‌شود و بخش رشته‌های در هم تابیده شده، پس از باز شدن در ساختار بتن هم، در جلوگیری از ترک‌های نخستین و هم ترک‌های پسین و بتن سخت شده، نقش خود را ایفا می‌کند.

میزان مصرف رایج الیاف ماکرو سینتتیک با توجه به نوع کاربرد، در بازه‌ی ۱ تا ۴/۵ کیلوگرم در هر متر مکعب بتن می‌باشد. این الیاف در محل کارخانه ساخت بتن و یا در محل اجرای پروژه و در داخل تراک میکسر می‌توانند افزوده شود. پیشنهاد می‌شود پس از اضافه کردن آن، بین ۵ تا ۱۰ دقیقه اختلاط ادامه یابد و سپس پمپاژ انجام شود. در صورت استفاده از فوق روان‌کننده در مخلوط بتن، این الیاف باید قبل از فوق روان‌کننده افزوده شود. نیازی به اضافه کردن تجهیزات جدید برای وزن کردن این الیاف نیست، زیرا، در بسته‌های آماده یک کیلوگرمی به مخلوط اضافه می‌شوند. جدول ۲ و شکل ۶، به ترتیب، ویژگی‌ها و شکل ظاهری الیاف ماکرو سینتتیک را نشان می‌دهند.

جدول ۲: ویژگی‌های الیاف ماکرو سینتتیک

پلی پروپیلن خالص / کوپلیمر	مواد سازنده
رشته‌های درهم تابیده شده	شکل
طوسی	رنگ
۴۵mm	طول
۵۷۰-۶۶۰ MPa	مقاومت کششی
۰/۹۱	وزن مخصوص
ندارد	جذب آب
بسیار عالی	مقاومت در محیط اسیدی و بازی
۰/۹-۴/۵ kg/m <sup>3</sup>	میزان مصرف



شکل ۶: الیاف ماکرو سینتتیک

## ۴- آزمون‌ها

## ۴-۱- آزمون فشاری

این آزمایش برای بدست آوردن مقاومت فشاری بتن با استفاده از نمونه‌های مکعبی  $15 \times 15 \times 15$  cm مطابق آزمایش استاندارد ASTM-C39 [۳۵] انجام می‌شود. در این آزمایش، یک نیروی محوری به نمونه اعمال می‌شود تا بتن گسیخته شود.

مقاومت فشاری نمونه از تقسیم نیرو در هنگام گسیختگی بر سطح مقطع آن به دست می‌آید. در این پژوهش، برای هر یک از گروه‌های بتنی دارای ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد الیاف، سه نمونه آزمایش شدند و در نهایت میانگین مقاومت فشاری آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۷ نمونه‌های آزمایش شده پس از آزمون را نشان می‌دهد. ویژگی نمونه‌های آزمایش فشاری به همراه نتیجه‌های به دست آمده از آزمون در جدول ۳ ارائه شده‌اند. میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها در نمودار شکل ۸ نشان داده شده است.

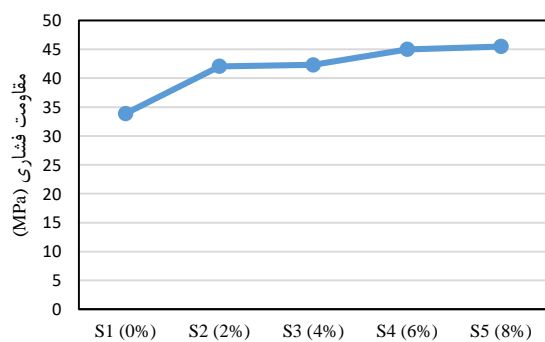
جدول ۳: نتیجه‌های آزمون فشاری بر روی نمونه‌ها

گروه	نام نمونه	ابعاد (cm×cm×cm)	وزن (gr)	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	بار نهایی (ton)	مقاومت فشاری (MPa)	میانگین مقاومت فشاری (MPa)
S1 (0%)	S1-C1	15×15×15	7790	2308/14	75/5	33/56	33/89
	S1-C2	15×15×15	7774	2303/41	79/3	35/24	
	S1-C3	15×15×15	7708	2283/85	74	32/89	
S2 (2%)	S2-C1	15×15×15	7822	2317/63	94	41/78	42/07
	S2-C2	15×15×15	8058	2387/56	94	41/78	
	S2-C3	15×15×15	8104	2401/18	96	42/67	
S3 (4%)	S3-C1	15×15×15	8026	2378/07	97	43/11	42/31
	S3-C2	15×15×15	7830	2320/01	93/9	41/73	
	S3-C3	15×15×15	7808	2313/48	94/7	42/09	
S4 (6%)	S4-C1	15×15×15	8158	2417/19	100/4	44/62	44/99
	S4-C2	15×15×15	8030	2379/26	102/3	45/46	
	S4-C3	15×15×15	7994	2368/59	101	44/89	
S5 (8%)	S5-C1	15×15×15	7978	2363/85	102/1	45/38	45/49
	S5-C2	15×15×15	8090	2397/03	103/9	46/17	
	S5-C3	15×15×15	8018	2375/71	101/1	44/93	





شکل ۷: نمونه‌های آزمون فشاری



شکل ۸: میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، مقاومت فشاری بتن الیافی با افزایش درصد الیاف افزایش می یابد. ولی نرخ این افزایش با نرخ افزایش درصد الیاف یکسان نیست و روند مشابهی ندارد. این ناهمبستگی را می توان در نمونه های S2 و S3 مشاهده کرد. این دو نمونه با وجود تغییر در میزان درصد الیاف خود، در مقاومت فشاری تفاوت چندانی ندارد. از این رو، می توان نتیجه گرفت، اثر الیاف بر روی مقاومت فشاری دارای یک روند ثابت نیست. برخی از پژوهشگران افزایش و برخی دیگر کاهش در مقاومت فشاری را گزارش کرده اند [۵]. دست یابی به این نتیجه که چرا الیاف بر روی مقاومت فشاری چنین اثر دوگانه ای دارند، مشکل است. ولی، به طور کلی کاهش مقاومت فشاری برای بتن های الیافی می تواند به علت ایجاد نشدن کامل پیوستگی بین بتن و الیاف باشد که با افزایش آب این پیوستگی بهتر صورت می گیرد.

برای دست یابی به علت دیگر این رفتار بتن الیافی، می توان بتن و الیاف درون آن را به یک سازه شبکه ای تشبیه کرد. در این سازه اعضای فشاری و اتصال اعضای کششی به عهده بتن است و الیاف نقش اعضای کششی را بازی می کنند. نیروی اعمال شده، اعضای فشاری، کششی و اتصالات را تحت اثر قرار می دهد. در این میان، حفظ پایداری جانبی سازه به عهده اعضای کششی (الیاف) می باشد. حال اگر، درصد الیاف افزایش یابد، تعداد الیاف در یک حجم معین از مخلوط (اتصالات) زیاد می شود و در حقیقت با افزایش تعداد الیاف، افزایش در بار اعمال شده، سبب شکست اتصالات (بتن) شده و نمونه به صورت ناگهانی شکسته خواهد شد. بنابراین، با افزایش درصد الیاف به طور قطعی مقاومت بتن الیافی افزایش نمی یابد.

در حالت کلی الیاف برای افزایش مقاومت فشاری به بتن افزوده نمی شوند و برای بهبود مقاومت فشاری می توان طرح اختلاط را تغییر داد [۴].

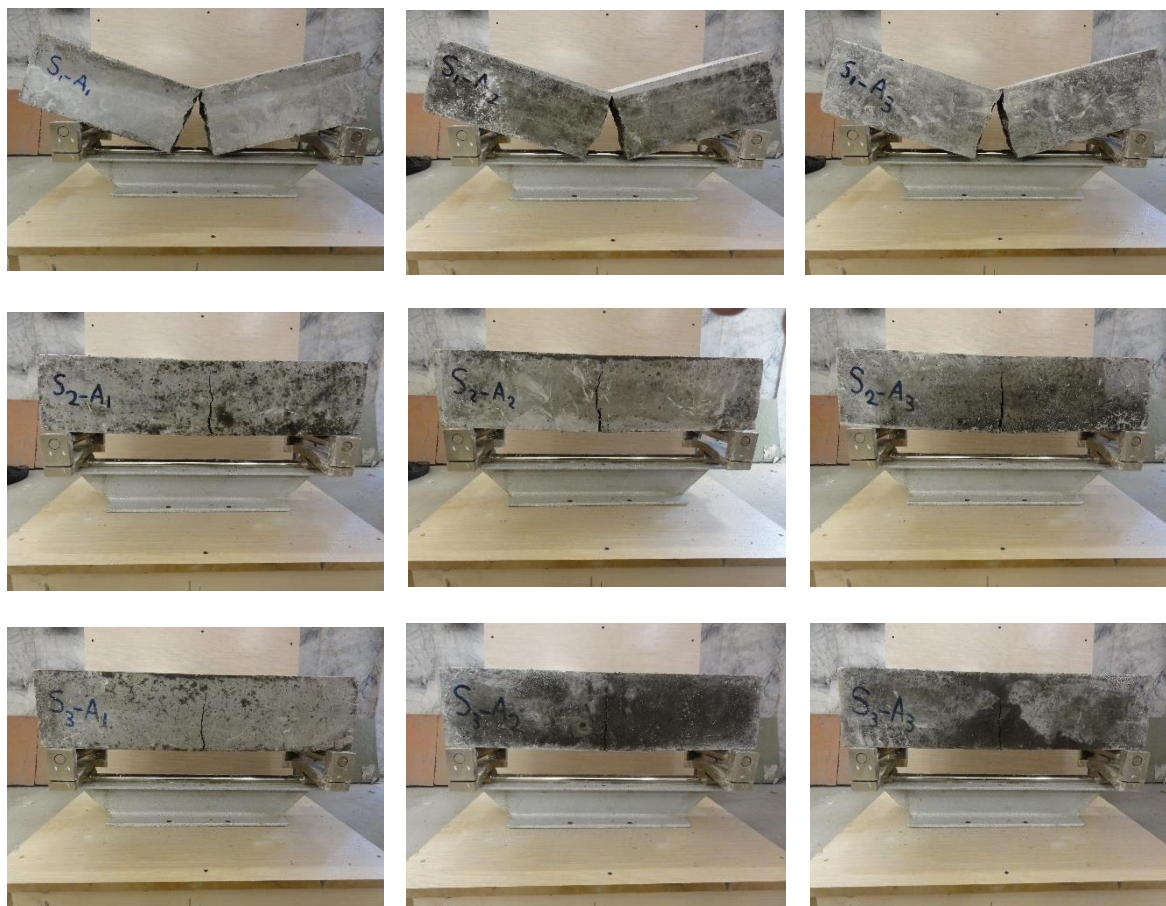
#### ۴-۲- آزمون خمشی

در این آزمایش از روش استاندارد ASTM C293 [۳۶] برای تعیین مقاومت خمشی بتن با استفاده از تیر ساده و بارگذاری در نقطه میانی استفاده می شود. برای این منظور، مقدار نیروی متمرکز میانی به تدریج به کمک جک هیدرولیکی دستگاه اضافه و تغییر مکان میانی تیر اندازه گیری می شود. این روند تا گسیختگی کامل نمونه ادامه پیدا می کند. سپس، نیروی بیشینه با توجه به نمودار نیرو-تغییر شکل تیر به دست می آید. در نهایت با توجه به ممان اینرسی مقطع، مقدار تنش خمشی بحرانی در آن محاسبه می شود. این تنش نشان دهنده ی مقاومت خمشی نمونه خواهد بود. شکل ۹ دستگاه آزمایش خمشی در این پژوهش را نشان می دهد.

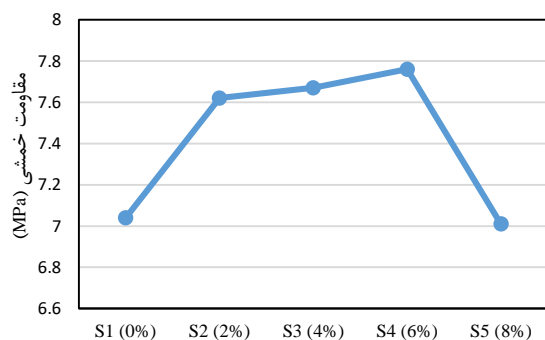


شکل ۹: دستگاه آزمون خمشی

برای آزمون خمشی نمونه‌های مکعب مستطیل شکلی با ابعاد  $15 \times 15 \times 65$  cm ساخته شدند. این نمونه‌ها بر حسب درصد الیاف موجود در خود به پنج گروه با ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد تقسیم‌بندی شدند. در هر یک از این گروه‌ها، سه نمونه ساخته شدند و میانگین مقاومت خمشی آن‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. شکل ۱۰ برخی از نمونه‌های تیر پس از آزمون خمشی در این پژوهش را نشان می‌دهند. ویژگی‌ها و نتیجه‌های مقاومت خمشی تیرها در پنج گروه ساخته شده نیز در جدول ۴ ارائه شده است. میانگین مقاومت خمشی نمونه‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰: برخی از نمونه‌های تیر پس از آزمون خمشی



شکل ۱۱: میانگین مقاومت خمشی نمونه‌ها

جدول ۴: ویژگی‌ها و نتیجه‌های آزمون خمشی

گروه	نام نمونه	ابعاد (cm×cm×cm)	بار نهایی (kg)	مقاومت خمشی (MPa)	میانگین مقاومت خمشی (MPa)
S1 (0%)	S1-A1	۱۵×۱۵×۶۵	۲۹۰۰	۷/۰۷	۷/۰۴
	S1-A2	۱۵×۱۵×۶۵	۲۹۲۰	۷/۱۳	
	S1-A3	۱۵×۱۵×۶۵	۲۸۴۰	۶/۹۳	
S2 (2%)	S2-A1	۱۵×۱۵×۶۵	۳۱۵۰	۷/۶۹	۷/۶۲
	S2-A2	۱۵×۱۵×۶۵	۳۱۰۰	۷/۵۶	
	S2-A3	۱۵×۱۵×۶۵	۳۱۲۰	۷/۶۱	
S3 (4%)	S3-A1	۱۵×۱۵×۶۵	۳۱۵۰	۷/۶۸	۷/۶۷
	S3-A2	۱۵×۱۵×۶۵	۳۱۲۰	۷/۶۱	
	S3-A3	۱۵×۱۵×۶۵	۳۱۶۰	۷/۷۲	
S4 (6%)	S4-A1	۱۵×۱۵×۶۵	۳۲۱۰	۷/۸۳	۷/۷۶
	S4-A2	۱۵×۱۵×۶۵	۳۱۸۰	۷/۷۶	
	S4-A3	۱۵×۱۵×۶۵	۳۱۵۰	۷/۶۸	
S5 (8%)	S5-A1	۱۵×۱۵×۶۵	۲۸۶۰	۶/۹۸	۷/۰۱
	S5-A2	۱۵×۱۵×۶۵	۲۷۷۰	۶/۷۶	
	S5-A3	۱۵×۱۵×۶۵	۲۹۸۰	۷/۲۷	

با توجه به شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد الیاف تا ۶ درصد (نمونه S4)، مقاومت خمشی رفته رفته زیاد می‌شود. ولی در نمونه‌های با الیاف ۶ درصد به بالا (نمونه S5)، مقاومت خمشی کاهش می‌یابد.

بسیاری از پژوهشگران افزایش درصد وزنی الیاف و نسبت طول به قطر آن‌ها را، باعث افزایش سطح زیر منحنی نیرو- تغییر مکان دانسته‌اند [۴]. علت این‌که افزایش پارامترهای درصد وزنی الیاف و نسبت طول به قطر باعث بهبود خواص خمشی می‌شوند این است که تعداد الیاف در حجم بتن برای طول معین الیاف، افزایش می‌یابد. طبیعی است که اگر در سطح شکست، الیاف دارای جهت و اندازه مناسب باشند، اثر آن‌ها بر روی خواص خمشی زیادتر است. این‌که الیاف در چه راستا و زاویه و با چه طولی در سطح قرار گرفته باشند بسیار مهم است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که اگر الیاف از راستای نیرو کششی منحرف شوند، مقاومت بتن الیافی به شدت کاهش می‌یابد [۵]. مناسب‌ترین حالت زمانی است که تمامی الیاف در راستای طول تیر واقع شوند و بدترین حالت وقتی است که تمامی الیاف در راستای عمود بر محور طولی قرار گیرند. از آن‌جا که توزیع الیاف در بتن به صورت تصادفی می‌باشد، الیاف در بتن بین دو حالت بالا توزیع می‌شوند. تعداد کل الیاف در بتن به صورت خطی افزایش می‌یابد ولی تعداد الیافی که دارای جهت و اندازه مناسب باشند، تابع قوانین احتمالات است. بنابراین، افزایش درصد وزنی الیاف و نسبت طول به قطر، اثر مستقیم بر بهبود خواص خمشی ندارد و به طور مستقیم به تعداد الیاف مناسب در سطح شکست بستگی دارد. با افزایش این دو پارامتر، احتمال این‌که الیاف مناسب در سطح زیاد شوند، افزایش پیدا می‌کند. در آزمون خمشی این پژوهش، نمونه سری S5 که حاوی هشت کیلوگرم الیاف در هر مترمکعب است دچار افت مقاومت شدید شده است، به گونه‌ای که مقاومت خمشی آن حتی از نمونه فاقد الیاف کمتر است. دلیل این امر را می‌توان در درصد بسیار زیاد الیاف مصرفی جست و جو نمود. در هنگام ساخت نمونه‌ها مشاهده شد که بتن سری S5 به علت تراکم بیش از حد الیاف به شکل مناسبی متراکم نشده و نمونه‌های خمشی

این سری دارای حفرات زیادی در سطح خود بوده و ظاهر مناسبی نداشتند. از طرف دیگر، مقاومت خمشی با ساختار بتن در ارتباط مستقیم است و ساختار نامناسب بتن باعث افت مقاومت خمشی می‌شود. بنابراین تراکم نامناسب و افت وزن مخصوص بتن این سری از نمونه‌ها که به سبب درصد بالای مصرف الیاف افتاده است می‌تواند عامل اصلی در افت مقاومت خمشی آن‌ها باشد.

### ۳-۴- آزمون کششی

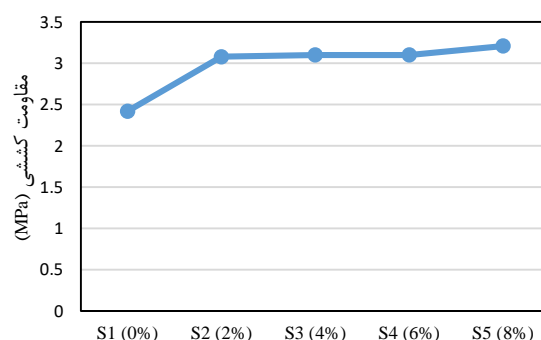
در این آزمایش از روش استاندارد ASTM C496 [۳۷] برای تعیین مقاومت کششی به صورت دو نیم شدن نمونه‌های استوانه‌ای استفاده می‌شود. برای انجام آزمایش نمونه استوانه‌ای بطور افقی توسط گیره نگهدارنده داخل دستگاه آزمایش قرار می‌گیرد. بدین ترتیب پس از روشن شدن دستگاه، به نوار تکیه‌گاهی نیرو اعمال می‌شود و سبب دو نیمه شدن استوانه می‌گردد. نیرویی که باعث دو نیم شدن استوانه گردیده است ثبت می‌گردد. با داشتن این نیرو، مقاومت کششی دو نیم شدن نمونه را به صورت رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Ld} \quad (1)$$

که در رابطه‌ی (۱)،  $\sigma_t$  مقاومت کششی،  $P$  بار اعمال شده،  $L$  طول نمونه و  $d$  قطر نمونه هستند. برای این آزمون، در این پژوهش استوانه‌هایی به قطر ۱۵cm و ارتفاع ۳۰cm ساخته شدند. این نمونه‌ها بر اساس درصد‌های ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ الیاف به پنج دسته تقسیم‌بندی شدند. در هر یک از این گروه‌ها، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند و میانگین مقاومت کششی آن‌ها محاسبه و با هم مقایسه شد. شکل ۱۲ برخی از این نمونه‌ها را پس از آزمون کششی نشان می‌دهد. جدول ۵ نتیجه‌های به دست آمده از آزمون کششی را بر روی پنج گروه نمونه‌های آزمایشی نشان می‌دهد. میانگین مقاومت فشاری هر یک از گروه‌های آزمایشی شده مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرند. به منظور امکان مقایسه‌ی دقیق‌تر، نمودار شکل ۱۳ میانگین مقاومت‌های کششی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: برخی از نمونه‌ها پس از آزمون کششی



شکل ۱۳: میانگین مقاومت کششی

جدول ۵: ویژگی نمونه‌ها و نتیجه‌های آزمون کششی

گروه	نام گروه	ابعاد (cm×cm)	وزن (gr)	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	بار نهایی (ton)	مقاومت کششی (MPa)	میانگین مقاومت کششی (MPa)
S1 (0%)	S1-B1	۱۵×۳۰	۱۳۱۷۰	۲۱۸۳/۳۵	۱۸/۲۰	۲/۴۲	۲/۴۲
	S1-B2	۱۵×۳۰	۱۳۲۱۲	۲۱۹۰/۳۱	۱۸/۵۰	۲/۴۵	
	S1-B3	۱۵×۳۰	۱۳۳۱۴	۲۲۰۷/۲۳	۱۸/۰۰	۲/۳۹	
S2 (2%)	S2-B1	۱۵×۳۰	۱۳۷۶۶	۲۲۸۲/۱۶	۲۳/۲۰	۳/۰۸	۳/۰۸
	S2-B2	۱۵×۳۰	۱۳۸۹۴	۲۳۰۳/۳۸	۲۳/۵۰	۳/۱۲	
	S2-B3	۱۵×۳۰	۱۳۸۷۲	۲۲۹۹/۷۳	۲۳/۰۰	۳/۰۵	
S3 (4%)	S3-B1	۱۵×۳۰	۱۴۰۹۶	۲۳۳۶/۸۷	۲۴/۰۰	۳/۱۸	۳/۱۰
	S3-B2	۱۵×۳۰	۱۳۸۸۸	۲۳۰۲/۳۸	۲۳/۲۰	۳/۰۸	
	S3-B3	۱۵×۳۰	۱۴۱۲۶	۲۳۴۱/۸۴	۲۳/۰۰	۳/۰۵	
S4 (6%)	S4-B1	۱۵×۳۰	۱۴۳۷۸	۲۳۸۳/۶۲	۲۳/۲۰	۳/۰۸	۳/۱۰
	S4-B2	۱۵×۳۰	۱۴۰۸۰	۲۳۳۴/۲۱	۲۳/۶۰	۳/۱۳	
	S4-B3	۱۵×۳۰	۱۳۹۷۶	۲۳۱۶/۹۷	۲۳/۴۰	۳/۱۰	
S5 (8%)	S5-B1	۱۵×۳۰	۱۴۰۴۰	۲۳۲۷/۵۸	۲۴/۲۰	۳/۲۱	۳/۲۱
	S5-B2	۱۵×۳۰	۱۴۰۲۰	۲۳۲۴/۲۷	۲۴/۲۰	۳/۲۱	
	S5-B3	۱۵×۳۰	۱۴۱۵۶	۲۳۴۶/۸۱	۲۴/۳۰	۳/۲۲	

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، مقاومت کششی بتن با افزایش درصد الیاف افزایش می‌یابد. این بدان معنی است که با افزوده شدن الیاف به بتن، میزان جلوگیری از ترک‌ها در قسمت کششی بتن افزایش می‌یابد. همان‌طور که دیده می‌شود، این روند افزایشی در اولین نمونه مسلح به الیاف (S2) در مقایسه با نمونه بدون الیاف (S1)، چشم‌گیر است. ولی مقایسه‌ی نمونه‌های مختلف با درصدهای متفاوت الیاف نشان می‌دهد که پس از افزایش ۲ درصد الیاف، با افزایش درصد الیاف به ۴ و بیشتر تفاوت چندانی در مقاومت کششی نمونه‌ها بوجود نمی‌آید. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که درصد بهینه برای الیاف در بتن، ۲ درصد می‌باشد. در واقع، با افزایش بیشتر از ۲ درصد به میزان الیاف در بتن، اثر چندانی در مقاومت کششی دیده نمی‌شود و مناسب‌ترین درصد برای وجود الیاف فوراً در بتن دو درصد خواهد بود.

#### ۴-۴- آزمون تعیین ضریب کشسانی

برای بدست آوردن ضریب کشسانی در نمونه‌های بتنی از استوانه‌های بتنی استفاده می‌شود. نمونه‌های استوانه‌ای در دستگاه اندازه‌گیری قرار می‌گیرند و نیروی محوری به آن‌ها وارد می‌شود. این دستگاه شامل دو طوق است که یکی به‌طور کامل به نمونه محکم شده و دیگری فقط در دو نقطه‌ی قرینه نسبت به محور روی محیط نمونه متصل می‌شود. به این ترتیب، این نقطه می‌تواند حول محوری که از این دو نقطه می‌گذرد، دوران نماید. روی طوق آزاد در وسط دو نقطه تکیه‌گاه میله‌ی نوک تیز بلندی قرار دارد که فاصله دو طوق را در این محل ثابت نگه میدارد. به این ترتیب، تغییر طول بین دو طوق در نقطه قرینه این نقطه روی محیط استوانه برابر با مجموعه تغییر طول دو

تار اطراف خواهد بود. این مقدار را می توان به طور مستقیم با اندازه گیری دستگاه و یا هر وسیله ی مناسب دیگر اندازه گیری کرد. شکل ۱۴ این دستگاه را نشان می دهد.



شکل ۱۴: دستگاه آزمون تعیین ضریب شکسانی

این دستگاه از تغییر شکل طولی نمونه برای اندازه گیری ضریب شکسانی بتن استفاده می کند. حساسیت این دستگاه حدود  $5 \times 10^{-6}$  باشد. تغییر طول نمونه از میانگین تغییر طول تارهایی که در اطراف استوانه بین نقطه های تماس دو حلقه دستگاه با نمونه واقع شده اند و نسبت به محور استوانه قرینه هستند به دست می آید. طول موثر تارهای مورد نظر یعنی فاصله ی نقطه های تماس از یکدیگر نباید از سه برابر بزرگترین دانه ی شن موجود در بتن کم تر باشد. هم چنین، این فاصله نباید از دو سوم ارتفاع نمونه تجاوز کند. مناسب ترین اندازه برای فاصله بین دو نقطه ی تماس، حدود نصف ارتفاع نمونه است. نقطه های تماس دستگاه بایستی بخوبی به نمونه محکم شده باشند به طوری که هیچ گونه لغزش بین این نقاط و نمونه ایجاد نشود. تغییر طول تارها را می توان جداگانه در طرفین استوانه اندازه گیری نمود و سپس میانگین آن ها را محاسبه کرد.

برای اندازه گیری ضریب شکسانی، نمونه را که دستگاه طول سنج به آن متصل است در روی قطعه فلزی پائین جک قرار می دهند. نیروی محوری بر نمونه وارد می شود و به ازای بارهای مختلف، عددی را که عقربه ی طول سنج نشان می دهد، یادداشت می شود. حداقل دو بار نمونه بارگذاری می شود و رقم های بار اول نباید ملاک محاسبه قرار گیرد. محاسبات بر مبنای میانگین نتیجه های بارگذاری های بعدی انجام می شود. به طور کلی، حداقل انجام سه بار بارگذاری توصیه می شود. در هنگام بارگذاری اول که به منظور تنظیم طول سنجها است، روش کار طول سنجها بررسی می شود و قبل از بارگذاری دوم، هر نوع عملکرد غیرعادی آن ها تصحیح می شود.

اگر نمونه هایی برای تعیین تاب فشاری در دست نباشد و وزن مخصوص نمونه معلوم نباشد باید نمونه در شرایط هوای اطاق آزمون و درست قبل از آزمون وزن آن با دقت  $0.05$  کیلوگرم ثبت شود. سپس، وزن مخصوص نمونه محاسبه می شود. چنانچه، نمونه های کافی در اختیار باشد، باید قبل از آزمون مدول الاستیسیته ی بتن، تاب فشاری آن را تعیین کرد. به کمک اندازه گیری های به دست آمده، ضریب شکسانی با دقت یک هزار کیلوگرم بر سانتی متر مربع از رابطه ی (۲) به دست می آید.

$$E_b = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (2)$$

که در رابطه ی (۲)،  $E_b$  مدول ارتجاعی بر حسب کیلوگرم بر سانتیمتر مربع،  $\sigma_2$  حداکثر تنش وارده بر حسب کیلوگرم بر سانتیمتر مربع،  $\sigma_1$  تنش وارده بر حسب کیلوگرم بر سانتیمتر مربع به ازای تغییر طول نسبی برابر با  $50 \times 10^{-6}$  و  $\varepsilon_2$  تغییر طول نسبی بازاء حداکثر تنش می باشند.

در این پژوهش، نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵cm و ارتفاع ۳۰cm با درصد‌های مختلف ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد الیاف ماکرو سینتتیک ساخته شدند. سپس، به کمک دستگاه آزمایش، ضریب کشسانی آن‌ها محاسبه شد. در این پژوهش، بدون محاسبه‌ی تاب فشاری نمونه‌ها، تنش و کرنش اولیه ( $\sigma_1$  و  $\epsilon_1 = 0.00005$ ) برابر صفر در نظر گرفته شدند. شکل ۱۵ برخی از نمونه‌های استوانه‌ای پس از آزمون را نشان می‌دهد. جدول ۶ نتیجه‌های به دست آمده از نمونه‌ها تحت آزمون مدول الاستیسیته را نشان می‌دهد. نمونه‌ها بر اساس درصد الیاف‌های موجود در پنج گروه تقسیم‌بندی شده‌اند. میانگین مدول الاستیسیته‌ی هر یک از این گروه‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرند. شکل ۱۶ میانگین ضریب کشسانی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

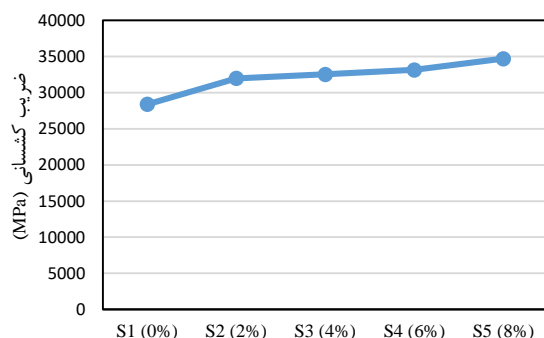


شکل ۱۵: برخی از نمونه‌ها پس از آزمون تعیین ضریب کشسانی

جدول ۶: ویژگی نمونه‌ها و نتیجه‌ی آزمون تعیین ضریب کشسانی

گروه	نام گروه	ابعاد (cm×cm)	بار نهایی (ton)	جابجایی نهایی (mm)	ضریب کشسانی (MPa)	میانگین ضریب کشسانی (MPa)
S1 (0%)	S1-D1	۱۵×۳۰	۳۰	۰/۱۰	۲۹۲۸۹/۰۱	۲۸۴۰۱
	S1-D2	۱۵×۳۰	۳۰	۰/۱۰	۲۹۲۸۹/۱۲	
	S1-D3	۱۵×۳۰	۳۰	۰/۱۱	۲۶۶۲۶/۳۶	
S2 (2%)	S2-D1	۱۵×۳۰	۴۰	۰/۱۱	۳۵۵۰۱/۸۱	۳۱۹۸۰
	S2-D2	۱۵×۳۰	۴۰	۰/۱۲	۳۲۵۴۳/۳۳	
	S2-D3	۱۵×۳۰	۴۰	۰/۱۴	۲۷۸۹۴/۸۴	
S3 (4%)	S3-D1	۱۵×۳۰	۴۰	۰/۱۲	۳۲۵۴۳/۳۳	۳۲۵۴۳
	S3-D2	۱۵×۳۰	۴۰	۰/۱۵	۲۶۰۳۴/۶۷	
	S3-D3	۱۵×۳۰	۴۰	۰/۱۰	۳۹۰۵۲/۶۸	
S4 (6%)	S4-D1	۱۵×۳۰	۴۰	۰/۱۰	۳۹۰۵۲/۶۸	۳۳۱۶۳
	S4-D2	۱۵×۳۰	۴۰	۰/۱۴	۲۷۸۹۴/۸۴	
	S4-D3	۱۵×۳۰	۴۰	۰/۱۲	۳۲۵۴۳/۳۳	
S5 (8%)	S5-D1	۱۵×۳۰	۴۰	۰/۱۵	۲۶۰۳۴/۶۷	۳۴۷۱۳
	S5-D2	۱۵×۳۰	۴۰	۰/۱۰	۳۹۰۵۲/۶۸	
	S5-D3	۱۵×۳۰	۴۰	۰/۱۰	۳۹۰۵۲/۶۸	





شکل ۱۶: میانگین ضریب کشسانی نمونه‌ها

همان‌طور که در شکل ۱۶ دیده می‌شود، مشابه آزمون‌های پیشین، با افزایش درصد الیاف‌های موجود در بتن، ضریب کشسانی آن نیز افزایش می‌یابد. با مقایسه‌ی نتیجه‌های نمونه‌ی S1 و S2 دیده می‌شود که وجود الیاف در بتن اثر فراوانی بر افزایش مدول الاستیسیته دارد. ولی، مقایسه‌ی نمونه‌های S2 تا S5 نشان می‌دهد که افزایش درصد الیاف از ۲ تا ۸ درصد اثر چندانی در افزایش این ویژگی ندارد.

بررسی و مقایسه‌ی نتیجه‌های آزمون‌های فشاری، خمشی، کششی و تعیین ضریب کشسانی در این پژوهش نشان می‌دهد که افزودن الیاف ماکرو سینتتیک همواره موجب بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن نسبت به حالت بدون الیاف شده است. علاوه بر آن، نرخ رشد این بهبود با افزایش میزان مصرف الیاف از ۲ درصد تا ۸ درصد تغییر چندانی نکرده است. از این رو، با توجه به هزینه‌ی این الیاف و نتیجه‌های به دست آمده از آزمون‌های این پژوهش، می‌توان ۲ درصد الیاف ماکرو سینتتیک را درصد مناسب برای بتن‌های مسلح شده با آن‌ها دانست.

## ۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور بررسی اثر الیاف بر ویژگی‌های مکانیکی مختلف بتن انجام شده است. برای این منظور، با هدف دستیابی به میزان مصرف بهینه‌ی الیاف نوین ماکرو سینتتیک و بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن، آزمون‌هایی انجام شده است. در مطالعه‌ی آزمایشگاهی، نمونه‌های مسلح به ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد از الیاف به کمک آزمون‌های مختلف فشاری، خمشی، کششی و هم‌چنین آزمون تعیین ضریب کشسانی مورد ارزیابی قرار گرفتند. مقایسه‌ی نتیجه‌های آزمون‌ها نشان دادند که بر طبق انتظار، بتن‌های مسلح به الیاف نسبت به بتن‌های معمولی مقاومت فشاری، خمشی، کششی و ضریب کشسانی بیشتری دارند. علاوه بر آن، بین درصد‌های مختلف الیاف در بتن، در نمونه‌های دارای درصد‌های بیشتر از ۲ درصد، نرخ افزایش مقاومت‌های مختلف نسبت به حالت بدون الیاف کم‌تر است. بنابراین، با توجه به هزینه‌ی الیاف، می‌توان ۲ درصد الیاف ماکرو سینتتیک را درصد مناسب برای بتن‌های مسلح شده با آن‌ها دانست.

## مراجع

- [1] Aziz, M.A., Paramasivam, P. and Lee, S.L., (1981). Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3(2), 123-132.
- [2] Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M., (1986). *Concrete Structure, Properties and Materials*. New Jersey: Prenticehall. Inc. Englewood Cliffs.
- [3] Groth, P., (2000). *Fibre reinforced concrete: fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders*. Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet.
- [4] Alberti, M.G., Enfedaque, A. and Gálvez, J.C., (2018). A review on the assessment and prediction of the orientation and distribution of fibres for concrete. *Composites Part B: Engineering*, 151, 274-290.
- [5] Marcos-Meson, V., Fischer, G., Edvardsen, C., Skovhus, T.L. and Michel, A., (2019). Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack—A literature review. *Construction and Building Materials*, 200, 490-501.

- [6] Jahangir, H., Esfahani, M. R. (2020). Investigating loading rate and fibre densities influence on SRG-concrete bond behaviour. *Steel and Composite Structures*, 34(6), 877-889. DOI: 10.12989/scs.2020.34.6.877.
- [7] Jahangir, H., Esfahani, M. R. (2020). Experimental analysis on tensile strengthening properties of steel and glass fiber reinforced inorganic matrix composites. *Scientia Iranica*. DOI: 10.24200/SCI.2020.54787.3921.
- [8] Bagheri, M., Chahkandi, A., and Jahangir, H., (2019). Seismic Reliability Analysis of RC Frames Rehabilitated by Glass Fiber-Reinforced Polymers. *International Journal of Civil Engineering*, 17, 1785–1797. DOI: 10.1007/s40999-019-00438-x.
- [9] Jahangir, H., Esfahani, M.R., (2018). Strain of Newly – Developed Composites Relationship in Flexural Tests (In Persian)” *Journal of Structural and Construction Engineering*. 5(Special Issue 3), 92-107. DOI: 10.22065/jsce.2017.91828.1255.
- [10] Jahangir, H., Esfahani, M.R., (2018). Numerical Study of Bond–Slip Mechanism in Advanced Externally Bonded Strengthening Composites. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22, 4509–4518. DOI: 10.1007/s12205-018-1662-6.
- [11] Jahangir, H., and Rezazadeh Eidgahee, D. (2021). A New and Robust Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm–ANN Model for FRP-Concrete Bond Strength Evaluation. *Composite Structures*. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113160.
- [12] Banthia, N. and Nandakumar, N., (2003). Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 3-9.
- [13] Banthia, N. and Sappakittipakorn, M., (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1366-1372.
- [14] Walton, P.L. and Majumdar, A.J., (1975). Cement-based composites with mixtures of different types of fibres. *Composites*, 6(5), 209-216.
- [15] Pakravan, H.R., Latifi, M. and Jamshidi, M., (2017). Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. *Construction and building materials*, 142, 280-294.
- [16] Shah, S.P., (1992). Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrix?. *Materials Journal*, 88(6), 595-602.
- [17] Banthia, N.B.A.U.O.B.C., Moncef, A.B.A.U.L., Chokri, K.B.A.U.L. and Sheng, J.B.A.U.L., (1995). Uniaxial tensile response of microfibre reinforced cement composites. *Materials and Structures*, 28(9), 507-517.
- [18] Qian, C.X. and Stroeven, P., (2000). Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 63-69.
- [19] Feldman, D. and Zheng, Z., (1993). Synthetic fibres for fibre concrete composites. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 305.
- [20] Yao, W., Li, J. and Wu, K., (2003). Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cement and concrete research*, 33(1), 27-30.
- [21] Sorelli, L.G., Meda, A. and Plizzari, G.A., (2005). Bending and uniaxial tensile tests on concrete reinforced with hybrid steel fibers. *Journal of materials in civil engineering*, 17(5), 519-527.
- [22] Bentur, A. and Mindess, S., (2014). *Fibre reinforced cementitious composites*. CRC Press.
- [23] Selina Ruby, G., Geethanjali, C., Varghese, J. and Muthu Priya, P., (2014). Influence of Hybrid Fiber on Reinforced Concrete. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, 3(1), 40-43.
- [24] Park, Y., Abolmaali, A., Mohammadagha, M. and Lee, S.H., (2014). Flexural characteristic of rubberized hybrid concrete reinforced with steel and synthetic fibers. *Advances in Civil Engineering Materials*, 3(1), 495-508.
- [25] Park, Y., Abolmaali, A., Mohammadagha, M. and Lee, S., (2015). Structural performance of dry-cast rubberized concrete pipes with steel and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 77, 218-226.
- [26] Serrano, R., Cobo, A., Prieto, M.I. and de las Nieves González, M., (2016). Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers. *Construction and building materials*, 122, 302-309.
- [27] Alberti, M.G., Enfedaque, A. and Gálvez, J.C., (2017). Fibre reinforced concrete with a combination of polyolefin and steel-hooked fibres. *Composite Structures*, 171, 317-325.
- [28] Karimipour, A., Ghalehnovi, M., & De Brito, J. (2020). Mechanical and durability properties of steel fibre-reinforced rubberised concrete. *Construction and Building Materials*, 257, 119463. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119463.
- [29] Karimipour, A., Ghalehnovi, M., de Brito, J., & Attari, M. (2020). The effect of polypropylene fibres on the compressive strength, impact and heat resistance of self-compacting concrete. *Structures*. 25, 72-87. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.02.022.
- [30] Karimipour, A., de Brito, J., & Edalati, M. (2021). Influence of polypropylene fibres on the thermal and acoustic behaviour of untreated coal coarse aggregates concrete. *Journal of Building Engineering*, 36. DOI: 10.1016/j.jobte.2020.102125.
- [31] Karimipour, A., & de Brito, J. (2021). Influence of polypropylene fibres and silica fume on the mechanical and fracture properties of ultra-high-performance geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 283. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122753.
- [32] Karimipour, A., de Brito, J., & Edalati, M. (2021). Biaxial mechanical behaviour of polypropylene fibres reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 278. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122416.

- [33] ASTM, C., (2003). *Standard specification for concrete aggregates*. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.
- [34] KG Chemical, (2019). [online] available at: [www.kgchem.co.kr](http://www.kgchem.co.kr) [accessed March 10, 2019].
- [35] ASTM, C., (2012). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM C39/C39M-12.
- [36] ASTM, C., (2010). *Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)*. ASTM C293/C293M-10.
- [37] ASTM, C., (1976). *Standard Method of Test for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM C496/C496M-76.