

## Review of the Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete

Gholamreza Havaei

Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Environmental, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Concrete, as one of the most widely used construction materials in the world, despite its extensive application in the construction industry, has certain limitations, including low tensile strength, which restricts its use in tensile and bending conditions. To improve this property, the use of reinforcing fibers in concrete mixtures has been widely considered. This paper examines the impact of various types of fibers, including steel, polypropylene, and other fibers, on the mechanical properties of concrete. The results show that adding steel fibers increases the tensile and impact resistance of concrete, improves flexural and compressive properties, and reduces cracking. Additionally, the use of polypropylene fibers in hybrid concrete mixtures enhances the behavior of concrete after cracking and increases its resistance to impact. However, high temperatures can reduce the mechanical properties of concrete, and the combination of steel and polypropylene fibers in these conditions can help increase the concrete's resistance to heat. Finally, the use of pozzolanic materials such as microsilica along with fibers can improve the durability and resistance of concrete, especially at high temperatures. These results indicate that adding fibers to concrete can be an effective solution for improving the mechanical properties and durability of concrete under various conditions.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 23 September 2022

**Revise Date:** 18 December 2022

**Accept Date:** 18 January 2023

### Keywords:

Fiber-reinforced  
compressive strength  
stress-strain curve  
steel fibers  
polypropylene fibers

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525732.3742>

\*Corresponding author: Gholamreza Havaei

Email address: [Havaei@aut.ac.ir](mailto:Havaei@aut.ac.ir)

## بررسی خواص مکانیکی بتن الیافی

غلامرضا هوآئی

استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

بتن به عنوان یکی از پرمصرف ترین مصالح ساختمانی در جهان، با وجود کاربرد گسترده اش در صنعت ساخت و ساز، دارای برخی محدودیت‌ها از جمله مقاومت کششی پایین است که کاربرد آن را در شرایط تحت کشش و خمش محدود می‌سازد. برای بهبود این ویژگی، استفاده از الیاف تقویت کننده در ترکیب بتن به طور گسترده ای مورد توجه قرار گرفته است. این مقاله به بررسی تأثیر انواع مختلف الیاف از جمله فولادی، پلی پروپیلن و دیگر الیاف در بهبود خواص مکانیکی بتن می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهند که افزودن الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت کششی و ضربه ای بتن، بهبود ویژگی های خمشی و فشاری و کاهش ترک خوردگی در آن می‌شود. همچنین، استفاده از الیاف پلی پروپیلن در ترکیب بتن هیبریدی باعث بهبود رفتار بتن پس از ترک خوردگی و افزایش مقاومت در برابر ضربه می‌گردد. با این حال، دماهای بالا می‌تواند باعث کاهش ویژگی های مکانیکی بتن شوند که ترکیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن در این شرایط می‌تواند به افزایش مقاومت بتن در برابر حرارت کمک کند. در نهایت، استفاده از مواد پوزولانی مانند میکروسیلیس به همراه الیاف می‌تواند دوام و مقاومت بتن را به ویژه در دماهای بالا افزایش دهد. این نتایج نشان می‌دهند که افزودن الیاف به بتن می‌تواند به یک راهکار مؤثر برای بهبود ویژگی های مکانیکی و دوام بتن در شرایط مختلف تبدیل شود.

کلمات کلیدی: بتن الیافی، مقاومت فشاری، منحنی تنش - کرنش، الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525732.3742">https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525732.3742</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525732.3742">10.22065/jsce.2025.525732.3742</a>	۱۴۰۲/۰۴/۳۱	۱۴۰۱/۱۰/۲۸	۱۴۰۱/۱۰/۲۸	۱۴۰۱/۰۹/۲۷	۱۴۰۱/۰۷/۰۱
			غلامرضا هوآئی		*نویسنده مسئول:	
			<a href="mailto:havaei@aut.ac.ir">havaei@aut.ac.ir</a>		پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

صنعت بتن، یکی از صنایع مهم و عمده در هر کشوری می‌باشد، به طوری که این ماده پس از آب، پرمصرف‌ترین ماده در جهان می‌باشد. یکی از ضعف‌های اصلی بتن، مقاومت کششی پایین در مقایسه با مقاومت فشاری آن است. با توجه به اینکه عمده بتن مصرفی در صنایع ساخت و ساز مورد استفاده قرار می‌گیرد و در این سازه‌ها بتن تحت کشش و خمش نیز قرار می‌گیرد، نیاز است تا مقاومت کششی آن تامین گردد. یکی از راه‌های افزایش مقاومت کششی بتن که از گذشته تا کنون مورد استفاده قرار گرفته است، استفاده از آرماتورهای فولادی جهت تامین ظرفیت کششی می‌باشد.

با گذشت زمان و افزایش جمعیت دنیا نیاز به پیشرفت در زمینه ساخت‌وساز، نگهداری و مقاوم‌سازی سازه‌های موجود و استفاده از تکنولوژی‌های نوین بیش از پیش احساس می‌شود. علاوه بر این لزوم ساخت سازه‌های مقاوم در برابر زلزله به دلیل افزایش لرزه‌خیزی کشورهای دنیا بیش‌تر احساس می‌شود. از جمله تکنولوژی‌های نوین که جایگاه ویژه‌ای در ساخت‌وساز به خود اختصاص داده، افزودنی‌های بتن و الیاف تقویت‌کننده در غالب بتن الیافی می‌باشد. استفاده از افزودنی‌های بتن باعث بهبود خواص مطلوب بتن، همچون مقاومت آن می‌گردد و در بعضی موارد با کاهش وزن بتن، مصالح بسیار سبکی را فرا راه مهندسين بنا قرار می‌دهد.

ایده اضافه کردن الیاف به مخلوط‌های ترد و شکننده که مقاومت کششی اندکی دارند، از زمان‌های قدیم وجود داشته است. مصریان قدیم از کاه برای مسلح کردن آجرهای گلی و از الیاف پنبه نسوز و موی اسب نیز برای مسلح‌سازی استفاده شده است [۱].

با توجه به اینکه بتن ماده‌ای ترد است، امروزه کاربرد بتن الیافی با نرمی بالاتر به گونه‌ای که بتواند تغییرشکل‌های زیاد را بدون شکست تحمل نماید، مورد توجه محققان و مهندسان است. تحقیقات درباره تأمین نرمی لازم در بتن با الیاف مختلف و حتی دربرخی موارد حذف آرماتور، در حال انجام است. هدف کلی از کاربرد الیاف در بتن افزایش میزان جذب انرژی بتن و کنترل گسترش ترک است تا قطعه بتنی بتواند در مقابل بارهای وارده در یک مقطع ترک‌خورده، تغییر شکل‌های بیش‌تری را پس از ایجاد اولین ترک تحمل نماید. بتن مسلح به الیاف متعدد در سال‌های اخیر در سازه‌های چون روسازی راه‌ها و فرودگاه‌ها، پی‌های عظیم با تغییرشکل‌های زیاد و به ویژه در پوشش بتنی تونل‌ها به کار رفته است. افزودن الیاف به بتن به میزان قابل توجهی خواص مکانیکی آن را از جمله طاقت و مقاومت خمشی، مقاومت کششی و مقاومت به ضربه را بهبود می‌بخشد [۲].

بتن‌های الیافی (بتن مسلح به الیاف) نوعی کامپوزیت است که با بکارگیری الیاف تقویت‌کننده داخل مخلوط بتن، منجر به بهبود محسوسی از خواص مقاومتی بتن می‌گردد. با این حال مهمترین مشخصه بتن الیافی خاصیت جذب انرژی، انعطاف پذیری و مقاومت آن در مقابل ضربه است. به همین دلیل امروزه این بتن نقش بسیار جدی در پیشرفت تکنولوژی بتن ایفا کرده است و به عنوان یک ماده جدید و اقتصادی در صنعت ساختمان محسوب می‌گردد. خاصیت جذب انرژی و طاقت بتن می‌تواند خطر شکست سازه‌های بتنی را به خصوص در مناطقی که تحت بارهای مکرر و لرزهای قرار می‌گیرند، به طور مطلوبی کاهش دهد. قابلیت انعطافی آن نیز، همانند خواص مواد پالستیکی، باعث می‌شود که بتن الیافی گسیختگی نهایی نداشته باشد.

ویژگی‌های مکانیکی بتن الیافی به شکل قابل ملاحظه‌ای نسبت به بتن معمولی تغییر می‌کند. از جمله تغییرات در پارامترهای مکانیکی بتن الیافی می‌توان به مقاومت در مقابل تورق، سایش و هوازدگی سطح، مقاومت زیاد در مقابل تنش‌های خستگی، مقاومت بسیار عالی در مقابل ضربه، قابلیت کششی خوب (ظرفیت زیاد کرنش)، قابلیت باربری زیاد بعد از ترک‌خوردگی، مقاومت کششی، خمشی و برشی زیاد و طاقت خیلی زیاد اشاره کرد. این مصالح برخلاف بتن معمولی قادر به تحمل تنش‌ها و کرنش‌های کششی قابل ملاحظه در بارهای کششی هستند و می‌توان از آن‌ها در طراحی سازه استفاده کرد. بعلاوه، این مواد پتانسیل زیادی جهت استفاده در المان‌های جاذب انرژی به عنوان کنترل غیرفعال در بهسازی لرزه‌ای ساختمان را دارند.

### ۳-۱ انواع الیاف فولادی

انواع الیاف فولادی که در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد در ادامه آمده است.

#### ۱-۳-۱ الیاف فولاد و نقش آن در تقویت بتن

فولاد یکی از متداول‌ترین مواد به منظور تقویت کردن بتن است. الیاف فولادی به دو صورت گرد و تخت ساخته می‌شوند. الیاف فولادی گرد با برش سیم به صورت گرد و در طول‌های کوتاه ساخته می‌شوند و الیاف فولادی تخت و مستطیل شکل از طریق ورقه‌های فولادی ذوب شده ایجاد می‌شوند.



شکل ۱- الیاف فولادی

الیاف فولادی با توزیع تنش‌های موضعی باعث به وجود آمدن مقاومت بیشتری در مخلوط‌های بتنی می‌شوند. تقویت بتن با الیاف فولاد باعث می‌شود میزان فولاد مورد نیاز در سازه مانند میلگرد و مش کاهش یابد. همچنین می‌تواند ضمن افزایش مقاومت در برابر ضربه، آسیب یخ زدگی و ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خمیری را نیز کاهش دهد.

#### ۱-۳-۲ الیاف پلی‌پروپیلن (PFR) در بتن مسلح

در بتن تقویت شده با الیاف پلی‌پروپیلن (PRF) از پلیمر ارزان و بسیار در دسترس پلی‌پروپیلن استفاده می‌شود. الیاف پلی‌پروپیلن در برابر بیش‌تر مواد شیمیایی مقاوم بوده و دارای نقطه ذوب بالای ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد است. بنابراین می‌تواند برای مدت کوتاهی دمای کار ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کند.



شکل ۱۲- الیاف پلی پروپیلن

از آنجا که این الیاف هیدروفوبیک هستند، می توان آن ها را به راحتی مخلوط کرده و به طور مساوی در بتن توزیع کرد؛ بدون اینکه در هم جمع شده و فرو روند.

### ۱-۳-۳ الیاف شیشه (GFRC) و نقش آن در تقویت بتن

بتن مسلح با الیاف شیشه (GFRC) نوع رایج دیگری از بتن ها است. این ماده اغلب در تولید محصولات بتنی ورق نازک استفاده می شود. بتن مسلح با الیاف شیشه کامپوزیتی است که از سیمان پرتلند، سنگدانه ریز، آب، پلیمر اکریلیک، الیاف شیشه مقاوم در برابر مواد قلیایی و برخی مواد افزودنی دیگر تشکیل شده است.



شکل ۳- الیاف شیشه

همان گونه که تقویت کننده فولاد در بتن معمولی عمل می کند، الیاف شیشه نیز بتن را تقویت می کند. استفاده از الیاف شیشه به منظور تقویت بتن منجر به محصولی با مقاومت موجی و کششی بسیار بالاتر از بتن معمولی می شود که امکان

استفاده از آن را در کاربردهای ریخته گری با دیواره نازک فراهم می‌کند. الیاف شیشه یک ماده سبک و بادوام است که تقریباً می‌تواند به شکل‌ها، رنگ‌ها و بافت‌های نامحدود ریخته شود. دو فرآیند اساسی برای ساخت الیاف شیشه وجود دارد: روند Spray-Up و Premix

### ۱-۳-۴ الیاف آزبست (Asbestos) در بتن تقویت شده

الیاف معدنی آزبست به طور طبیعی موجود و ارزان هستند. الیاف آزبست در برابر حرارت و مواد شیمیایی مقاوم‌اند و بنابراین برای کاشی‌ها و عناصر سقف موج دار مناسب هستند. اما از آنجا که خطرات سلامتی مرتبط با آزبست وجود دارد، تامین کنندگان بتن این روزها از مواد ایمن‌تری استفاده می‌کنند.



شکل ۴- الیاف آزبست

### ۵-۳-۱ الیاف کربن و تاثیر آن در تقویت بتن

الیاف کربن از کشش و مقاومت موجی بالایی برخوردار هستند. در مقایسه با الیاف فولادی، مقاومت الیاف کربن بیشتر است. اما الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه در معرض آسیب بیشتری هستند؛ بنابراین باید با پوشش رزین کاور شوند.



شکل ۵- الیاف کربن

### ۶-۳-۱ الیاف ارگانیک (آلی) و ترکیب آن با مواد تشکیل دهنده بتن

الیاف طبیعی مانند الیاف گیاهی از سایر الیاف ارزان‌ترند. با این حال برای دستیابی به کنترل ترک خوردگی، اغلب حجم زیادی از الیاف طبیعی لازم است. مخلوط کردن الیاف طبیعی با سایر مواد و توزیع مساوی آن در سراسر بتن به سختی انجام می‌شود. بنابراین برای جلوگیری از مشکلات اختلاط و اطمینان از توزیع یکنواخت الیاف در بتن، ممکن است به یک فوق روان‌کننده نیاز باشد.

### ۷-۳-۱ الیاف پلاستیک و کاربرد آن در تقویت بتن

استفاده از الیاف پلاستیک در دنیای تقویت کننده بتن نسبتاً جدید است. اما این الیاف فرصتی برای بازیافت فراوان پلاستیک در جهان به منظور ایجاد بتن مسلح سازگار با محیط زیست خواهد بود.



شکل ۶- الیاف پلاستیک

### ۸-۳-۱ الیاف نایلون (Nylon) و تاثیر آن بر مقاومت بتن

الیاف نایلون دارای بسیاری از مشخصات یکسان با الیاف پلی پروپیلن هستند. استفاده از الیاف نایلون در بتن، نسبت به جوش دادن سیم در بتن مقاومت بیشتری ایجاد میکنند.



شکل ۷- الیاف نایلون

### ۱-۳-۹ الیاف مصنوعی ماکرو در بتن تقویت شده

الیاف مصنوعی ماکرو، که گاهی اوقات به عنوان الیاف مصنوعی "ساختاری" نیز شناخته می‌شوند؛ با ترکیبی از پلیمرها ساخته شده‌اند و در اصل در برخی از موارد، جایگزینی برای الیاف فولاد هستند. در ابتدا آن‌ها به عنوان یک جایگزین بالقوه برای الیاف فولادی موجود در بتن شناسایی شدند؛ اما تحقیقات و توسعه روز افزون نشان داد که این الیاف‌های مصنوعی ماکرو در طراحی و ساخت صفحاتی که متکی

به زمین هستند و روی زمین قرار می‌گیرند و همچنین طیف وسیعی از کاربردهای دیگر نقش دارند. مشخص شده است که ممکن است از الیاف مصنوعی در طیف گسترده‌ای از مقاومت بتن استفاده شود. این الیاف دارای مقاومت کششی بالا (حدود ۶۰۰ مگاپاسکال) و مدول الاستیسیته نسبتاً بالایی (حدود ۱۰ گیگاپاسکال) هستند.



شکل ۲- الیاف مصنوعی

الیاف مصنوعی ماکرو به ویژه برای تقویت بتن‌ها در محیط‌های تهاجمی مانند سازه‌های دریایی و ساحلی مناسب هستند؛ زیرا همانند فولاد تحت تاثیر مشکلات مربوط به زنگ زدن و خوردگی قرار نمی‌گیرند. همچنین از آنجا که این الیاف های مصنوعی رسانا نیستند، در توسعه تراموا و راه آهن سبک نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تاکنون پیشرفت‌های بسیار مهمی در زمینه افزایش مقاومت فشاری بتن حاصل شده است و محققان زیادی بر روی رفع معایب رفتار بتن تحت کشش کار کرده‌اند. افزودن الیاف مختلف با این که در رفتار بتن با مقاومت بالا، قبل از رسیدن به تنش حداکثر تاثیر بسیار کمی دارد، اما تاثیر قابل توجهی در رفتار پس از ترک خوردگی در بتن به نمایش می‌گذارد. این روش در بهبود قابلیت‌های بتن مانند افزایش استحکام، انرژی شکست و کاهش نفوذپذیری تاثیر چشم‌گیری دارد که به نسبت الیاف استفاده شده بستگی دارد. از تاثیرگذارترین راه‌ها در جلوگیری از ترک پلاستیک بتن، استفاده از الیاف است. الیافی که در حجم بتن با پخش تصادفی، مانع باز شدن ترک‌ها می‌شود. برای کنترل این ترک‌ها، تعداد الیاف در حجم مهم است نه مقاومت آن. زیرا ترک‌ها ابتدا به شکل ریزترک به وجود می‌آیند و سپس در کل بتن شروع به گسترش یافتن می‌کنند. اگر الیاف به صورت عمود بر لبه‌های ترک جای گیرد با پل زدن الیاف بین ترک‌ها، یکپارچگی بتن تا تغییر شکلهای زیاد حفظ شده و موجب افزایش مقاومت خمشی و کششی آن می‌شود. با توزیع اتفاقی الیاف در فواصل بسیار کوچکتر از فاصله بین آرماتورها، اندازه ترک‌ها کوچک‌تر شده و به دنبال آن شاهد کاهش نفوذپذیری و پایداری بتن در محیط‌های مهاجم هستیم.

## ۲- بررسی طرح اختلاط‌های مختلف بتن الیافی

یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های هر بتن که تاثیر مستقیم در مشخصات مقاومتی و دوام آن دارد، طرح مخلوط بتن می‌باشد. در بتن‌های الیافی نیز طرح مخلوط مناسب می‌تواند به نتایج مقاومتی و دوام مناسب منجر شود. در ادامه، نتایج تعدادی از تحقیقات مختلف در این خصوص آورده شده است.

در تحقیقی که توسط رخشانی‌مهر و بخشی [۱] انجام شد، تاثیر میزان الیاف فولادی مورد استفاده در بتن‌هایی با رده‌های مقاومتی مختلف بر مشخصات مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق طرح‌های اختلاط برای رسیدن به سه رده مقاومتی ۲۵، ۳۵ و ۴۵

مگاپاسکال طراحی شدند. در هر رده مقاومتی، چهار طرح با مقدار الیاف صفر، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ کیلوگرم مورد استفاده قرار گرفت و مشخصات مکانیکی شامل مقاومت کششی، مقاومت ضربه‌ای، مقاومت فشاری و خمشی مورد بررسی قرار گرفت.

مشخصات الیاف فولادی مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مشخصات الیاف مورد استفاده در تحقیق رخشانی مهر و همکاران [۱]

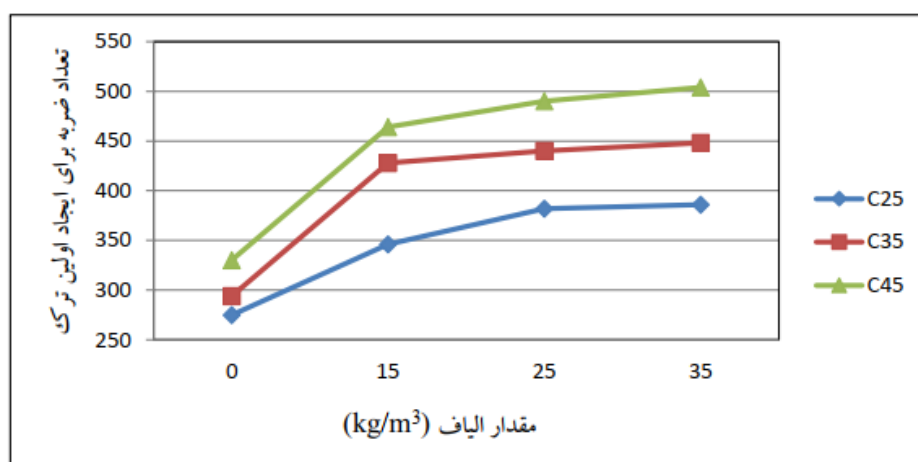
قطر الیاف (mm)	طول الیاف (mm)	نسبت طول به قطر	چگالی ( $kg/m^3$ )	مقاومت کششی (Mpa)
۰/۸	۵۱	۶۳/۷۵	۷۸۵۰	۱۲۲۰

طرح اختلاط مورد استفاده در این تحقیق نیز در جدول ۲ آمده است.

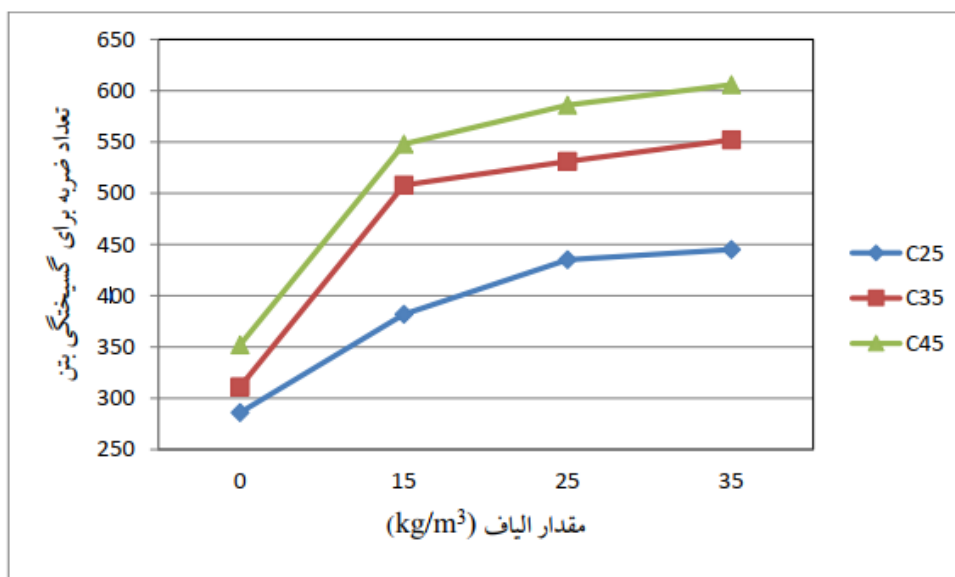
جدول ۲- طرح اختلاط مورد استفاده در تحقیق رخشانی مهر و همکاران [۱]

W/C	فوق روان کننده Lit/m <sup>3</sup>	آب ( $kg/m^3$ )	شن ( $kg/m^3$ )	ماسه ( $kg/m^3$ )	سیمان ( $kg/m^3$ )	رده مقاومتی بتن (Mpa)
۰/۵	۰	۱۷۵	۱۱۵۰	۶۲۵	۳۵۰	C25
۰/۴	۵	۱۶۰	۹۵۰	۸۲۵	۴۰۰	C35
۰/۳۵	۶/۵	۱۲۶	۹۰۰	۸۷۵	۴۲۰	C45

در نمودارهای شکل ۹ و ۱۰، تاثیر مقدار الیاف در مقاومت ضربه‌ای برای اولین ترک و تاثیر مقدار الیاف در مقاومت ضربه‌ای برای گسیختگی نهایی آمده است. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار الیاف تا ۳۵ کیلوگرم در همه رده‌های مقاومتی، تعداد ضربه‌ها برای ایجاد اولین ترک افزایش می‌یابد. همچنین نتایج مشابهی در خصوص مقاومت ضربه برای گسیختگی نهایی مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در رده مقاومتی ۴۵ مگاپاسکال، با افزودن ۳۵ کیلوگرم الیاف فولادی، تعداد ضربه برای ظهور اولین ترک ۵۳ درصد و برای رسیدن به گسیختگی نهایی ۸۳ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت اضافه کردن الیاف فولادی باعث افزایش قابل توجه مقاومت در برابر ضربه شده است.

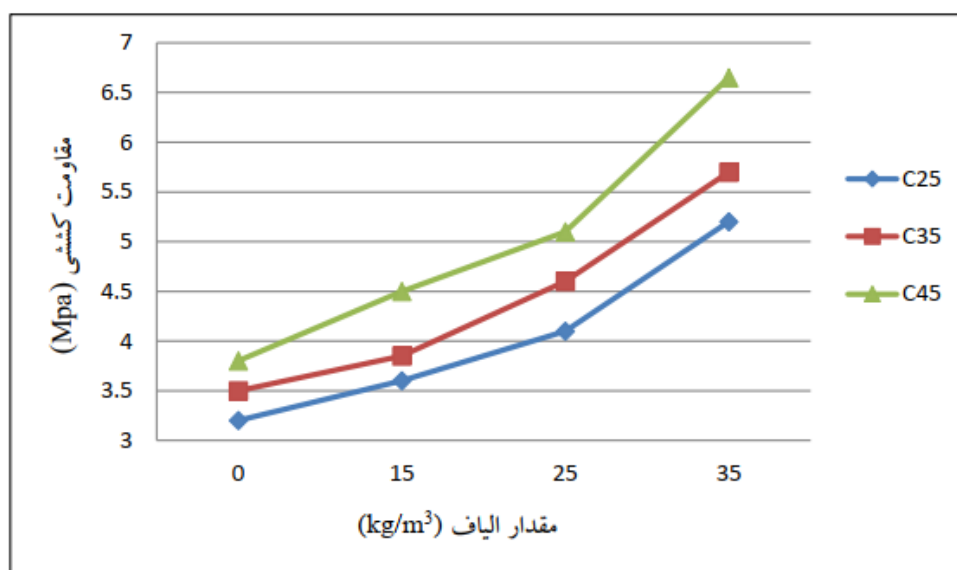


شکل ۹- نمودار تاثیر مقدار الیاف بر مقاومت ضربه‌ای اولین ترک



شکل ۱۰- نمودار تاثیر مقدار الیاف بر مقاومت ضربه‌ای گسیختگی

نتایج مقاومت کششی این تحقیق در نمودار شکل ۱۱ آمده است. با توجه به نتایج مقاومت کششی می‌توان گفت که استفاده از الیاف فلزی باعث افزایش قابل توجه مقاومت کششی می‌شود. همچنین با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش رده بتن، میزان افزایش مقاومت فشاری در حضور الیاف فولادی نیز افزایش پیدا می‌کند.



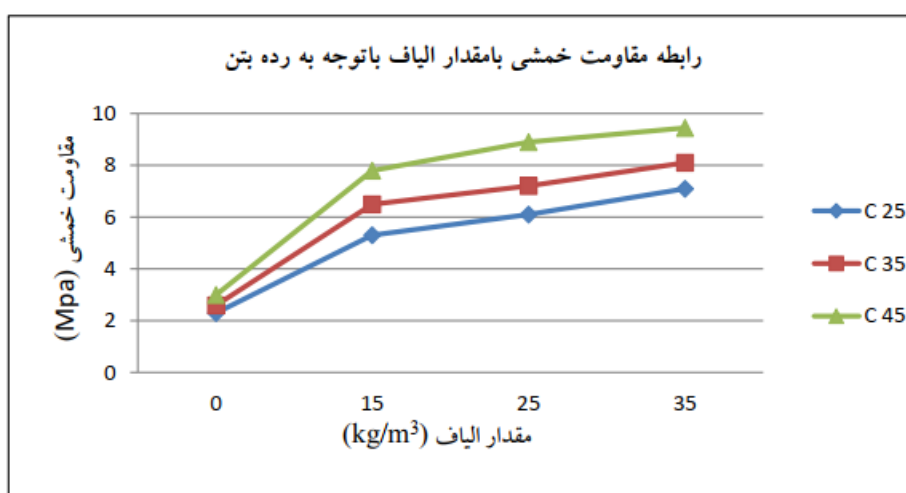
شکل ۱۱- نمودار تاثیر مقدار الیاف بر مقاومت کششی

نتایج مقاومت فشاری این تحقیق در نمودار شکل ۱۲ آمده است و نشان می‌دهد که در رده ۴۵ مگاپاسکال، با افزایش درصد الیاف فولادی، مقادیر مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. این در حالی است که در رده ۲۵ مگاپاسکال، تا مقدار ۲۵ کیلوگرم الیاف مقدار مقاومت فشاری افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. در رده ۳۵ مگاپاسکال نیز روند مشخصی مشاهده نمی‌شود، اما بیشترین مقدار مقاومت در مقدار ۲۵ کیلوگرم الیاف بدست می‌آید.



شکل ۱۲- نمودار تاثیر مقدار الیاف بر مقاومت فشاری

نتایج مقاومت خمشی در این تحقیق نیز در نمودار شکل ۱۳ آمده است. با توجه به نتایج مشاهده می شود که مقادیر مقاومت فشاری با افزایش مقدار الیاف در تمامی رده های مقاومتی افزایش می یابد.



شکل ۱۳- نمودار تاثیر مقدار الیاف بر مقاومت فشاری

در تحقیقی که توسط رمضان پور و رشیداداش [۳] انجام شد، تاثیر افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن در بتن الیافی هیبریدی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق ۳ درصد مختلف الیاف پلی پروپیلن در ۱ درصد حجمی الیاف فولادی جایگزین شده است و خواص مکانیکی شامل طاقت خمشی، مقاومت خمشی و مقاومت ضربه با نمونه شاهد مقایسه شده است. مشخصات الیاف مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۳ و ۴ آمده است.

جدول ۳- مشخصات الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده در تحقیق رمضانیان پور و رشیدداداش [۳]

مقطع	طول (mm)	مقاومت کششی (MPa)	افزایش طول	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
دایره	۱۲	۴۰۰	٪۱۲	۹۱۰

جدول ۴- مشخصات الیاف فولادی مورد استفاده در تحقیق رمضانیان پور و رشیدداداش [۳]

طول (mm)	قطر (mm)	L/D	مقاومت کششی (MPa)	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
۳۶	۰/۸	۴۵	>۱۲۰۰	۷۸۵۰

طرح مخلوط مورد استفاده در این تحقیق به همراه درصد حجمی الیاف در یک متر مکعب بتن در جداول ۵ و ۶ آمده است.

جدول ۵- مشخصات طرح مخلوط مورد استفاده در تحقیق رمضانیان پور و رشیدداداش [۳]

شن ( $\text{kg/m}^3$ )	ماسه ( $\text{kg/m}^3$ )	آب ( $\text{kg/m}^3$ )	سیمان ( $\text{kg/m}^3$ )	الیاف
۵۴۶	۱۲۷۴	۱۸۰	۴۵۰	متغیر

جدول ۶- درصد حجمی الیاف در یک متر مکعب بتن در تحقیق رمضانیان پور و رشیدداداش [۳]

شماره مخلوط	نوع الیاف	درصد حجمی الیاف (%)
SP0	-	۰
SP1	الیاف فولادی	۰/۲۵
	الیاف پلی پروپیلن	۰/۷۵
SP2	الیاف فولادی	۰/۵۰
	الیاف پلی پروپیلن	۰/۵۰
SP3	الیاف فولادی	۰/۷۵
	الیاف پلی پروپیلن	۰/۲۵
SP4	الیاف فولادی	۱
	الیاف پلی پروپیلن	۰

نتایج کلی این تحقیق نشان می‌دهد که الیاف پلی‌پروپیلن قابلیت پل زدن روی ریزترک‌ها را داشته و اثر ناچیزی بر بهبود رفتار بتن بعد از ایجاد اولین ترک را دارند. هرچه الیاف فولادی با درصد بیش‌تری از الیاف پلی‌پروپیلن جایگزین شود، میزان مقاومت خمشی، جذب انرژی و مقاومت در برابر ضربه کاهش می‌یابد.

در تحقیق دیگری که توسط سحرخیزان و سعیدی‌جم [۴] انجام شد، نمونه‌های بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و عیار سیمان ۴۰۰ و درصد‌های مختلف الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن هم به صورت مجزا و هم ترکیبی تهیه شد و آزمون‌های مقاومت فشاری، کششی و تنش کرنش بر روی آن انجام شد. مشخصات الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن مورد استفاده در این تحقیق در جدول‌های ۷ و ۸ آمده است.

جدول ۷- مشخصات الیاف پلی‌پروپیلن مورد استفاده در تحقیق سحرخیزان و سعیدی‌جم [۴]

ردیف	ویژگی	نتیجه آزمایشگاهی
۱	وزن مخصوص ( $\text{gr/cm}^3$ )	۰/۹۱
۲	قطر الیاف ( $\mu\text{m}$ )	۲۲
۳	شکل مقطع عرضی	دایروی
۴	طول الیاف (mm)	۱۹
۵	مقاومت در برابر واکنش سیلیسی قلیایی	عالی
۶	دمای ذوب (درجه سانتی‌گراد)	۱۶۰-۱۷۰
۷	جذب آب	۰
۸	هدایت الکتریکی	بسیار پایین
۹	هدایت حرارتی	بسیار پایین
۱۰	مقاومت (MPa)	۳۵۰-۴۰۰

جدول ۸- مشخصات الیاف فولادی مورد استفاده در تحقیق سحرخیزان و سعیدی جم [۴]

ردیف	ویژگی	نتیجه
۱	وزن مخصوص ( $\text{gr/cm}^3$ )	۷/۸۷
۲	طول (mm)	۱۲
۳	قطر (mm)	۰/۸
۴	نسبت طول به قطر	۱۵

مشخصات طرح‌های مخلوط مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۹ آمده است.

جدول ۹- مشخصات طرح‌های مخلوط مورد استفاده در تحقیق سحرخیزان و سعیدی جم [۴]

نام نمونه	نوع بتن	پروپیلن (%)	فولادی (%)	سیلیکافیوم (%)
N	معمولی	0	0	0
0.5PP	الیافی	0.5	0	0
0.5PP+0.5St	الیافی	0.5	0.5	0
0.25PP+0.75St	الیافی	0.25	0.75	0
1St	الیافی	0	1	0
0.5PP+5Sf	الیافی	0.5	0	5
0.25PP+0.75St+10Sf	الیافی	0.25	0.75	10

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزودن درصد‌های مختلف الیاف در سن هفت روز، تغییر خاصی در مقاومت نمونه‌ها حاصل نشده است. این در حالی است که در سن ۲۸ روز مقاومت فشاری و کششی افزایش یافته است. بیش‌ترین میزان رشد مقاومت در نمونه‌های حاوی یک درصد الیاف فولادی بوده است. همچنین مقاومت طاق‌مطابق با نمودارهای تنش - کرنش، با افزودن الیاف به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است و رفتار نمونه‌ها شکل پذیرتر شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد نمونه‌های حاوی میکروسیلیس باعث بهبود پارامترهای مقاومتی بتن می‌شود.

در تحقیق دیگری [۵] به بررسی تاثیر نسبت آب به سیمان و حجم الیاف فولادی بر پارامترهای شکست بتن خودمترکم الیافی پرداخته شد. به این منظور، ۵ طرح مخلوط متفاوت در دو سری در نظر گرفته شد که در سری اول نسبت آب به سیمان متغیر (۰/۴۲، ۰/۵۲ و ۰/۶۲) و درصد الیاف فولادی ثابت ۳ درصد و در سری دوم درصد الیاف فولادی متغیر (۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد) و نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۵۲ می‌باشد. مشخصات طرح‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱۰ آمده است.

جدول ۱۰- مشخصات طرح‌های مخلوط مورد استفاده در تحقیق [۵]

مواد مصرفی	Weight(kg/m <sup>3</sup> )					
	سری ۱			سری ۲		
	SCSF-42-3	SCSF-52-3	SCSF-62-3	SCSF-52-1	SCSF-52-3	SCSF-52-5
سیمان(kg)	400	375	350	375	375	375
درصد الیاف فولادی Sf(%)	0.3	0.3	0.3	0.1	0.3	0.5
(by weight)w/c	0.42	0.52	0.62	0.52	0.52	0.52
آب	168	195	217	195	195	195
فوق روان کننده(kg)	5.3	3.75	3	3	3.75	4.5
وزن واحد حجم(kg/m <sup>3</sup> )	2245	2260	2345	2240	2260	2295
آزمایشات بتن خودمترکم تازه						
Flow time(sec)	3	2.6	2.10	2.8	2.6	2.88
Slump flow(mm)	710	715	700	680	715	670
L-Box(h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub> )	0.94	0.88	0.86	0.86	0.88	0.85
Sieve test(%)	1.8	2.9	2	1	2.9	1

نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش نسبت آب به سیمان انرژی شکست کاهش و بتن تردتر می‌شود. همچنین با افزایش درصد الیاف فولادی، انرژی شکست افزایش می‌یابد و بتن شکل‌پذیرتر می‌شود. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش درصد الیاف فولادی، اندازه موثر کاهش می‌یابد.

در تحقیق دیگری که توسط حاجی‌اسمعیلی و همکاران [۶] انجام شد، به بررسی مشخصات مکانیکی بتن فوق‌توانمند با مقادیر مختلف الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، ابتدا ۱۴ طرح اختلاط با نسبت‌های مختلف پارامترهای تاثیرگذار از جمله نوع سنگدانه، نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان، نسبت میکروسیلیس به سیمان و مقدار فوق‌روان‌کننده ساخته شده است و از میان آن‌ها، طرح اختلاط بهینه با توجه به مقاومت فشاری میانگین حدود ۱۷۵ مگاپاسکال و روانی ۱۹/۷۵ میلی‌متر انتخاب شد. سپس مشخصات مکانیکی بتن فوق‌توانمند با یک و دو درصد حجمی الیاف فولادی به وسیله آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی برزیلی و مدول الاستیسیته مشخص شد. طرح‌های مخلوط مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱۱ و ۱۲ آمده است.

جدول ۱۱- مشخصات طرح‌های مخلوط مورد استفاده در تحقیق حاج اسمعیلی و همکاران [۶]

کد نمونه	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	دوده سیس (kg/m <sup>3</sup> )	نسبت آب به مواد سیمانی	نسبت سلیس به مواد سیمانی (%)	نسبت دوده سیمانی (%)	روان‌ساز به مواد سیمانی (%)	نسبت فوق	روانی (mm)	میانگین مقاومت فشاری (MPa)	میانگین وزن مخصوص (Kg/m <sup>3</sup> )
Q1	۷۷۰	۳۳۰	۰٫۲	۳۰	۱٫۵	۱۷٫۳	۱۳۴/۸۷	۲۳۹۰		
Q2	۷۷۰	۳۳۰	۰٫۲۲	۳۰	۱٫۵	۲۰	۱۳۸/۵۳	۲۳۷۰		
Q3	۶۰۰	۳۰۰	۰٫۲	۳۳	۲	۱۸٫۵	۱۳۵/۵۰	۲۳۸۳/۳۳		
Q4	۶۷۵	۲۲۵	۰٫۲	۲۵	۱٫۸	۱۱٫۸	۱۴۱/۳	۲۴۶۰		
Q5	۷۷۰	۳۳۰	۰٫۱۸	۳۰	۱٫۵	۱۳٫۵	۱۵۳/۰۷	۲۴۴۳/۳۳		
Q6	۸۴۰	۳۶۰	۰٫۲۲	۳۰	۱٫۵	۲۱	۱۳۸/۳۳	۲۳۶۰		
Q7	۸۲۵	۲۷۵	۰٫۱۸	۲۵	۳	۱۵	۱۴۰/۴	۲۴۵۰		
Q8	۸۲۵	۲۷۵	۰٫۱۷	۲۵	۳	۱۲	۱۵۰/۳	۲۴۴۶/۶۷		
Q9	۷۷۰	۳۳۰	۰٫۱۸	۳۰	۳	۱۶/۱	۱۳۱/۷۷	۲۴۴۶/۶۷		
Q10	۹۰۰	۲۷۵	۰٫۱۷	۲۵	۳	۱۶/۵	۱۵۷/۵۳	۲۵۰۳/۳۳		
Q11	۹۰۰	۳۰۰	۰٫۱۷	۲۵	۳	۱۸	۱۷۰/۱۰	۲۴۱۶/۶۷		
Q12	۱۰۵۰	۳۵۰	۰٫۱۶	۲۵	۳	۱۹/۷۵	۱۷۵/۵۳	۲۴۱۳/۳۳		
Q13	۷۷۰	۳۳۰	۰٫۱۸	۳۰	۲٫۵	۱۷/۷۵	۱۵۴/۱۰	۲۴۹۶/۶۷		
Q14	۱۰۵۰	۳۵۰	۰٫۱۴	۲۵	۳	۱۴	۱۷۱/۷۰	۲۴۰۶/۶۷		

جدول ۱۲- مشخصات طرح‌های مخلوط بهینه مورد استفاده در تحقیق حاج اسمعیلی و همکاران [۶]

کد نمونه		
U <sub>۲</sub>	U <sub>۱</sub>	
۱۰۵۰	۱۰۵۰	سیمان (kg/m <sup>۳</sup> )
۳۵۰	۳۵۰	دوده سیلیس (kg/m <sup>۳</sup> )
۲۲۴	۲۲۴	آب (kg/m <sup>۳</sup> )
۴۲	۴۲	فوق روان‌ساز (kg/m <sup>۳</sup> )
۱۵۶	۷۸	الیاف (kg/m <sup>۳</sup> )
۶۷۸	۶۷۸	سنگدانه (kg/m <sup>۳</sup> )
۰/۱۶	۰/۱۶	نسبت آب به سیمان
۲۴۱۵	۲۴۲۴	چگالی (kg/m <sup>۳</sup> )
۱۸۹/۴	۱۹۴/۳	قطر بازشدگی (mm)

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن الیاف به بهبود مقاومت فشاری و خمشی کمک کرده است، اما تاثیری بر مقاومت کششی نداشته است. دلیل این امر این است که بتن فوق توانمند مقاومت کششی بالایی دارد و استفاده از الیاف در حد ۱ درصد، تغییر چندانی ایجاد نمی‌کند.

### ۳- تاثیر بتن‌های الیافی بر روابط تنش - کرنش

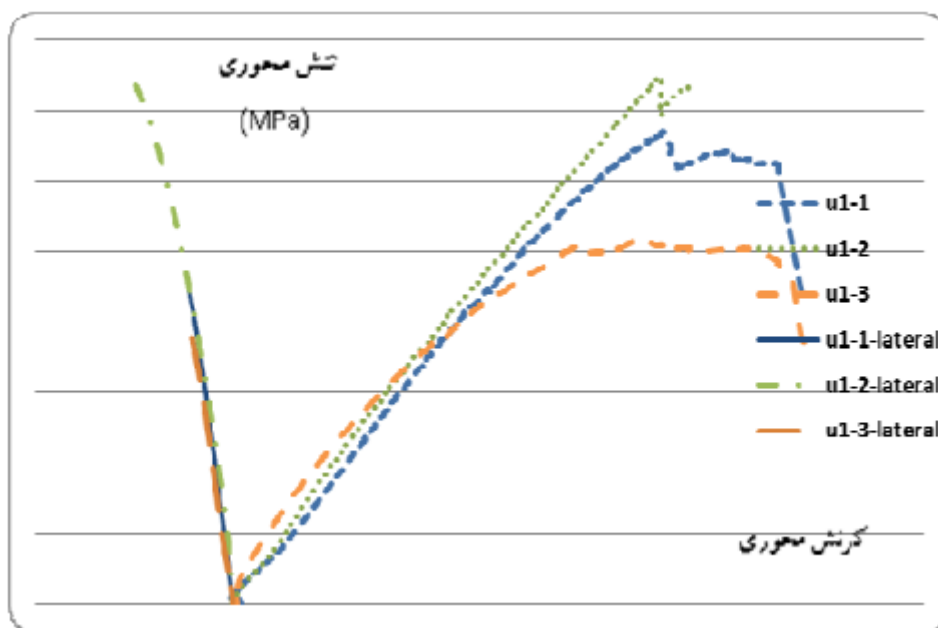
#### ۳-۱ مقدمه

یکی از موارد مورد نیاز جهت شبیه‌سازی و تعیین مدل رفتاری برای سازه‌ها در شرایط مختلف، داشتن داده‌های آماری رفتار مصالح است. بتن به‌عنوان ماده‌ای ناهمگن دارای رفتار بسیار پیچیده‌ای است و خصوصیات رفتاری آن به نحوه بارگذاری و نوع مصالح تشکیل‌دهنده آن وابسته است. با تعیین رفتار بتن تحت بارهای مختلف می‌توان رفتار اعضای ساخته شده از این مصالح را با استفاده تحلیل عددی اجزا محدود شبیه‌سازی و پیش‌بینی نمود. بنابراین در این قسمت به بررسی تاثیر الیاف در بتن بر منحنی و روابط تنش - کرنش پرداخته می‌شود.

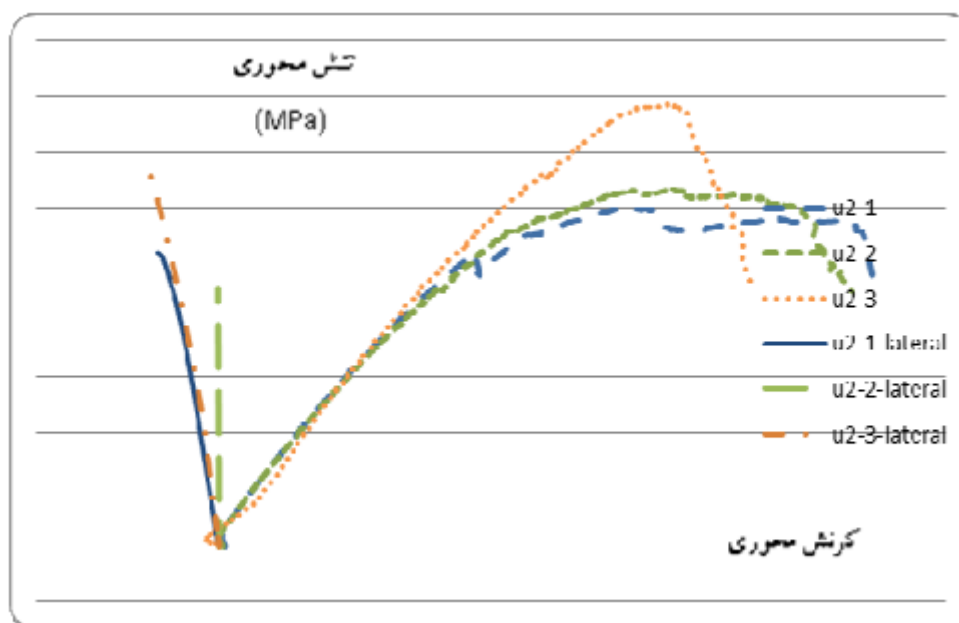
#### ۳-۲ تحقیقات داخلی

در تحقیقی که توسط حاجی‌اسمعیلی و همکاران [۶] انجام شد، مشاهده شد که با افزایش درصد الیاف فولادی از ۱ درصد به ۲ درصد حجمی، مدول الاستیسیته بتن فوق توانمند افزایش پیدا کرده و منحنی تنش - کرنش نشان می‌دهد که جذب انرژی افزایش می‌یابد. مقادیر ضریب پواسون و مدول برشی در این تحقیق در آزمایش با فشار تک محوری به دست آمده است و برای طراحی سازه‌ها مفید می‌باشد.

همچنین در این تحقیق با آزمایش کشش مستقیم نمونه استخوانی شکل، منحنی کامل تنش - کرنش کششی در مقادیر مختل الیاف بدست آمد. منحنی‌های تنش - کرنش بدست آمده در این تحقیق در نمودارهای شکل ۱۴ و ۱۵ آمده است.



شکل ۱۴- منحنی تنش - کرنش بتن فوق توانمند حاوی ۱ درصد الیاف فولادی در بارگذاری تک محوری



شکل ۱۵- منحنی تنش - کرنش بتن فوق توانمند حاوی ۲ درصد الیاف فولادی در بارگذاری تک محوری

در تحقیق دیگری [۷] به بررسی تاثیر الیاف فولادی بر مشخصات مکانیکی بتن حاوی الیاف فولادی در دو حالت آزمایشگاهی و عددی پرداخته شد. در این تحقیق، روابط تنش - کرنش تا لحظه گسیختگی نیز بدست آمد. در این تحقیق از درصدهای الیاف ۱، ۱/۶ و ۳ درصد استفاده شد. طرح مخلوط‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱۳ آمده است.

جدول ۱۳- مشخصات طرح‌های مخلوط مورد استفاده در تحقیق [۷]

Material		PC	SFRC		
			S1%	S1.6%	S3%
Cement	42.5 R	500	500	500	500
Quartz	0/2 mm	377	377	377	377
	3/6 mm	273	273	273	273
Coarse aggregate	0/5 mm	693	615	567	458
	5/10 mm	290	290	290	290
	10/15 mm	317	317	317	317
Fiber	$V_f$	0%	1%	1.6%	3%
	(kg)	-	78	126	235
Silica fume	%	6%	6%	6%	6%
	(kg)	30	30	30	30
Super plasticizer	%	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%
	(kg)	7.5	7.5	7.5	7.5
Water	w/c	0.35	0.35	0.35	0.35
	(l)	175	175	175	175

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در این تحقیق در جدول ۱۴ آمده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف، توانسته‌اند بیش‌ترین مقدار مقاومت فشاری را نشان دهد. در نمونه‌های استوانه‌ای نیز که نتایج آن در جدول ۱۵ آمده است، بیش‌ترین میزان مقاومت متعلق به نمونه‌های با یک درصد الیاف است، اما میزان افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد در مقایسه با نمونه‌های مکعبی کم‌تر است.

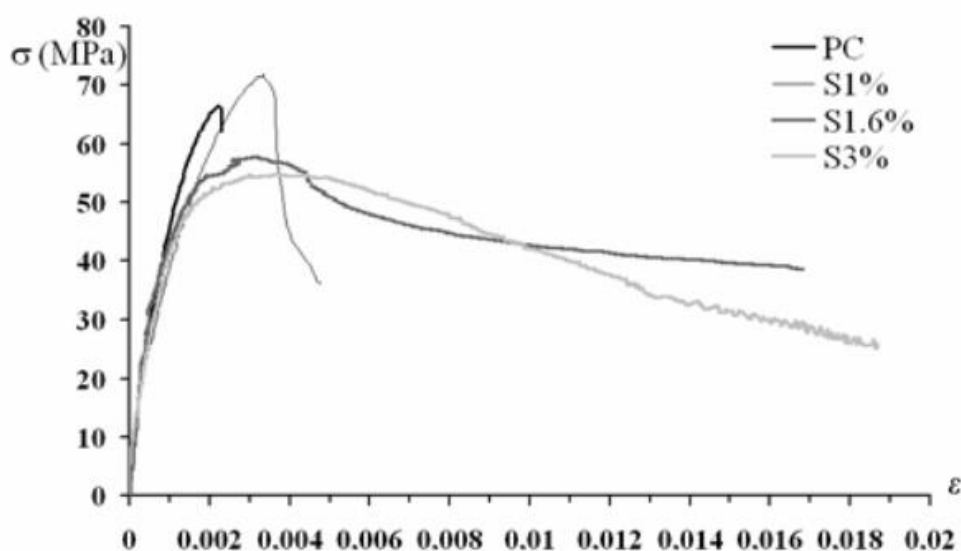
جدول ۱۴- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در تحقیق [۷]

	$R_c$	$R_m$	s	$\delta$
	MPa	MPa	MPa	%
PC_k1	65.5			
PC_k2	57.9	61.5	3.8	6.2
PC_k3	61.1			
S1%_k1	69.8			
S1%_k2	79.0	74.2	4.6	6.2
S1%_k3	73.6			
S1.6%_k1	62.8			
S1.6%_k2	54.3	60.5	5.4	8.9
S1.6%_k3	64.5			
S3%_k1	64.4			
S3%_k2	62.8	62.8	1.6	2.5
S3%_k3	61.2			

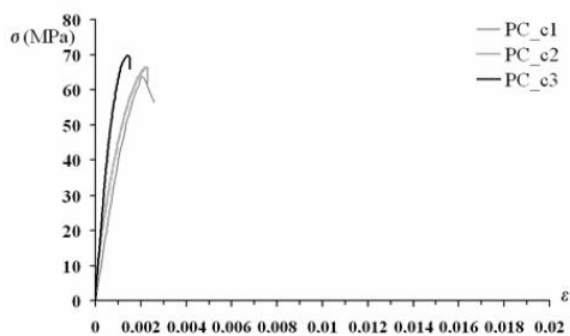
جدول ۱۵- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای در تحقیق [۷]

	$f_c$	$f_m$	s	$\delta$
	MPa	MPa	MPa	%
PC_c1	64.1			
PC_c2	66.3	66.7	2.8	4.2
PC_c3	69.8			
S1%_c1	67.2			
S1%_c2	71.9	69.6	2.4	3.4
S1%_c3	69.8			
S1.6%_c1	61.1			
S1.6%_c2	55.7	58.1	2.7	4.6
S1.6%_c3	57.7			
S3%_c1	59.8			
S3%_c2	54.2	58.5	3.8	6.5
S3%_c3	61.5			

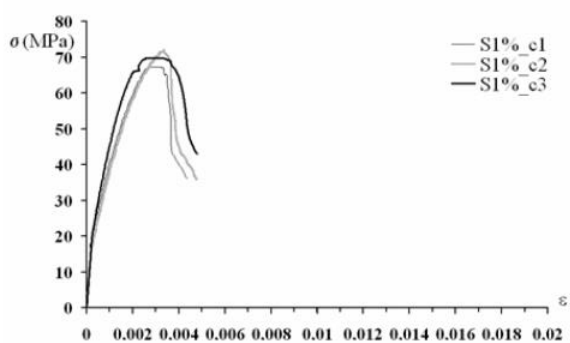
همچنین نمودارهای تنش و کرنش در این تحقیق در نمودارهای شکل ۱۶ و ۱۷ آمده است. با توجه به منحنی‌های تنش - کرنش بدست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش درصد الیاف فولادی، بتن از حالت ترد خارج شده و شکل‌پذیری بیشتری را نشان می‌دهد. بنابراین مشاهده می‌شود که اضافه کردن الیاف فولادی باعث تغییر رفتار از حالت گسیختگی شکننده به حالت گسیختگی با شکنندگی کم‌تر می‌شود که امری مطلوب است. همچنین نمودار مقایسه منحنی‌های تنش - کرنش بدست آمده در این تحقیق در شکل ۱۶ آمده است.



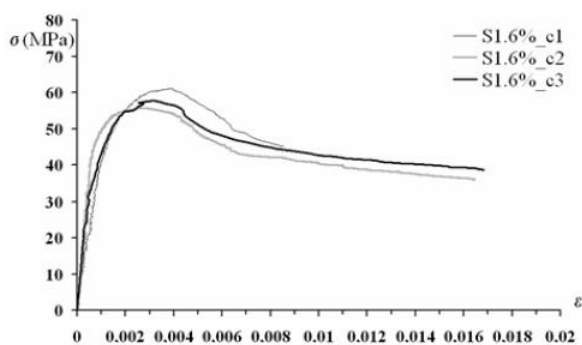
شکل ۱۶- مقایسه منحنی تنش - کرنش نمونه‌های تحقیق [۷]



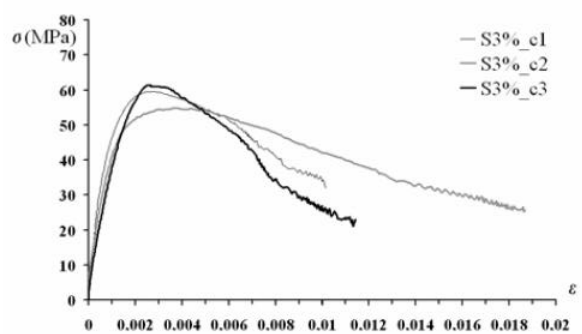
a)



b)



c)



d)

شکل ۱۷- منحنی تنش - کرنش نمونه‌های تحقیق [۷]

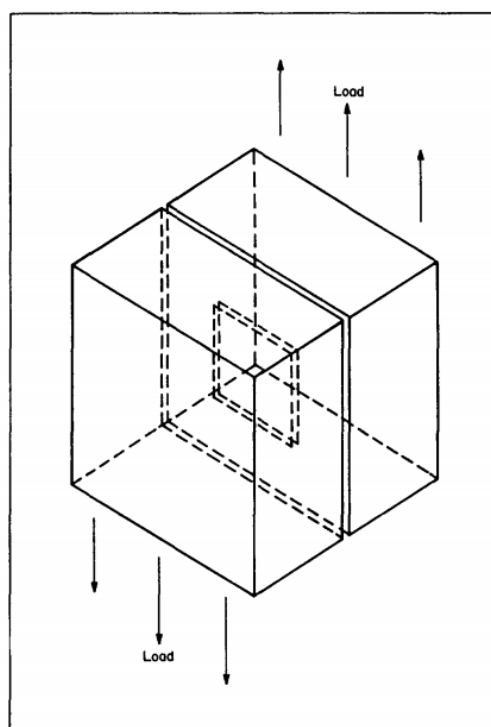
## ۴- تاثیر الیاف در بتن بر ظرفیت برشی

## ۴-۱ مقدمه

گسیختگی برشی یکی از مشکلات مهم در سازه‌های بتنی و بتن الیافی است. تنش‌های برشی در برخی اعضا مثل تیرهای عمیق، اعضای پیش‌تنیده و کوله‌ها حائز اهمیت است. تنش برشی عبارت است از مؤلفه‌ای از تنش که بر سطح مقطع یک جسم اعمال می‌شود. تنش برشی از بردار نیروی عمود بر بردار نرمال سطح مقطع ناشی می‌شود. از سوی دیگر، تنش نرمال نیز از بردار نیروی موازی یا ناموازی نرمال سطح مقطع جسم به وجود می‌آید.

## ۴-۲ نتایج تحقیقات مقاومت برشی

در تحقیقی که توسط بار و همکاران [۱۵] انجام شد، مقاومت برشی نمونه‌های بتن بدون ملات و حاوی ملات مقایسه شد. نحوه آزمایش نمونه و اعمال بار برشی در شکل‌های زیر آمده است. در این آزمایش از دو نوع الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف فلزی استفاده شد.



شکل ۱۸- نحوه اعمال نیروی برشی در تحقیق [۱۵]

نتایج مقاومت برشی نمونه‌های تیر کوتاه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف فلزی در جدول‌های زیر آمده است.

جدول ۱۶- نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در تحقیق [۱۵]

Fibre content (weight %)	Shear strength (MPa)	Coefficient of variation (%)
0.2	6.90	21.5
0.4	6.33	25.8
1.0	6.44	12.0
2.0	5.87	16.0
3.0	6.00	15.2
4.0	5.06	13.4

جدول ۱۷- نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن در تحقیق [۱۵]

Fibre content (weight %)	Slot separation (mm)	Shear strength (MPa)	Number of specimens	Coefficient of variation (%)
0.0	20	6.09	15	28.1
	30	5.03	20	24.6
	40	6.39	16	16.7
	50	5.75	20	18.1
0.05	20	7.54	16	17.2
	30	5.97	17	16.9
	40	6.16	15	7.6
	50	6.55	16	12.2
0.10	20	6.53	16	18.4
	30	6.34	23	18.0
	40	6.42	16	13.1
	50	6.39	16	8.4
0.15	20	6.84	15	17.4
	30	5.80	20	22.2
	40	6.67	16	13.4
	50	6.71	19	10.3
0.20	20	6.01	16	28.9
	30	6.87	22	24.5
	40	5.12	16	17.3
	50	6.23	15	14.4
0.25	20	6.10	16	17.7
	30	5.84	22	23.0
	40	6.27	16	12.9
	50	5.99	19	10.9
0.30	20	5.06	16	28.1
	30	5.35	19	22.0
	40	5.75	16	16.4
	50	5.26	21	21.0

نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن الیاف فولادی باعث کاهش مقاومت برشی شده است. کم‌ترین مقدار مقاومت برشی مربوط به نمونه با ۴ درصد الیاف فولادی است که در این حالت به علت مشکل بودن پخش الیاف در بتن، مقاومت برشی بیش از سایر نمونه‌ها کاهش داشته است. در حالت استفاده از الیاف فولادی، فاصله شیارها برابر با مقدار ثابت ۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

نتایج استفاده از الیاف پلی پروپیلن نیز نشان می‌دهد که با تا ۰/۱۵ درصد، مقادیر مقاومت برشی افزایش و در مقادیر بیش‌تر، کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با تغییر فاصله شیارها، مقادیر مقاومت برشی تغییر می‌کند.

نتایج نمونه‌های استوانه‌ای در این تحقیق نیز در جدول‌های زیر آمده است. نتایج بدست آمده در نمونه‌های استوانه‌ای نیز مشابه با نمونه‌های تیر کوتاه است. با این حال نتایج نشان می‌دهد استفاده از الیاف فلزی تا ۴ درصد وزنی باعث افزایش مقاومت برشی در نمونه‌ها می‌شود.

جدول ۱۸- نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های استوانه‌ای حاوی الیاف پلی پروپیلن در تحقیق [۱۵]

Fibre content (weight %)	Slot separation (mm)	Average shear strength (MPa)	Coefficient of variation (%)	Cylinder compressive strength (MPa)	Slump (mm)
<i>Results for 200 x 100 mm cylinders</i>					
0.0	20	7.3	7.5	38.5	109
	25	6.5	11.8		
	30	7.1	11.2		
0.1	15	8.9	13.8	34.0	43
	20	8.2	10.5		
	25	8.4	9.0		
0.3	15	7.9	15.7	28.0	12
	20	7.8	9.9		
	25	7.3	10.3		
0.5	15	6.9	7.3	21.0	0
	20	6.5	16.9		
	25	7.0	10.1		
<i>Results for 300 x 150 mm cylinders</i>					
0.0	20	7.8	5.2	35	109
	30	8.7	7.9		
	40	7.8	4.8		
	50	7.7	3.4		
0.1	30	8.1	8.7	34.5	43
	40	7.7	7.2		
	50	7.2	—		
0.3	20	9.1	2.3	29.0	12
	30	6.5	6.2		
	40	6.2	16.1		
0.5	20	5.7	4.9	25.1	0
	30	6.1	8.1		

جدول ۱۹- نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های استوانه‌ای حاوی الیاف فولادی در تحقیق [۱۵]

Fibre content (weight %)	Slot separation (mm)	Average shear strength (MPa)	Coefficient of variation (%)	Cylinder compressive strength (MPa)	Slump (mm)
<i>Results for 200 x 100 mm cylinders</i>					
0.10	15	7.1	7.8	37.9	102
	20	6.6	6.9		
	25	6.8	14.6		
	30	6.8	4.2		
	Average	6.8	7.6		
0.50	15	7.2	5.8	38.5	83
	20	7.2	16.0		
	25	7.0	7.6		
	30	7.6	3.7		
	Average	7.2	8.8		
1.00	15	7.9	7.2	36.6	56
	20	7.7	9.1		
	25	7.4	4.3		
	Average	7.6	6.6		
2.00	15	9.1	3.1	42.0	3
	20	8.9	8.7		
	25	8.7	3.3		
	Average	8.9	5.4		
3.00	15	9.8	6.7	38.0	0
	20	9.4	10.8		
	25	9.5	11.4		
	Average	9.6	8.6		
4.00	15	8.4	10.9	40.5	0
	20	9.0	10.2		
	25	8.1	8.7		
	Average	8.5	9.3		
<i>Results for 300 x 150 mm cylinders</i>					
0.10	20	7.5	—	37.0	102
	30	7.7	7.8		
	40	7.0	5.2		
	Average	7.4	7.1		
0.50	20	8.1	2.6	37.1	83
	30	7.8	5.2		
	40	7.8	7.8		
	50	7.4	2.9		
	Average	7.8	5.5		
1.00	20	8.9	6.3	34.4	56
	30	8.2	4.9		
	40	8.6	—		
	Average	8.5	5.9		
2.00	20	9.3	18.6	41.4	3
	30	8.4	3.6		
	40	8.7	7.7		
	Average	8.8	11.1		
3.00	20	9.6	19.2	37.8	0
	30	9.0	3.4		
	40	9.2	13.1		
	Average	9.2	10.4		
4.00	20	13.0	3.8	42.1	0
	30	9.7	14.7		
	40	11.5	—		
	Average	11.4	16.4		

با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، بهترین روش اندازه‌گیری مقاومت برشی نمونه‌های بتن الیافی، استفاده از روش نمونه دو شیاری استوانه‌ای است. همچنین بهترین میزان فاصله شیارها جهت آزمایش بین ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که مقاومت برشی به جهت بتن ریزی و متراکم کردن نیز وابسته است.

در تحقیق دیگری مشاهده شد که با افزایش مقدار الیاف فولادی، مقاومت برشی افزایش می‌یابد. این در حالی است که در این حالت کارپذیری کاهش داشته است [۱۶].

## ۵- تاثیر حرارت بر بتن الیافی

### ۵-۱ مقدمه

سازه‌های بتنی در طول عمر خود شرایط مختلف دمایی را تجربه می‌کنند و این موارد بر روی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن اثر مستقیم دارد. این اثرات می‌تواند شامل تغییرات دمایی جوی طبیعی یا شرایط غیر طبیعی مانند آتش‌سوزی باشد. از این رو بررسی اثرات دما بر روی بتن به ویژه بتن الیافی که انتظار مقاومت بالایی از آن می‌رود، بسیار مهم می‌باشد.

تصور می‌شود که ساختمان‌های بتنی در برابر آتش مقاوم هستند. تحقیقات گذشته نشان داده است که به هنگام حریق در این ساختمان‌ها، مشکلات متعددی اتفاق می‌افتد. در آتش‌سوزی، یکی از روش‌های خاموش کردن، استفاده از آب توسط آتش‌نشان‌ها می‌باشد. در عضو حرارت دیده به محض رسیدن آب، اختلاف حرارت زیادی به وجود آمده و سبب تاثیر گذاشتن بر بسیاری از خصوصیات آن می‌گردد.

بنابراین در این بخش به بررسی اثرات دما بر روی مشخصات مکانیکی بتن الیافی پرداخته خواهد شد.

آگاهی نسبت به میزان ضریب انبساط حرارتی در مدل‌سازی رفتار مواد در حرارت اهمیت فراوانی دارد. تنش‌های حرارتی اضافه در مواد سیمانی می‌توانند منجر به ترک‌خوردگی و قلوه‌کن شدن بتن شوند. بنابراین در صورت توانایی در مدل کردن کرنش‌های ناشی از حرارت در مواد، می‌توان انتظار داشت که در مرحله طراحی این مورد به درستی در نظر گرفته شده و تدابیر لازم برای کنترل آن اتخاذ گردد. دو علت عمده برای ایجاد ضعف‌های ذکر شده به ویژه قلوه‌کن شدن بتن در مراجع بیان شده است. یک احتمال آن است که قلوه‌کن شدن به علت انرژی کرنشی ذخیره شده در نمونه به علت عدم سازگاری بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها باشد. زمانی که نمونه تحت حرارت قرار می‌گیرد، در مراحل اولیه سنگدانه‌ها منبسط می‌شوند، در حالی که خمیر سیمان به علت از دست دادن آب منقبض می‌شود و باعث به وجود آمدن تنش حاصل از جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن می‌شود. در بتن‌های توانمند ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه متراکم‌تر بوده و باعث به وجود آمدن تنش بیش‌تری می‌شود.

الیاف مورد استفاده در بتن در مواجهه با حرارت بالا به دو نوع تقسیم می‌شوند. دسته اول شامل الیافی است که معمولاً مشخصات مکانیکی خوبی در دمای محیط دارند و همچنین پایداری مناسبی در مقابل حرارت بالا دارند. از جمله این الیاف می‌توان به الیاف فولادی، الیاف کربن و الیاف بازالتی اشاره کرد. در نقطه مقابل و در دسته دوم، الیافی مانند الیاف پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن و پلی‌وینیل‌الکل می‌باشد که نقطه ذوب پایینی دارند و در حرارت بالا ذوب شده و یک مسیر برای بخار آب ایجاد می‌کنند. بنابراین فشار بخار داخلی کاهش می‌یابد.

مقاومت در برابر حرارت بالا در بتن‌های الیافی به عوامل مختلفی از جمله مقدار الیاف، شکل الیاف، اندازه الیاف، جهت الیاف و عملکرد آن‌ها در دمای محیط وابسته است [۱۷]، [۱۸]

از دیگر عوامل موثر بر مقاومت بتن‌های الیافی در دمای بالا، استفاده از مواد پوزولانی مانند خاکستر بادی، میکروسیلیس، سرباره، متاکائولن و ... می‌باشد. این مواد به علت ایجاد ساختار متراکم‌تر در بتن، باعث افزایش فشار بخار داخلی شده و این می‌تواند باعث خرابی و قلوه‌کن شدن بتن شود.

همچنین نوع سنگدانه نیز می‌تواند بر خرابی‌های ناشی از حرارت تاثیرگذار باشد. نتایج تحقیقی نشان می‌دهد که استفاده از سنگدانه سیلیسی باعث افزایش ریسک خرابی و قلوه‌کن شدن در دمای بالا شده است [۱۹].

نحوه اعمال تنش حرارتی به بتن‌های الیافی نیز از دیگر عوامل موثر بر خواص بتن الیافی حرارت دیده است. مقدار بالاتر دمای حداکثر ممکن است باعث ایجاد آسیب بیش‌تر به نمونه‌های حاوی الیاف شود [۲۰]. نرخ افزایش دما نیز یکی از پارامترهای کلیدی در مشخصات بتن الیافی است. نرخ افزایش دمای بالاتر می‌تواند منجر به بروز خسارات بیش‌تر شود [۲۱]، [۲۲]. همچنین نتایج نشان می‌دهد که باقی‌ماندن بیش‌تر در دمای بالا می‌تواند منجر به بروز آسیب‌های بیش‌تر شود [۲۳]. از دیگر عواملی که بر خصوصیات بتن الیافی حرارت

دیده تاثیرگذار است، روش کاهش دما است که روش‌های مختلفی از جمله سرد کردن در محیط و سرد کردن به کمک آب را شامل می‌شود [۲۴].

### ۵-۲ تاثیر حرارت بر مشخصات مکانیکی بتن الیافی

در تحقیقی که توسط پلیا و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۱۱ انجام شد، به بررسی الیاف فولادی و پلی پروپیلن در بتن‌های با مقاومت بالا در برابر حرارت بالا پرداخته شد. طرح‌های اختلاط مورد استفاده در این تحقیق در جدول زیر آمده است.

جدول ۲۰- طرح‌های مخلوط تحقیق پلیا و همکاران [۲۵]

Comp. (kg/m <sup>3</sup> )	C3	CP3-1	CP3-2	CS3-30	CS3-40	CSP3-30 × 1	CSP3-30 × 2	CSP3-40 × 1	CSP3-40 × 2
Cement	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Water	150	150	150	151	151	151	151	151	151
Sand 0/4 mm	667	666	664	656	652	655	655	654	653
Gravel 4/22.4 mm	1102	1101	1098	-	-	-	-	-	-
Gravel 6.3/20 mm	-	-	-	1072	1072	1070	1070	1068	1066
PP-F	0.0	1.0	2.0	0.0	0.0	1.0	2.0	1.0	2.0
S-F	0.0	0.0	0.0	30	40	30	30	40	40
Sup (dry extract)	1.55	1.61	1.76	1.28	1.42	1.43	1.60	1.50	1.67
Density	2421	2419	2417	2410	2416	2408	2406	2415	2413

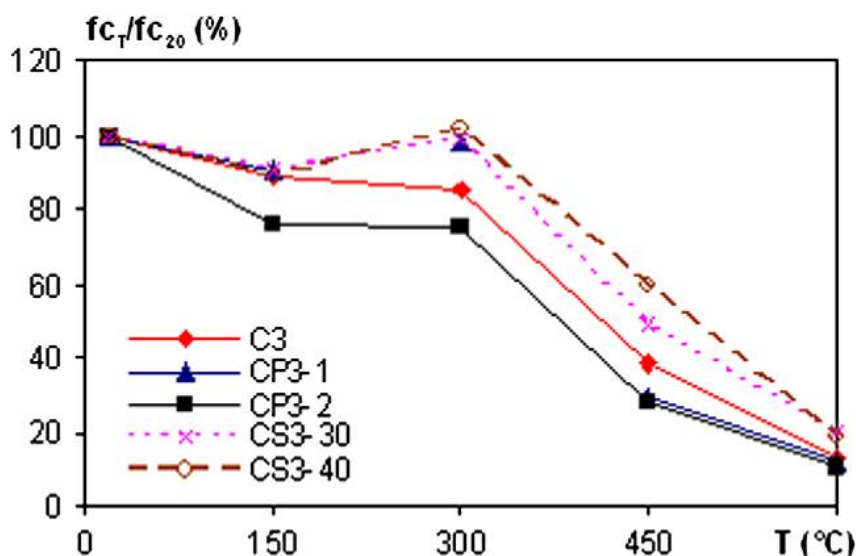
در

این تحقیق، تاثیر افزایش حرارت بر تخلخل، کاهش وزن، مقاومت فشاری، خمشی و مدول الاستیسیته مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج افزایش حرارت بر مشخصات مکانیکی در جدول زیر آمده است. نتایج نشان می‌دهد که تمامی مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن و الیاف فولادی، با افزایش دما کاهش می‌یابد. این کاهش در نمونه‌های مختلف و در دماهای مختلف متفاوت است.

جدول ۲۱- نتایج تاثیر حرارت بر مشخصات مکانیکی تحقیق پلیا و همکاران [۲۵]

Measured parameter	T (°C)	C3	CP3-1	CP3-2	CS3-30	CS3-40	CSP3-30 × 1	CSP3-30 × 2	CSP3-40 × 1	CSP3-40 × 2
<b>Compressive strength (<math>f_c</math>)</b>										
(MPa)	20	70.2	67.8	78.9	74.7	77.9	73.5	72.9	79.6	77.1
SD		0.5	1.2	4.7	1.6	2.0	4.1	1.9	0.7	0.7
Relative (%)	150	89.2	90.2	75.9	90.8	89.1	-	-	-	-
	300	85.0	98.3	75.6	98.7	101.5	97.8	101.4	96.2	92.4
	450	38.3	29.2	27.8	49.3	59.7	-	-	-	-
	600	13.2	12.0	10.8	20.2	18.8	19.1	21.1	22.3	22.1
<b>Flexural tensile strength (<math>f_t</math>)</b>										
(MPa)	20	7.3	6.3	5.7	6.7	7.2	6.3	7.2	7.4	7.8
SD		0.4	0.2	0.5	0.1	0.1	0.5	0.2	0.2	0.5
Relative (%)	150	74.1	83.2	70.3	103.3	109.2	-	-	-	-
	300	62.7	60.6	60.0	81.9	82.5	81.3	68.3	73.9	76.1
	450	38.2	26.5	24.6	46.4	72.6	-	-	-	-
	600	9.4	10.4	9.8	36.7	37.8	23.7	23.0	28.2	32.9
<b>Modulus of elasticity (E)</b>										
(GPa)	20	44.1	45.7	49.5	45.3	44.9	43.3	44.9	43.9	41.4
SD		0.4	0.1	0.8	0.4	1.1	0.6	1.0	0.9	0.1
Relative (%)	150	86.5	85.5	80.0	84.2	86.2	-	-	-	-
	300	58.3	64.3	57.9	67.9	71.4	62.4	61.3	69.2	66.7
	450	14.2	11.6	10.7	16.1	20.2	-	-	-	-
	600	3.6	3.7	3.5	4.1	4.0	4.1	4.2	4.9	5.2

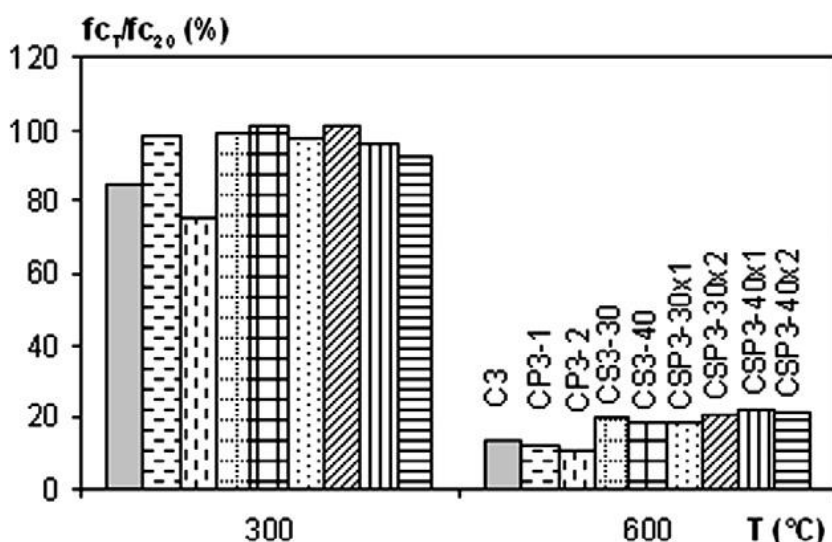
در نمودار شکل زیر، تاثیر افزایش دما بر مقاومت فشاری نمونه‌ها نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن کاهش مقاومت بیشتری را در برابر آتش تجربه کرده است. در این میان، نمونه حاوی ۲ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف پلی پروپیلن دارای کمترین میزان مقاومت در دماهای متفاوت و نمونه حاوی ۴۰ کیلوگرم الیاف شیشه دارای بیشترین میزان مقاومت بوده است. همچنین مشاهده می‌شود که در دمای ۶۰۰ درجه، مقادیر افت نسبی مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن با نمونه شاهد برابر است.



شکل ۱۹- نتایج افت نسبی مقاومت فشاری در تحقیق [۲۵]

نتایج مقاومت باقی مانده نمونه‌ها در نمودار شکل زیر آمده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار مقاومت باقی مانده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، مربوط به نمونه‌های CS3-40 و CSP3-30x2 می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، تمامی نمونه‌ها به جز نمونه CP3-2 در حدود ۹۰ درصد مقاومت خود را حفظ کرده‌اند. نتایج در دمای ۶۰۰ درجه نشان می‌دهد که بیشترین میزان مقاومت باقی مانده مربوط به نمونه‌های CSP3-30x2 و CSP3-40x1 می‌باشد که این به این معنی است که در دماهای بالا، استفاده ترکیبی از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن نتایج بهتری را بدست می‌دهد.

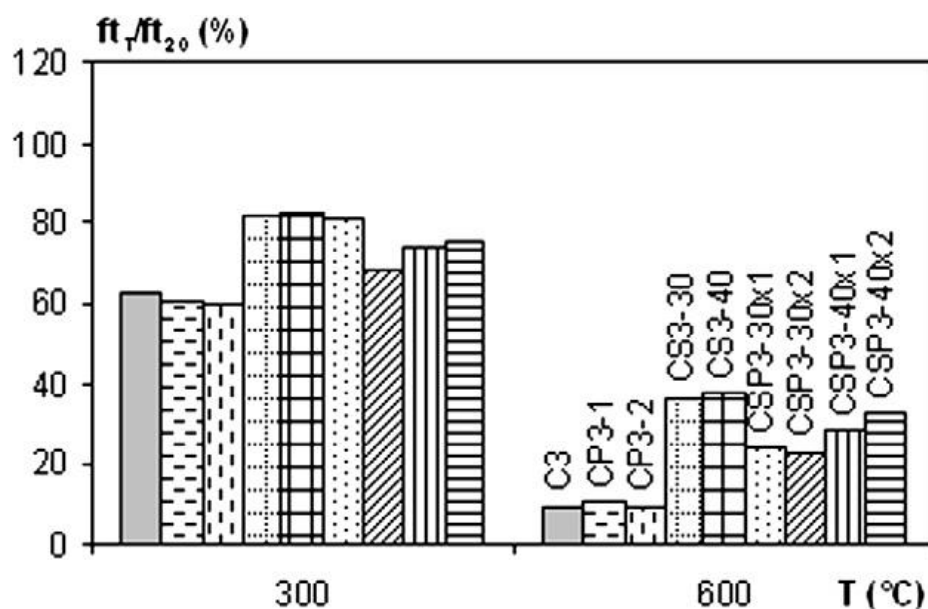
کمترین میزان مقاومت در دمای ۳۰۰ و ۶۰۰ درجه مربوط به نمونه CP3-2 می‌باشد. این در حالی است که نمونه CP3-1 دارای مقاومت بیش‌تری است که این نشان می‌دهد مقدار بهینه استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن، برابر ۱ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است و در مقادیر بیش‌تر، مقادیر مقاومت در دماهای بالا افت بیش‌تری را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰- نتایج مقاومت فشاری باقی مانده در تحقیق [۲۵]

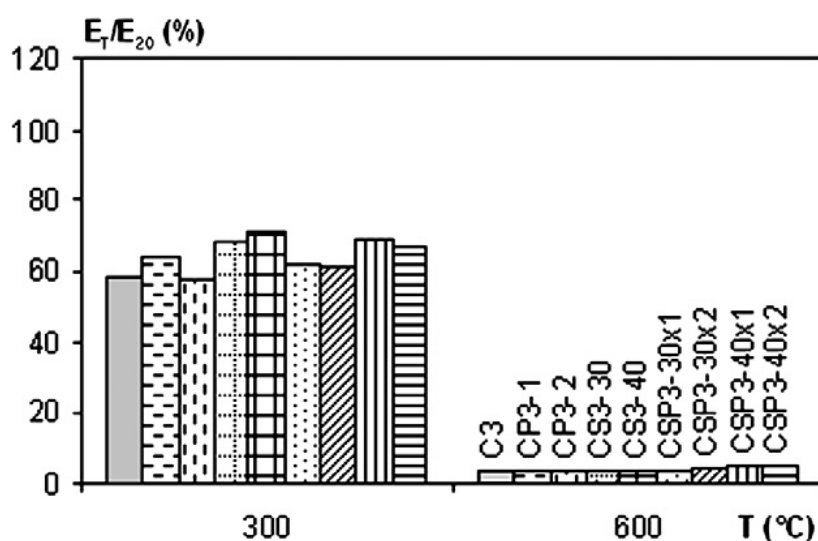
در ادامه و در نمودار شکل زیر، تاثیرات حرارت بر مقاومت خمشی بتن‌های الیافی مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در دمای ۳۰۰ درجه، نمونه‌ها افت حداقل ۲۰ درصد را متحمل شده‌اند. در این میان نمونه‌های CP3-2 و CP3-1 مقاومت خمشی کم‌تری از نمونه شاهد

دارند. این درحالی است که نمونه‌های حاوی ۴۰ و ۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف فولادی و نمونه حاوی ۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف فولادی و ۱ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف پلی‌پروپیلن توانسته‌اند حفظ مقاومت بهتری داشته باشند. در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، تمامی نمونه‌ها دارای مقاومت برابر یا بیش‌تر از نمونه شاهد می‌باشد. همچنین نمونه‌های حاوی ۴۰ و ۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب الیاف فولادی، دارای بیش‌ترین مقادیر مقاومت باقی‌مانده می‌باشد. این نمونه‌ها در دمای ۶۰۰ درجه توانسته‌اند تقریباً ۴۰ درصد مقاومت خمشی خود را حفظ کنند.



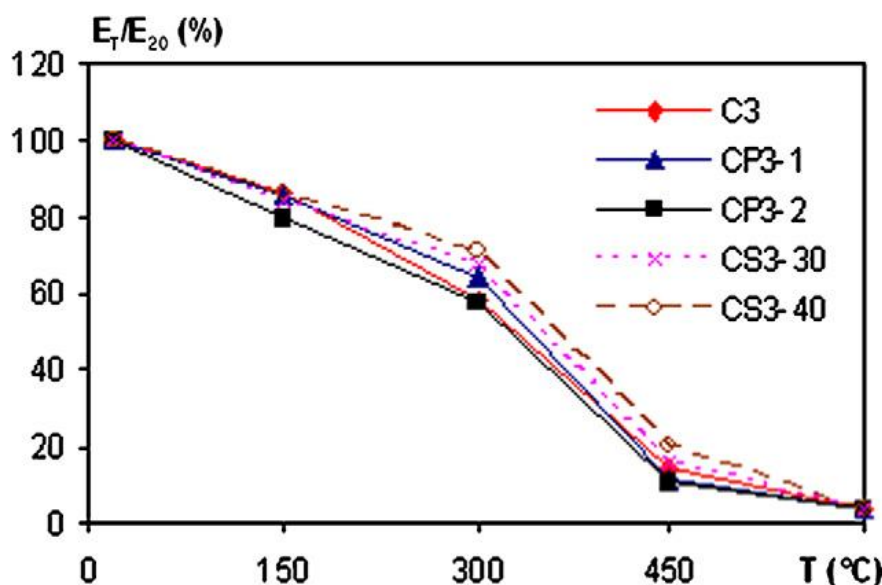
شکل ۲۱- نتایج مقاومت خمشی باقی‌مانده در تحقیق [۲۵]

در ادامه این تحقیق، تاثیرات حرارت بر مدول الاستیسیته بتن مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های CS3-30 و CS3-40 و CSP3-40x1 توانسته‌اند کم‌ترین افت مدول الاستیسیته را داشته باشند. در این میان، نمونه CP3-2 دارای کم‌ترین میزان مدول الاستیسیته نسبی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقادیر مدول الاستیسیته به شدت افت می‌کند و تقریباً در تمامی نمونه‌ها برابر می‌شود. در این میان نمونه‌های CSP3-40x1 و CSP3-40x2 نسبت به سایر نمونه‌ها دارای اندکی مدول الاستیسیته نسبی بیش‌تر می‌باشد.



شکل ۲۲- نتایج مدول الاستیسیته پسماند در تحقیق [۲۵]

نتایج عنوان شده در خصوص مدول الاستیسیته در نمودار شکل زیر نیز قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می شود، نمودارها در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد به یکدیگر می رسد که این به معنی برابر شدن میزان افت مدول الاستیسیته در تمامی نمونه ها می باشد.



شکل ۲۳- نتایج مدول الاستیسیته پسماند در تحقیق [۲۵]

#### ۴- نتیجه گیری

بتن، به عنوان یکی از مصالح ساختمانی اصلی و پرمصرفترین ماده در جهان، در صنایع مختلف ساخت و ساز از اهمیت ویژه ای برخوردار است. با این حال، ضعف عمده آن در مقاومت کششی پایین است که باعث محدودیت در استفاده آن در شرایط تحت کشش و خمش می شود. برای رفع این مشکل و افزایش مقاومت کششی بتن، استفاده از الیاف تقویت کننده مانند الیاف فولادی، پلی پروپیلن و دیگر انواع الیاف در ترکیب بتن، به طور گسترده ای در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این الیاف می توانند باعث افزایش مقاومت بتن در برابر کشش، ضربه، ترک خوردگی و دیگر آسیب های مکانیکی شوند و ویژگی های مکانیکی بتن مانند مقاومت خمشی، کششی، سایش و استحکام ضربه ای را بهبود بخشند.

از جمله نتایج مهم تحقیقات مختلف در این زمینه می توان به موارد زیر اشاره کرد:

تأثیر الیاف فولادی در افزایش مقاومت کششی و ضربه ای: مطالعات نشان می دهند که با افزودن الیاف فولادی به بتن، به ویژه در مقادیر بالای ۳۵ کیلوگرم، مقاومت بتن در برابر ضربه به طور قابل توجهی افزایش می یابد و تعداد ضربات لازم برای ایجاد اولین ترک و گسیختگی نهایی کاهش می یابد.

اثر الیاف پلی پروپیلن در بتن هیبریدی: تحقیقات نشان داده اند که الیاف پلی پروپیلن می توانند به طور مؤثر بر روی ریزترک ها پل زده و باعث بهبود مقاومت بتن در برابر ضربه و خمشی شوند. با این حال، این الیاف تأثیر ناچیزی بر رفتار بتن پس از ترک های اولیه دارند و با افزایش درصد این الیاف، ویژگی های مکانیکی بتن کاهش می یابد.

افزایش مقاومت فشاری و خمشی: استفاده از الیاف فولادی و پلی پروپیلن باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی در بتن های مختلف می شود. این امر به ویژه در بتن هایی با رده مقاومتی بالا مشهود است، جایی که افزودن الیاف فولادی موجب بهبود خواص مکانیکی و کاهش ترک خوردگی می شود.

تأثیر دما و حرارت بر بتن الیافی: تحقیقات نشان می‌دهند که افزایش دما به‌ویژه در دماهای بالا (۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) می‌تواند منجر به کاهش مقاومت فشاری، خمشی و مدول الاستیسیته در بتن‌های الیافی شود. اما ترکیب الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن می‌تواند به‌طور قابل توجهی مقاومت بتن را در دماهای بالا افزایش دهد.

اثر مواد پوزولانی: استفاده از مواد پوزولانی مانند میکروسیلیس و خاکستر بادی به همراه الیاف می‌تواند تأثیر مثبتی بر مقاومت حرارتی و دوام بتن‌های الیافی داشته باشد و باعث کاهش آسیب‌پذیری بتن در دماهای بالا شود.

در نتیجه، استفاده از الیاف در بتن نه تنها موجب بهبود خواص مکانیکی آن می‌شود، بلکه به‌ویژه در شرایط دمایی و بارگذاری‌های مختلف، می‌تواند به‌طور مؤثری از ترک‌خوردگی و خرابی‌های ناشی از آن جلوگیری کند. بنابراین، به‌کارگیری ترکیب مناسب الیاف در طرح اختلاط بتن می‌تواند به یک گزینه مؤثر و اقتصادی برای تولید بتن‌های مقاوم‌تر و با دوام‌تر در شرایط مختلف تبدیل شود.

## مراجع

- [1] Rakhshani Mehr, M., & Bakhshi, H. (Year). Investigating the effect of fiber content and strength grade on the mechanical properties of steel fiber concrete. *Concrete Research*. in Persian
- [2] Banthia, N., & Nandakumar, N. (2003). Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. *Cem. Concr. Compos.*, 25(1), 3–9. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00043-9).
- [3] Ramazanianpour, A. A., & Rashid Dadas, P. (1392). Hybrid fiber reinforced concrete with steel and polypropylene fibers. *Amirkabir Civil Engineering Journal*. in Persian
- [4] Saharkhizan, S., & Saeedi Jam, S. (1394). Investigating the mechanical properties of concrete containing hybrid fibers of steel and polypropylene. *Concrete Research*. in Persian
- [5] Ghasemi, M., Ghasemi, M. R., & Mousavi, S. R. (1400). Investigating the effect of water-to-cement ratio and steel fiber volume on the failure parameters of self-compacting concrete containing steel fibers. *Structural Engineering and Construction*. in Persian
- [6] Esmaeili, H., Mohammad, M. J., & Shakarchizadeh, M. (1398). Investigating the mechanical and structural properties of ultra-strong concrete with different steel fiber volumes. *11th National Concrete Conference, Tehran*. in Persian
- [7] Bencardino, F., Rizzuti, L., & Spadea, G. (2007). Experimental tests vs. theoretical modeling for FRC in compression. *Proc. 6th Int. Conf. Fract. Mech. Concr. Struct.*, 3, 1473–1480.
- [8] Soroushian, P., & Lee, C.D. (1989). Constitutive modeling of steel fiber reinforced concrete under direct tension and compression. In R.N. Swamy & B. Barr (Eds.), *Fibre Reinforced Cements and Concretes, Recent Developments* (pp. 363-375).
- [9] Ezeldin, A.S., & Balaguru, P.N. (1992). Normal and high strength fiber reinforced concrete under compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4(4), 415-427.
- [10] Fanella, D.A., & Naaman, A.E. (1985). Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression. *ACI Journal*, 82(4), 475-483.
- [11] Barros, J.A.O., & Figueiras, J.A. (1999). Flexural behavior of SFRC: testing and modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11(4), 331-339.
- [12] Jamshidi Avanaki, M., Abedi, M., & Hoseini, A. (2020). Stress-Strain Constitutive Material Models for Hybrid Steel Fiber Reinforced Concrete. *J. Civ. Eng. Constr.*, 9(2), 74–82. <https://doi.org/10.32732/jcec.2020.9.2.74>.
- [13] De Oliveira Júnior, L. Á., et al. (2010). Stress-strain curves for steel fiber reinforced concrete in compression. *65th ABM Int. Congr. 18th IFHTSE Congr. 1st TMS/ABM Int. Mater. Congr.*, 7, 5447–5454. <https://doi.org/10.1590/s1517-70762010000200025>.
- [14] Carreira, D.J., & Chu, K.H. (1985). Stress-strain relationship for plain concrete in compression. *ACI Journal*, 82(6), 797-804.
- [15] Barr, B. I. G., Hasso, E. B. D., & Liu, K. (1985). Shear strength of FRC materials. *Composites*, 16(4), 326–334. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(85\)90285-X](https://doi.org/10.1016/0010-4361(85)90285-X).
- [16] Joshi, A., Reddy, P., Kumar, P., & Hatker, P. (2016). Experimental work on steel fibre reinforced concrete. *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 7, 971–981.
- [17] Kim, Y., Lee, T., & Kim, G. (2013). An experimental study on the residual mechanical properties of fiber reinforced concrete with high temperature and load. *Mater. Struct.*, 46(4), 607–620. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9918-y>.
- [18] Gao, D., Yan, D., & Li, X. (2012). Splitting strength of GGBFS concrete incorporating with steel fiber and polypropylene fiber after exposure to elevated temperatures. *Fire Saf. J.*, 54, 67–73. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.07.009>.
- [19] Kodur, V. K. R., & Dwaikat, M. (2008). A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams. *Cem. Concr. Compos.*, 30(5), 431–443. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.012>.

- [20] Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L. (2004). Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures. *Cem. Concr. Res.*, 34(12), 2215–2222. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.011>.
- [21] Choe, G., Kim, G., Yoon, M., Hwang, E., Nam, J., & Guncunski, N. (2019). Effect of moisture migration and water vapor pressure build-up with the heating rate on concrete spalling type. *Cem. Concr. Res.*, 116, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.10.021>.
- [22] Zhao, J., Zheng, J.-J., Peng, G.-F., & van Breugel, K. (2017). Numerical analysis of heating rate effect on spalling of high-performance concrete under high temperature conditions. *Constr. Build. Mater.*, 152, 456–466. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.023>.
- [23] Al Qadi, A. N. S., & Al-Zaidyeen, S. M. (2014). Effect of fibre content and specimen shape on residual strength of polypropylene fibre self-compacting concrete exposed to elevated temperatures. *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, 26(1), 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2012.12.002>.
- [24] Luo, X., Sun, W., & Chan, S. Y. N. (2000). Effect of heating and cooling regimes on residual strength and microstructure of normal strength and high-performance concrete. *Cem. Concr. Res.*, 30(3), 379–383. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00264-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00264-1).
- [25] Pliya, P., Beaucour, A. L., & Noumowé, A. (2011). Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature. *Constr. Build. Mater.*, 25(4), 1926–1934. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.064>.