

## بررسی مقاومت برشی و مدول گسیختگی بتن مسلح شده با الیاف پلی الفین در دماهای مختلف

مسلم یوسفوند<sup>۱</sup>، مختار هواسی<sup>۲</sup>، علی اکبر امیری<sup>۳</sup>، سعید یوسفوند<sup>۴</sup>

۱- کارشناس ارشد عمران- سازه، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

۲- کارشناس ارشد عمران - شرکت مهندسی و توسعه سروک آذر

۳- کارشناس ارشد عمران- سازه، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

۴- کارشناس ارشد عمران- سازه، دانشگاه ملایر

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط (M.yousefvand.vru@gmail.com)

### چکیده

تلاش‌های بسیاری طی سال‌های اخیر جهت جبران ضعف کششی بتن انجام شده‌است. به منظور اصلاح رفتار بتن در کشش، مسلح سازی آن با الیاف می‌تواند گزینه مناسبی باشد. از اهداف پژوهش بررسی عملکرد کششی بتن مسلح شده با الیاف پلی‌الفین تحت اثر درجه حرارت‌های مختلف و مقایسه با طرح اولیه است. با افزودن الیاف (۱/۵ درصد حجمی) رشد ۲۹ درصد، مقاومت کششی و ۵۶ درصدی مدول گسیختگی (تنش متناظر با کاهش چشمگیر این دو پارامتر در بتن نسبت به نمونه‌های موجود با همان درصد‌های حجمی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مواجه شدیم. بتن الیافی در شرایط آزمایشگاهی می‌تواند عملکرد مقاومتی مناسبی را از خود به نمایش بگذارد اما تحت اثر حرارت‌های بالا خود الیاف به یک عامل مخرب در بتن تبدیل می‌شود که دلیل آن برهم خوردن هموژنی بتن و اکسایش الیاف موجود در بتن تحت اثر حرارت بالا است.

کلمات کلیدی: بتن مسلح شده با الیاف، عملکرد کششی، مدول گسیختگی، حرارت

## ۱. مقدمه

الیاف‌ها به صورت طبیعی و مصنوعی وجود دارند از انواع الیاف‌های پر کاربرد در FRC می‌توان به فولاد، شیشه، کربن، الیاف‌های پلیمری و سلولزی اشاره کرد. در حالت کلی الیاف مسلح کننده نمی‌تواند جایگزین میلگرد در قطعات سازه‌ای شود بلکه نقش متفاوتی را در بتن بازی می‌نماید. مهم‌ترین نقش الیاف کنترل ترک در FRC و تغییر رفتار بتن هنگامی که خمیر آن دچار ترک می‌شود است. محققان ثابت کردند که نتیجه افزودن الیاف پلیمری به بتن، بهبود انعطاف‌پذیری و طاقت آن است. آن‌ها ثابت کردند که درصد حجمی بحرانی الیاف برای تأمین مقاومت بتن به عوامل متعددی وابسته است. مهم‌ترین عامل پیوستگی الیاف با ملات سیمان است [1-3].

زولو و همکاران [4] آزمایش‌هایی جهت تعیین مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدن و مقاومت خمشی بتن غیرمسلح و مسلح به الیاف پلیمری انجام داده‌اند؛ که نمونه‌ها حاوی ۰ الی ۰/۳ درصد الیاف بودند. نشان دادند که استفاده از این مقدار حجمی الیاف در بتن تأثیر کمی بر مقاومت فشاری داشته اما مقاومت کششی و خمشی با استفاده از ۰/۱ درصد الیاف از ۰ تا ۲/۷ درصد افزایش یافت.

کونزالسکی [5] به ارزیابی اثرات مختلف مقادیر الیاف پلیمری آرامید بر مقاومت کششی بتن پرداخت. مقادیر الیاف بین ۰ و ۲ درصد حجمی قرار داشت و جهت‌گیری الیاف در ترکیبات آزمایشی، تک راستا بود. نتایج آزمایش نشان داد که نقطه غیرخطی شدن برای مقادیر الیاف بیشتر از ۱/۴۵ درصد کاهش یافته و همچنین مدول یانگ و طاقت با افزایش مقدار الیاف کاهش می‌یابد.

اندرسون و دانیل، ترکیبات مختلف بتن مسلح شده با الیاف پلیمری آکریلیک، مطالعاتی را انجام دادند. میزان استفاده بین ۱ الی ۳ درصد وزنی خمیر بود. نتایج نشان دادند که با افزایش مقدار اولیه الیاف مدول گسیختگی تمایل به افزایش دارد [6]. مایی و همکاران گزارش داده‌اند که تحت اثر حرارت کوره، الیاف پلی‌پروپیلن موجود در بتن مسلح الیافی، اکسایش یافته و انعطاف‌پذیری خود را به‌طور چشمگیری از دست می‌دهد [7].

بر اساس تحقیقات رفتار بتن الیافی تحت اثر حرارت کوره و حرارت ناشی از آتش‌سوزی، متفاوت است. محققان نشان دادند در مواقع آتش‌سوزی با افزایش مقاومت فشاری [8-9]، و لاو و اندرسون گزارش دادند که در زمانی بتن الیافی تحت اثر حرارت کوره قرار می‌گیرد، کاهش مقاومت فشاری را شاهد هستیم [10].

## ۲. مواد مصرفی

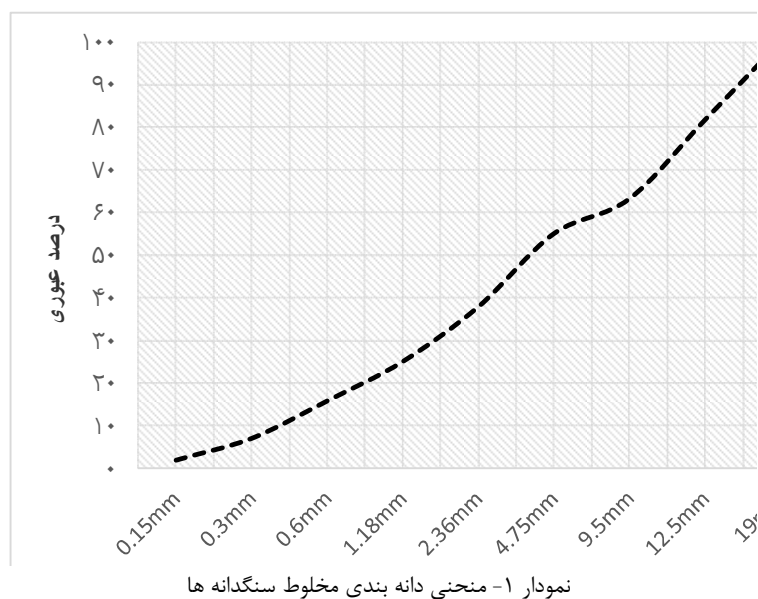
سنگ‌دانه‌های بتن در حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد حجم بتن را به خود اختصاص می‌دهند و بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی بتن با ویژگی‌های سنگ‌دانه‌ها ارتباط مستقیم دارد. سنگ‌دانه‌ها تقریباً ارزان هستند و با آب واکنش پیچیده‌ای برقرار نمی‌کنند، بنابراین معمولاً از سنگ‌دانه‌ها به‌عنوان پرکننده‌های خنثی در بتن نام برده می‌شود. برخی از مشخصات سنگ‌دانه‌ها که در بتن اهمیت دارند عبارت‌اند از: تخلخل، دانه‌بندی جذب رطوبت، شکل و بافت سطحی، مقاومت در برابر خردشدگی، مدول الاستیسیته و نوع مواد زیان‌آور موجود در آن‌ها. در (جدول ۱) برخی از ویژگی‌های مهم سنگ‌دانه‌های مصرفی آمده‌است. نمودار دانه‌بندی (نمودار ۱) نیز در ادامه قابل مشاهده است. در این پژوهش سیمان تیپ ۲ کرمان استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن، در (جدول ۲)، قابل مشاهده است. این مشخصات با استاندارد ASTM ۰۷ - C150 [11] مطابقت دارد. در روش استاندارد ملی بتن شماره شده است که آبی که قابل آشامیدن است را می‌توان در بتن به کاربرد. تنها استثنا آن است که سوابق قبلی، نشان‌دهنده نامناسب بودن این آب برای بتن باشد که در این صورت نباید در بتن به‌کاربرده شود. آب به سه صورت در بتن به کار می‌رود: برای شستشوی سنگ‌دانه‌ها، به‌عنوان یکی از اجزای تشکیل‌دهنده

بتن و به منظور عمل آوری بتن، آب مصرفی در این پژوهش آب شرب شهر رفسنجان استان کرمان است. فوق روان کننده کاهش آب بتن باعث صرفه جویی در مصرف سیمان و سادگی عمل تراکم و اختلاط بتن می شود. فوق روان کننده ها در مقایسه با روان کننده ها دارای اثر قوی تری هستند. این مواد ضمن حفظ انسجام بتن و بدون کاهش مقاومت آن باعث افزایش کارایی آن می شوند. علاوه بر این، این مواد قادرند آب مورد نیاز بتن را به میزان ۲۵ تا ۳۵ درصد کاهش دهند و مانع آب انداختن آن شوند. توسعه ی آینده بتن وابسته به افزودنی های آن مخصوصاً فوق روان کننده بتن است. در این پژوهش از فوق روان کننده بتن با خاصیت حفظ کارایی به مدت زیاد بر پایه پلی کربوکسیلات اتر شرکت البرز شیمی استفاده شده است که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در (جدول ۳) آمده است.

الیاف مورد استفاده در این پژوهش الیاف الیاف پلی الفین (شکل ۱)، است که مشخصات فنی آن در (جدول ۴) آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سنگدانه ها (شن و ماسه)

ماسه	شن	
۲/۴۸	۲/۵۶	چگالی ذرات SSD
۳/۳	۲/۴	درصد ظرفیت جذب آب
گرد و تیز گوشه	نیمه شکسته	شکل



جدول ۲- مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲ کرمان

Component	Loss on Ignition	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	Free CaO	C <sup>3</sup> S	C <sup>2</sup> S	C <sup>4</sup> A	C <sup>4</sup> AF
Result (%)	۱/۱۹	۲۱/۵۰	۴/۹۵	۳/۹۷	۶۳/۵۲	۱/۷۵	۲/۲۰	-	۱/۴	۵۰	۲۴	۶/۴	۱۲/۱

جدول ۳- مشخصات فنی فوق روان کننده کربوکسیلاتی

مشخصه	شرح
شکل ظاهری	مایع ویسکوز
رنگ	شفاف یا شیری
غلظت	۴۰٪
pH	۶ - ۸
چگالی	۱/۰۸ g/cm <sup>۳</sup>
میزان مصرف	۰/۳ الی ۱/۵ درصد وزن سیمان



شکل ۱- الیاف پلی الفین

جدول ۴- مشخصات الیاف پلی الفین

مواد سازنده	پلی الفین اصلاح شده
شکل	تارهای شبکه‌ای تاییده
طول	۱۸ میلی‌متر
مقاومت کششی	۸۰۰ مگاپاسکال
وزن مخصوص	۰/۹۴ - ۰/۹۱
جذب آب	ندارد

### ۳. روش‌ها و نتایج کلی

#### ۳.۱. طرح مخلوط بتن

پس از بهینه‌سازی مخلوط سنگ‌دانه و تعیین نسبت‌های اختلاط بر اساس روش ملی اختلاط روند ساخت و تولید نمونه‌های بتنی طبق استاندارد انجام شد. در پروژه جاری، طرح‌های اختلاط برای تمامی آزمایش‌های بتن به شرح (جدول ۵) و (جدول ۶)، ارائه شده است. نحوه اختلاط مواد به این صورت بود که پس از اختلاط مواد اصلی بتن بدون افزودنی به مدت ۲ دقیقه با یکدیگر در مخلوط‌کن مواد افزودنی ابتدا الیاف و سپس فوق روان کننده به مخلوط اضافه شدند و پس از اختلاط کامل عملیات نمونه‌گیری انجام شد.

جدول ۵- نام گذاری طرح‌های اختلاط

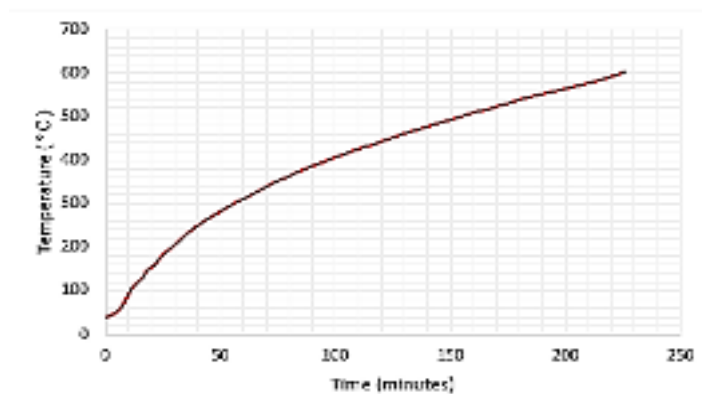
نام طرح اختلاط	شرح
CN , N (Normal)	شاهد
CP, P (polyelfin)	بتن مسلح شده با الیاف پلی الفین

جدول ۶- طرح اختلاط

طرح اختلاط (Mix)	درصد حجمی الیاف	فوق روان کننده (درصدوزنی سیمان) (kg/m <sup>3</sup> )	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	شن (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )
CN	-	۰/۶	۴۱۰	۸۵۰	۹۴۰	۲۰۰
CP ۰,۵%	۰/۵	۰/۶	۴۱۰	۸۵۰	۹۴۰	۲۰۰
CP ۱%	۱	۰/۶	۴۱۰	۸۵۰	۹۴۰	۲۰۰
CP ۱,۵%	۱/۵	۰/۶	۴۱۰	۸۵۰	۹۴۰	۲۰۰

### ۲.۳. آزمون‌های مقاومت کششی و خمشی

آزمون‌های مقاومت کششی (دو نیم شدن) مطابق ASTM C۴۹۶/C۴۹۶M-۰۴ [12] (نمونه های استوانه‌ای ۲۰\*۱۰) و مقاومت خمشی مطابق ASTM C۷۸-۰۸ [13] (نمونه های ۱۵\*۱۵\*۴۵ سانتی‌متر با دهانه ۳۰ سانتی-متری) با درصدهای حجمی مختلف تحت حرارت کوره (نمودار ۲ و شکل ۲) مورد ارزیابی قرار گرفتند. تمامی نمونه‌ها قبل از آزمایش به مدت ۲۸ روز در شرایط آزمایشگاهی در آب غوطه‌ور و عمل‌آوری شدند. نتایج مربوط به نمونه‌های تحت حرارت در دماهای ۶۰۰، ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به تفکیک در (جدول ۷) و (جدول ۸) به همراه نمودار هر کدام از آزمون‌ها و همچنین گزارش تصویری از نوع شکست نمونه‌ها و نیز آورده شده است.



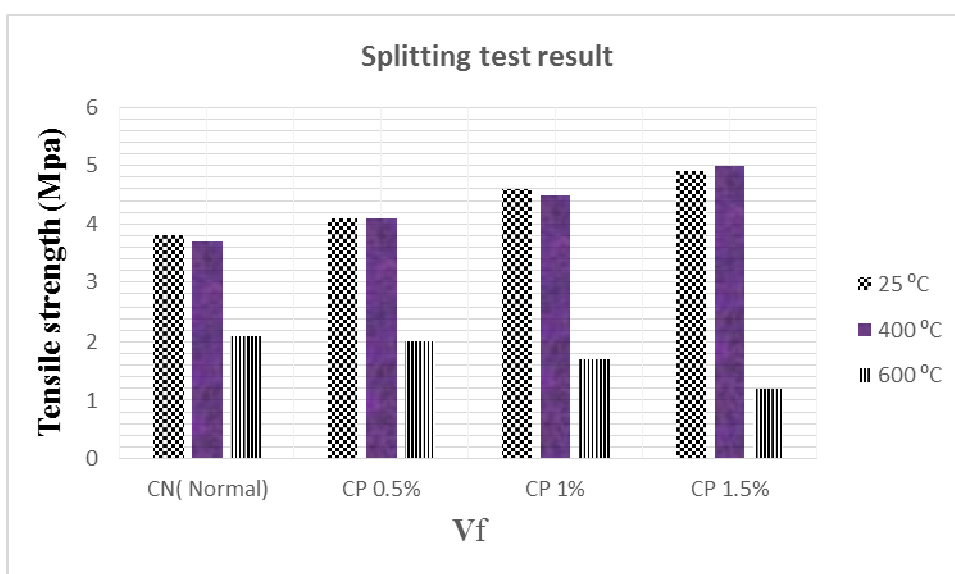
نمودار ۲- منحنی حرارت- زمان کوره



شکل ۲- کوره و نمونه‌ها

جدول ۷- نتایج مربوط به آزمون مقاومت کششی تحت اثر دماهای مختلف

طرح اختلاط	مقاومت کششی (Mpa)		
	۲۵ <sup>o</sup> C	۴۰۰ <sup>o</sup> C	۶۰۰ <sup>o</sup> C
CN(Normal)	۳/۸	۳/۷	۲/۱
CP ۰,۵%	۴/۱	۴/۱	۲
CP ۱%	۴/۶	۴/۵	۱/۷
CP ۱,۵%	۴/۹	۵	۱/۲



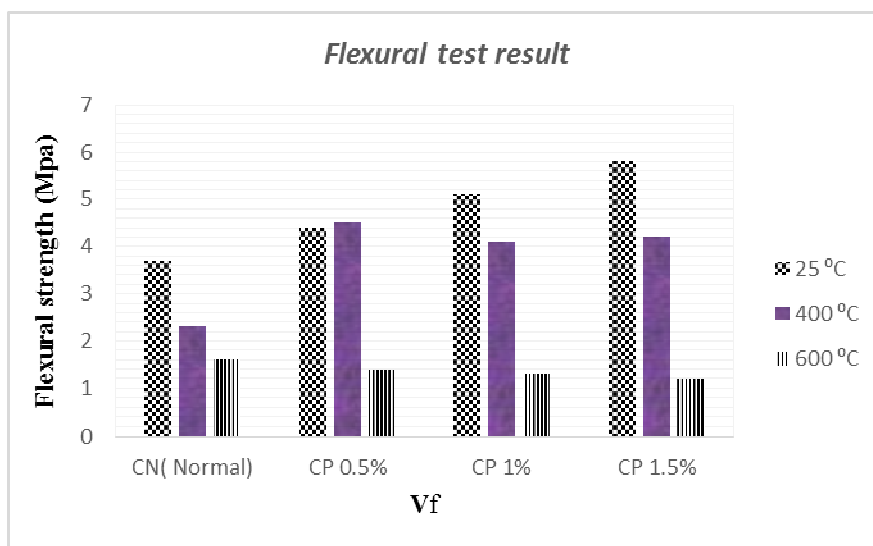
نمودار ۳- نتایج مربوط به تست کشش برزیلی (دو نیم شدن)



شکل ۳- تصاویری از روند انجام آزمون مقاومت کششی

جدول ۸- نتایج مربوط به آزمون مقاومت خمشی تحت اثر دماهای مختلف

طرح اختلاط	مقاومت خمشی (Mpa)		
	۲۵°C	۴۰۰°C	۶۰۰°C
CN(Normal)	۳/۷	۲/۳	۱/۶
CP ۰,۵%	۴/۴	۳/۵	۱/۴
CP ۱%	۵/۱	۴/۱	۱/۳
CP ۱,۵%	۵/۸	۴/۲	۱/۲



نمودار ۴- نتایج مربوط به تست مقاومت خمشی (چهار نقطه ای)



شکل ۴- تصاویری از روند انجام آزمون مقاومت خمشی

#### ۴. نتیجه گیری کلی:

تحقیقات انجام گرفته نشان می دهند که وجود الیاف با مقدار بهینه مقاومت فشاری بتن را چندان تحت تأثیر قرار نمی دهد، اما به دلیل نقش الیاف در دوختن ترکها، از گسیختگی ترد و خرد شدن نمونه جلوگیری می کند. در واقع گسیختگی بتن الیافی در این حالت با شکل پذیری همراه بوده و نمونه یکپارچگی خود را تا حدود زیادی حفظ می کند [14]. افزودن الیاف پیوستگی منافذ و ارتباط کانالهای جریان را در بتن از بین می برد [15]. اکسایش الیاف و از بین رفتن مدول آن در الیاف تحت حرارت بالا نه تنها به این ارتباط را از بین نمی برد بلکه باعث تشدید در ایجاد منافذ شده و خود عامل مخربی در بتن مسلح الیافی است که در این پژوهش زمانی که بتن تحت اثر حرارت های بالا ( $600^{\circ}\text{C}$ ) در کوره قرار می گیرد تشدید پیدا می کند.

افزودن الیاف ۱/۵ درصد حجمی تقریباً ۲۹ درصد، افزایش مقاومت کششی در دمای ۲۵ درجه نسبت به نمونه شاهد خود را سبب می شود. در دماهای بالاتر شاهد کاهش مقاومت کششی بتن حاوی درصد های مختلف الیافی نسبت به نمونه های موجود با همان درصد های حجمی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد هستیم که دلیل آن با توجه به پژوهش های گذشته که در مقدمه اشاره شد می تواند برهم خوردن هموزنی بتن و اکسایش الیاف موجود در بتن تحت اثر حرارت بالا باشد.

افزودن ۱/۵ درصد حجمی الیاف به بتن سبب افزایش ۵۶ درصدی مقاومت خمشی بتن ( تنش متناظر با پیدایش اولین ترک) در دمای ۲۵ درجه شده که عامل آن را می توان پل زدن الیاف مابین نانو ترک های بتن دانست. افزودن الیاف به تیرهای بتنی می تواند در بهبود مدول گسیختگی و تغییر نوع شکست بتن از حالت ترد به شکل پذیر تر کمک کننده باشد.

با توجه به نتایج بدست آمده می توان اینگونه استنباط کرد که الیاف نقش خود را تا دمای ۴۰۰ درجه در بهبود مقاومت کششی و خمشی حفظ کرده؛ سپس با بالا رفتن حرارت کوره رفته رفته الیاف نه تنها نقش خود را از دست می دهد بلکه خود می تواند در بتن تخلخل ایجاد کرده و باعث کاهش مقاومت خمشی بتن شود. به وضوح می توان مشاهده کرد که نمونه های مربوط به طرح شاهد در دمای ۶۰۰ درجه نسبت به نمونه های حاوی الیاف دچار افت مقاومت کمتری شده است و رفته رفته با افزایش حجم الیاف در دمای مذکور کاهش مقاومت شدیدی را شاهدیم.



## مراجع

- [۱] Dave, N. J., and D. G. Ellis. "Polypropylene fiber reinforced cement." *International Journal of Cement Composites* ۱,۱ (۱۹۷۹): ۱۹-۲۸.
- [۲] Hanna, A. N., "Preliminary Evaluation of Forta Fiber Reinforced Concrete, Report to Forta fiber, Inc., by Construction Technology Laboratories, Portland Cement Association, ۱۹۸۱.
- [۳] Swamy, R. N., and H. Stavrides. "Influence of fiber reinforcement on restrained shrinkage and cracking." *Journal Proceedings*. Vol. ۷۶. No. ۳. ۱۹۷۹.
- [۴] Zollo, R. F., J. A. Ilter, and G. B. Bouchacourt. "Plastic and drying shrinkage in concrete containing collated fibrillated polypropylene fibers." *Development in fibre reinforced cement and concrete. Proceedings, RILEM Symposium, Sheffield*. ۱۹۸۶.
- [۵] Konczalski, P., and K. Piekarski. "Tensile properties of Portland cement reinforced with Kevlar fibers." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* ۱,۴ (۱۹۸۲): ۳۷۸-۳۸۴.
- [۶] Daniel, J. I., and E. D. Anderson. "Acrylic fiber reinforced cement composites." *Proceedings of the Third International Symposium on Development in Fibre Reinforced Cement and Concrete; Sheffield, England*. ۱۹۸۶.
- [۷] Mai, y. W.; Andonian, R.; and Cotterell, B., "Thermal degradation of polypropylene fibers in cement composites," *International Journal of Composites*, vol. ۳, No. ۳, August ۱۹۸۰, pages ۱۴۹-۱۵۵.
- [۸] Serrano, Rubén, et al. "Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers." *Construction and building materials* ۱۲۲ (۲۰۱۶): ۳۰۲-۳۰۹.
- [۹] Horiguchi, T., T. Sugawara, and N. Saeki. "۵۷. Fire resistance of hybrid fiber reinforced high strength concrete." *۶th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes*. RILEM Publications SARL, ۲۰۰۴.
- [۱۰] Lau, A., and M. Anson. "Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete." *Cement and Concrete Research* ۳۶,۹ (۲۰۰۶): ۱۶۹۸-۱۷۰۷.
- [۱۱] ASTM C۱۵۰ / C۱۵۰M-19a, Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۹, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [۱۲] ASTM C۴۹۶ / C۴۹۶M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۷, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [۱۳] ASTM C۷۸ / C۷۸M-۱۸, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۸, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [۱۴] Katz, Amnon, and Arnon Bentur. "Mechanisms and processes leading to changes in time in the properties of CFRC." *Advanced Cement Based Materials* ۳,۱ (۱۹۹۶): ۱-۱۳.
- [۱۵] Singh, A. P., and Dharendra Singhal. "Permeability of steel fibre reinforced concrete influence of fibre parameters." *Procedia Engineering* ۱۴ (۲۰۱۱): ۲۸۲۳-۲۸۲۹.