



## بررسی مشخصات مکانیکی و دوام کامپوزیت های سیمانی حاوی میکا دوده سیلیس و

### الیاف شیشه

پرهام نظام<sup>۱</sup>، علی صدر ممتازی<sup>۲</sup>، رضا کهنی خشکیبجاری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، داشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت

[parhamnezam96@gmail.com](mailto:parhamnezam96@gmail.com)

۲- پرفسور گروه مهندسی عمران، داشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت [sadmomtazi@yahoo.com](mailto:sadrmomtazi@yahoo.com)

۳- فارغالتحصیل دکترای سازه، داشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت [r.kohani.k@gamil.com](mailto:r.kohani.k@gamil.com)

#### چکیده

کامپوزیت‌های سیمانی حاوی الیاف مصالح مناسبی به خصوص برای مواردی که مصالح تحت اثر تنش‌های کششی بیشتر قرار دارد، می‌باشد. کاربرد الیاف می‌تواند تا حد زیادی باعث بهبود شکل‌پذیری و افزایش مقاومت در برابر تنش‌های خمشی شود. از سوی دیگر کاربرد مواد معدنی جایگزین سیمان علاوه بر اینکه ممکن است بر بهبود خواص مکانیکی موثر باشد بر خواص دوامی نیز تاثیرگذار است. در پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر استفاده از الیاف شیشه، میکروسیلیس و میکا بر خواص مکانیکی، دوام و حرارتی کامپوزیت‌های سیمانی، آزمایش‌های مختلف از جمله آزمایش‌های مقاومت فشاری و طاق خمشی در دو حالت حرارت ندیده و حرارت دیده (تحت دمای ۶۰۰ درج سانتی گراد) و آرایش مقاومت شکافت برزیلی، آزمایش جذب آب نهایی انجام شده است. برای دستیابی به اهداف مورد نظر در این پژوهش ۱۹ طرح اختلاط ساخته شده است. طرح شاهد فاقد الیاف شیشه بوده همچنین در این طرح از میکا و میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان استفاده نشده است. میکا و میکروسیلیس با درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ (نسبت به وزن سیمان) به صورت تکی و ترکیبی با سیمان جایگزین می‌شود. همچنین نمونه‌های آزمایشگاهی با توجه به درصد حجمی الیاف به دو گروه تقسیم می‌شوند گروه اول حاوی ۰٫۲۵٪ الیاف شیشه و گروه دوم حاوی ۰٫۵٪ الیاف است. بررسی نتایج نشان داده است که در سن ۲۸ روز نیز بهترین عملکرد مقاومت فشاری در هر دو گروه طرح حاوی ۰٫۲۵ و ۰٫۵ درصد الیاف مربوط به نمونه‌های حاوی میکروسیلیس می‌باشد به طوری که با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس مقاومت فشاری افزایش یافته است. بررسی نتایج همچنین نشان داده است افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس باعث کاهش افت مقاومت فشاری ناشی از حرارت می‌شود اما مقدار این کاهش در مقایسه با طرح‌های حاوی میکا شدت کمتری دارد که نشان دهنده اثر بیشتر میکا در مقایسه با میکروسیلیس در بهبود مقاومت حرارتی می‌باشد. قرارگیری تحت اثر دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با طور قابل توجهی طاق خمشی را کاهش می‌دهد. در طرح‌های حرارت ندیده مشاهده می‌شود علاوه بر اینکه افزایش درصد حجمی



## شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

الیاف شیشه باعث بهبود طاقت خمشی می شود افزایش درصد جایگزینی میکا و میکروسیلیس نیز باعث افزایش طاقت خمشی شده است.

**کلید واژه:** کامپوزیت سیمانی، الیاف شیشه، میکا، میکروسیلیس، مقاومت حرارتی، طاقت خمشی

### ۱- مقدمه

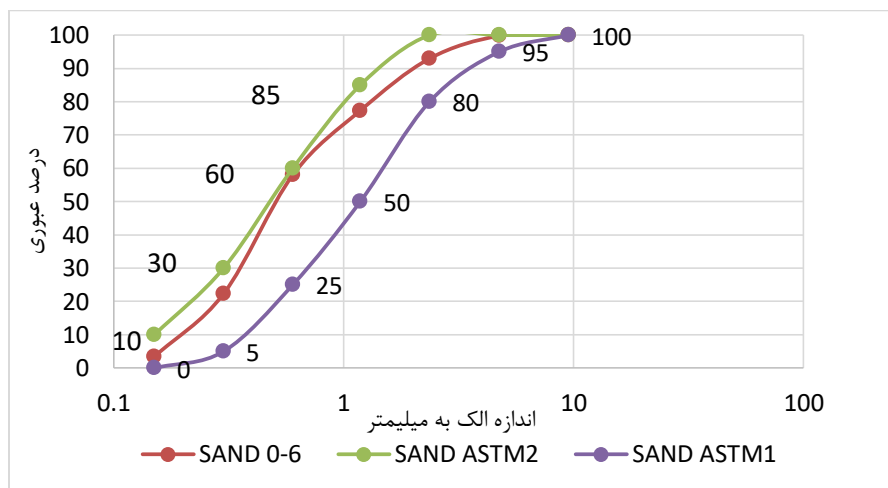
بتن با توجه به مزایای بسیاری همچون در دسترس بودن مواد اولیه، مقاومت فشاری بالا، طول عمر بالا، مقاومت در برابر حرارت، به عنوان پرکاربردترین مصالح ساختمانی در دنیا شناخته می شود. با توجه به افزایش ساخت و ساز به ویژه در کشورهای در حال توسعه، تولید بتن در سال های اخیر به طور چشمگیری در حال افزایش می باشد. سیمان به عنوان یکی از اجزای اصلی بتن شناخته می شود که تولید آن علاوه بر مصرف بالای انرژی باعث تولید و انتشار گاز دی اکسید کربن نیز می شود، مصرف روزافزون بتن افزایش تولید سیمان پرتلند را به دنبال خواهد داشت، که این موضوع باعث اثرات مخرب زیست محیطی خواهد شد. از سوی دیگر تولید این ماده باعث مصرف قابل توجه انرژی از قبیل برق و سوخت فسیلی می شود از اینرو ارائه یک محصول جایگزین برای این ماده می تواند به عنوان گامی موثر در جهت توسعه پایدار تلقی شود. استفاده از مواد با خاصیت پوزولانی به عنوان جایگزین سیمان، تا حد زیادی می تواند اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از تولید این ماده را کاهش دهد از سوی دیگر با توجه به اینکه عمده این مواد به صورت مواد معدنی در طبیعت وجود دارند و یا محصول جانبی صنایع مختلف می باشند، استفاده از آنها در ساخت انواع کامپوزیت های سیمانی می تواند صرفه اقتصادی به همراه داشته باشد.

بتن و مصالح سیمانی همانند تمامی مصالح درکنار مزایای بسیاری که دارند دارای ضعفها و نواقصی نیز هستند از جمله ضعف مصالح سیمانی می توان به رفتار ترد، مقاومت کششی پایین، گسترش سریع ترکها و ظرفیت کرنش کششی و شکل پذیری کم اشاره نمود. استفاده از الیاف در ماتریس [مصالح سیمانی](#) با هدف ساخت کامپوزیت سیمانی الیافی می تواند راه حلی مفید برای رفع این نواقص باشد. الیاف مانند پل عمل کرده و از گسترش و باز شدن ترک و شکست ناگهانی جلوگیری میکنند. اضافه نمودن الیاف به ماتریس بتن و ملات سیمانی میتواند ظرفیت کرنش کششی آن را تا حد زیادی بهبود بخشد.

۲- مشخصات مصالح مصرفی

۱-۳- سنگدانه

در این پژوهش جهت ساخت کامپوزیت‌های سیمانی، از ماسه گردگوشه (رودخانه‌ای) استفاده شده است. چگالی مخصوص ماسه مصرفی برابر  $2611 \text{ Kg/m}^3$  می‌باشد و جذب آب  $2,4\%$  می‌باشد. دانه‌بندی ماسه مصرفی مطابق استاندارد ASTM C33 (۲۰۰۸) می‌باشد که دانه‌بندی آن در نمودار شکل (۱-۳) و جدول (۱-۳) ارایه شده است.



شکل ۱-۳- منحنی دانه بندی ماسه مصرفی

جدول ۱-۳- دانه بندی ماسه مصرفی

اندازه الک	درصد رد شده
19 mm	۱۰۰
12.5 mm	۱۰۰
9.5 mm	۱۰۰
4.75 mm	۹۹/۹۷



شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

2.36 mm	۹۲/۹۶
1.18 mm	۷۷/۳۵
600 μm	۵۸
300 μm	۲۲/۳۲
150 μm	۳/۴۴

آب-۳-۳۲

آب جهت ساخت و عمل آوری نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. کیفیت آب مصرفی در ساخت مصالح سیمانی نقش مهمی دارد به همین دلیل باید شرایط استاندارد مربوطه را داشته باشد. در پژوهش حاضر برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از آب شرب شهر رشت استفاده شده است که استانداردهای ارائه شده توسط (ASTM C1602 (2006) را رعایت مینماید.

جدول ۳-۲: مشخصات فیزیکی الیاف شیشه

طول	قطر	طول به قطر	وزن مخصوص	مدول الاستیسیته	مقاومت کششی	گرنش شکست
mm	mm		gr/cm <sup>3</sup>	GPa	MPa	درصد
۱۲	۰,۰۱۳	۹۲۳	۲,۶	۸۰	۲۰۰۰	۳,۵-۲



## شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

جدول ۳-۳- مشخصات فوق روان کننده مصرفی<sup>۱</sup>

مشخصات فنی	
ترکیب شیمیایی	کوپلیمرهای اصلاح شده پلی کربوکسیلیک اسید
طبیعت یونی	آنیونی
رنگ	سبز تیره
حالت فیزیکی	مایع
وزن مخصوص (kg/lit)	$1.02 \pm 0.01$ در $20^{\circ}\text{C}$
کلراید (PPM)	حداکثر ۵۰۰

### 2-2 طرح اختلاط

برای دستیابی به اهداف مورد نظر در این پژوهش در مجموع ۱۹ طرح مختلف از کامپوزیت سیمانی حاوی الیاف شیشه و میکا و میکروسیلیس ساخته شده است. طرح شاهد فاقد الیاف و مواد جایگزین سیمان (میکا و دوده سیلیس) می باشد. میکا و میکروسیلیس با درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ (نسبت به وزن سیمان) به صورت تکی و ترکیبی با سیمان جایگزین می شود. همچنین نمونه های آزمایشگاهی با توجه به درصد حجمی الیاف به دو گروه تقسیم می شوند گروه اول حاوی ۰,۲۵٪ الیاف شیشه و گروه دوم حاوی ۰,۵٪ الیاف است. در ساخت نمونه های آزمایشگاهی از سیمان تیپ ۲ استفاده شده است همچنین نسبت آب به سیمان برای تمامی نمونه ها مقداری ثابت و برابر با ۰,۳۵ در نظر گرفته شده است. جزئیات طرح اختلاط نمونه های آزمایشگاهی در جدول ۳-۴ ارائه شده است.

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

جدول ۳-۴- جزئیات طرح‌های اختلاط ساخته شده

شماره	نام طرح	Cement	Mica	silicafume	Glass fibers	Water	River Sand
		Kg	%(c)	%(c)	%	Kg	Kg
1	Ctrl	700	0	0	0	245	1381
2	M5G0.25	665	5	0	0.25	245	1381
3	M10G0.25	630	10	0	0.25	245	1381
4	M15G0.25	595	15	0	0.25	245	1381
5	S5G0.25	665	0	5	0.25	245	1381
6	S10G0.25	630	0	10	0.25	245	1381
7	S15G0.25	595	0	15	0.25	245	1381
8	M2.5S2.5G0.25	665	2.5	2.5	0.25	245	1381
9	M5S5G0.25	630	5	5	0.25	245	1381
10	M7.5S7.5G0.25	595	7.5	7.5	0.25	245	1381
11	M5G0.5	665	5	0	0.5	245	1381
12	M10G0.5	630	10	0	0.5	245	1381
13	M15G0.5	595	15	0	0.5	245	1381
14	S5G0.5	665	0	5	0.5	245	1381
15	S10G0.5	630	0	10	0.5	245	1381
16	S15G0.5	595	0	15	0.5	245	1381
17	M2.5S2.5G0.5	665	2.5	2.5	0.5	245	1381
18	M5S5G0.5	630	5	5	0.5	245	1381



### شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

19	M7.5S7.5G0.5	595	7.5	7.5	0.5	245	1381
----	--------------	-----	-----	-----	-----	-----	------

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

و برای نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵۰\*۵۰\*۵۰ میلیمتر و پس از عمل‌آوری تا ASTM C109 آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد سنین ۷ و ۲۸ روز انجام شده است. همچنین با هدف بررسی اثر حرارت بر نتایج این آزمایش، پس از قرارگیری نمونه‌ها به مدت یک ساعت در کوره با دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و خنک شدن تدریجی، آزمایش مقاومت فشاری برای تمامی نمونه‌ها انجام شده است.

طاقة خاصیتی از یک جسم است که مقاومت اجسام ترد را در برابر شکست نشان می‌دهند. طاقه شکست یک روش محاسباتی برای شکست ترد است زمانی که در ماده ترک وجود داشته باشد. اگر طاقه شکست یک ماده کم باشد، آن ماده به صورت ترد می‌شکند و هرچه طاقه شکست بالاتر رود احتمال شکست نرم افزایش می‌یابد. طاقه خمشی مساحت زیر منحنی خیز-نیرو هست که میزان انرژی جذب شده را توسط نمونه‌های بتنی نشان می‌دهد، بررسی طاقه خمشی مخلوط‌های ساخته شده مطابق آئین نامه مطابق آئین نامه ASTM1609 از رابطه زیر استفاده می‌شود. مطابق آئین نامه این روش فقط برای محاسبه طاقه خمشی مخلوط‌های حاوی الیاف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$T_{D150} = (P * L/150) / 2$$

P: بار متناظر با طول L/150 بر حسب KN

L: طول نمونه آزمایشگاهی (۱۶۰ میلیمتر)

T<sub>D150</sub>: طاقه خمشی بر حسب KN.mm

برای محاسبه مقاومت خمشی با توجه به نتایج حاصل از آزمایش طاقه خمشی ماکزیمم نیروی ثب شده توسط دستگاه ثبت شده و با توجه به رابطه ۲-۳ و مطابق استاندارد ASTM C348 نسبت به محاسبه مقاومت خمشی اقدام می‌شود. برای انجام آزمایش



## شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

مقاومت خمشی از نمونه‌های منشوری با ابعاد  $40 \times 40 \times 160$  میلی‌متر استفاده می‌شود. برای این آزمایش نمونه بر روی دو تکیه‌گاه با فاصله  $140$  میلی‌متر قرار می‌گیرد و بار متمرکز در وسط دهانه اعمال می‌شود.

$$S_f = \frac{3pl}{2bh^2} \quad \text{رابطه (۱-۳)}$$

در رابطه فوق :

$S_f$ : مقاومت خمشی بر حسب مگاپاسکال

$P$ : نیروی اعمالی در وسط دهانه بر حسب نیوتن

$b$ : عرض مقطع بر حسب میلی متر

$h$ : ارتفاع مقطع بر حسب میلی متر

$l$ : فاصله بین دو تکیه‌گاه بر حسب میلی‌متر

نتایج حاصل از این آزمایش جهت محاسبه مقاومت کششی ملات و بتن به روش دونیم شدن نمونه‌های استوانه‌ای، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حقیقت در این آزمایش مقاومت کششی کامپوزیت سیمانی به روشی غیر مستقیم محاسبه می‌شود، این آزمایش با عنوان تست برزیلی نیز شناخته می‌شود. آزمایش مقاومت کششی مطابق با استاندارد ASTM C496\_90 و برای تمامی نمونه‌ها پس از عمل آوری تا سن ۲۸ روز، انجام شده است. برای انجام این آزمایش، یک نمونه استوانه‌ای استاندارد به ابعاد (ارتفاع)  $300 \times 150$  میلی‌متر (قطر) را به طور افقی در امتداد محور خود در دستگاه آزمایش مقاومت فشاری قرار می‌دهند بار به صورت پیوسته و با سرعت ثابتی تا هنگام شکست نمونه به آن اعمال می‌شود. تنش فشاری سبب ایجاد کشش یکنواختی در راستای عمود بر امتداد قطر قائم می‌شود و پس از ثبت نتایج مقاومت کششی با استفاده از رابطه (۲-۳) محاسبه می‌شود.

$$T = \frac{2 \times P}{\pi \times L \times D} \quad \text{(۲-۳)}$$

در رابطه فوق  $T$ ، مقاومت کششی بر حسب (MPa)،  $P$ ، بار اعمال شده (N)؛  $L$ ، طول نمونه (mm)؛  $D$ ، قطر نمونه (mm) می‌باشد.

جذب آب به عنوان یکی از شاخص‌های مهم مشخص کننده دوام بتن و ملات محسوب می‌گردد. جذب آب نمونه‌های مورد آزمایش بر طبق استاندارد ASTM C642 و برای نمونه‌های مکعبی انجام شده است. آزمایش‌های جذب توسط غوطه‌ور نمودن



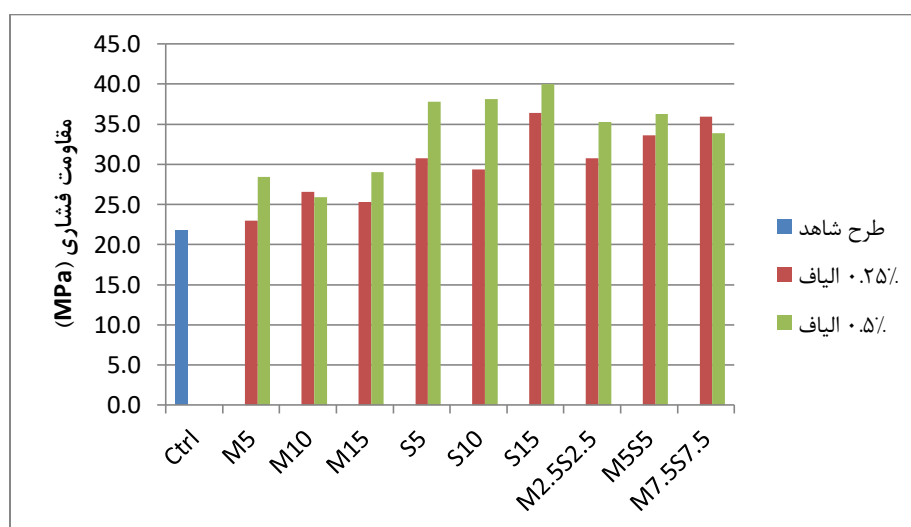
### شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

بتن در آب به مدت ۷۲ ساعت، وزن کردن آن پس از خشک شدن سطح، خشک کردن در کوره و مجدداً وزن کردن انجام می‌شود. سپس جذب را می‌توان از تقسیم مقدار افت وزن به وزن خشک شده در کوره به دست آورد. این آزمایش برای نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵۰\*۵۰ میلی‌متر و پس از عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز انجام شده است. مقدار درصد جذب آب آزمونه‌ها در هر زمان با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\left(\frac{W_s - W_d}{W_d}\right) \times 100 = \text{جذب آب (\%)} \quad (2-3)$$

#### ۴- تحلیل نتایج

##### ۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری



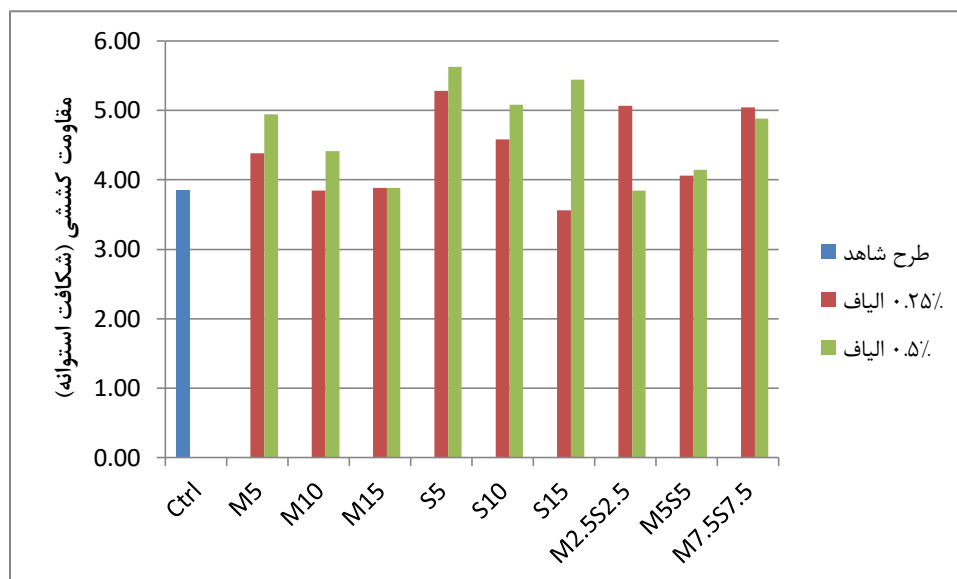
شکل ۴-۱: نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۷ روزه

مشابه نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه، در سن ۲۸ روز نیز بهترین عملکرد مقاومت فشاری در هر دو گروه طرح حاوی ۰.۲۵ و ۰.۵ درصد الیاف مربوط به طرح‌های حاوی میکروسیلیس می‌باشد به طوری که با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس مقاومت فشاری افزایش یافته است و بهترین نتیجه در هر دو گروه در جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس بدست آمده است. طرح‌های S15G0.5 و S15G0.25 نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۵۲٫۳٪ و ۶۹٫۱٪ مقاومت فشاری بالاتری نتیجه داده‌اند. استفاده از

### شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

ترکیب میکا و میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان هرچند در مقایسه با استفاده از میکا به صورت تکی، باعث دستیابی به نتایج بهتری در مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌شود اما همچنان مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های حاوی میکروسیلیس به صورت تکی، کمتر است.

#### ۴-۲- آزمایش شکافت استوانه (مقاومت کششی)



شکل ۴-۳: مقاومت کششی به روش شکافت استوانه

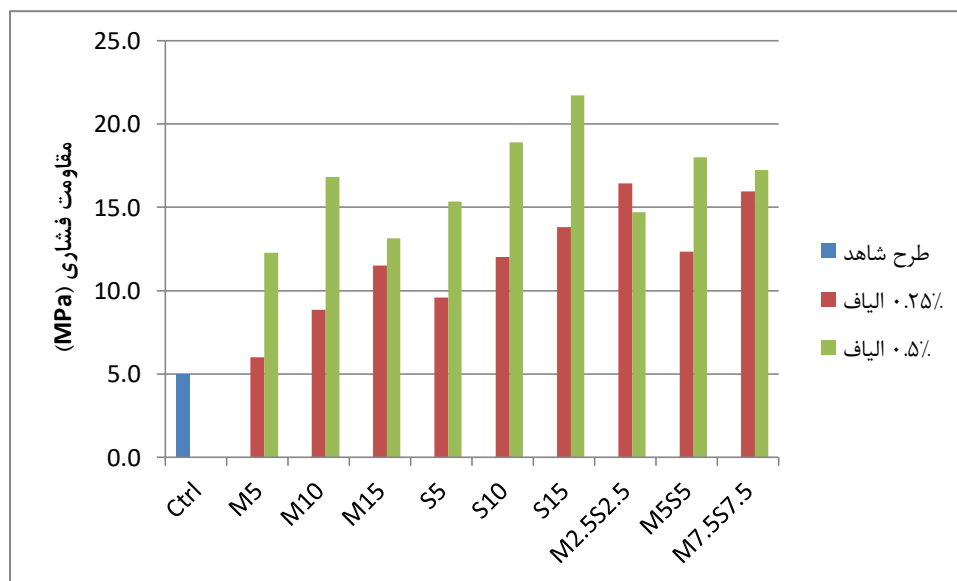
با توجه به نمودار شکل ۴-۳ بررسی نتایج مربوط به آزمایش شکافت استوانه نشان می‌دهد در میان طرح‌های حاوی میکا، بهترین عملکرد در هر دو گروه طرح حاوی ۰٫۲۵٪ و ۰٫۵٪ الیاف، در جایگزینی ۰٫۵٪ این ماده بدست آمده و با افزایش درصد جایگزینی این ماده مقاومت شکافت کاهش یافته است. در جایگزینی ۰٫۵٪ میکا با سیمان و حاوی ۰٫۲۵٪ الیاف شیشه مقاومت کششی ۱۳٫۸٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است این مقدار برای طرح حاوی ۰٫۵٪ الیاف شیشه ۲۸٫۳٪ می‌باشد. در حالتی که از میکروسیلیس به صورت تکی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده شده است بهترین عملکرد کششی در جایگزینی ۰٫۵٪ این ماده بدست آمده است، به طوری که در طرح حاوی ۰٫۲۵٪ الیاف شیشه و ۰٫۵٪ میکروسیلیس، مقاومت کششی شکافتی ۳۷٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است این مقدار برای طرح حاوی ۰٫۵٪ الیاف برابر ۴۶٪ می‌باشد. در طرح‌های حاوی ۰٫۲۵٪

### شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

الیاف و با جایگزینی میکروسیلیس مشاهده می‌شود افزایش درصد جایگزینی این ماده اثر منفی بر مقاومت کششی شکافتنی دارد به طوری که در جایگزینی ۱۵٪ مقاومت کششی ۷٫۵٪ نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است.

در صورت استفاده از میکا و میکروسیلیس به صورت ترکیب به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، در جایگزینی ۱۵٪ این مواد در هر دو گروه طرح حاوی ۰٫۲۵٪ و ۰٫۵٪ الیاف شیشه، بهترین نتیجه برای مقاومت کششی شکافتنی بدست آمده است به طوری که در این درصد جایگزینی مقاومت کششی در ۰٫۲۵٪ الیاف ۳۱٫۴٪ و در ۰٫۵٪ الیاف ۲۶٫۷٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است.

#### ۳-۴ مقاومت حرارتی



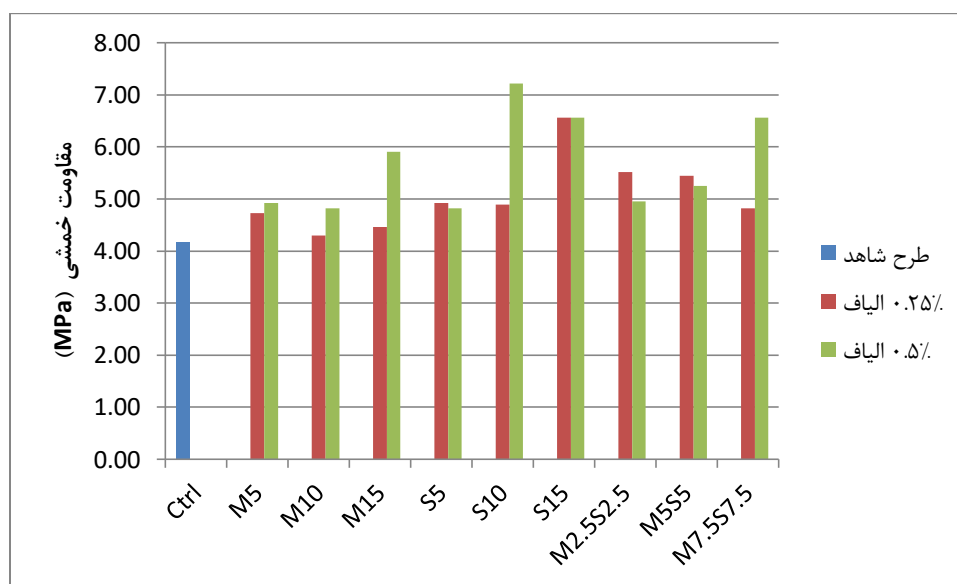
شکل ۴-۴: مقاومت فشاری پس از قرارگیری تحت اثر دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری پس از قرارگیری تحت اثر دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد، مشاهده می‌شود تمامی نمونه‌های حاوی الیاف شیشه، میکا و میکروسیلیس (به صورت تکی و یا ترکیب) مقاومت فشاری بالاتری پس از قرارگیری تحت اثر حرارت نسبت به نمونه شاهد نتیجه داده‌اند این موضوع می‌تواند ناشی از حضور الیاف شیشه و با توجه به مقاومت بالای این نوع الیاف در برابر حرارت باشد. بهترین عملکرد در میان تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی مربوط به طرح حاوی ۰٫۵٪ الیاف شیشه و ۱۵٪ میکروسیلیس می‌باشد. بررسی نتایج مربوط به طرح‌های حاوی ۰٫۲۵٪ الیاف شیشه نشان می‌دهد کاربرد میکا باعث بهبود مقاومت

### شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

حرارتی نسبت به نمونه شاهد می‌شود و با افزایش درصد جایگزینی این ماده مقاومت حرارتی افزایش یافته است، این موضوع در نمودار شکل ۴-۵ نیز قابل مشاهده است به طوری که با افزایش درصد جایگزینی میکافت مقاومت ناشی از حرارت بالا به طور محسوسی کاهش یافته است. در رابطه با طرح‌های حاوی میکروسیلیس نیز مشاهده می‌شود افزایش درصد جایگزینی این ماده باعث کاهش افت مقاومت ناشی از حرارت شده است اما مقدار این کاهش در مقایسه با طرح‌های حاوی میکافت کمتر است که نشان دهنده اثر بیشتر میکافت در مقایسه با میکروسیلیس در بهبود مقاومت حرارتی می‌باشد.

#### ۴-۴ نتایج آزمایش مقاومت خمشی و طاقت خمشی

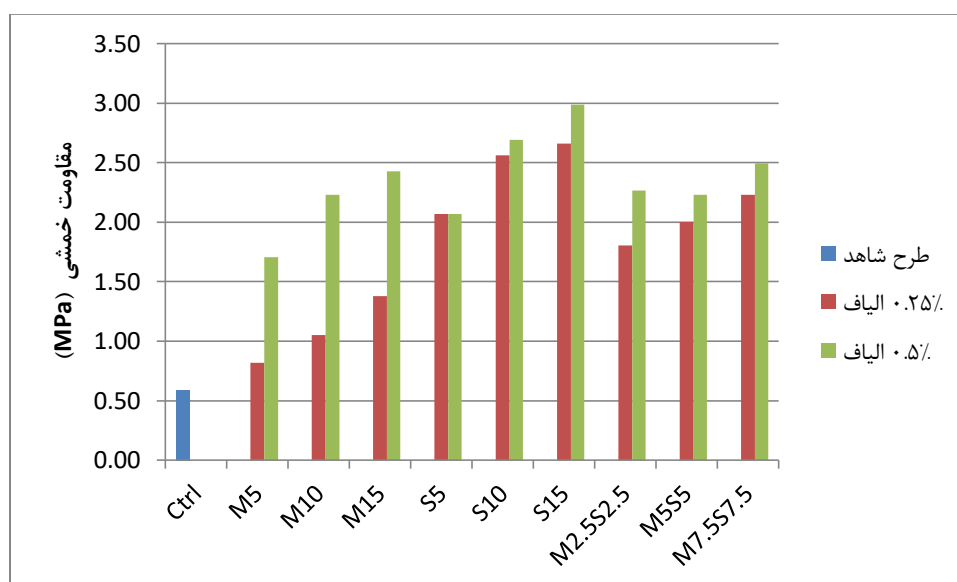


شکل ۴-۶: نتایج آزمایش مقاومت خمشی قبل از قرارگیری در کوره

نتایج آزمایش مقاومت خمشی پیش از قرارگیری در معرض حرارت در نمودار شکل ۴-۶ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد استفاده از الیاف شیشه باعث بهبود نتایج مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد می‌شود و با افزایش درصد حجمی الیاف شیشه مقاومت خمشی افزایش یافته است. در میان طرح‌های حاوی ۰.۲۵٪ الیاف شیشه بهترین نتیجه مربوط به نمونه حاوی ۰.۱۵٪ میکروسیلیس می‌باشد به طوری که ۰.۵۷٪ مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونه شاهد نتیجه داده است. در میان نمونه‌های حاوی ۰.۵٪ الیاف، بالاترین مقاومت خمشی در جایگزینی ۰.۱۰٪ میکروسیلیس بدست آمده است این طرح ۰.۷۳٪ مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونه شاهد نتیجه داده است. در نمودار شکل ۴-۷ نتایج آزمایش مقاومت خمشی پس از قرارگیری نمونه‌ها در معرض

### شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

حرارت ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد تمامی نمونه‌های حاوی الیاف شیشه پس از قرارگیری در معرض حرارت مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونه شاهد نتیجه می‌دهند. افزایش درصد الیاف شیشه باعث افزایش مقاومت خمشی حرارت دیده شده است این موضوع می‌تواند ناشی از مقاومت حرارتی بالای این الیاف باشد به طوری که تاثیر افزایش درصد الیاف شیشه بر بهبود نتایج خمشی در نمونه‌های حرارت دیده در مقایسه با نمونه‌های حرارت ندیده با شدت بیشتری همراه است.



شکل ۴-۷: نتایج آزمایش مقاومت خمشی پس از قرارگیری در کوره

بیشترین افت مقاومت خمشی پس از قرارگیری تحت اثر دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در طرح شاهد اتفاق افتاده است به طوری که مقاومت خمشی این طرح ۸۶٪ پس از قرارگیری در کوره کاهش یافته است. همچنین با توجه به نتایج مقاومت خمشی پس از قرارگیری در کوره با دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود افزایش درصد جایگزینی میکا اثری مستقیم بر بهبود مقاومت خمشی پس از قرارگیری تحت اثر حرارت دارد به طوری که با افزایش درصد جایگزینی این ماده در طرح اختلاط مقاومت خمشی پس از قرارگیری در کوره افزایش یافته است، این موضوع در طرح‌های حاوی درصد بالاتر الیاف شیشه با شدت بیشتری مشاهده می‌شود و نشان می‌دهد استفاده توأم از میکا و الیاف شیشه می‌تواند اثر قابل توجهی بر بهبود مقاومت خمشی حرارتی داشته باشد. استفاده از ترکیب میکا و میکروسیلیس می‌تواند باعث دستیابی به نتایج قابل قبولی در آزمایش مقاومت خمشی حرارتی شود، به

### شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

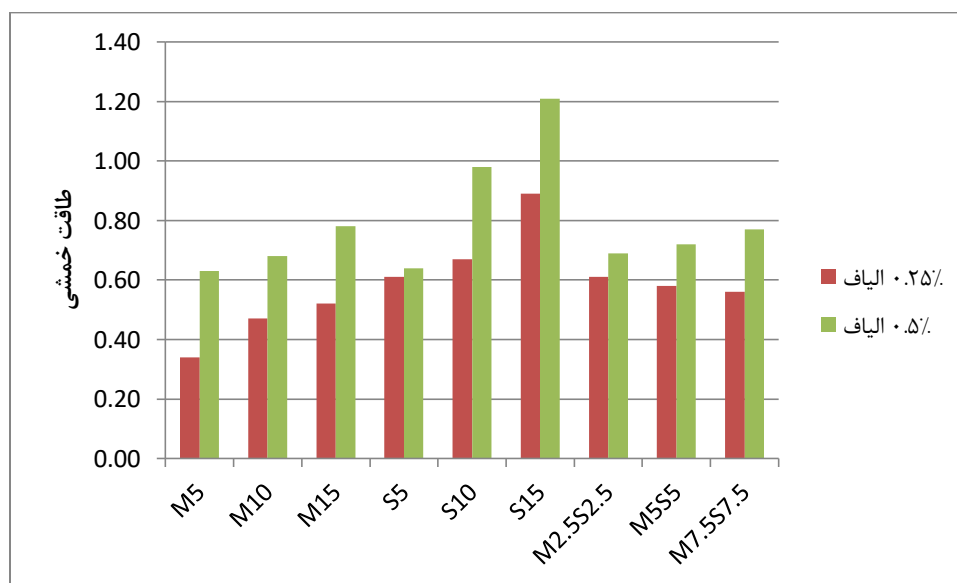
طوری که استفاده از ترکیب این دو ماده با درصد جایگزینی ۱۵٪ در طرح حاوی ۰٫۲۵٪ الیاف شیشه باعث شده مقاومت خمشی حرارتی بیش از دو برابر نسبت به نمونه شاهد بدست آید و در طرح حاوی ۰٫۵٪ الیاف شیشه این مقدار بیش از سه برابر مقاومت خمشی حرارتی طرح شاهد می‌باشد. یکی دیگر از پارامترهایی که می‌توان با استفاده از نتایج آزمون خمش بدست آورد ضریب طاقت خمشی می‌باشد. برای محاسبه این پارامتر با توجه به منحنی نیرو جابجایی حاصل از آزمایش خمش نمونه منشوری، سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی زمانی که تغییر شکل در امتداد یا وسط دهانه به ۱/۱۵۰ طول نمونه رسید، محاسبه می‌شود و به عنوان ضریب طاقت نتایج خمشی در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه طاقت خمشی مطابق آیین نامه ASTM1609 از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$T_{D150} = (P * L/150) / 2$$

P: بار متناظر با طول L/150 بر حسب KN

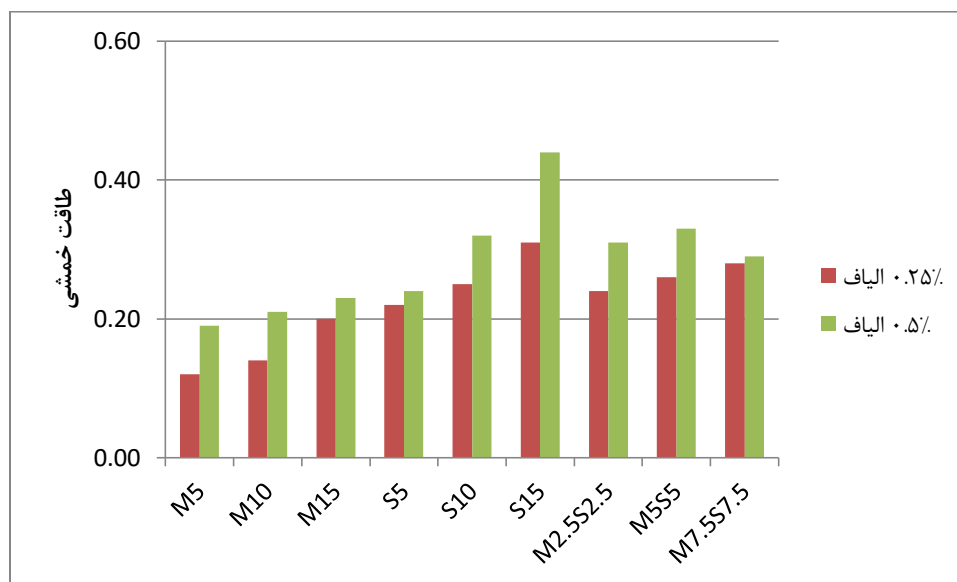
L: طول نمونه آزمایشگاهی (۱۶۰ میلی‌متر)

$T_{D150}$ : طاقت خمشی بر حسب KN.mm



شکل ۴-۸: طاقت خمشی پیش از قرارگیری در کوره با دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد

## شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۴-۹: طاقت خمشی پس از قرارگیری در کوره با دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد

با توجه به نمودار شکل‌های ۴-۸ و ۴-۹ به خوبی نشان می‌دهد قرارگیری تحت اثر دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با طور قابل توجهی طاقت خمشی را کاهش می‌دهد. در طرح‌های حرارت ندیده مشاهده می‌شود علاوه بر اینکه افزایش درصد حجمی الیاف شیشه باعث بهبود طاقت خمشی می‌شود افزایش درصد جایگزینی میکا و میکروسیلیس نیز باعث افزایش طاقت خمشی شده است. در جایگزینی ۱۰ و ۱۵ درصد میکروسیلیس بهترین نتایج طاقت خمشی در حالت حرارت ندیده بدست آمده است.

### ۶- نتایج آزمایش جذب آب

بررسی نتایج نشان می‌دهد استفاده از میکا به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در کامپوزیت سیمانی حاوی الیف شیشه تاثیر چندانی بر کاهش جذب آب نهایی ندارد و تنها در جایگزینی ۱۵٪ این ماده و در طرح حاوی ۰٫۵٪ الیف شیشه جذب آب اندکی نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد برخلاف میکا، استفاده از میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان اثر مستقیم جذب آب نهایی خواهد داشت و با بهبود ریزساختار ماتریس سیمانی باعث کاهش جذب آب نهایی می‌شود، به طوری که با افزایش درصد جایگزینی این ماده شاهد کاهش محسوس جذب آب نهایی می‌باشیم.



## شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

### ۲- نتیجه گیری

- ❖ بهترین عملکرد در آزمایش فشاری ۷ روزه را طرح حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس و ۰٫۵٪ الیاف کسب نموده و ۸۴٪ مقاومت فشاری بهتری نسبت به نمونه شاهد نتیجه داده است. این موضوع هم می‌تواند ناشی از فعالیت پوزولانی شدیدتر میکروسیلیس در مقایسه با میکا باشد و هم ناشی از اثر بهتر میکروسیلیس در مقایسه با میکا در بهبود ریزساختار ملات سیمانی.
- ❖ استفاده از میکا در درصدهای جایگزینی ۵٪ و ۱۵٪ به عنوان جایگزین سیمان در کامپوزیت سیمانی حاوی ۰٫۲۵٪ الیاف شیشه تاثیر مثبت بر بهبود مقاومت فشاری ۲۸ روزه ندارد، افزایش درصد الیاف شیشه از ۰٫۲۵٪ تا ۰٫۵٪ تا حدی این ضعف را جبران نموده و باعث شده مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد در درصدهای جایگزینی ۵، ۱۰ و ۱۵ به ترتیب ۱۹٫۷٪، ۱۸٫۵٪ و ۴٫۹٪ افزایش یابد.
- ❖ استفاده از میکا به عنوان جایگزین ۵٪ وزن سیمان باعث بهبود مقاومت شکافت استوانه در کامپوزیت‌های سیمانی حاوی الیاف شیشه می‌شود، و با افزایش درصد جایگزینی این ماده به ۱۰ و ۱۵ درصد مقاومت کششی حاصل از آزمایش شکافت کاهش یافته است.
- ❖ در میان نمونه‌های حاوی میکروسیلیس بهترین عملکرد کششی در جایگزینی ۵٪ این ماده بدست آمده است، به طوری که در طرح حاوی ۰٫۲۵٪ الیاف شیشه مقاومت کششی شکافتنی ۳۷٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است این مقدار برای طرح حاوی ۰٫۵٪ الیاف برابر ۴۶٪ می‌باشد.
- ❖ استفاده از الیاف شیشه، میکا و میکروسیلیس در ساخت کامپوزیت‌های سیمانی باعث افزایش مقاومت فشاری پس از قرارگیری در معرض حرارت، نسبت به نمونه شاهد می‌شود. کاربرد میکا باعث بهبود مقاومت حرارتی نسبت به نمونه شاهد می‌شود و با افزایش درصد جایگزینی این ماده مقاومت حرارتی افزایش یافته است، به طوری که با افزایش درصد جایگزینی میکا افت مقاومت ناشی از حرارت بالا به طور محسوسی کاهش یافته است.
- ❖ در طرح‌های حاوی میکروسیلیس نیز مشاهده می‌شود افزایش درصد جایگزینی این ماده باعث کاهش افت مقاومت ناشی از حرارت شده است اما مقدار این کاهش در مقایسه با طرح‌های حاوی میکا شدت کمتری دارد که نشان دهنده اثر بیشتر میکا در مقایسه با میکروسیلیس در بهبود مقاومت حرارتی می‌باشد.





## شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

- ❖ استفاده از الیاف شیشه اثری مستقیم بر بهبود مقاومت خمشی دارد و با افزایش درصد حجمی الیاف شیشه مقاومت خمشی افزایش یافته است. در میان طرح‌های حاوی ۰,۲۵٪ الیاف شیشه بهترین نتیجه مربوط به نمونه حاوی ۰,۱۵٪ میکروسیلیس می‌باشد به طوری که ۵۷٪ مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونه شاهد نتیجه داده است.
- ❖ در میان نمونه‌های حاوی ۰,۵٪ الیاف، بالاترین مقاومت خمشی در جایگزینی ۰,۱۰٪ میکروسیلیس بدست آمده است این طرح ۷۳٪ مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونه شاهد نتیجه داده است.
- ❖ بیشترین افت مقاومت خمشی پس از قرارگیری تحت اثر دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در طرح شاهد اتفاق افتاده است به طوری که مقاومت خمشی این طرح ۸۶٪ پس از قرارگیری در کوره کاهش یافته است. تمامی نمونه‌های حاوی الیاف شیشه پس از قرارگیری در معرض حرارت مقاومت خمشی بالاتری نسبت به نمونه شاهد نتیجه می‌دهند. افزایش درصد الیاف شیشه باعث افزایش مقاومت خمشی حرارت دیده شده است.
- ❖ افزایش درصد جایگزینی میکا اثری مستقیم بر بهبود مقاومت خمشی پس از قرارگیری تحت اثر حرارت دارد به طوری که با افزایش درصد جایگزینی این ماده در طرح اختلاط مقاومت خمشی پس از قرارگیری در کوره افزایش یافته است، این موضوع در طرح‌های حاوی درصد بالاتر الیاف شیشه با شدت بیشتری مشاهده می‌شود.
- ❖ قرارگیری تحت اثر دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با طور قابل توجهی طاقتم خمشی را کاهش می‌دهد. در طرح‌های حرارت ندیده مشاهده می‌شود علاوه بر اینکه افزایش درصد حجمی الیاف شیشه باعث بهبود طاقتم خمشی می‌شود افزایش درصد جایگزینی میکا و میکروسیلیس نیز باعث افزایش طاقتم خمشی شده است.
- ❖ استفاده از میکا به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در کامپوزیت سیمانی حاوی الیاف شیشه تاثیر چندانی بر کاهش جذب آب نهایی ندارد، برخلاف میکا، استفاده از میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان اثر مستقیم جذب آب نهایی خواهد داشت و با بهبود ریزساختار ماتریس سیمانی باعث کاهش جذب آب نهایی می‌شود.

### فهرست منابع

- [۱] باقری، علیرضا، پرهزکار، طیبه، قدوسی، پرویز، طاهری، افشین، (۱۳۸۷)، "کاربرد الیاف در بتن و فرآورده های سیمانی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن نشریه ک-۳۰۰.
- [2] Aydın, S. and Baradan, B., The effect of fiber properties on high performance alkaliactivated slag/silica fume mortars. *Composites Part B: Engineering*; 45(1): 63-69, 2013.
- [3] Beigi, M., Berenjian, J., Lotfi Omran, O., Sadeghi Nik, A., Nikbin, I, An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete". *Materials and Design*, VOL. 50, 1019–1029, 2013.
- [4] Naaman, A. E., Wongtanakitcharoen, T. and Hauser, G. "Influence of Different Fibers on Plastic Shrinkage Cracking of Concrete", *ACI Materials Journal*, V. 102, No. 1, Jan.-Feb., pp. 49-58, 2005.
- [5] ACI Committee 544, "Measurements of Properties of Fiber Reinforced Concrete", *ACI Materials Journal*, 1996.
- [۶] خالوع. "خواص مکانیکی و کاربرد بتن مسلح به الیاف"، مجله عمران شریف، شماره ۵، ص ۲۸-۳۳، ۱۳۷۱.
- [7] Ghosh. S. and Roy. A., "Polypropylene Fiber Concrete Beams in Flexure", *Fiber Reinforced Cement and Concrete*, RILEM, pp. 486-498, 1992.
- [8] Wei-Ling, L. "Toughness Behavior of Fiber Reinforced Concrete", *Fiber Reinforced Cement and Concrete*, RILEM, pp. 299-315, 1992.
- [9] Bayasi, Z. and Zeng, J. "Properties of polypropylene Fiber Reinforced Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol 90, No 6, pp. 605-610, 1993.
- [10] Soroushian, P., Khan, A. and Jer-win, H. "Mechanical Properties of Concrete Materials Reinforced with Polypropylene or Polyethylene Fibers ", *ACI Materials Journal*. Vol.89, No 6, pp. 535-540, 1992.
- [۱۱] رسولی نژاد، قدرت اله و رسولی نژاد، مجید، ۱۳۹۵، تکنولوژی بتن مسلح با الیاف شیشه ای GFRC روش تولید و کاربرد آن در صنعت ساختمان، اولین کنفرانس ملی کاربرد کامپوزیت ها در صنعت ساخت، تهران،
- [12] Bensaid Boulekbache, Mostefa Hamrat, Mohamed Chemrouk, Sofiane Amziane, Influence of yield stress and compressive strength on direct shear behaviour of steel fibre-reinforced



concrete, Construction and Building Materials, Volume 27, Issue 1, 2012, Pages 6-14, ISSN 0950-0618.

[13] Burcu Akcay, Experimental investigation on uniaxial tensile strength of hybrid fibre concrete, Composites Part B: Engineering, Volume 43, Issue 2, 2012, Pages 766-778, ISSN 1359-8368.

[14] Roozbeh Rezakhani, Dylan A. Scott, Faysal Bousikhane, Madura Pathirage, Robert D. Moser, Brian H. Green, Gianluca Cusatis, Influence of steel fiber size, shape, and strength on the quasi-static properties of ultra-high performance concrete: Experimental investigation and numerical modeling, Construction and Building Materials, Volume 296, 2021, 123532, ISSN 0950-0618.

[15] Babar Ali, Liaqat Ali Qureshi, Rawaz Kurda, Environmental and economic benefits of steel, glass, and polypropylene fiber reinforced cement composite application in jointed plain concrete pavement, Composites Communications, Volume 22, 2020, 100437, ISSN 2452-2139.

[۱۶] رضانیانپور ع.ا.، طرقت ا.، "پوزولانها و نقش آنها در بتن سدها" چهارمین کنفرانس سدسازی

[۱۷] کریمی درمیان ح.، "پوزولان و مصرف آن در بتن ری های حجیم سدها" دهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران، تهران - دانشگاه . امیرکبیر سال ۱۳۸۲.

[۱۸] خوشایند م.، دهشویی م.، " دوام بتن و نقش سیمانهای پوزولانی " دهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران، تهران - دانشگاه امیرکبیر، سال ۱۳۸۲.

[۱۹] شناسایی ارزیابی و خواص پوزولانهای ایران، موسسه مصالح. دانشگاه تهران ۱۳۸۱ شماره گزارش ۸۱۱۱۵

[۲۰] ویژگیهای پوزولان های طبیعی ، چاپ اول - استاندارد ملی ایران به شماره ۳۴۳۳ چاپ اول ۱۳۷۳

[۲۱] نعمتی ر.، بررسی اثر متاکائولن بر روی خواص سیمان، (پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران سازه)، دانشکده فنی و مهندسی، سال ۱۳۸۵.

[22] Ünala, O., Demirbaş, F., Uygunoğlu, T., "Fuzzy Logic Approach to Predict Stress–Strain Curves of Fiber-Reinforced Concretes in Compression, Building and Environment," october 2006.

[23] De Castro, j., Keller , Th., "Ductile Double-lap Joints From Brittle GFRP Laminates and Ductile Adhesives", Part ii: Numerical Investigation and Joint Strength Prediction, Composites: Part B 39 (2008) 282–291



## شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

[۲۴] رواقی محمد، فولادی علیرضا. تاثیر الیاف پلی پروپیلن، فولادی و شیشه ای بر مقاومت فشاری و خمشی نمونه های بتنی با استفاده از مصالح سنگی استان بوشهر. تحقیقات بتن، ۱۳۹۴.

[۲۵] صدر ممتازی، علی، کهنی خشکبیجاری، رضا، لطفی عمران، امید. خواص مهندسی و دوام بتن خود تراکم حاوی ذرات نانو سیلیس با رویکرد دستیابی به درصدهای بهینه الیاف. تحقیقات بتن، ۱۳۹۴؛

[۲۶] کیخا، امیرحمزه. تأثیر حرارت بالا بر مقاومت فشاری و کششی بتن های حاوی الیاف شیشه. تحقیقات بتن، ۱۳۹۶