



ارزیابی تأثیر دما و الیاف بر خواص مکانیکی بتن خودمتراکم سبک

موسی مظلوم^{*}، سجاد لطفی آهنگر کلایی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۱
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۰۸
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:

بتن خود متراکم سبک
بتن الیافی
الیاف شیشه
الیاف بازالت
دمای بالا

خلاصه: مزایای بتن خودمتراکم سبک باعث استفاده روزافزون آن در صنعت ساخت و ساز شده است. استفاده از الیاف مختلف در این نوع بتن سبب مشکلاتی نظیر کاهش کارایی و حساسیت به دما می‌شود که نوع و نحوه استفاده از الیاف را به چالش می‌کشد. از این رو در این تحقیق، اثرات دما و الیاف شیشه و بازالت بر روی خصوصیات بتن خود متراکم سبک مورد بررسی قرار گرفته است. در همین راستا ۱۲ طرح اختلاط از این نوع بتن شامل طرح های اختلاط تکی حاوی ۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪ حجمی هر کدام از الیاف ها و نمونه های ترکیبی شامل ۰/۲۵٪ الیاف بازالت و ۰/۷۵٪ الیاف شیشه، ۰/۵٪ الیاف بازالت به همراه ۰/۵٪ الیاف شیشه، و ۰/۷۵٪ الیاف بازالت با ۰/۲۵٪ الیاف شیشه ساخته شده است. خواص خودمتراکمی در این بتن توسط آزمایش های جریان اسلامپ، T ۵۰۰، قیف V و حلقه J سنجیده شده است. آزمایش های مقاومت فشاری، کششی و خمشی جهت تعیین ویژگی های مکانیکی بتن در دمای ۲۰ درجه سلسیوس، همچنین دماهای ۱۰۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس انجام گرفتند. در نهایت نتایج آزمایش های بتن تازه نشان دادند که بتن خود متراکم سبک حاضر قابلیت های گذرندگی، پر شوندگی و مقاومت در برابر جدایش را پوشش داده اند. همچنین مشخص شد افزایش الیاف موجب کاهش مقاومت فشاری و افزایش مقاومت های کششی، خمشی و همچنین انرژی شکست می شود. علاوه بر این استفاده از الیاف به صورت ترکیبی در مقایسه با الیاف به صورت تکی خواص مکانیکی بتن را بهبود بیشتری بخشیده اند. بهترین طرح اختلاط حاوی ترکیبی از ۰/۷۵٪ الیاف شیشه و ۰/۲۵٪ الیاف بازالت بوده است که خواص قابل قبولی از بتن تازه و سخت شده و همچنین مقاومت در دماهای بالا را ارائه کرده است.

۱- مقدمه

بتن به عنوان یک ماده محبوب، بیشترین استفاده را در ساخت سازه های مختلف دارا می باشد. لذا تحقیقات زیادی در زمینه بهینه سازی، همگام سازی بتن با شرایط محیط و بهبود مقاومت آن توسط دانشمندان انجام گرفته است. به دلیل فرارگیری کشور ایران در منطقه زلزله خیز و نیاز به کاهش بار مرده ساختمان، تولید بتن سبک مورد توجه محققین قرار گرفته است. همچنین حل مشکلات مختلف در بتن سبک مانند رو زدن سنگ‌دانه‌ها، هزینه و بیبره کردن و آلودگی صوتی ناشی از آن منجر به تولید بتن سبک خودمتراکم^۱ شده است [۳-۱]. بنابراین بتن سبک خودمتراکم نیاز به توجه بیشتر محققان جهت گسترش ویژگی های مفید خود دارد [۵ و ۴].

در سال های اخیر، اثرات خاص افزودنی های مختلف روی ویژگی های بتن سبک خودمتراکم مطالعه شده است [۷ و ۶]. Madandoust و

همکاران [۸] با مطالعه تاثیر نانوسیلیس^۲ بر روی بتن های سبک خودمتراکم دارای سنگ‌دانه‌های لیکا و پلیاستایرن^۳ به این نتیجه رسیدند که نانوسیلیس تاثیر مثبتی در کاهش جدایش سنگدانه ها داشته است. همچنین برای نمونه هایی با مقدار کمتر پلیاستایرن، باعث افزایش مقاومت فشاری آن‌ها شده است. از طرفی اضافه کردن نانوسیلیس میتواند تاثیرات منفی ناشی از کاهش مقدار آب به سیمان را کم کند.

بسیاری از دانشمندان بر روی اثرات الیاف^۴ در بتن تمرکز کرده‌اند، آن‌ها گزارش داده اند که ویژگیهای مکانیکی بتن سبک خودمتراکم با اضافه شدن الیاف به آن بهبود می یابد که این مسئله این نوع بتن را جهت استفاده در سازه های مختلف جذابتر ساخته است [۱۰ و ۹]. الیاف به جهت بهبود ویژگی های مکانیکی به خمیر سیمان اضافه می شوند. مطالعات نشان می دهند که الیاف ویژگی های بتن از جمله مقاومت کششی، مقاومت خمشی،

- 2 Nano Silica
- 3 Polystyrene
- 4 Fiber

- 1 Self-compacting lightweight concretes

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mazloom@ru.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



محدود به الیاف خاصی مانند پلی پروپیلن بوده است. الیاف پلی پروپیلن دارای نقطه ذوب ۱۶۰ درجه سلسیوس می‌باشد، لذا این نوع الیاف در دماهای بالا عملاً ذوب شده و کارایی خود را از دست می‌دهد [۱۹ و ۱۸]. از این رو استفاده از الیاف بازالت و شیشه که نقطه ذوب بالاتری دارند توصیه می‌شود. در تحقیق حاضر علاوه بر سنجش تاثیر الیاف بر مقاومت این نوع بتن، تاثیر دماهای ۲۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ درجه نیز بررسی شده است.

از طرفی تحقیقاتی که بر روی تاثیر الیاف کوتاه شیشه و بازالت بر روی بتن سبک خودمتراکم انجام شده باشد محدود است [۲۰]. از میان الیاف های مورد مصرف در بتن استفاده از الیاف بازالت رشد چشمگیری داشته است. این الیاف طبیعی و دوست‌دار محیط زیست^۴ از ذوب کردن سنگ بازالت به دست می‌آید و در فرآیند تولید آن مواد افزودنی دیگری استفاده نمیشود که خود به عنوان عاملی جهت کاهش هزینه ها محسوب می‌شود [۲۱]. همچنین الیاف شیشه نیز از افزودنی های پرکاربرد در بتن می باشد. آن‌ها الیاف انعطاف‌پذیری هستند که از شیشه مذاب به صورت تارهای نخی رشته‌رشته میشوند. الیاف شیشه دارای مقاومت کششی بالایی هستند و در مقابل حرارت مقاومت بسیار خوبی دارند [۲۲].

۲- مواد و روش اختلاط

در این بخش به معرفی ویژگیهای مصالح، طرح اختلاط و نحوه اختلاط مصالح پرداخته شده است.

۲-۱- مصالح

در این تحقیق از سیمان تهران نوع ۱-۴۲۵ و چگالی $\frac{g}{cm^3}$ ۳/۱۵ همچنین میکرو سیلیس با چگالی $\frac{g}{cm^3}$ ۲/۵ استفاده شده است که ترکیبات شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. سنگدانه‌ها نیز به ترتیب از سبکدانه رس منبسط شده (لیکا)^۵ با اندازه اسمی ۴-۸ میلی‌متر به عنوان درشت دانه با چگالی $\frac{g}{cm^3}$ ۱/۲۱ و از ماسه شسته رودخانه ای با چگالی $\frac{g}{cm^3}$ ۲/۴۵ به عنوان ریزدانه استفاده شده است که دانه‌بندی آن در جدول ۲ آورده شده است. همچنین برای افزایش کارایی و عدم بروز آب انداختگی و اصلاح بخش ریزدانه ماسه از پودر سنگ با چگالی $\frac{g}{cm^3}$ ۷/۲ استفاده شده است.

جهت کاهش نسبت آب به سیمان از فوق روان کننده^۶ بر پایه

مقاومت در برابر ضربه، مقاومت در برابر سایش، قدرت تحمل بار بعد از ترک خوردن، چقرمگی و خستگی را بهبود می‌بخشد [۱۱].

H.qian و همکاران [۱۲] گزارش داده اند که به منظور بهینه کردن طول و میزان الیاف پلی پروپیلن^۱ در بتن‌های سبک مقدار مشخصی از ذرات ریز همانند میکروسیلیس برای پراکندگی بهتر و یکنواخت تر الیاف لازم است.

S. Iqbal و همکاران [۱۳] نشان داده‌اند که الیاف فولادی کوتاه می‌توانند در بتن‌های سبک خودمتراکم عملکرد مطلوبی داشته باشند. آن‌ها گزارش دادند حساسیت کارایی بتن سبک خودمتراکم نسبت به این نوع الیاف در مقادیر حجمی پایینتر از ۰/۷۵٪ کمتر از حساسیت آن در نسبت های حجمی بالای ۱٪ می‌باشد. آن‌ها همچنین نشان دادند، اضافه کردن الیاف به طور مطلوبی می‌تواند مقاومت‌های کششی و خمشی را بالا ببرد.

H. Mazaheripour و همکاران [۱۴] گزارش داده اند که افزایش الیاف پلی پروپیلن تاثیری بر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن سبک خودمتراکم ندارند. آن‌ها همچنین گزارش داده اند که با افزایش مقدار پلی پروپیلن تا ۰/۳٪ حجمی، مقاومت کششی تا ۱۴/۲٪ و مقاومت خمشی تا ۱۰/۷٪ می‌توانند رشد داشته باشند.

T.M. Grabis و همکاران [۱۵] نشان دادند که الیاف فولادی در بتن سبک خود متراکم می‌توانند گسترش ترک‌ها را محدود کند. از طرفی آن‌ها گزارش داده اند که ظرفیت جذب انرژی بیشتری را با افزودن ۱٪ حجمی الیاف شاهد بودند.

در سال‌های گذشته دانشمندان تحقیقات زیادی در رابطه با تاثیر دما^۲ بر خصوصیات بتن انجام داده اند. آن‌ها گزارش داده اند که دما می‌تواند تاثیرات منفی بر روی مقاومت بتن داشته باشد. مظلوم و همکاران [۱۶] گزارش داده اند که بیشترین اثر دمای بالا^۳ در بتن بر روی مقاومت خمشی آن ظاهر شده است؛ اما تحقیقات در زمینه تاثیر دما بر روی بتن سبک خودمتراکم حاوی الیاف محدود می‌باشد.

Aslani و همکاران [۱۷] گزارش دادند در بتن خود متراکم سبک حاوی دانه سبک اسکوریا و الیاف پلی پروپیلن و الیاف فولادی در دماهای ۱۰۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ درجه سلسیوس بهینه ترین درصد الیاف مورد استفاده، ۰/۲۵٪ الیاف پلی پروپیلن و ۰/۷۵٪ الیاف فولادی بوده است. در بحث استفاده از الیاف، تحقیقات صورت گرفته در بتن خود متراکم سبک

4 Green
5 Leca
6 Super plasticizers

1 Polypropylene
2 Thermal effect
3 High temperature

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی سیمان و میکروسیلیس

Table 1. Chemical mixes and Physical properties of cement and silica fume

میکروسیلیس	سیمان ۱-۴۲۵	ترکیبات شیمیایی
۹۵/۰۶	۲۱/۵۰	دی‌اکسید سیلیسیم (SiO ₂) %
۱/۳۲	۴/۶۷	اکسید آلومینیوم (Al ₂ O ₃) %
۰/۳۷	۳/۳۴	اکسید آهن (Fe ₂ O ₃) %
۰/۵۸	۶۲/۸۶	اکسید کلسیم (CaO) %
۰/۹۷	۳/۴۶	اکسید منیزیم (MgO) %
۰/۵	۱/۸۷	تری‌اکسید گوگرد (SO ₃) %
۱/۰۱	۰/۵۸	اکسید پتاسیم (K ₂ O) %
-	۰/۰۴	اکسید استرانسیم (SrO) %
-	۰/۲۱	اکسید سدیم (Na ₂ O) %
-	۰/۰۴	کلرید (CL) %
-	۱/۲	افت حرارتی (L.O.I) %
-	۰/۵۳	باقی‌مانده نامحلول (IR) %
آزمون فیزیکی		
۲/۵۲	۳/۱۵	وزن مخصوص (gr/cm ³)

جدول ۲. دانه بندی مصالح ریز دانه

Table 2. sieve analysis of fine Aggregate

اندازه الک (mm)	درصد عبوری
۹/۵۱ (۳/۸")	۱۰۰
۴/۷۵ (#۴)	۹۲/۲۵
۲/۳۶ (#۸)	۹۱/۳۶
۱/۱۸ (#۱۶)	۷۶/۳۲
۰/۶۰ (#۳۰)	۵۲/۶۴
۰/۳۰ (#۵۰)	۲۳/۷۲
۰/۱۵ (#۱۰۰)	۶/۸۱

جدول ۳. ویژگی الیاف ها

Table 3. Properties of fibers

نوع الیاف	قطر μm	طول mm	مقاومت کششی MPa	مدول الاستیسیته GPa	چگالی kg/m^3	نقطه ذوب $^{\circ}\text{C}$	نسبت ابعادی (L_f/d_f)
الیاف بازالت	۱۱	۱۰	۲۹۵۰	۹۰	۲۶۷۰	۶۰۰	۹۰۹
الیاف شیشه	۲۰	۱۰	۳۴۵۰	۶۹	۲۵۵۰	۱۴۰۰	۵۰۰



شکل ۱. الیاف شیشه و بازالت

Fig. 1. Basalt and glass fibers

۱/۸ تا ۲٪ وزن حجمی مجموع سیمان و میکروسیلیس متغیر است.

۲-۳- روش اختلاط بتن مصرفی

ابتدا سبک دانه لیکا و ماسه درون مخلوطکن ریخته شده و به مدت دو دقیقه مخلوطکن روشن شده و مصالح مخلوط گردید. پس از آن سیمان و پودر سنگ و میکروسیلیس به درون مخلوطکن ریخته و دو دقیقه با هم مخلوط شده اند. سپس بخشی از آب اختلاط به آن اضافه گردید و بعد از یک دقیقه الیاف به آن افزوده شد و یک دقیقه با سایر مصالح مخلوط گردید. در نهایت آب اختلاط باقی مانده به همراه فوق روان کننده به تدریج به مخلوط اضافه گردید و اختلاط برای سه الی چهار دقیقه دیگر ادامه یافت.

پلیکربوکسیلات استفاده شده است. الیاف بازالت مورد استفاده دارای طول ۱۰ میلی متر و قطر ۱۱ میکرومتر همچنین الیاف شیشه دارای طول ۱۰ میلی متر و قطر ۲۰ میکرومتر میباشد. مشخصات و شکل الیاف مصرفی به ترتیب در جدول ۳ و شکل ۱ آورده شده است.

۲-۲- طرح اختلاط بتن مصرفی

مطابق جدول ۴ نسبت آب به وزن حجمی مجموع سیمان و میکروسیلیس مورد استفاده در این تحقیق برابر ۰/۴ در نظر گرفته شده است. میزان میکروسیلیس ۱۰٪ در نظر گرفته شد، اما جهت کاهش میزان جدایش دانه ها، این رقم تا ۱۴/۵٪ افزایش یافته است [۸]. مقدار روان کننده از

1 segregation

جدول ۴. طرح اختلاط بتن مصرفی در آزمایش‌ها

Table 4. Concrete mix composition.

نام طرح	حجم مصالح (kg/m^3)									
	شماره طرح	سیمان	میکروسلیس	پودر سنگ	آب	ریز-دانه	درشت‌دانه (لیکا)	فوق روان کننده	الیاف بازالت	الیاف شیشه
Mix-۰	۱	۴۸۰	۷۰	۶۵	۲۲۰	۴۹۵	۳۶۰	۱۰	۰	۰
BF-۰/۲۵	۲	۴۸۰	۷۰	۶۵	۲۲۰	۴۹۵	۳۶۰	۱۱	۶/۶۷۵	۰
BF-۰/۱۵	۳	۴۸۰	۷۰	۶۵	۲۲۰	۴۹۵	۳۶۰	۱۱	۱۳/۳۵	۰
BF-۰/۷۵	۴	۴۸۰	۷۰	۶۵	۲۲۰	۴۹۵	۳۶۰	۱۱/۵	۲۰/۰۲	۰
BF-۰/۱	۵	۴۸۰	۷۰	۶۵	۲۲۰	۴۹۵	۳۶۰	۱۱/۵	۲۶/۷	۰
GF-۰/۲۵	۶	۴۸۰	۷۰	۶۵	۲۲۰	۴۹۵	۳۶۰	۱۱	۰	۶/۳۷۵
GF-۰/۱۵	۷	۴۸۰	۷۰	۶۵	۲۲۰	۴۹۵	۳۶۰	۱۱	۰	۱۲/۷۵
GF-۰/۷۵	۸	۴۸۰	۷۰	۶۵	۲۲۰	۴۹۵	۳۶۰	۱۱	۰	۱۹/۱۲
GF-۰/۱	۹	۴۸۰	۷۰	۶۵	۲۲۰	۴۹۵	۳۶۰	۱۱/۵	۰	۲۵/۵
H1-۰/۲۵G-۰/۷۵B	۱۰	۴۸۰	۷۰	۶۵	۲۲۰	۴۹۵	۳۶۰	۱۱/۵	۲۰/۰۲	۶/۳۷
H1-۰/۱۵G-۰/۱۵B	۱۱	۴۸۰	۷۰	۶۵	۲۲۰	۴۹۵	۳۶۰	۱۱/۵	۱۳/۳۵	۱۲/۷۵
H1-۰/۷۵G-۰/۲۵B	۱۲	۴۸۰	۷۰	۶۵	۲۲۰	۴۹۵	۳۶۰	۱۱/۵	۶/۶۷	۱۹/۱۲

۳-۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۳-۱- آماده سازی نمونه‌ها

در این تحقیق آزمایش‌های بتن تازه، جهت اثبات خصوصیات خود متراکمی انجام شده است. تعداد ۳۲۴ نمونه حاوی ۰/۲۵٪، ۰/۱۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪ هر کدام از الیاف‌های بازالت و شیشه، همچنین نسبت‌های ترکیبی از الیاف به مقدار ۰/۲۵٪ الیاف شیشه و ۰/۷۵٪ الیاف بازالت، ۰/۱۵٪ الیاف شیشه و ۰/۵٪ الیاف بازالت، همچنین ۰/۷۵٪ الیاف شیشه و ۰/۲۵٪ الیاف بازالت جهت تعیین مقاومت فشاری، کششی و خمشی در دماهای ۲۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتیگراد مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

۳-۳-۲- روش انجام آزمایش

آزمایش‌های بتن تازه بر اساس آیین نامه (EFNARC (۲۰۰۵) [۲۳] انجام شده است که شامل آزمایش‌های اسلامپ^۱، ۵۰۰T، حلقه J و قیف V^۲ می‌باشد. همچنین بررسی‌های مورد نیاز از جهت شکل ظاهری، جدایش و آنداختگی مورد بررسی قرار گرفت. در طرح‌های اختلاط مختلف جهت دستیابی به معیارهای خود تراکمی، از درصدهای مختلف فوق روان کننده استفاده و نسبت آب به سیمان ثابت نگه داشته شده است. بی‌درنگ پس از انجام آزمایش‌های بتن تازه، جهت بررسی خواص مکانیکی و حرارتی، بتن قالبگیری و نمونه‌های بتنی در دمای ± 20 درجه سلسیوس در فضای آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شده‌اند. نمونه

- 1 Slump flow test
- 2 J-ring test
- 3 V-funnel

میزان کارایی بتن کاهش می یابد، از طرفی با استفاده از الیاف بازالت کاهش کارایی بیشتری نسبت به الیاف شیشه مشاهده شده است. استفاده از حجم الیاف بازالت بالاتر از ۱٪ حجمی بتن موجب از بین رفتن خصوصیات خود تراکمی در بتن خواهد شد.

در تمامی آزمایش های انجام شده در بتن تازه، میزان قابلیت جریان بیشتر از ۶۰۰ میلی متر شده است که معیارهای آیین نامه مربوطه EF- (۲۰۰۵) (NARC) [۲۳] را به خوبی پوشش می دهد. با توجه به نمودار شکل ۲، مقدار جریان اسلامپ بین ۶۱۰ تا ۸۲۰ میلی متر در نوسان بود. جریان اسلامپ نمونه های بتنی با الیاف بازالت از ۵۰ تا ۲۱۰ میلی متر در مقایسه با بتن فاقد الیاف کاهش داشتند ولی در نمونه های مسلح به الیاف شیشه این میزان از ۲۰ تا ۱۱۰ میلی متر در نوسان بود.

قابلیت جریان پذیری گروه هیبریدی نیز دارای کاهش قابل ملاحظه ای می باشد. جریان اسلامپ این گروه از ۱۲۰ تا ۱۷۰ میلی متر در مقایسه با بتن بدون الیاف کاهش داشت؛ اما با توجه به بند ۴-۲ آیین نامه EFNARC (۲۰۰۵) [۲۳] تمام نمونه های ترکیبی در محدوده ۲SF قرار گرفتند که برای تمام کارهای ساختمانی نظیر ساخت تیرها و ستون ها مناسب هستند. همچنین در شکل ۳ با بررسی نمودار $50^{\circ}T$ به قیف V این نوع بتن ها در محدوده ۲VS/۲VF قرار گرفتند که احتمال آب انداختگی و جدایش دانه ها در این گروه کم می باشد. برای سنجش توان عبور از حلقه J استفاده شد. قطر نمونه های حلقه J بین ۵۲۰ تا ۷۹۰ میلی متر در نوسان بوده اند. بیشترین کاهش قطر حلقه J در نمونه با ۱٪ حجمی الیاف بازالت مشاهده گردید، در این صورت می توان این گونه استنباط کرد که با افزایش الیاف بازالت به بیش از ۱٪ حجمی، بتن قابلیت عبور خود را از دست خواهد داد.

با توجه به آزمایش های انجام شده و به صورت چشمی تمام نمونه ها از نظر قابلیت گذرندگی و جداسازی از یکنواختی مناسبی برخوردار بودند. شکل ۴ آزمایش جریان اسلامپ بتن سبک خودتراکم حاوی ۱٪ الیاف بازالت را نشان می دهد.

۴-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری ۲۸ روزهی تمامی طرح اختلاط های مورد نظر تحقیق، کاهش یافته اند. میزان این کاهش مقاومت نسبت به درصد های حجمی مختلف الیاف و همچنین دماهای مورد نظر متفاوت است. نمونه های بتن الیافی مسلح شده با استفاده از ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱٪ حجمی الیاف

ها پس از قالب برداری تا زمان انجام آزمایش طبق آیین نامه ASTM C1۹۲/C1۹۲ M [۲۴] تحت عمل آوری مرطوب قرار گرفتند. بعد از رسیدن سن نمونه ها به ۲۸ روزگی، از حوضچه آب خارج شدند و پس از ۲۴ ساعت خشک شدن در محیط آزمایشگاه در آن حرارتی قرار گرفتند و با نرخ سه درجه بر دقیقه به دماهای ۱۰۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس رسانده شدند و جهت رسیدن به حالت پایداری حرارتی هر یک به مدت یک ساعت در دماهای مذکور نگهداری شدند، سپس جهت خنک شدن با همان نرخ به دمای محیط برده و در هوای محیط قرار گرفتند.

آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت کششی و آزمایش مقاومت خمشی طبق آیین نامه های ASTM [۲۵-۲۷] انجام شده اند. آزمایش مقاومت فشاری ASTM C۳۹/C۳۹ M [۲۵] بر روی نمونه های استوانه ای با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی متر در سن ۲۸ روزه انجام شده است. همچنین نرخ بارگذاری در این آزمایش ثابت و برابر ۲۵/MPa/s می باشد.

آزمایش مقاومت کششی ASTM C۴۹۶/C۴۹۶ M [۲۶] نیز بر روی نمونه های استوانه ای با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی متر انجام گردیده است و نرخ بارگذاری در آن ۰/۰۲ MPa/s می باشد. آزمایش های مقاومت خمشی ASTM C۱۶۰۹/C۱۶۰۹ M [۲۷] بر روی نمونه های منشوری به ابعاد $10 \times 10 \times 35$ میلیمتر مکعب به صورت دو سر ساده و با طول دهانه ۳۰۰ میلی متر انجام شده است. سرعت بارگذاری در این آزمایش ۰/۰۵ mm/min می باشد. برای هر یک از آزمایش های فوق در هر سن، ۳ نمونه برای هر طرح اختلاط مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین این سه عدد در جدول جدول های مربوط به هر بخش آمده است. در نهایت از نمونه های شکسته شده جهت مشاهده ریز ساختار بتن، الیاف و نحوه پخش شدن ترک ها در میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه برداری صورت گرفت.

۴-۳- بحث و بررسی نتایج

در این بخش به بررسی نتایج آزمایش های بتن تازه و سخت شده پرداخته شده است.

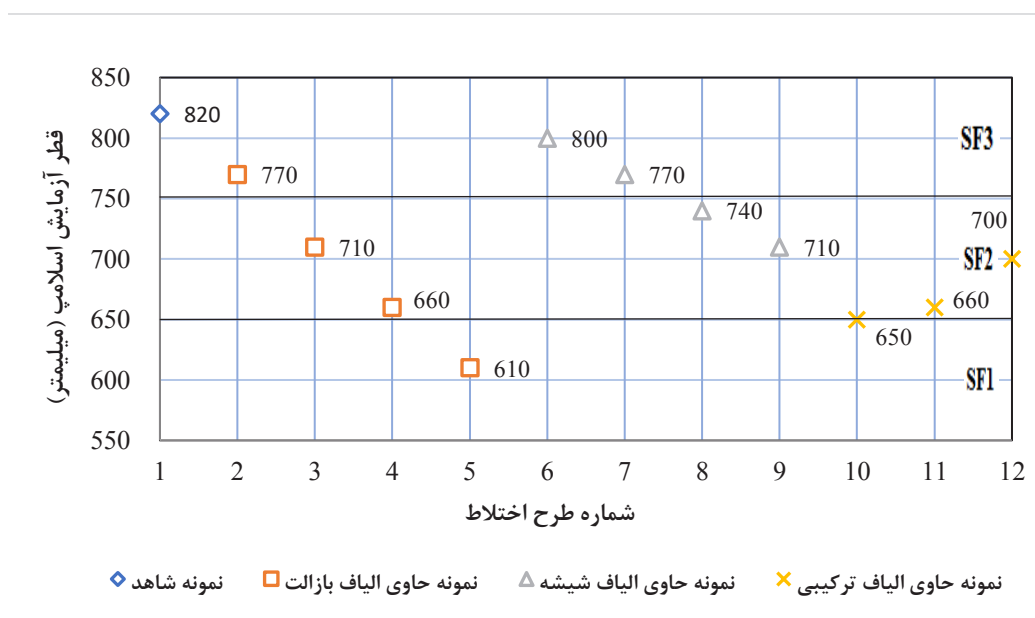
۴-۱- نتایج آزمایش های بتن تازه

نتایج آزمایش های بتن تازه در جدول ۵ نمایش داده شده است. همان طور که از جدول مشاهده می شود، حضور الیاف شیشه و بازالت در نتایج آزمایش های بتن تازه بسیار مؤثرند. با افزایش میزان الیاف بازالت و شیشه

جدول ۵. نتایج بتن تازه

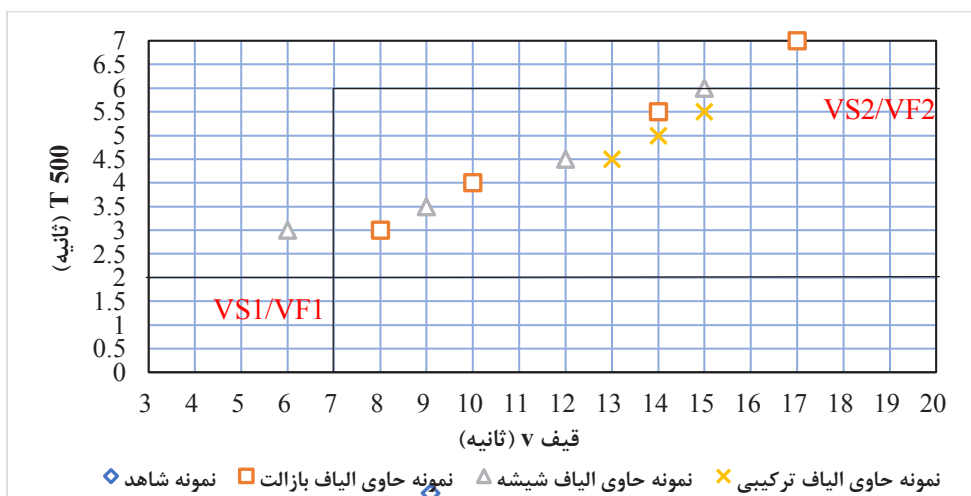
Table 5. Fresh state properties results

نام طرح	شماره طرح	جریان اسلامپ (mm)	T50 (s)	حلقه-J (mm)	قیف-V (s)	وزن مخصوص (kg/m ³)
Mix--	۱	۸۲۰	۲	۷۹۰	۵	۱۶۷۸
BF-٪۰/۲۵	۲	۷۷۰	۳	۷۵۰	۸	۱۷۰۸
BF-٪۰/۱۵	۳	۷۱۰	۴	۶۸۰	۱۰	۱۷۲۰
BF-٪۰/۱۷۵	۴	۶۶۰	۵/۵	۶۰۰	۱۴	۱۷۳۵
BF-٪۱	۵	۶۱۰	۷	۵۲۰	۱۷	۱۷۵۶
GF-٪۰/۲۵	۶	۸۰۰	۳	۷۹۰	۶	۱۷۰۷
GF-٪۰/۱۵	۷	۷۷۰	۳/۵	۷۵۰	۹	۱۷۱۸
GF-٪۰/۱۷۵	۸	۷۴۰	۴/۵	۷۰۰	۱۲	۱۷۳۰
GF-٪۱	۹	۷۱۰	۶	۶۴۰	۱۵	۱۷۴۸
H1-٪۰/۲۵G-٪۰/۱۷۵B	۱۰	۶۵۰	۵/۵	۵۹۰	۱۵	۱۷۵۴
H1-٪۰/۱۵G-٪۰/۱۵B	۱۱	۶۶۰	۵	۶۴۰	۱۴	۱۷۳۷
H1-٪۰/۱۷۵G-٪۰/۲۵B	۱۲	۷۰۰	۴/۵	۶۸۰	۱۳	۱۷۳۳



شکل ۲. نمودار آزمایش جریان اسلامپ

Fig. 2. Slump flow test



شکل ۳. نمودار T 500 به قیف V

Fig. 3. v-funnel to slump flow



شکل ۴. اسلامپ بتن حاوی ۱٪ الیاف بازالت

Fig. 4. Concrete slump flow containing 1% basalt fibers

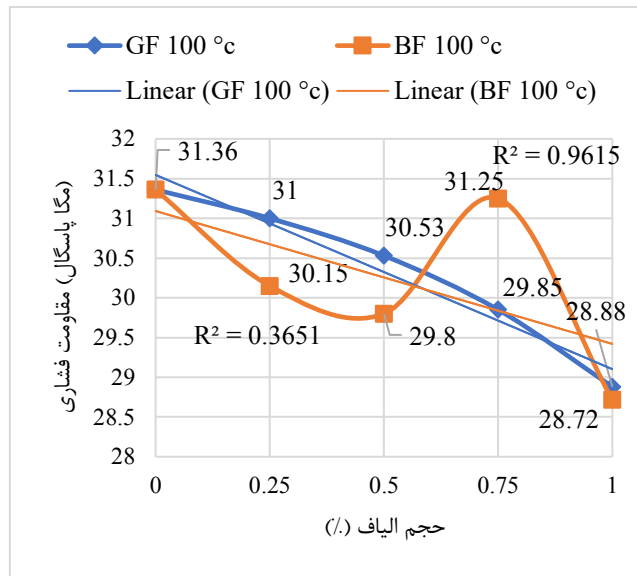
جدول ۶. نتایج آزمایش فشاری

Table 6. Compressive strength results

نام طرح	مقاومت فشاری (MPa)	نام طرح	مقاومت فشاری (MPa)	نام طرح	مقاومت فشاری (MPa)
%۰-۲۰BF	۳۱/۸۴	%۰-۲۰GF	۳۱/۸۴	H1-%۰/۲۵G-%۰/۷۵B-۲۰	۳۰/۱۹
%۰-۱۰۰BF	۳۱/۳۶	%۰-۱۰۰GF	۳۱/۳۶	H1-%۰/۲۵G-%۰/۷۵B-۱۰۰	۲۹/۵۶
%۰-۳۰۰BF	۲۷/۱۹	%۰-۳۰۰GF	۲۷/۱۹	H1-%۰/۲۵G-%۰/۷۵B-۳۰۰	۲۴/۲۹
-%۰/۲۵-۲۰BF	۳۰/۲۶	-%۰/۲۵-۲۰GF	۳۱/۲۳	H1-%۰/۵۰G-%۰/۵۰B-۲۰	۳۰/۴۶
-%۰/۲۵-۱۰۰BF	۳۰/۱۵	-%۰/۲۵-۱۰۰GF	۳۱	H1-%۰/۵۰G-%۰/۵۰B-۱۰۰	۲۹/۹۲
-%۰/۲۵-۳۰۰BF	۲۵/۲۲	-%۰/۲۵-۳۰۰GF	۲۵/۷۹	H1-%۰/۵۰G-%۰/۵۰B-۳۰۰	۲۴/۸۶
-%۰/۵۰-۲۰BF	۳۰/۷۴	-%۰/۵۰-۲۰GF	۳۱/۱۷	H1-%۰/۷۵G-%۰/۲۵B-۲۰	۳۰/۶۱
-%۰/۵۰-۱۰۰BF	۲۹/۸	-%۰/۵۰-۱۰۰GF	۳۰/۵۳	H1-%۰/۷۵G-%۰/۲۵B-۱۰۰	۳۰/۳۸
-%۰/۵۰-۳۰۰BF	۲۵/۵	-%۰/۵۰-۳۰۰GF	۲۴/۸۶	H1-%۰/۷۵G-%۰/۲۵B-۳۰۰	۲۴/۵۲
-%۰/۷۵-۲۰BF	۳۰/۱۵	-%۰/۷۵-۲۰GF	۳۰/۵۴		
-%۰/۷۵-۱۰۰BF	۳۱/۲۵	-%۰/۷۵-۱۰۰GF	۲۹/۸۵		
-%۰/۷۵-۳۰۰BF	۲۳/۴۳	-%۰/۷۵-۳۰۰GF	۲۴/۱۸		
-%۱-۲۰BF	۲۹/۸۴	-%۱-۲۰GF	۳۰/۳۲		
-%۱-۱۰۰BF	۲۸/۷۲	-%۱-۱۰۰GF	۲۸/۸۸		
-%۱-۳۰۰BF	۲۲/۶۴	-%۱-۳۰۰GF	۲۳/۵۶		

بازالت در دمای ۲۰ درجه سلسیوس به ترتیب شاهد کاهش مقاومت به میزان ۴/۲۸٪، ۵/۳۰٪، ۳/۴۵٪، ۴/۹۶٪، ۱/۹۱٪، ۲/۱۰٪، ۴/۰۸٪، ۴/۷۷٪ شده است. دلیل این قضیه را می توان این گونه بیان کرد که در درصدهای بالای الیاف، فضاهای خالی افزایش یافته است و این فضاهای خالی خود به خود سبب افزایش تخلخل در نمونه ها شده و مقاومت فشاری آن را کاهش می دهد. Jiang و همکاران نیز با بررسی نمونه های حاوی الیاف بازالت از طریق آزمایش تخلخل سنجی به روش تزریق جیوه، به این نتیجه رسیدند که افزودن الیاف بازالت باعث ایجاد تخلخل بیشتر در بتن می شود [۲۸]. یکی دیگر از دلایل این کاهش مقاومت، میل الیاف خصوصا الیاف بازالت به توده های شدن است که در بعضی مواقع سبب کاهش مقاومت می گردد.

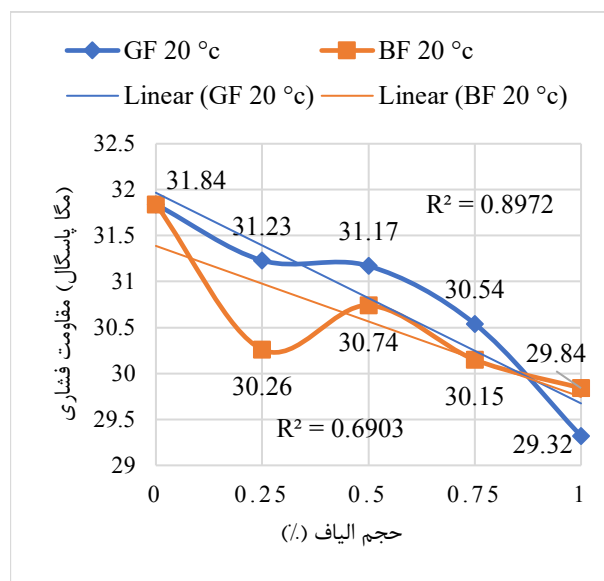
در نمونه های بتن الیافی مسلح شده با الیاف ترکیبی با میزان حجمی ۰/۲۵٪ الیاف بازالت و ۰/۷۵٪ الیاف شیشه، ۰/۵٪ الیاف بازالت و ۰/۵٪ الیاف شیشه، در دمای ۲۰ درجه سلسیوس نمونه ها شاهد کاهش مقاومت به میزان ۵/۱۸٪، ۴/۳۳٪ و ۳/۸۶٪ شده اند. بیشترین کاهش مقاومت فشاری مربوط به نمونه های حاوی ۱٪ الیاف



۲۰ °C

شکل ۵. نمودار آزمایش مقاومت فشاری ۲۰ °C

Fig. 5. Variation in compressive strength of concrete in 20 °C



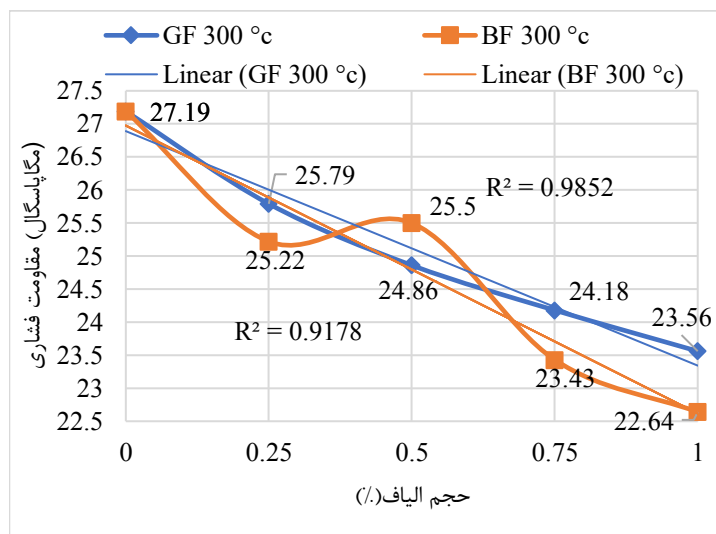
۱۰۰ °C

شکل ۶. نمودار آزمایش مقاومت فشاری ۱۰۰ °C

Fig. 6. Variation in compressive strength of concrete in 100 °C

به الیاف شیشه می باشد. اگر مقاومت فشاری تنها تابعی از حجم الیاف بود، نمودار کاملاً به صورت خطی پیش می رفت. خطی نبودن شکل نمودار حاکی از آن است که جنس الیاف نیز در این بین بسیار تاثیرگذار است. به نظر می رسد جنس الیاف بازالت و شکل پرزی آن مانع از درست پخش شدن

در بررسی نمودار مقاومت فشاری به درصد حجمی الیاف در شکل های ۵، ۶ و ۷ میانگین ضرایب R^2 در سه دمای ۲۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس، برای الیاف شیشه ۰/۹۵ و برای الیاف بازالت ۰/۶۵ به دست آمد. این رقم نشان دهنده وابستگی بیشتر الیاف بازالت به متغیرهای دیگر نسبت



شکل ۷. نمودار آزمایش مقاومت فشاری ۳۰۰ °C

Fig. 7. Variation in compressive strength of concrete in 300 °C

۴-۳- نتایج آزمایش مقاومت کششی

در آزمایش مقاومت کششی در هر سن، ۳ نمونه برای هر اختلاط مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین این سه عدد در جدول ۷ آمده است. به کارگیری الیاف جهت بهبود عملکرد کششی طرح اختلاط های بتنی، می تواند تاثیر به سزایی در افزایش تنش های تحمل شده توسط بتن داشته باشد. همچنین استفاده از الیاف سبب کاهش ترک خوردگی و در نتیجه آن افزایش عمر و دوام سازه ها گردد.

در نمونه های بتنی خودمتراکم سبک، مقاومت کششی ۲۸ روزهی تمامی طرح اختلاط های مورد نظر تحقیق، افزایش یافته اند. میزان این افزایش مقاومت کششی نسبت به درصد های مختلف الیاف و همچنین دماهای مورد نظر متفاوت است. نمونه های بتن الیافی مسلح شده با استفاده از ۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪ حجمی الیاف بازالت در دمای ۲۰ درجه سلسیوس به ترتیب شاهد افزایش مقاومت به میزان ۵/۸۴٪، ۱۰/۸۱٪، ۲۰/۷۶٪، ۲۸/۹۴٪ شده است. این افزایش مقاومت در الیاف شیشه به ترتیب ۷٪، ۱۴/۶۱٪، ۲۵/۴۳٪، ۳۵/۹۶٪ شده است.

الیاف در مخلوط بتن می شود. از این رو می توان این طور نتیجه گرفت که الیاف شیشه نسبت به الیاف بازالت بهتر در سراسر نمونه ها پخش شده اند. با افزایش دما مقاومت فشاری نمونه ها کاهش می یابد. تا دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس مقاومت فشاری در نمونه های حاوی الیاف تغییر محسوس مشاهده نشد، اما در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس نمونه های بدون الیاف ۱۴/۶٪ کاهش مقاومت داشته اند. این کاهش مقاومت در نمونه های مسلح شده با الیاف بازالت به میزان ۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪ حجمی به ترتیب ۱۶/۶۵٪، ۱۷/۰۴٪، ۲۲/۲۸٪، ۲۴/۱۲٪ شده است. این کاهش مقاومت در الیاف شیشه به ترتیب ۱۷/۴۱٪، ۲۲/۲۴٪، ۲۰/۸۲٪، ۲۲/۲۹٪ شده است. همچنین در نمونه های بتن الیافی مسلح شده با الیاف ترکیبی با میزان حجمی ۰/۷۵٪ الیاف بازالت و ۰/۲۵٪ الیاف شیشه، ۰/۵٪ الیاف بازالت و ۰/۵٪ الیاف شیشه، ۰/۲۵٪ الیاف بازالت و ۰/۷۵٪ الیاف شیشه، نمونه ها شاهد کاهش مقاومت به میزان ۱۹/۵۴٪، ۱۸/۳۸٪ و ۱۹/۸۹٪ شده است. با توجه به نتایج فوق بیشترین کاهش مقاومت مربوط به ۱٪ حجمی الیاف بازالت به میزان ۲۴/۱۲٪ می باشد. این امر را میتوان ناشی از تاثیر پذیری کمتر الیاف شیشه به دلیل ماهیت و نقطه ذوب بیشتر نسبت به نمونه های بازالتی دانست.

جدول ۷. نتایج آزمایش کششی

Table 7. Splitting tensile strength results

نام طرح	مقاومت کششی (MPa)	نام طرح	مقاومت کششی (MPa)	نام طرح	مقاومت کششی (MPa)
BF-۲۰-۰٪	۳/۴۲	GF-۲۰-۰٪	۳/۴۲	H1-۰/۲۵G-۰/۷۵B-۲۰	۴/۵۴
BF-۱۰۰-۰٪	۳/۲۱	GF-۱۰۰-۰٪	۳/۲۱	H1-۰/۲۵G-۰/۷۵B-۱۰۰	۴/۱۷
BF-۳۰۰-۰٪	۲/۱۸	GF-۳۰۰-۰٪	۲/۱۸	H1-۰/۲۵G-۰/۷۵B-۳۰۰	۲/۶۸
BF-۲۰-۲۵/۰٪	۳/۶۲	GF-۲۰-۲۵/۰٪	۳/۶۶	H1-۰/۵۰G-۰/۵۰B-۲۰	۴/۵۰
BF-۱۰۰-۲۵/۰٪	۳/۴۰	GF-۱۰۰-۲۵/۰٪	۳/۵۱	H1-۰/۵۰G-۰/۵۰B-۱۰۰	۴/۳۲
BF-۳۰۰-۲۵/۰٪	۲/۴۲	GF-۳۰۰-۲۵/۰٪	۲/۵۳	H1-۰/۵۰G-۰/۵۰B-۳۰۰	۲/۷۱
BF-۲۰-۵۰/۰٪	۳/۷۹	GF-۲۰-۵۰/۰٪	۳/۹۲	H1-۰/۷۵G-۰/۲۵B-۲۰	۴/۷۳
BF-۱۰۰-۵۰/۰٪	۳/۵۲	GF-۱۰۰-۵۰/۰٪	۳/۷۲	H1-۰/۷۵G-۰/۲۵B-۱۰۰	۴/۴۸
BF-۳۰۰-۵۰/۰٪	۲/۴۶	GF-۳۰۰-۵۰/۰٪	۲/۶۶	H1-۰/۷۵G-۰/۲۵B-۳۰۰	۲/۹۲
BF-۲۰-۷۵/۰٪	۴/۱۳	GF-۲۰-۷۵/۰٪	۴/۲۹		
BF-۱۰۰-۷۵/۰٪	۳/۷۵	GF-۱۰۰-۷۵/۰٪	۳/۹۸		
BF-۳۰۰-۷۵/۰٪	۲/۵۲	GF-۳۰۰-۷۵/۰٪	۲/۸۱		
BF-۲۰-۱٪	۴/۴۴	GF-۲۰-۱٪	۴/۶۵		
BF-۱۰۰-۱٪	۳/۸۸	GF-۱۰۰-۱٪	۴/۲۷		
BF-۳۰۰-۱٪	۲/۶۰	GF-۳۰۰-۱٪	۳/۰۲		

شیشه به میزان ۳۵/۹۶٪ است. دلیل این امر پخش شدن بهتر در بتن، همچنین مقاومت کششی بالاتر الیاف شیشه می‌باشد. در استفاده از الیاف ترکیبی بیشترین رشد مقاومت کششی مربوط به میزان حجمی ۰/۲۵ الیاف بازالت و ۰/۷۵ الیاف شیشه به میزان ۳۸/۳٪ می‌باشد.

Tao wu و همکاران با بررسی اثر ترکیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن گزارش داده اند که ترکیب این الیاف ها موجب رشد مقاومت خمشی میشود. آن‌ها همچنین کاربرد الیاف فوق را به صورت ترکیبی را بهتر از کاربرد تکی الیاف دانسته اند [۲۹].

همچنین در نمونه های بتن الیافی مسلح شده با الیاف ترکیبی با میزان حجمی ۰/۲۵ الیاف بازالت و ۰/۷۵ الیاف شیشه، ۰/۵ الیاف بازالت و ۰/۵ الیاف شیشه، ۰/۷۵ الیاف بازالت و ۰/۲۵ الیاف شیشه، نمونه ها شاهد افزایش مقاومت کششی به میزان ۳۸/۳۰٪، ۳۱/۵۷٪ و ۳۲/۷۴٪ شده است.

مقاومت کششی نمونه های مسلح شده با استفاده از الیاف شیشه رشد بیشتری نسبت به نمونه های مسلح شده با استفاده از الیاف بازالت داشته اند، بیشترین افزایش مقاومت کششی مربوط به نمونه های حاوی ۱٪ الیاف



شکل ۸. شکست نمونه در آزمایش کششی

Fig. 8. Specimen fracture in Splitting tensile strength

همچنین بیشترین کاهش مقاومت در دمای بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس رخ داده است. نقطه ذوب الیاف می تواند در کاهش یا افزایش مقاومت کششی پس از گرم کردن نمونه ها مؤثر باشد. همان طور که مشاهده می شود نمونه های حاوی الیاف بازالت کاهش مقاومت بیشتری را نسبت به نمونه های حاوی الیاف شیشه تجربه کرده اند. اصلانی و همکاران [۱۹] نیز با مطالعه تاثیر الیاف پلی پروپیلن و الیاف فولادی دریافتند، افزایش دمای نمونه های حاوی پلی پروپیلن بیش از ۳۰۰ درجه سلسیوس باعث از بین رفتن اثر این الیاف شده اما در نمونه های حاوی الیاف فولادی با افزایش دما بیش از ۶۰۰ درجه سلسیوس نیز کارایی الیاف حفظ میشود.

۴-۴- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

الیاف به عنوان یکی از مواد بهبود دهنده مقاومت خمشی در بتن عمل می کند. آزمایش مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه برای نمونه های منشوری به ابعاد $100 \times 100 \times 350$ میلی متر مکعب انجام شده است. نتایج به دست آمده از مقاومت خمشی در جدول ۸ و همینطور در نمودار شکل ۹ آمده است. در نمونه های بتنی خودمتراکم سبک، مقاومت خمشی ۲۸ روزهی تمامی طرح اختلاط های مورد نظر تحقیق، افزایش یافته اند. میزان این افزایش مقاومت نسبت به درصد های مختلف الیاف و همچنین دماهای مورد نظر متفاوت است. نمونه های بتن الیافی مسلح شده با استفاده از 0.25%

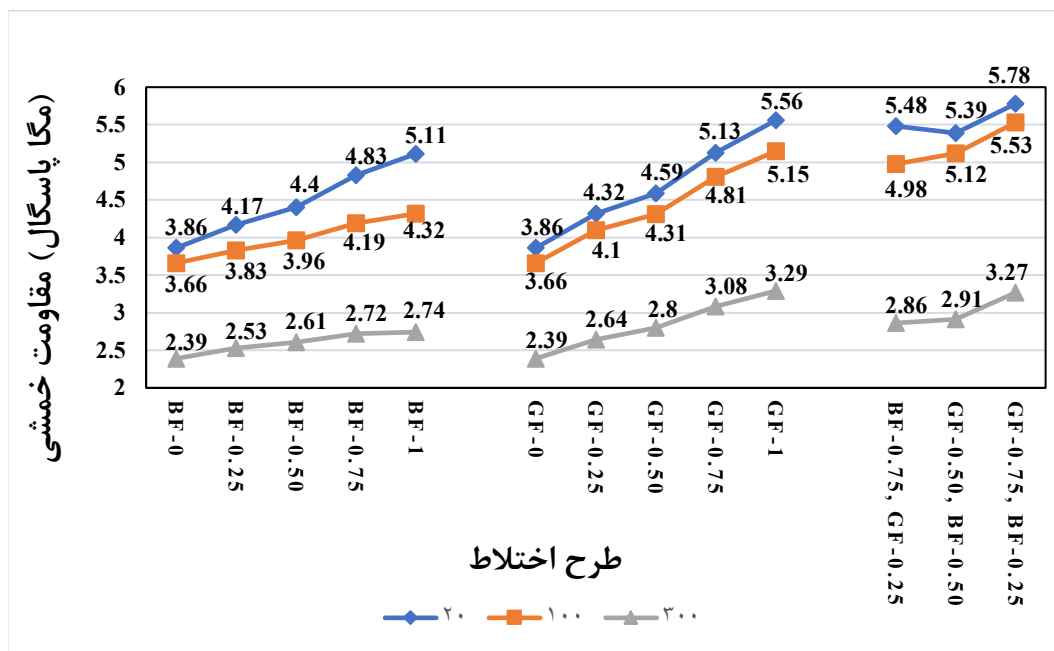
با افزایش دما مقاومت کششی نمونه ها کاهش می یابد. در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس نمونه های بدون الیاف 6.14% کاهش مقاومت داشته اند. این کاهش مقاومت در نمونه های مسلح شده با الیاف بازالت به میزان 0.25% ، 0.15% ، 0.075% و 0.1% حجمی به ترتیب 6.07% ، 7.12% ، 9.20% ، 12.01% شده است. این کاهش مقاومت در الیاف شیشه به ترتیب 4.09% ، 5.10% ، 7.22% ، 8.17% شده است. همچنین در نمونه های بتن الیافی مسلح شده با الیاف ترکیبی با میزان حجمی 0.25% الیاف بازالت و 0.075% الیاف شیشه، 0.5% الیاف بازالت و 0.075% الیاف شیشه، 0.5% الیاف بازالت و 0.25% الیاف شیشه، نمونه ها شاهد کاهش مقاومت به میزان 5.28% ، 4% و 8.14% شده است.

همچنین در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس نمونه های بدون الیاف 36.25% کاهش مقاومت داشته اند. این کاهش مقاومت در نمونه های مسلح شده با الیاف بازالت به میزان 0.25% ، 0.15% ، 0.075% و 0.1% حجمی به ترتیب 33.14% ، 35.09% ، 38.98% ، 41.04% شده است. این کاهش مقاومت در الیاف شیشه به ترتیب 30.87% ، 32.14% ، 34.49% ، 35.05% شده است. همچنین در نمونه های بتن الیافی مسلح شده با الیاف ترکیبی با میزان حجمی 0.25% الیاف بازالت و 0.075% الیاف شیشه، 0.5% الیاف بازالت و 0.075% الیاف شیشه، 0.075% الیاف بازالت و 0.25% الیاف شیشه، نمونه ها شاهد کاهش مقاومت به میزان 38.26% ، 39.77% و 40.96% شده است.

جدول ۸. نتایج آزمایش خمشی

Table 8. Flexural strength results

نام طرح	مقاومت خمشی (MPa)	نام طرح	مقاومت خمشی (MPa)	نام طرح	مقاومت خمشی (MPa)
٪۰-۲۰-BF	۳/۸۶	٪۰-۲۰-GF	۳/۸۶	H1-٪۰/۲۵G-٪۰/۷۵B-۲۰	۵/۴۸
٪۰-۱۰۰-BF	۳/۶۶	٪۰-۱۰۰-GF	۳/۶۶	G-٪۰/۷۵B-۱۰۰ H1-٪۰/۲۵	۴/۹۸
٪۰-۳۰۰-BF	۲/۳۹	٪۰-۳۰۰-GF	۲/۳۹	G-٪۰/۷۵B-۳۰۰ H1-٪۰/۲۵	۲/۸۶
-٪۰/۲۵-۲۰-BF	۴/۱۷	-٪۰/۲۵-۲۰-GF	۴/۳۲	H1-٪۰/۵۰G-٪۰/۵۰B-۲۰	۵/۳۹
-٪۰/۲۵-۱۰۰-BF	۳/۸۳	-٪۰/۲۵-۱۰۰-GF	۴/۱۰	G-٪۰/۵۰B-۱۰۰ H1-٪۰/۵۰	۵/۱۲
-٪۰/۲۵-۳۰۰-BF	۲/۵۳	-٪۰/۲۵-۳۰۰-GF	۲/۶۴	G-٪۰/۵۰B-۳۰۰ H1-٪۰/۵۰	۲/۹۱
-٪۰/۵۰-۲۰-BF	۴/۴۰	-٪۰/۵۰-۲۰-GF	۴/۵۹	H1-٪۰/۷۵G-٪۰/۲۵B-۲۰	۵/۷۸
-٪۰/۵۰-۱۰۰-BF	۳/۹۶	-٪۰/۵۰-۱۰۰-GF	۴/۳۱	G-٪۰/۲۵B-۱۰۰ H1-٪۰/۷۵	۵/۵۳
-٪۰/۵۰-۳۰۰-BF	۲/۶۱	-٪۰/۵۰-۳۰۰-GF	۲/۸۰	G-٪۰/۲۵B-۳۰۰ H1-٪۰/۷۵	۳/۲۷
-٪۰/۷۵-۲۰-BF	۴/۸۳	-٪۰/۷۵-۲۰-GF	۵/۱۳		
-٪۰/۷۵-۱۰۰-BF	۴/۱۹	-٪۰/۷۵-۱۰۰-GF	۴/۸۱		
-٪۰/۷۵-۳۰۰-BF	۲/۷۲	-٪۰/۷۵-۳۰۰-GF	۳/۰۸		
-٪۱-۲۰-BF	۵/۱۱	-٪۱-۲۰-GF	۵/۵۶		
-٪۱-۱۰۰-BF	۴/۳۴	-٪۱-۱۰۰-GF	۵/۱۵		
-٪۱-۳۰۰-BF	۲/۷۴	-٪۱-۳۰۰-GF	۳/۲۹		



شکل ۹. نمودار مقاومت خمشی

Fig. 9. Flexural strength results

زمان از بین رفتن سطح واسط مقاومت می کنند و پیوند بین ماتریس سیمان توسط الیاف همچنان حفظ می شود [۲۲].

در استفاده از الیاف ترکیبی بیشترین رشد مقاومت خمشی مربوط به میزان حجمی ۰/۲۵ الیاف بازالت و ۰/۷۵ الیاف شیشه به میزان ۴۹/۷۶٪ می باشد. در تحقیقی مشابه lagod و همکاران با بررسی ترکیب الیاف فولادی و بازالت دریافتند که ترکیب این دو الیاف می تواند رفتار بتن سبک خود متراکم را انعطاف پذیرتر کند. آن ها همچنین گزارش کرده اند که ترکیب دو الیاف فوق باعث اتصال مناسب ترک ها در طول آزمایش مقاومت خمشی می شوند [۳۰].

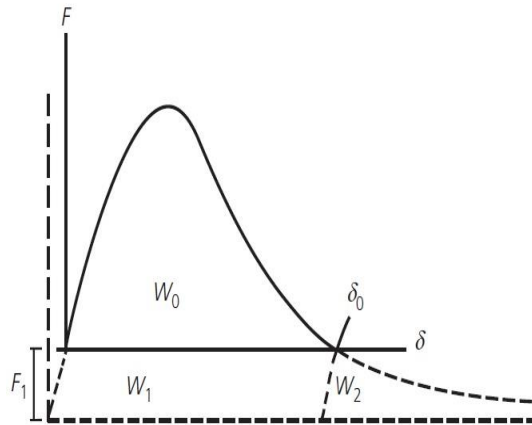
با مقایسه ی بین مقاومت های خمشی حاصله از طرح های اختلاط حاوی الیاف بازالت و شیشه، رشد مقاومت بیشتری با استفاده ی از الیاف شیشه، به دست خواهد آمد. دلیل این امر آن است که با افزایش الیاف بازالت، از کارایی بتن کاسته می شود و در این شرایط ملات سیمان یکپارچگی خود را از دست داده و امکان ایجاد فضاهای خالی بیشتر می شود. همچنین الیاف شیشه در بتن بهتر بخش شده و باعث بهبود بیشتر مقاومت خمشی می شوند. با افزایش دما مقاومت خمشی نمونه ها کاهش میابد. در دمای ۱۰۰

۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪ حجمی الیاف بازالت در دمای ۲۰ درجه سلسیوس به ترتیب شاهد افزایش مقاومت خمشی به میزان ۰/۰۳٪، ۰/۱۳٪، ۰/۲۵٪، ۰/۳۲٪ شده است. این افزایش مقاومت در الیاف شیشه به ترتیب ۰/۱۱٪، ۰/۱۸٪، ۰/۳۲٪، ۰/۴۴٪ شده است.

همچنین در نمونه های بتن الیافی مسلح شده با الیاف ترکیبی با میزان حجمی ۰/۲۵ الیاف بازالت و ۰/۷۵ الیاف شیشه، ۰/۵ الیاف بازالت و ۰/۵ الیاف شیشه، ۰/۷۵ الیاف بازالت و ۰/۲۵ الیاف شیشه، نمونه ها شاهد افزایش مقاومت خمشی به میزان ۴۱/۹۶٪، ۳۹/۶۳٪ و ۴۹/۷۴٪ شده است.

مقاومت خمشی نمونه های مسلح شده با استفاده از الیاف شیشه رشد بیشتری نسبت به نمونه های مسلح شده با استفاده از الیاف بازالت داشته اند، در استفاده از الیاف تکی بیشترین افزایش مقاومت خمشی مربوط به نمونه های حاوی ۱٪ الیاف شیشه به میزان ۴۴/۰۴٪ است.

Güneyisi و همکاران در بررسی های خود بر روی بتن خود متراکم دریافتند که مقاومت خمشی با افزایش حجم الیاف شیشه افزایش یافته است. این امر احتمالاً به این دلیل است که پس از ترک خوردگی بتن، الیاف تا



شکل ۱۰. نمودار انرژی شکست [۲۹]

Fig. 10. fracture energy charts

۴-۵- نتایج مقدار انرژی شکست

با توجه به نمودار نیرو تغییر مکان شکل زیر انرژی شکست از رابطه (۱) محاسبه می شود. در این رابطه A سطح مقطع نمونه و W از رابطه (۲) محاسبه می شود. در واقع W_0 مساحت زیر نمودار بار به تغییر مکان وسط دهانه می باشد. در روابط ۳ و ۴، F_1 وزن نمونه و δ_0 تغییر مکان حداکثر وسط دهانه می باشد.

$$G_F = \frac{W}{A} \quad (1)$$

$$W = W_0 + W_1 + W_2 \quad (2)$$

$$W_1 = W_2 = F_1 \delta_0 \quad (3)$$

$$W = W_0 + 2 F_1 \delta_0 \quad (4)$$

در جدول ۹ نتایج مقدار انرژی شکست (G_f) نمونه ها در سن ۲۸ روز بیان شده است. با توجه به نتایج بیان شده مشاهده می شود که در نمونه های دارای الیاف تکی، نمونه حاوی ۱٪ الیاف شیشه و در نمونه های دارای الیاف ترکیبی نمونه های حاوی ۱٪ الیاف شیشه و ۲۵٪ الیاف بازالت در دمای ۲۰ درجه سلسیوس بیشترین انرژی شکست را دارد. مظلوم و همکاران با آزمایش بر روی بتن ECC به نتایج مشابه دست یافته اند. آن ها گزارش کرده اند که با افزودن الیاف شیشه و بازالت انرژی شکست نمونه ها در دمای معمولی و دمای بالا افزایش می یابد [۳۱].

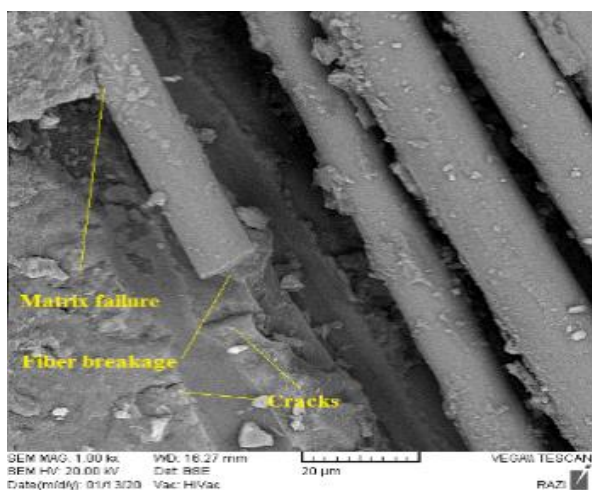
درجه سلسیوس نمونه های بدون الیاف ۵/۱۸٪ کاهش مقاومت داشته اند. این کاهش مقاومت در نمونه های مسلح شده با الیاف بازالت به میزان ۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪ حجمی به ترتیب ۸/۱۵٪، ۱۰٪، ۱۳/۲۵٪، ۱۵/۴۵٪ شده است. این کاهش مقاومت در الیاف شیشه به ترتیب ۵/۰۹٪، ۶/۱۰٪، ۶/۲۳٪، ۷/۳۷٪ شده است. همچنین در نمونه های بتن الیافی مسلح شده با الیاف ترکیبی با میزان حجمی ۰/۲۵٪ الیاف بازالت و ۰/۷۵٪ الیاف شیشه، ۰/۵٪ الیاف بازالت و ۰/۷۵٪ الیاف شیشه، ۰/۷۵٪ الیاف بازالت و ۰/۲۵٪ الیاف شیشه، نمونه ها شاهد کاهش مقاومت به میزان ۴/۳٪، ۵٪ و ۹/۱۲٪ شده است.

همچنین در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس نمونه های بدون الیاف ۳۸/۰۸٪ کاهش مقاومت داشته اند. این کاهش مقاومت در نمونه های مسلح شده با الیاف بازالت به میزان ۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪ حجمی به ترتیب ۳۹/۳۲٪، ۴۰/۶۸٪، ۴۳/۶۸٪، ۴۶/۳۷٪ شده است. این کاهش مقاومت در الیاف شیشه به ترتیب ۳۸/۸۸٪، ۳۹٪، ۳۹/۹۶٪، ۴۰/۸۲٪ شده است. همچنین در نمونه های بتن الیافی مسلح شده با الیاف ترکیبی با میزان حجمی ۰/۷۵٪ الیاف بازالت و ۰/۲۵٪ الیاف شیشه، ۰/۵٪ الیاف بازالت و ۰/۷۵٪ الیاف شیشه، نمونه ها شاهد کاهش مقاومت به میزان ۴۷/۸۱٪، ۴۶/۰۱٪ و ۴۳/۴۲٪ شده است. کمترین کاهش مقاومت خمشی در الیاف ترکیبی مربوط به میزان ۰/۲۵٪ الیاف بازالت و ۰/۷۵٪ الیاف شیشه در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به میزان ۴۳/۴۲٪ می باشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت در دمای بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس رخ داده است.

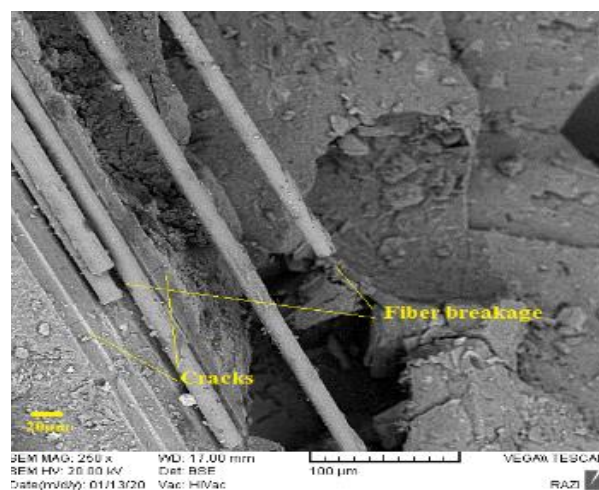
جدول ۹. انرژی شکست

Table 9. fracture energy

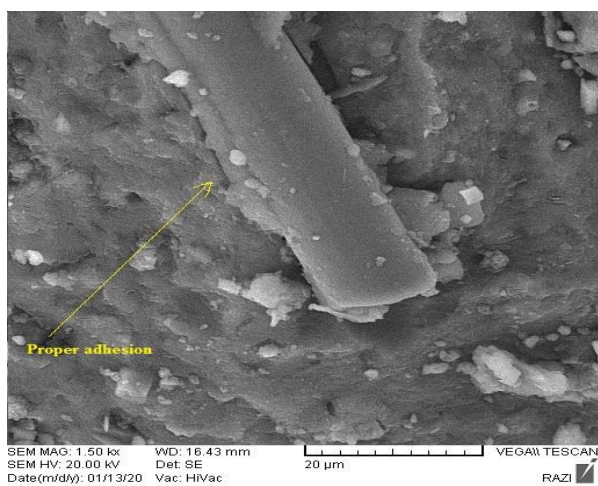
نام طرح	انرژی شکست Gf (N/mm)	نام طرح	انرژی شکست Gf (N/mm)	نام طرح	انرژی شکست Gf (N/mm)
٪۰-۲۰-BF	۱/۲۶	٪۰-۲۰-GF	۱/۲۶	H1-٪۰/۲۵G-٪۰/۷۵B-۲۰	۲/۵۱
٪۰-۱۰۰-BF	۱/۱۰	٪۰-۱۰۰-GF	۱/۱۰	G-٪۰/۷۵B-۱۰۰ H1-٪۰/۲۵	۲/۱۸
٪۰-۳۰-BF	۰/۵۲	٪۰-۳۰-GF	۰/۵۲	G-٪۰/۷۵B-۳۰۰ H1-٪۰/۲۵	۰/۸۳
-٪۰/۲۵-۲۰-BF	۱/۶۵	-٪۰/۲۵-۲۰-GF	۱/۹۶	H1-٪۰/۵۰G-٪۰/۵۰B-۲۰	۲/۶۳
-٪۰/۲۵-۱۰۰-BF	۱/۳۵	-٪۰/۲۵-۱۰۰-GF	۱/۷۸	G-٪۰/۵۰B-۱۰۰ H1-٪۰/۵۰	۲/۳۶
-٪۰/۲۵-۳۰۰-BF	۰/۵۴	-٪۰/۲۵-۳۰۰-GF	۰/۷۶	G-٪۰/۵۰B-۳۰۰ H1-٪۰/۵۰	۰/۸۹
-٪۰/۵۰-۲۰-BF	۱/۸۶	-٪۰/۵۰-۲۰-GF	۲/۲۲	H1-٪۰/۷۵G-٪۰/۲۵B-۲۰	۳/۲۵
-٪۰/۵۰-۱۰۰-BF	۱/۴۹	-٪۰/۵۰-۱۰۰-GF	۱/۹۷	G-٪۰/۲۵B-۱۰۰ H1-٪۰/۷۵	۲/۸۲
-٪۰/۵۰-۳۰۰-BF	۰/۶۲	-٪۰/۵۰-۳۰۰-GF	۰/۸۵	G-٪۰/۲۵B-۳۰۰ H1-٪۰/۷۵	۱/۱۸
-٪۰/۷۵-۲۰-BF	۲/۵	-٪۰/۷۵-۲۰-GF	۲/۷۷		
-٪۰/۷۵-۱۰۰-BF	۱/۸۸	-٪۰/۷۵-۱۰۰-GF	۲/۳۵		
-٪۰/۷۵-۳۰۰-BF	۰/۸۶	-٪۰/۷۵-۳۰۰-GF	۱/۰۳		
-٪۱-۲۰-BF	۲/۸۰	-٪۱-۲۰-GF	۳/۱۵		
-٪۱-۱۰۰-BF	۲/۰۲	-٪۱-۱۰۰-GF	۲/۷۲		
-٪۱-۳۰۰-BF	۰/۹۱	-٪۱-۳۰۰-GF	۱/۱۰		



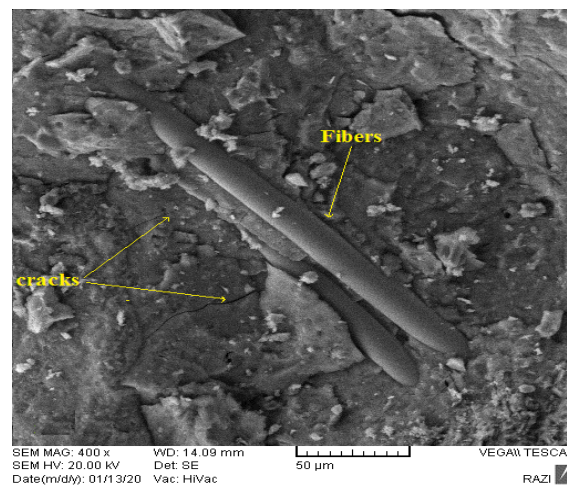
شکل ۱۲. نمونه حاوی ۱٪ الیاف بازالت در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس
 Fig. 12. Specimen containing 1% basalt fibers in 300 °C



شکل ۱۱. نمونه حاوی ۱٪ الیاف شیشه در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس
 Fig. 11. Specimen containing 1% glass fibers in 300 °C



شکل ۱۴. نمونه حاوی ۱٪ الیاف شیشه در دمای ۲۰ درجه سلسیوس
 Fig. 14. Specimen containing 1% glass fibers in 20 °C



شکل ۱۳. نمونه حاوی ۱٪ الیاف شیشه در دمای ۲۰ درجه سلسیوس
 Fig. 13. Specimen containing 1% glass fibers in 20 °C

۴-۶- نتایج عکس های SEM

۳- افزایش دمای نمونه ها تا ۱۰۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس موجب تغییراتی در مقاومت فشاری نمونه ها شده است. مقاومت فشاری نمونه های بدون الیاف در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس کاهش محسوسی نداشته اند، اما در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس ۱۷٪ کاهش مقاومت داشته اند. هنگام استفاده از الیاف تکی، بیشترین کاهش مقاومت فشاری مربوط به نمونه دارای ۱٪ الیاف بازالت در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به میزان ۴۰٪ می باشد.

۴- به کارگیری الیاف بازالت و شیشه به صورت تکی موجب بهبود عملکرد کششی نمونه ها شده است. در دمای ۲۰ درجه سلسیوس با اضافه شدن الیاف بازالت از ۰/۲۵٪ تا ۱٪ حجمی مقاومت کششی به ترتیب ۵/۸٪، ۱۰/۸٪، ۲۰/۷٪، ۲۸/۹٪ افزایش یافت، این افزایش مقاومت کششی در الیاف شیشه به ترتیب ۷٪، ۱۴/۶٪، ۲۵/۴٪، ۳۵/۹٪ شده است. در مقایسه با الیاف تکی استفاده از الیاف ترکیبی موجب بهبود مقاومت کششی شده است. بیشترین افزایش مقاومت کششی مربوط به میزان حجمی ۰/۲۵٪ الیاف بازالت و ۰/۷۵٪ الیاف شیشه به میزان ۳۸/۳٪ می باشد. دلیل این امر بالاتر بودن مقاومت کششی الیاف شیشه نسبت به الیاف بازالت می باشد.

۵- مقاومت خمشی نمونه های مسلح شده با استفاده از الیاف شیشه رشد بیشتری نسبت به نمونه های مسلح شده با استفاده از الیاف بازالت داشته اند. در استفاده از الیاف تکی بیشترین افزایش مقاومت خمشی مربوط به نمونه های حاوی ۱٪ الیاف شیشه به میزان ۴۴/۰۴٪ است. همچنین در نمونه های بتن الیافی مسلح شده با الیاف ترکیبی با میزان حجمی ۰/۲۵٪ الیاف بازالت و ۰/۷۵٪ الیاف شیشه، ۰/۵٪ الیاف بازالت و ۰/۵٪ الیاف شیشه، ۰/۷۵٪ الیاف بازالت و ۰/۲۵٪ الیاف شیشه، نمونه ها شاهد افزایش مقاومت خمشی به میزان ۴۱/۹۶٪، ۳۹/۶۳٪ و ۴۹/۷۴٪ بوده اند. در استفاده از الیاف ترکیبی بیشترین رشد مقاومت کششی مربوط به میزان حجمی ۰/۲۵٪ الیاف بازالت و ۰/۷۵٪ الیاف شیشه به میزان ۴۹/۷۴٪ می باشد. دلیل این امر آن است که با افزودن نسبتی از الیاف بازالت به الیاف شیشه مخلوط متراکم و همگنتری نسبت به دیگر مخلوطها شکل گرفته است.

۶- با افزایش دمای نمونه ها از ۲۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس، مقاومت خمشی نمونه های بدون الیاف ۳۸/۰۸٪ کاهش داشته اند. همچنین در استفاده از الیاف تکی بیشترین کاهش مربوط به نمونه حاوی ۱٪ الیاف بازالت به میزان ۴۶/۳۷٪ می باشد. در استفاده از الیاف ترکیبی کمترین کاهش مقاومت خمشی مربوط به نمونه حاوی ۰/۲۵٪ الیاف بازالت و ۰/۷۵٪ الیاف شیشه به میزان ۴۳/۴۲٪ است.

۷- با افزایش میزان الیاف، انرژی شکست نمونه ها افزایش یافته است.

با توجه به شکل ۱۱ برای نمونه حاوی ۱٪ الیاف شیشه در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، ضعف در چسبندگی بین الیاف و ماتریس بتن مشاهده شده است. همچنین پارگی الیاف از قسمت های دارای ترک مشهود می باشد. با توجه به شکل ۱۲ برای نمونه حاوی ۱٪ الیاف بازالت در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس، ضعف در چسبندگی بین الیاف و ماتریس بتن مشاهده شده است. سطوح الیاف نیز تغییر شکل زیادی داده است که باعث پارگی بیشتر این نوع الیاف نسبت به الیاف شیشه در حجم مشابه شده است. همچنین پارگی الیاف از محل ترک قابل مشاهده می باشد. در شکل ۱۳ الیاف شیشه در دمای ۲۰ درجه سلسیوس نشان داده شده است. مشاهده می شود که چگونه الیاف مانع از گسترش ترک در نمونه می شود. شکل ۱۴ الیاف بازالت در دمای ۲۰ درجه سلسیوس نشان داده شده است. چگونگی چسبندگی صحیح بین الیاف و ماتریس بتن مشخص شده است.

۵- نتیجه گیری

آزمایش های بتن تازه و سخت شده بر روی نمونه های دارای الیاف تکی شیشه و بازالت به میزان حجمی ۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ و ۱٪ و همچنین الیاف ترکیبی با میزان حجمی ۰/۲۵٪ الیاف بازالت و ۰/۷۵٪ الیاف شیشه، ۰/۵٪ الیاف بازالت به همراه ۰/۵٪ الیاف شیشه، و ۰/۷۵٪ الیاف بازالت با ۰/۲۵٪ الیاف شیشه انجام شده است. بر اساس آزمایش های انجام شده نتایج حاصله به شرح زیر است:

۱- با توجه به نتایج آزمایش های بتن تازه، حضور الیاف تکی و ترکیبی موجب کاهش کارایی بتن خودمتراکم سبک می شوند. تمام طرح اختلاطها تا ۱٪ حجمی به صورت تکی و ترکیبی قابلیت های گذرندگی، پر شوندگی و مقاومت در برابر جدایش را پوشش داده اند و استفاده از الیاف در حجم های بالاتر از ۱٪ موجب از بین رفتن خصوصیات خود تراکمی می شوند.

۲- استفاده از الیاف به صورت تکی در دمای ۲۰ درجه سلسیوس باعث کاهش مقاومت فشاری بتن خودمتراکم سبک می شوند. کاهش مقاومت در الیاف بازالت به ترتیب ۴/۹۶٪، ۳/۴۵٪، ۵/۳۰٪، ۶/۲۸٪ شده است. همچنین کاهش مقاومت فشاری در الیاف شیشه به ترتیب ۱/۹۱٪، ۲/۱۰٪، ۴/۰۸٪، ۴/۷۷٪ شده است. دلیل این امر را می توان افزایش فضاهای خالی در استفاده از درصد های بالاتر الیاف دانست، که این فضاهای خالی خودبه خود سبب افزایش تخلخل در نمونه ها شده، مقاومت فشاری آن ها را کاهش می دهد.

- concrete.” *Construction and Building Materials*, 23.5 (2009): 2087–2092.
- [7] Maghsoudi, A. A., Mohamadpour, S. H., and Maghsoudi, M. “Mix design and mechanical properties of self compacting light weight concrete.” *Int. J. Civil Eng.* (2011): 230-236.
- [8] Madandoust, R., Ranjbar, M. M., and Mousavi, S. Y. “An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene.” *Construction and Building Materials*, 25.9 (2011): 3721-3731.
- [9] Kizilkanat, A. B., Kabay, N., Akyüncü, V., Chowdhury, S., and Akça, A. H. “Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study.” *Construction and Building Materials*, 100 (2015): 218-224.
- [10] Algin, Z. and Ozen, M. “The properties of chopped basalt fibre reinforced self-compacting concrete.” *Construction and Building Materials*, ۶۸۵-۶۷۸ : (۲۰۱۸) ۱۸۶.
- [11] Niaki, M. H., Fereidoon, A., and Ahangari, M. G. “Experimental study on the mechanical and thermal properties of basalt fiber and nanoclay reinforced polymer concrete.” *Composite Structures*, 191 (2018): 231-238.
- [12] Sun, W., Chen, H., Luo, X., and Qian, H. “Effect of Hybrid Fibers and Expansive Agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete.” *Cement and concrete research*, 31.4 (2001): 595-601.
- [13] Iqbal, S., Ali, A., Holschemacher, K., and Bier, T. A. “Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC).” *Construction and Building Materials*, 98 (2015): 325-333.
- [14] Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S. H., and Hosseinpour, I. “The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete.” *Construction and Building Materials*, 25.1 (2011): 351-358.
- [15] Grabois, T. M., Cordeiro, G. C., and Toledo Filho, R. D. “Fresh and hardened-state properties of self-compacting
- انرژی شکست نمونه‌های حاوی الیاف ترکیبی رشد بیشتری را نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف تکی داشته‌اند. با افزایش دمای نمونه‌ها از ۲۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس، انرژی شکست نمونه‌های بدون الیاف $\frac{58}{73}\%$ کاهش داشته‌اند. همچنین در استفاده از الیاف تکی بیشترین کاهش مربوط به نمونه حاوی ۱٪ الیاف بازالت به میزان $\frac{67}{5}\%$ می‌باشد. در استفاده از الیاف ترکیبی کمترین کاهش مربوط به نمونه حاوی $\frac{25}{25}\%$ الیاف بازالت و $\frac{75}{75}\%$ الیاف شیشه به میزان $\frac{63}{69}\%$ است.
- ۸- با توجه به نتایج کلیه آزمایش‌های مشخصات مکانیکی و انرژی شکست، توصیه می‌شود که از الیاف ترکیبی حاوی $\frac{25}{25}\%$ الیاف بازالت و $\frac{75}{75}\%$ الیاف شیشه برای ساخت بتن‌های خود متراکم سبک الیافی استفاده گردد.

منابع

- [1] Mazloom, M., and Salehi, H. “The relationship between fracture toughness and compressive strength of self-compacting lightweight concrete.” Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (2018).
- [2] Salehi, H., and Mazloom, M. “Opposite effects of ground granulated blast-furnace slag and silica fume on the fracture behavior of self-compacting lightweight concrete.” *Construction and Building Materials*, 222 (2019): 622-632.
- [3] Kaffetzakis, M., and Papanicolaou, C. C. “Lightweight aggregate self-compacting concrete (LWASCC) semi-automated mix design methodology.” *Construction and Building Materials*, 123 (2016): 254-260.
- [4] Karamloo, M., Mazloom, M., Payganeh, G. “Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete.” *Construction and Building Materials*, 123 (2016b): 508–515.
- [5] Afzali-Naniz, O., and Mazloom, M. “Effects of colloidal nanosilica on fresh and hardened properties of self-compacting lightweight concrete.” *Journal of Building Engineering*, 20 (2018): 400–410.
- [6] Wu, Z., Zhang, Y., Zheng, J., and Ding, Y. “An experimental study on the workability of self-compacting lightweight

- [23] Self-Compacting Concrete European Project Group. The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use. International Bureau for Precast Concrete (BIBM), 2005.
- [24] ASTM C192/C192 M, Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory, ASTM International.
- [25] ASTM C39/C39 M, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International.
- [26] ASTM C496/C496 M, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International.
- [27] ASTM C1609/C1609 M, Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading), ASTM International.
- [28] Jiang, C., Fan, K., Wu, F. and Chen, D. "Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fiber reinforced concrete." *Materials and Design*, 58 (2014): 187-193.
- [29] Liu, X., Wu, T., Yang, X. and Wei, H. "Properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel and polypropylene fibers." *Construction and Building Materials*, 226 (2019): 388-398.
- [30] Barnat-Hunek, D., Góra, J., Andrzejuk, W. and Łagód, G. "The Microstructure-Mechanical Properties of Hybrid Fibres-Reinforced Self-Compacting Lightweight Concrete with Perlite Aggregate." *Materials*, 11.7 (2018): 1093.
- [31] Mazloom, M. and Mirzamohammadi, S. "Fracture of fibre-reinforced cementitious composites after exposure to elevated temperatures". *Magazine of Concrete Research*, (2019): 1-36.
- lightweight concrete reinforced with steel fibers." *Construction and Building Materials*, 104 (2016): 284-292.
- [16] Mazloom, M., and Mirzamohammadi, S. "Thermal effects on the mechanical properties of cement mortars reinforced with aramid, glass, basalt and polypropylene fibers." *Advances in Materials Research*, 8.2 (2019): 137-154.
- [17] Aslani, F., Sun, J., Bromley, D. and Ma, G. "Fiber-reinforced lightweight self-compacting concrete incorporating scoria aggregates at elevated temperatures." *Structural Concrete*, 20.3 (2019): 1022-1035.
- [18] Karamloo, M., Afzali-Naniz, O., and Doostmohamadi, A. "Impact of using different amounts of polyolefin macro fibers on fracture behavior, size effect, and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete." *Construction and Building Materials*, ۲۰۰ 118856 :(2020).
- [19] Aslani, F., Sun, J., and Huang, G. Mechanical Behavior of Fiber-Reinforced Self-Compacting Rubberized Concrete Exposed to Elevated Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(12), (2019) 04019302.
- [20] Atewi, Y. R., Hasan, M. F., and Güneyisi, E. "a Fracture and permeability properties of glass fiber reinforced self-compacting concrete with and without nanosilica". *Construction and Building Materials*, 226 (2019): 993-1005.
- [21] Branston, J., Das, S., Kenno, S.Y. and Taylor, C. "Mechanical behavior of basalt fibre reinforced concrete". *Construction and Building Materials*, 124 (2016): 878-886.
- [22] Güneyisi, E., Atewi, Y.R. and Hasan, M.F. "Fresh and rheological properties of glass fiber reinforced self-compacting concrete with nanosilica and fly ash blended." *Construction and Building Materials*, 211 (2019): 349-362.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mazloom , S. Lotfi Ahangar Kolaee , *Evaluating the influence of temperature and fiber type on the mechanical properties of self-compacting lightweight concrete* , *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(9) (2021) 4007-4028.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18185.6794](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18185.6794)

