نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۵، سال ۱۴۰۰، صفحات ۲۰۶۳ تا ۲۰۹۰
DOI: 10.22060/ceej.2020.17288.6516

بررسی تأثیر الیاف شیشه و مواد پوزولانی در دمای بالا بر روی مقاومت خمشی بتن با روش پیش‌مخلوط و اسپری

علی جدیدی[۱]، احسان اله ضیغمی[۲*]

[۱] دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران.
[۲] دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران.

خلاصه: در این مقاله از الیاف شیشه و مواد پوزولانی با درصد های مختلف استفاده شده است. به منظور بررسی مقاومت خمشی و شاخص های طاقت در بتن تولید شده به دو روش پیش‌مخلوط و اسپری، ۱۵ طرح اختلاط حاوی درصد های مختلف الیاف شیشه و مواد پوزولانی در روش پیش‌مخلوط و ۱۴ طرح اختلاط در روش اسپری، مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنین کلیه طرح‌های اختلاط در دمای ۳۵۰، ۶۵۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد مورد آزمایش قرار گرفتند و نتایج حاصل با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی ((SEM مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده، مسلح کردن بتن به الیاف شیشه، باعث افزایش قابل توجه مدول گسیختگی می شود. استفاده از مواد پوزولانی در نمونه های تقویت شده با الیاف شیشه، باعث بهبود مدول گسیختگی می شود. مدول گسیختگی در حضور حرارت و در صورت آتش‌سوزی به شدت کاهش می‌یابد که برای کنترل این روند کاهشی روش اسپری عملکرد بهتری دارد. همچنین در صورت استفاده از متاکائولین در درصدهای مختلف ۱۰ و ۱۵ می‌توان مقاومت خمشی نمونه‌های تحت حرارت بالا (۱۰۰۰ درجه سانتیگراد) را تا میزان قابل توجهی افزایش داد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۸
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۰۲
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۱۱

کلمات کلیدی:
الیاف شیشه
میکروسیلیس
متاکائولین
آتش‌سوزی
دستگاه SEM.

۱- مقدمه

با توجه به ضخامت و وزن پایین قطعات ساخته شده توسط بتن تقویت شده با الیاف شیشه، استفاده از آرماتور در ساخت این محصولات غیرممکن است. به همین منظور در این شرایط برای بهبود رفتار بتن تحت بارهای کششی و خمشی و افزایش طاقت، از الیاف شیشه استفاده می شود. از بتن تقویت شده با الیاف شیشه می‌توان به منظور ساخت قطعات در اشکال و طرح های مختلف استفاده کرد. در گذشته از این بتن تنها در تولید محصولاتی با کاربرد غیرسازه ای در ترمیم ساختمان ها، آستر فاضلاب، پوشش تونل ها، دیوار محافظ بستر رودخانه و موانع صوتی، استفاده شده است. اما در سال های اخیر، این بتن به عنوان ماده ای با کاربرد سازه ای قابل قبول در ساخت کف سالن های صنعتی، سقف های پیش‌ساخته و برج های مخابراتی، مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. مهم ترین الیافی که برای تقویت بتن به طور وسیع استفاده می شود الیاف شیشه است. اولین بررسی های انجام شده پیرامون تأثیر الیاف شیشه بر روی خواص بتن، به اواخر دهه ی ۱۹۵۰ میلادی بر می‌گردد [۲]. چویی و همکاران به بررسی رابطه ی بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری بتن های تقویت شده با الیاف شیشه (GFRC) و الیاف پلی پروپیلن (PFRC) پرداختند. آن ها در این تحقیق از الیاف شیشه ی مقاوم در محیط قلیایی به طول ۱۹ میلی متر و الیاف پلی پروپیلن به طول ۵۰ میلی متر استفاده کردند. در این مطالعه از الیاف شیشه و الیاف پلی پروپیلن به میزان ۱% و ۱/۵% حجمی بتن استفاده شد. پس از ساخت نمونه ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان الیاف شیشه از ۱% به ۱/۵%، کارایی بتن به شدت کاهش یافته و توزیع یکپارچه ی الیاف در ملات غیر ممکن می شود [۳]. مستوفی نژاد و

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: phd.civil.zeighami@gmail.com

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 فرمائید.

همکاران مطالعه ای را بر روی خواص مکانیکی بتن مسلح به الیاف شیشه با توجه به درصدهای مختلف الیاف و نسبت های مختلف شن به ماسه انجام دادند. در این تحقیق آن ها از چهار درصد مختلف الیاف شیشه (۰% ، ۱/۵%، ۳% ، ۴/۵%) استفاده کردند. آن ها پس از بررسی مقاومت فشاری نمونه های تقویت شده با الیاف شیشه به این نتیجه رسیدند که در صورت استفاده از ۴/۵% الیاف شیشه، مقاومت فشاری به دلیل پدیده ی گلوله شدن الیاف کاهش می یابد [۴]. بنتور و همکارانش روش متفاوت برای ساخت بتن مسلح به الیاف شیشه پیشنهاد کردند. در این روش رشته های الیاف شیشه قبل از اینکه در ماتریس سیمان گنجانیده شوند، در دوغاب میکروسیلیس قرار داده می شدند. آن ها پس از انجام آزمایش خمش چهار نقطه ای به این نتیجه رسیدند که پس از ۲۸ روز قرار گرفتن در آب داغ ۵۰ درجه سانتیگراد، مدول گسیختگی[1] و طاقت نمونه ها در حالتی که الیاف در دوغاب میکروسیلیس غوطه ور شده است، افت چندانی نخواهد داشت. نتایج به دست آمده از این قرار بود که مدول گسیختگی نمونه هایی که الیاف آن ها در دوغاب غوطه ور شدند، پس از پنج ماه قرار گرفتن در شرایط سخت تغییر چندانی از خود نشان نمی‌دهد؛ اما در شرایطی که از الیاف شیشه به تنهایی استفاده شود، مدول گسیختگی فقط در یک ماه اول حدود ۶۰% کاهش می یابد. آن ها نشان دادند که تمام کامپوزیت های ساخته شده از الیاف غوطه ور در دوغاب میکروسیلیس، به طور قابل توجهی در طول زمان خصوصیات مکانیکی خود را حفظ می‌کنند، این در حالی است که بهبود کمی در خواص بتن با جایگزینی میکروسیلیس به جای سیمان در بتن به دست آمد [۵]. چان و همکارش بتن‌های توانمند حاوی میکروسیلیس، در معرض حرارت ۸۰۰ درجه سانتیگراد و به مدت زمان یک ساعت که به صورت تدریجی خنک شده بودند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اُفت مقاومت فشاری در نمونه‌های بتنی توانمند در مقایسه با نمونه‌های شاهد زیادتر بوده، ولی همچنان مقاومت فشاری باقی‌مانده‌ی نمونه‌های بتنی توانمند در مقایسه با نمونه‌های شاهد بیشتر است [۶]. مطالعات الغادی و الزایدین بر روی مقاومت فشاری در نمونه‌های بتنی استوانه‌ای و مکعبی در معرض حرارت‌های ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد نشان داد که در نمونه‌های بتنی در معرض حرارت‌های ۲۰۰و ۴۰۰ درجه سانتیگراد تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری باقی‌مانده نداشته، ولی در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد، تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته است .همچنین بررسی اشکال نمونه‌های بتنی نشان داد که نمونه‌های مکعبی نسبت به نمونه‌های استوانه‌ای در هنگام مواجهه با حرارت‌های زیاد از عملکرد بهتری به دلیل توزیع نامناسب حرارت در داخل بافت بتن برخوردار می‌باشند [۷]. بررسی‌های دوگنسی و همکاران بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی الیاف فولادی در معرض دماهای ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد که پس از مواجهه با حرارت به طور آهسته در معرض هوا خنک شده بودند، نشان داد که نمونه شاهد دارای بیشترین مقادیر درصد اُفت مقاومت فشاری در تمامی نمونه‌ها بوده و همچنین حضور الیاف فولادی در نمونه‌های بتنی در معرض دماهای بالای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد در مقایسه با دمای ۹۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری باقی‌مانده نداشته است [۸]. تحقیقات ندیم و همکارانش بر روی مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در معرض حرارت‌های زیاد تحت دو تیپ خنک شدن سریع با استفاده از آب و خنک شدن آهسته با قرار گرفتن در معرض هوا، به این نتایج منجر شد که خنک شدن سریع نمونه‌های حرارت دیده، سبب ایجاد یک شوک حرارتی در الیاف های بتن گردید و در نهایت منجر به اُفت بیشتر مقاومت در مقایسه با نمونه‌های خنک شده در معرض هوا شد. همچنین عمده اُفت مقاومت برای هر دو سیستم خنک شدن، در دماهای بالای ۴۰۰ درجه سانتیگراد مشاهده شد [۹]. امروزه آتش‌سوزی و اقدامات تروریستی مانند انفجار یکی از تهدیدات مهم تخریب سازه‌ها می‌باشند. نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های مختلف بر خصوصیات مکانیکی بتن‌های در معرض حرارت تأثیر دارد. از این رو به منظور بررسی بیشتر، در تحقیق حاضر از الیاف شیشه به مقدار ۱/۵ درصد تا ۶ درصد وزن بتن، برای ساخت نمونه‌ها جهت بررسی اثرات حرارت بر بتن الیافی استفاده گردید. اثر تأثیرات مواد پوزولانی بر روی مدول گسیختگی بتن در درجه حرارت بالا، استفاده از روش‌های مختلف اختلاط (پیش‌مخلوط و اسپری) و همچنین تأثیر حرارت بالا و گذر زمان بر شکل ظاهری الیاف از موارد مهم ارزیابی می‌باشند.

۲- برنامه آزمایش و روش تحقیق

تحقیق حاضر با هدف بررسی درجه حرارت بالا بر روی مقاومت کششی بتن مسلح به الیاف شیشه با دو روش عمل‌آوری پیش‌مخلوط

1 Module of rupture

شکل ۱. دستگاه خمش چهار نقطه ای
Fig. 1. Four-point bending machine

و اسپری، بهبود عملکرد مقاومت کششی در درجه حرارت بالا با استفاده از مواد پوزولانی در هر دو روش اختلاط، بررسی شکل ظاهری الیاف شیشه در درجه حرارت بالا و تأثیرات میکروسیلیس، متاکائولین و نانوسیلیس بر روی مدول گسیختگی بتن در درجه حرارت بالا می‌پردازد.

۱-۲- آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای

آزمایش خمش بر اساس استاندارد های BS-EN۱۱۷۰-۵ [۱۰] و ASTM C۷۸ [۱۱] به وسیله‌ی دستگاه خمش چهار نقطه ای (شکل ۱) انجام می شود. در این روش به منظور ترسیم نمودار بار - تغییرمکان، از سه جابه‌جایی سنج الکترونیکی استفاده می شود. این جابه‌جایی سنج ها باید به گونه ای نصب شوند که بتوان از طریق نتایج ثبت شده در آن ها، جابه‌جایی دقیق مرکز تیر را تعیین کرد. در این تحقیق به منظور بررسی مقاومت خمشی، نمونه های ساخته شده به دو روش پیش‌مخلوط و اسپری پس از ۷ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفته اند.

۲-۲- طاقت بتن

معمولاً طاقت بتن تحت بارگذاری خمشی و بر اساس رفتار خمشی تیر با تکیه گاه های ساده تعیین می شود. علاوه بر آزمایش خمش، از آزمایش ضربات چکش نیز برای محاسبه ی طاقت بتن استفاده می شود. به طور معمول از بارگذاری خمشی برای محاسبه ی طاقت در بتن های مسلح به الیاف شیشه استفاده می شود. با توجه به استاندارد های مربوط به آزمایش طاقت خمشی مانند ASTM C۱۰۱۸ [۱۲]، مقادیر طاقت از تحلیل منحنی بار- تغییرمکان محاسبه می شود. در این تحقیق به منظور بررسی طاقت بتن مسلح به الیاف از استاندارد ASTM C۱۰۱۸ استفاده می شود. در این روش، رفتار تیر های بتنی تحت بار های ناشی از خمش چهار نقطه ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. استاندارد ASTM C۱۰۱۸، طاقت را به صورت تابعی از سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان تا یک تغییر شکل معین تعریف می‌کند. در این روش به منظور بررسی طاقت نمونه های تحت خمش تا رسیدن به یک جابه‌جایی مشخص، از شاخص های طاقت و فاکتور های مقاومت باقی‌مانده که در زیر معرفی شده اند، استفاده می شود. ۱- شاخص طاقت I_5: شاخص مربوط به جابه‌جایی معادل با ۳ برابر جابه‌جایی در لحظه ی اولین ترک. ۲- شاخص طاقت I_{10}: شاخص مربوط به جابه‌جایی معادل با ۵/۵ برابر جابه‌جایی در لحظه ی اولین ترک. ۳- شاخص طاقت I_{20}: شاخص مربوط به جابه‌جایی معادل با ۱۰/۵ برابر جابه‌جایی در لحظه ی اولین ترک. پارامتر های استفاده شده در این قسمت عبارتند از:

الف) $R_{5.10}$: این پارامتر بیان‌کننده ی میزان تحمل تیر در برابر بار های وارده، در فاصله ی بین جابه‌جایی معادل شاخص های طاقت I_5 و I_{10} می‌باشد.

$$R_{5.10} = 20 \times (I_{10} - I_5) \qquad (۱)$$

$R_{10.15}$: این پارامتر بیان‌کننده ی میزان تحمل تیر در برابر بار های وارده، در فاصله ی بین جابه‌جایی معادل شاخص های طاقت I_{10} و I_{20} می‌باشد.

$$R_{10.20} = 10 \times (I_{20} - I_{10}) \quad (۲)$$

۳-۲- مصالح مصرفی

در این تحقیق تنها از ریز دانه (ماسه ی سیلیسی) استفاده شده است. باید به این نکته توجه داشت که به منظور داشتن یک بتن با کیفیت بالا، رعایت ملزومات آئین‌نامه ی ASTM C۳۳ [۱۳] الزامی می‌باشد. همچنین در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ یک کارخانه ی سیمان اصفهان استفاده شده است. آب استفاده شده در این تحقیق، از آب شرب شهر اراک تهیه شده است که از نظر کیفیت مورد قبول می‌باشد. در این تحقیق از درصد های مختلف میکروسیلیس، متاکائولین و نانوسیلیس، به صورت جایگزین مواد سیمانی در طرح اختلاط بتن مسلح به الیاف شیشه استفاده شده است. پوزولان‌های استفاده شده در این تحقیق، محصول شرکت صنایع فرو آلیاژ ایران می‌باشد. نانوسیلیس استفاده شده در این تحقیق، با نام صنعتی اروزیل، محصول شرکت اونیک آلمان می‌باشد. در این تحقیق از فوق‌روان کننده ی WD ۵۰۰، تولیدی شرکت آرمان شیمی استفاده شده است. برای ساخت بتن به دو روش پیش‌مخلوط و اسپری، از دو نوع الیاف شیشه استفاده شده است. مشخصات کارخانه ای الیاف شیشه ی استفاده شده در این تحقیق به شرح جداول ۱ و ۲ می‌باشد.

۳- طرح اختلاط

به طور کلی در این تحقیق ۲۹ طرح اختلاط مورد مطالعه قرار گرفت. برای طرح اختلاط بتن مورد استفاده در هر دو روش پیش‌مخلوط و اسپری از روش اختلاط استاندارد آئین‌نامه ACI-۲۱۱ [۱۶] استفاده شده است.

نام گذاری و جزئیات مربوط به طرح های ساخته شده در روش پیش‌مخلوط و روش اسپری به ترتیب در جداول ۳ و ۴ نشان داده

جدول ۱. مشخصات الیاف شیشه ای استفاده شده در روش پیش‌مخلوط [۱۴]

Table 1. Specifications of glass fibers used in the pre-mixed method [14]

مشخصه‌ی موردنظر	مقدار
نوع الیاف	AR-GLASS
درصد زیرکونیوم	بیشتر از ٪۱۶
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۲/۸
مقاومت کششی (N/m^2)	۱/۵
کرنش گسیختگی	٪۲
مدول الاستیسیته (GN/m^2)	۷۵

جدول ۲. مشخصات الیاف شیشه ی استفاده شده در روش اسپری [۱۵]

Table 2. Specifications of glass fibers used in the spray method [15]

مشخصات	الیاف شیشه
نوع الیاف	AR-GLASS
قطر رشته‌ها (mμ)	۱۶
کرنش در نقطه شکست	٪۲/۴
چگالی دسته‌ی الیاف (TEX)	۲۳۸۷
مقاومت نهایی (N/Tex)	۰/۵۱
مدول الاستیسیته (N/Tex)	۸۰/۴
وزن مخصوص (gr/cm)	۲/۷
درصد زیرکونیوم	۱۶/۷
درصد رطوبت	۰/۰۷۲

شکل ۲. الیاف شیشه ی مورد استفاده در این تحقیق

Fig. 2. Glass fibers used in this study

جدول ۳. مقادیر مصالح مصرفی در طرح های اختلاط بتن پیش‌مخلوط [۱۷]

Table 3. Quantity of materials consumed in pre-mixed concrete mixing designs

علامت اختصاری	الیاف	میکروسیلیس	متاکائولین	نانوسیلیس	فوق روان کننده	سیمان	ماسه	آب
	بر حسب درصد وزنی بتن	بر حسب درصد وزنی سیمان	بر حسب درصد وزنی سیمان	بر حسب درصد وزنی سیمان	بر حسب درصد وزنی سیمان			
PC	۰	۰	۰	۰	۱	۹۳۹/۰۵۳	۹۳۹/۰۵۳	۳۲۸/۶۷
GF1.5	۱/۵	۰	۰	۰	۱	۹۲۷/۶۳	۹۲۷/۶۳	۳۲۴/۶۷
GF2.5	۲/۵	۰	۰	۰	۱	۹۲۰/۰۱	۹۲۰/۰۱	۳۲۲
GF1.5-SF10	۱/۵	۱۰	۰	۰	۱	۸۳۴/۱۲	۹۱۷/۵۳	۳۲۱/۱۳
GF1.5-SF15	۱/۵	۱۵	۰	۰	۱	۷۹۴/۰۹	۹۱۳/۲	۳۱۹/۶۲
GF1.5-MK10	۱/۵	۰	۱۰	۰	۱	۸۳۲/۴۳	۹۱۵/۶۷	۳۲۰/۴۸
GF1.5-MK15	۱/۵	۰	۱۵	۰	۱	۷۸۹/۷	۹۰۸/۱۸	۳۱۷/۸۶
GF1.5-NS0.75	۱/۵	۰	۰	۰/۷۵	۱	۹۱۹/۹	۹۲۶/۸	۳۲۴/۳۸
GF1.5-NS1.5	۱/۵	۰	۰	۱/۵	۱	۹۱۲/۲۹	۹۲۵/۹۷	۳۲۴/۰۹
GF2.5-SF10	۲/۵	۱۰	۰	۰	۱	۸۲۷/۲۷	۹۱۰	۳۱۸/۵
GF2.5-SF15	۲/۵	۱۵	۰	۰	۱	۷۸۷/۵۷	۹۰۵/۷۱	۳۱۷
GF2.5-MK10	۲/۵	۰	۱۰	۰	۱	۸۲۵/۶	۹۰۸/۱۶	۳۱۷/۸۵
GF2.5-MK15	۲/۵	۰	۱۵	۰	۱	۷۸۳/۲۳	۹۰۰/۷۲	۳۱۵/۲۵
GF2.5-NS0.75	۲/۵	۰	۰	۰/۷۵	۱	۹۱۲/۳۴	۹۱۹/۱۸۵	۳۲۱/۷۱
GF2.5-NS1.5	۲/۵	۰	۰	۱/۵	۱	۹۰۴/۷۹	۹۱۸/۳۷	۳۲۱/۴۳

جدول ۴. مقادیر مصالح مصرفی در طرح های اختلاط بتن اسپری شده [۱۷]

Table 4. Quantities of consumables in sprayed concrete mixing designs

علامت اختصاری	الیاف	میکروسیلیس	متاکائولین	نانوسیلیس	فوق روان کننده	سیمان	ماسه	آب
	بر حسب درصد وزنی بتن	بر حسب درصد وزنی سیمان	بر حسب درصد وزنی سیمان	بر حسب درصد وزنی سیمان	بر حسب درصد وزنی سیمان			
GF4	۴/۰۴	۰	۰	۰	۱	۹۰۸/۵۹	۹۰۸/۵۹	۳۱۸
GF6	۵/۷۲	۰	۰	۰	۱	۸۹۳/۳۵	۸۹۳/۳۵	۳۱۲/۶۷
GF4-SF10	۴/۷	۱۰	۰	۰	۱	۸۱۷	۸۹۸/۷	۳۱۴/۵۴
GF4-SF15	۴/۱۲	۱۵	۰	۰	۱	۷۷۷/۸	۸۹۴/۴۶	۳۱۳/۰۶
GF4-MK10	۴/۲۹	۰	۱۰	۰	۱	۸۱۵/۳۵	۸۹۶/۹	۳۱۳/۹۱
GF4-MK15	۴/۵	۰	۱۵	۰	۱	۷۷۳/۵۱	۸۸۹/۵۳	۳۱۱/۳۴
GF4-NS0.75	۴/۶	۰	۰	۰/۷۵	۱	۹۰۱/۰۱	۹۰۷/۷۷	۳۱۷/۷۲
GF4-NS1.5	۴/۷	۰	۰	۱/۵	۱	۸۹۳/۵۶	۹۰۶/۹۷	۳۱۷/۴۴
GF6-SF10	۵/۸	۱۰	۰	۰	۱	۸۰۳/۳	۸۸۳/۶۳	۳۰۹/۲۷
GF6-SF15	۵/۶	۱۵	۰	۰	۱	۷۶۴/۷۵	۸۷۹/۴۶	۳۰۷/۸۱
GF6-MK10	۵/۹	۰	۱۰	۰	۱	۸۰۱/۶۸	۸۸۱/۸۴۷	۳۰۸/۶۴
GF6-MK15	۶	۰	۱۵	۰	۱	۷۶۰/۵۴	۸۷۴/۶۲	۳۰۶/۱۲
GF6-NS0.75	۶	۰	۰	۰/۷۵	۱	۸۸۵/۹	۸۹۲/۵۵	۳۱۲/۴
GF6-NS1.5	۶/۱	۰	۰	۱/۵	۱	۸۷۸/۵۸	۸۹۱/۷۶	۳۱۲/۱۱

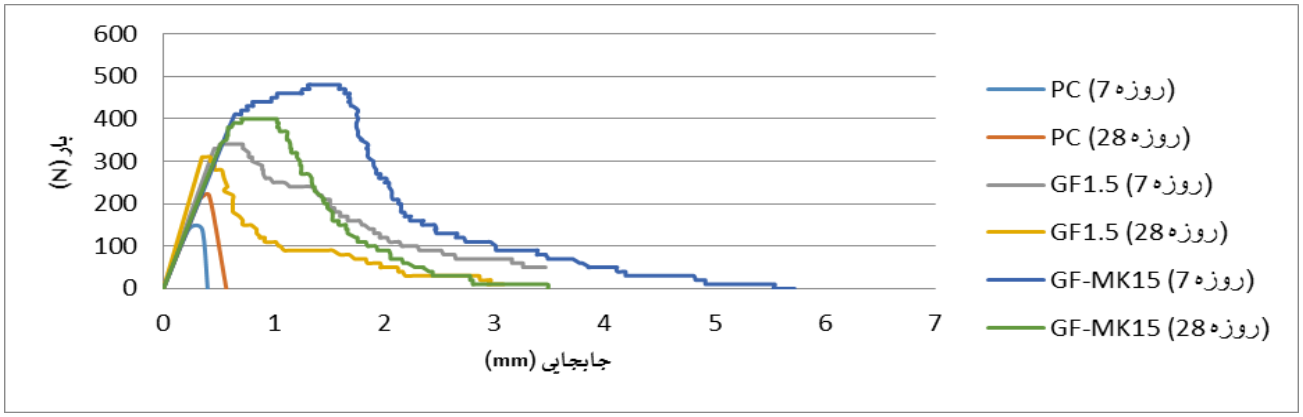
شده است.

۴- نتایج آزمایش‌ها

در ادامه نتایج به دست آمده برای آزمایش‌های انجام شده درج خواهد شد. در این تحقیق به منظور بررسی مقاومت خمشی، نمونه های ساخته شده به دو روش پیش‌مخلوط و اسپری پس از ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مورد آزمایش قرار گرفته اند. در محاسبه ی مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف شیشه باید به این نکته توجه داشت که به دلیل کارایی پایین این بتن، ضخامت نمونه های ساخته شده دارای مقادیر یکسان نمی‌باشد. ضخامت در نمونه های ساخته شده بین ۱۲ الی ۱۷ میلی متر متغیر است. نمودار های بار- تغییرمکان در شکل های ۳ و ۴ بیان گر رفتار خمشی تعدادی از نمونه های تقویت شده با الیاف شیشه در روش های پیش‌مخلوط و اسپری می‌باشد.

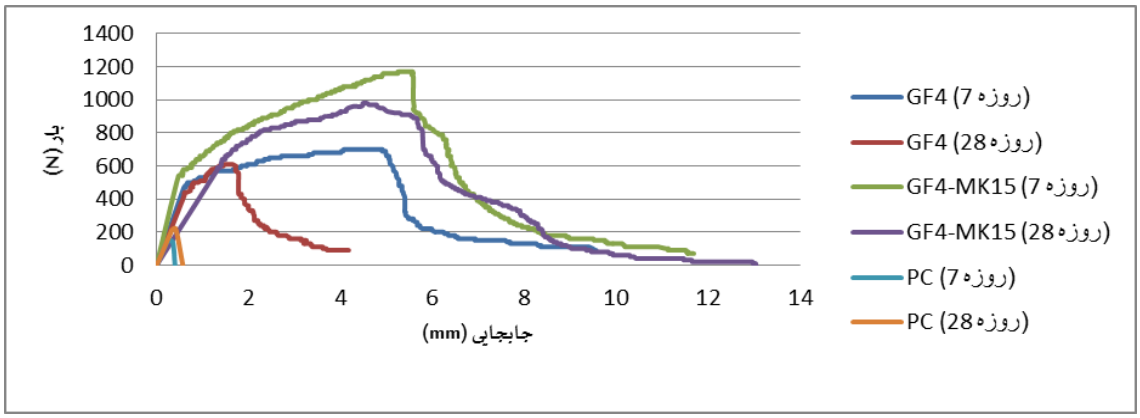
همان‌طور که در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است، با توجه به اینکه در روش اسپری، الیاف شیشه با تراکم مناسب در تمام سطح بتن پراکنده می شود، در این روش استفاده از الیاف با درصد های بالاتری نسبت به بتن ساخته شده در روش پیش‌مخلوط امکان پذیر می‌باشد.

با مقایسه ی نمونه های ساخته شده در روش اسپری با نمونه های ساخته شده در روش پیش‌مخلوط، مشخص است که در روش اسپری بار و جابه‌جایی نمونه ها تا لحظه ی شکست، مقدار بسیار بیشتری نسبت به نمونه های ساخته شده در روش پیش‌مخلوط دارند. در نمونه های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط، حداکثر بار قابل تحمل در بتن، با بار در انتهای ناحیه ی الاستیک (در لحظه ی ایجاد اولین ترک) تقریباً مقدار مشابهی دارد؛ در حالی که نمونه های ساخته شده در روش اسپری، پس از ترک‌خوردگی همچنان افزایش باربری داشته اند . پس از انجام آزمایش خمش و گسیخته شدن نمونه ها، مدول گسیختگی و تنش در لحظه ی اولین ترک در نمونه های مسلح



شکل ۳. نمودار بار- تغییرمکان نمونه هایی از طرح های تقویت شده با ۱/۵٪ الیاف شیشه در روش پیش‌مخلوط پس از ۷ و ۲۸ روز

Fig. 3. Load-displacement diagram from specimens of reinforced designs with 1.5% glass fiber in pre-mixed method after 7 and 28 days



شکل ۴. نمودار بار- تغییرمکان نمونه هایی از طرح های تقویت شده با ۴٪ الیاف شیشه در روش اسپری پس از ۷ و ۲۸ روز

Fig. 4. Load-displacement diagram from specimens of reinforced designs with 4% glass fiber in spray method after 7 and 28 days

به الیاف شیشه، به یکی از دو روش زیر محاسبه می شود

۱- در صورتی که سطح شکست در ناحیه یک سوم میانی تیر قرار گیرد، تنش در لحظه‌ی اولین ترک و مدول گسیختگی از رابطه ی (۳) محاسبه می شوند.

(۳)

دراین رابطه:

σ تنش در نقطه ی موردنظر (MPa) $\quad \acute{o} = PL / bd^2$

P: مقدار بار وارده در نقطه ی مورد نظر (N)

L: طول دهانه (mm)

b: متوسط عرض نمونه در محل گسیختگی (mm)

d: متوسط ارتفاع نمونه در محل گسیختگی (mm)

۲- در صورتی که گسیختگی در خارج از یک سوم میانی تیر و در فاصله ی کمتر از ۵% طول دهانه ی تیر نسبت به آن محدوده رخ دهد، مدول گسیختگی از رابطه ی زیر محاسبه می شود.

(۴)

که در این رابطه a نشان دهنده ی فاصله ی ترک ایجاد شده در سطح کششی تیر تا نزدیک ترین تکیه گاه می‌باشد. $\acute{o} = 3Pa / bd^2$

۳- اگر گسیختگی در خارج از یک سوم میانی تیر و در فاصله ی بیشتر از ۵% طول دهانه نسبت به آن محدوده رخ دهد، نمونه ی مورد نظر فاقد اعتبار می شود.

با توجه به مطالب مذکور، نتایج مربوط به آزمایش خمش در نمونه های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط و روش اسپری به ترتیب در جداول ۵ و ۶ آورده شده است.

همان‌طور که در جداول ۵ و ۶ ملاحظه می شود، مقدار الیاف شیشه ی بکار رفته در طرح های ساخته شده به روش اسپری با یکدیگر متفاوت می‌باشند. در نمونه های ساخته شده به روش اسپری پس از تنظیم میزان الیاف خروجی از دستگاه، ممکن است در طول اجرای بتن، در تنظیمات دستگاه درصدی خطا به وجود آید. با توجه به این امر، پس از انجام تست Wash out، مقدار الیاف شیشه ی محاسبه شده در سه ناحیه ی مختلف قطعه ی ساخته شده، با هم متفاوت می‌باشد. در این شرایط میزان الیاف بکار رفته از میانگین این سه مقدار بدست می آید. لازم به ذکر است که نسبت الیاف با توجه به کارایی بتن انتخاب شده است و تا زمانی که بتن کارایی قابل قبولی داشته باشد، از نسبت‌های بالاتری استفاده می‌شود. ولی به طور کلی درصد الیاف بالا از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد. به منظور مقایسه ی مقاومت خمشی نمونه های ساخته شده به دو روش پیش‌مخلوط و اسپری، نمودار مقایسه ی مدول گسیختگی آن ها در زمان های ۷ روز، ۲۸ روز و ۹۰ روز در شکل های ۵ و ۶ ارائه شده است.

با دقت به شکل های ۵ و ۶ مشاهده می‌گردد که از بین طرح های اختلاط، بیشترین مدول گسیختگی پس از گذشت ۷ روز مربوط به نمونه های حاوی ۱۵% متاکائولین و پس از گذشت ۹۰ روز، مربوط به نمونه های حاوی ۱۰% متاکائولین می‌باشد. با یک نگاه کلی مشاهده می شود که مدول گسیختگی به ترتیب از طرح های دارای متاکائولین به طرح های دارای میکروسیلیس و سپس به طرح های فاقد مواد پوزولانی و در نهایت به طرح های دارای نانوسیلیس کاهش می یابد. در جداول ۷ الی ۱۲ نتایج مربوط به شاخص های طاقت و درصد تحمل بار در طرح های اختلاط بعد از ترک‌خوردگی نمونه ها، ارائه شده است.

جهت بررسی مقادیر شاخص I_5 در بتن مسلح به الیاف شیشه، نمودار های تغییرات شاخص I_5، پس از گذشت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در شکل های ۷ و ۸ ترسیم شده است. بر این اساس، نمودار ۷ میزان تغییرات شاخص I_5 را در نمونه های تقویت شده با ۱/۵% و ۲/۵% الیاف شیشه به روش پیش‌مخلوط و نمودار ۸، تغییرات شاخص I_5 را در نمونه های تقویت شده با ۴% و ۶% الیاف شیشه به روش اسپری نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۷ مشاهده می شود که مسلح کردن نمونه های بتنی به الیاف شیشه، مقادیر شاخص طاقت را به شدت افزایش می‌دهد. با توجه به این نتایج، مقادیر مربوط به شاخص I_5 در نمونه های شاهد برابر یک بوده است. به عبارت دیگر، میزان تغییر شکل پس از ایجاد اولین ترک در نمونه های فاقد الیاف شیشه، به اندازه ای نیست که بتوان شاخص طاقت را برای تغییر شکلی معادل با ۳ برابر تغییرشکل در لحظه ی ایجاد اولین ترک محاسبه کرد. در نمونه های حاوی الیاف، با افزایش میزان الیاف شیشه، شاخص I_5 به مقدار کمی افزایش یافته است.

با مقایسه ی مقادیر شاخص I_5 در نمونه های تقویت شده با الیاف شیشه و حاوی میکروسیلیس و متاکائولین با نمونه های تقویت شده با الیاف شیشه و فاقد مواد پوزولانی، مشاهده می شود که مقادیر

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت خمشی برای نمونه های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط

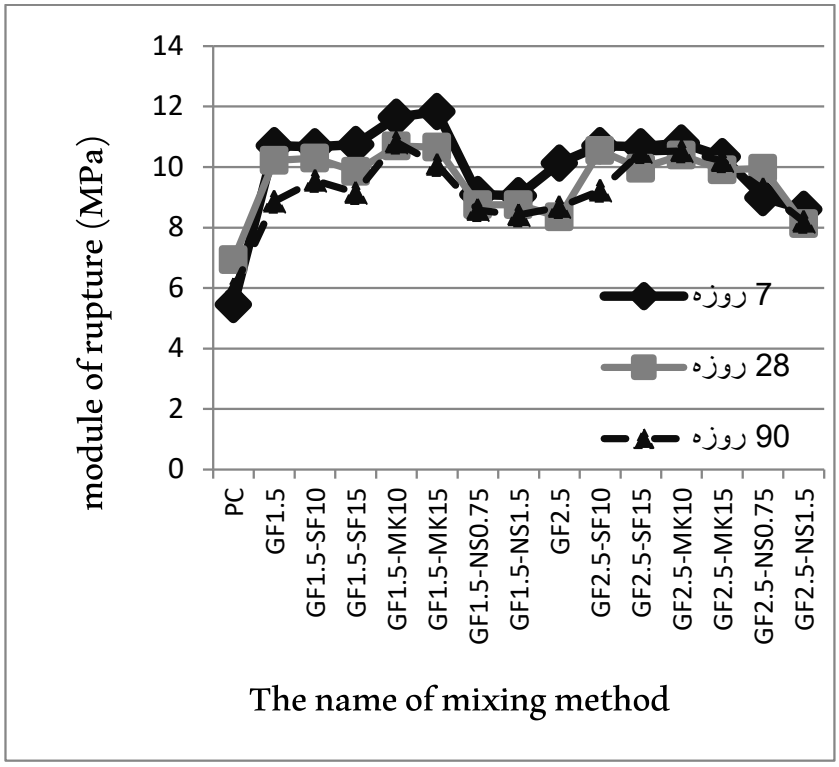
Table 5. Results of bending strength test for specimens made by pre-mixed method

نام طرح	نمونه‌های ۷ روزه		نمونه‌های ۲۸ روزه		نمونه‌های ۹۰ روزه	
	LOP **(MPa)**	***MOR*** **(MPa)**	***LOP*** **(MPa)**	***MOR*** **(MPa)**	***LOP*** **(MPa)**	***MOR*** **(MPa)**
PC	۵/۴۶	۵/۴۶	۶/۳	۶/۹۳	۵/۵۹۶	۵/۹۶
GF1.5	۱۰/۳۹	۱۰/۷۱	۱۰/۲۲	۱۰/۲۲	۸/۸۶	۸/۸۶
GF1.5-SF10	۹/۳	۱۰/۶۷	۸/۵۲	۱۰/۲۹	۸/۹۹	۹/۵۵
GF1.5-SF15	۱۰/۷۴	۱۰/۷۴	۹/۱	۹/۸۶	۸/۷۹	۹/۱۵
GF1.5-MK10	۹/۷۶	۱۱/۶۵	۸/۴۲	۱۰/۶۹	۱۰/۵	۱۰/۸۲
GF1.5-MK15	۱۰/۱	۱۱/۸۳	۹/۰۶	۱۰/۶۶	۷/۴۲	۱۰/۰۸
GF1.5-NS0.75	۸/۴۸	۹/۰۹	۸/۴	۸/۷۵	۸/۵۸	۸/۵۸
GF1.5-NS1.5	۸/۷	۹/۰۵	۸/۳۵	۸/۷۵	۸/۰۷۶	۸/۴۱
GF2.5	۸/۷۲	۱۰/۱۳	۸/۷۳	۹/۰۵	۸/۱۵	۸/۶۸
GF2.5-SF10	۱۰/۱	۱۰/۷۱	۹/۳۷	۱۰/۵۴	۹/۹۹	۹/۲۲
GF2.5-SF15	۸/۵۳	۱۰/۶۷	۹/۶۹	۹/۹۶	۹/۶	۱۰/۵
GF2.5-MK10	۹/۶۸	۱۰/۷۹	۹/۱۳۶	۱۰/۳۹	۸/۸۹	۱۰/۵۳
GF2.5-MK15	۸/۰۲	۱۰/۳۵	۸/۳۱	۹/۹۱	۸/۸۴	۱۰/۲
GF2.5-NS0.75	۷/۲۹	۸/۹۹	۸/۳۴	۹/۳۵	۸/۷	۹/۱۱
GF2.5-NS1.5	۷/۵۲	۸/۶	۷/۳۷	۸/۱۳۱	۷/۸۷	۸/۱۹

جدول ۶. نتایج آزمایش مقاومت خمشی ۹۰ روزه برای نمونه های ساخته شده به روش اسپری

Table 6. Results of 90-day bending strength test for specimens made by spray method

نام طرح	P_{LOP} (N)	Δ_{LOP} (mm)	***LOP*** (MPa)	P_{MOR} (N)	Δ_{MOR} (mm)	***MOR*** (MPa)	نتایج تست Wash out
GF4	۴۸۰	۶/۰۵	۱۲/۴۲	۷۵۰	۲۹/۰۵	۱۹/۴	۴/۰۴٪
GF4-SF10	۵۴۰	۴/۴	۱۳/۳	۸۲۰	۵۱/۶	۲۰/۱۹۵	۴/۷٪
GF4-SF15	۵۱۰	۳	۱۴	۷۴۰	۳۱/۳	۲۰/۳	۴/۱۲٪
GF4-MK10	۵۶۰	۸	۱۱/۳۹	۱۰۶۰	۳۹/۳	۲۱/۵۷	۴/۲۹٪
GF4-MK15	۵۳۰	۵/۴	۱۲/۱۷۸	۹۰۰	۲۲/۳۸	۲۰/۶۸	۴/۵٪
GF4-NS0.75	۴۷۰	۴/۹	۱۳/۰۲	۶۸۰	۲۸/۸	۱۸/۸	۴/۶٪
GF4-NS1.5	۴۶۰	۴/۶	۱۲/۱۹	۶۵۰	۱۴/۶	۱۷/۲۲	۴/۷٪
GF6	۴۱۰	۵/۷	۱۲/۰۳	۷۰۰	۳۱/۷۵	۲۰/۵۴	۵/۷۲٪
GF6-SF10	۴۸۰	۲/۶	۱۴/۲۸	۸۳۰	۴۵/۴۲	۲۴/۷	۵/۸٪
GF6-SF15	۵۷۰	۵/۶۵	۱۳/۶۸	۹۸۰	۵۲/۷۵	۲۳/۵	۵/۶٪
GF6-MK10	۳۴۰	۵/۵	۱۰/۴	۷۷۰	۳۹/۸	۲۳/۵۷	۵/۹٪
GF6-MK15	۴۸۰	۶	۱۳/۱۷	۸۴۰	۳۲/۳	۲۳/۰۵	٪۶
GF6-NS0.75	۵۴۰	۱/۸	۱۳/۰۹	۷۸۰	۳۵	۱۸/۹۱	٪۶
GF6-NS1.5	۲۸۰	۳/۲	۷/۰۷	۵۷۰	۳۹/۷۵	۱۴/۴۰۸	۶/۱٪



شکل ۵. مدول گسیختگی در تمام طرح های اختلاط ساخته شده به روش پیش‌مخلوط

Fig. 5. Rupture modulus in all mixing designs made by pre-mixing method

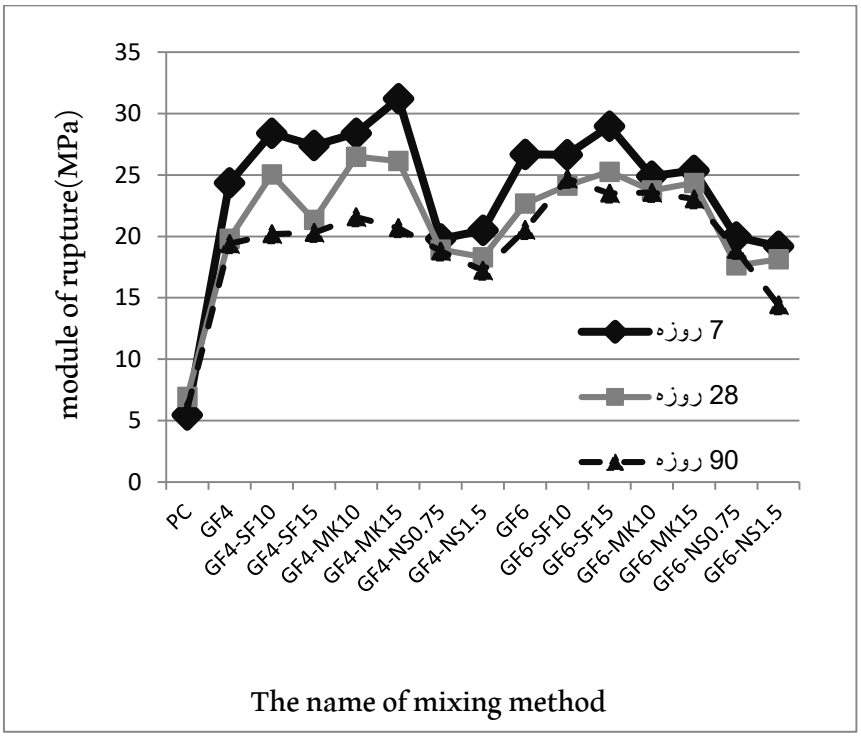
شاخص I_5 در بتن مسلح به الیاف شیشه و حاوی مواد پوزولانی، بیشتر از مقادیر شاخص I_5 در نمونه های فاقد مواد پوزولانی می‌باشد. با توجه به این نتایج، استفاده از متاکائولین در نمونه های تقویت شده با ۲/۵% الیاف شیشه، بیشترین مقدار را برای شاخص I_5 به همراه دارد. در نمونه های حاوی نانوسیلیس، به دلیل کاهش کارایی بتن و توزیع نامناسب الیاف در سطح بتن، شاخص I_5 به شدت کاهش یافته است. با بررسی شکل ۸، ملاحظه می شود که در روش اسپری نیز افزایش میزان الیاف شیشه باعث افزایش کم شاخص I_5 می شود.

به طور مثال با افزایش میزان الیاف شیشه از ۴% به ۶%، شاخص I_5 به طور متوسط به میزان ۱/۹۵% افزایش یافته است. با توجه به این نتایج استفاده از ۱۵% میکروسیلیس و ۱۵% متاکائولین، بیشترین مقادیر را برای شاخص I_5 در نمونه های تقویت شده با ۴% الیاف شیشه، و استفاده از ۱۵% متاکائولین بیشترین مقادیر شاخص I_5 را در نمونه های تقویت شده با ۶% الیاف شیشه به همراه دارد. با جایگزین کردن ۱۵% میکروسیلیس در نمونه های حاوی ۴% الیاف شیشه، شاخص I_5 به طور متوسط به میزان ۶% نسبت به نمونه های تقویت شده با ۴% الیاف شیشه و فاقد مواد پوزولانی، افزایش یافته است.

با دقت در شکل های ۹ و ۱۰، مشاهده می‌گردد که شاخص I_{10} در نمونه های ساخته شده به دو روش پیش‌مخلوط و اسپری، با افزایش میزان الیاف شیشه ی مورد استفاده، افزایش می یابد. به طور مثال در نمونه های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط، با افزایش درصد الیاف شیشه از ۱/۵% به ۲/۵%، شاخص طاقت به طور متوسط به میزان ۹/۱% افزایش یافته است. همچنین در نمونه های ساخته شده به روش اسپری، با افزایش درصد الیاف شیشه از ۴% به ۶%، شاخص طاقت به طور متوسط به میزان ۶/۶۵% افزایش یافته است.

جهت بررسی تأثیر استفاده از الیاف شیشه و مواد پوزولانی بر روی شاخص I_{20} در بتن مسلح به الیاف شیشه، نمودار تغییرات شاخص I_{20} در نمونه های ساخته شده به دو روش پیش‌مخلوط و اسپری، به ترتیب در شکل های ۱۱ و ۱۲ ترسیم شده است.

همان‌طور که در این نمودارها ملاحظه می‌شود با افزایش میزان



شکل ۶. مدول گسیختگی در تمام طرح های اختلاط ساخته شده به روش اسپری

Fig. 6. Rupture modulus in all mixing designs made by spray method

جدول ۷. نتایج مربوط به شاخص های طاقت و درصد تحمل بار پس از ۲۸ روز در نمونه های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط

Table 7. Results related to tolerate index and load tolerance percentage after 28 days in specimens made by pre-mixing method

نام طرح	شاخص طاقت			درصد تحمل بار بعد از ترک‌خوردگی	
	I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
PC	۱	۱	۱	۰	۰
GF1.5	۴/۰۲	۵/۷۳	۶/۵۹	۳۴/۲	۸/۶
GF1.5-SF10	۵/۳	۷/۳	۷/۶۲	۴۰	۳/۲
GF1.5-SF15	۵/۲۲	۶/۸	۶/۹۸	۳۱/۶	۱/۸
GF1.5-MK10	۴/۸۶	۶/۶۷	۷/۶۵	۳۶/۲	۹/۸
GF1.5-MK15	۵/۲۲	۷/۷۸	۹/۷	۵۱/۲	۱۹/۲
GF1.5-NS0.75	۳/۶۶	۵	۵/۰۹۴	۲۶/۸	۰/۹۴
GF1.5-NS1.5	۴/۰۵۳	۵/۰۴	۶/۰۶	۱۹/۷۴	۱۰/۲
GF2.5	۴/۳۶	۵/۵۴	۶/۹۵	۲۳/۶	۱۴/۱
GF2.5-SF10	۴/۷۲	۶/۳	۶/۶۲	۳۱/۶	۳/۲
GF2.5-SF15	۴/۸۳	۶/۵۳	۷/۰۴	۳۴	۵/۱
GF2.5-MK10	۵/۴	۷/۶۳	۸/۲۴	۴۴/۶	۶/۱
GF2.5-MK15	۵/۳	۷/۸۷	۸/۵۵	۵۱/۴	۶/۸
GF2.5-NS0.75	۴/۱۵	۵/۷۶	۵/۹۶	۳۲/۲	۲
GF2.5-NS1.5	۳/۷۷	۴/۳	۴/۳۰۶	۱۰/۶	۰/۰۶

جدول ۸. نتایج مربوط به شاخص های طاقت و درصد تحمل بار پس از ۲۸ روز در نمونه های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط

Table 8. Results related to tolerate indices and load tolerance percentage after 28 days in specimens made by pre-mixing method

نام طرح	شاخص طاقت			درصد تحمل بار بعد از ترک‌خوردگی	
	I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
PC	۱	۱	۱	۰	۰
GF1.5	۴/۰۲	۵/۷۳	۶/۵۹	۳۴/۲	۸/۶
GF1.5-SF10	۵/۳	۷/۳	۷/۶۲	۴۰	۳/۲
GF1.5-SF15	۵/۲۲	۶/۸	۶/۹۸	۳۱/۶	۱/۸
GF1.5-MK10	۴/۸۶	۶/۶۷	۷/۶۵	۳۶/۲	۹/۸
GF1.5-MK15	۵/۲۲	۷/۷۸	۹/۷	۵۱/۲	۱۹/۲
GF1.5-NS0.75	۳/۶۶	۵	۵/۰۹۴	۲۶/۸	۰/۹۴
GF1.5-NS1.5	۴/۰۵۳	۵/۰۴	۶/۰۶	۱۹/۷۴	۱۰/۲
GF2.5	۴/۳۶	۵/۵۴	۶/۹۵	۲۳/۶	۱۴/۱
GF2.5-SF10	۴/۷۲	۶/۳	۶/۶۲	۳۱/۶	۳/۲
GF2.5-SF15	۴/۸۳	۶/۵۳	۷/۰۴	۳۴	۵/۱
GF2.5-MK10	۵/۴	۷/۶۳	۸/۲۴	۴۴/۶	۶/۱
GF2.5-MK15	۵/۳	۷/۸۷	۸/۵۵	۵۱/۴	۶/۸
GF2.5-NS0.75	۴/۱۵	۵/۷۶	۵/۹۶	۳۲/۲	۲
GF2.5-NS1.5	۳/۷۷	۴/۳	۴/۳۰۶	۱۰/۶	۰/۰۶

جدول ۹. نتایج مربوط به شاخص های طاقت و درصد تحمل بار پس از ۹۰ روز در نمونه های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط

Table 9. Results related to tolerate indices and load tolerance percentage after 90 days in specimens made by pre-mixing method

نام طرح	شاخص طاقت			درصد تحمل بار بعد از ترک‌خوردگی	
	I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
PC	۱	۱	۱	۰	۰
GF1.5	۳/۷۵	۴/۶۲	۴/۸۹	۱۷/۴	۲/۷
GF1.5-SF10	۴/۹	۵/۶۲	۵/۷۸	۱۴/۴	۱/۶
GF1.5-SF15	۴/۹۵	۶/۲۴	۶/۶۵	۲۵/۸	۴/۱
GF1.5-MK10	۴/۹	۶/۴۴	۷/۱۴	۳۰/۸	۷
GF1.5-MK15	۵/۰۹	۵/۹۸	۶/۷۹	۱۷/۸	۸/۱
GF1.5-NS0.75	۳/۵	۳/۶۴	۳/۷۲	۲/۸	۰/۸
GF1.5-NS1.5	۴/۰۲	۴/۳۵	۵/۰۸	۶/۶	۷/۳
GF2.5	۴/۱۹	۵/۴	۶/۰۷	۲۴/۲	۶/۷
GF2.5-SF10	۴/۲۳	۵/۱۷	۵/۸۲	۱۸/۸	۶/۵
GF2.5-SF15	۴/۲۴	۵/۴۲	۶/۳۳	۲۳/۶	۹/۱
GF2.5-MK10	۵/۲	۷/۱۷	۷/۵۶	۳۹/۴	۳/۹
GF2.5-MK15	۵/۱	۶/۵۲	۶/۹۸	۲۸/۴	۴/۶
GF2.5-NS0.75	۳/۹۲	۴/۵	۵/۰۷	۱۱/۶	۵/۷
GF2.5-NS1.5	۳/۵۵	۴/۰۶	۴/۱۸	۱۰/۲	۱/۲

جدول ۱۰. نتایج مربوط به شاخص های طاقت و درصد تحمل بار پس از ۷ روز در نمونه های ساخته شده به روش اسپری

Table 10. Results regarding tolerate indices and load tolerance percentage after 7 days in specimens made by spray method

نام طرح	شاخص طاقت			درصد تحمل بار بعد از ترک‌خوردگی	
	I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
PC	۱	۱	۱	۰	۰
GF4	۵/۵۴	۱۲/۴۴	۲۳/۹۴	۱۳۸	۱۱۵
GF4-SF10	۶/۱۳	۱۲/۹۱۸	۲۸/۷۷	۱۳۵/۷۶	۱۵۸/۵۲
GF4-SF15	۶/۰۸	۱۳/۴۵	۳۰/۹۶	۱۴۷/۴	۱۷۵/۱
GF4-MK10	۵/۸۳	۱۳/۵۲	۳۱/۵۷	۱۵۳/۸	۱۸۰/۵
GF4-MK15	۵/۷۸	۱۳/۶۸	۳۱/۸۵	۱۵۸	۱۸۱/۷
GF4-NS0.75	۵/۶۴	۱۲/۲۶	۲۵/۲۱۸	۱۳۲/۴	۱۲۹/۵۸
GF4-NS1.5	۵/۴۶	۱۲/۲۴	۲۳/۴	۱۳۵/۶	۱۱۱/۶
GF6	۵/۹۳	۱۲/۵۵	۲۷/۰۸۱	۱۳۲/۴	۱۴۵/۳۱
GF6-SF10	۵/۸۴	۱۲/۷۳	۲۸/۱۴	۱۳۷/۸	۱۵۴/۱
GF6-SF15	۵/۸	۱۳/۱۵	۳۱	۱۵۴	۱۷۸/۵
GF6-MK10	۶/۰۹	۱۴/۱	۳۱/۲۷	۱۶۰/۲	۱۷۱/۷
GF6-MK15	۶/۱۷۷	۱۳/۷۸	۳۰/۵۳	۱۵۲/۰۶	۱۶۷/۵
GF6-NS0.75	۵/۳۹	۱۲/۲۷	۲۴/۸۳	۱۳۷/۶	۱۲۵/۶
GF6-NS1.5	۵/۲۵	۱۲/۳۶	۲۳/۸۲	۱۴۲/۲	۱۱۴/۶

جدول ۱۱. نتایج مربوط به شاخص های طاقت و درصد تحمل بار پس از ۲۸ روز در نمونه های ساخته شده به روش اسپری

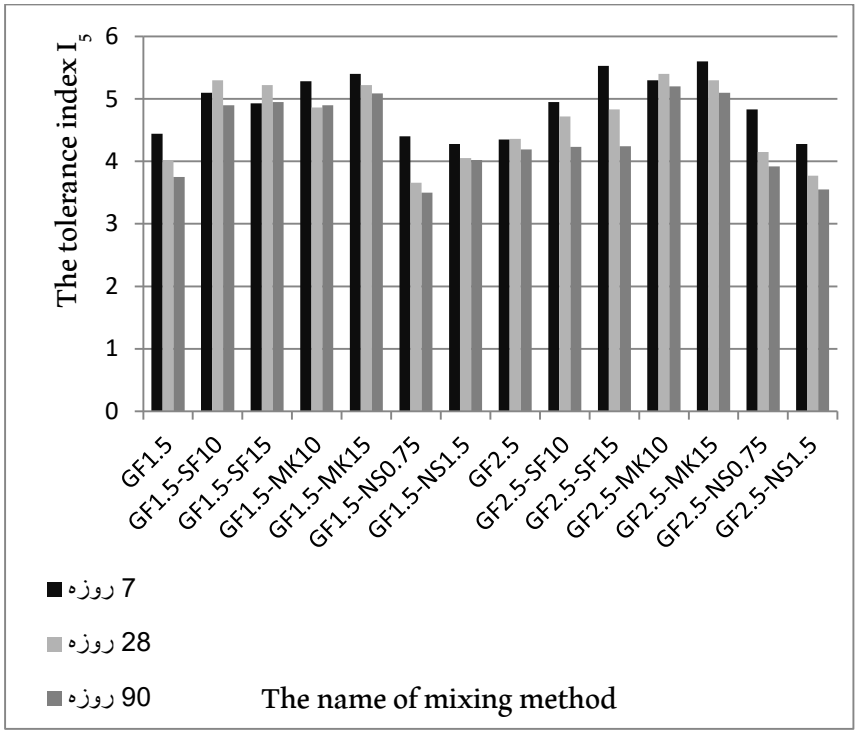
Table 11. Results of tolerate indices and load tolerance after 28 days in specimens made by spray method

نام طرح	شاخص طاقت			درصد تحمل بار بعد از ترک‌خوردگی	
	I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
PC	۱	۱	۱	۰	۰
GF4	۶/۰۱۴	۱۲/۱	۲۲/۳	۱۲۱/۷۲	۱۰۲
GF4-SF10	۶/۴۳	۱۲/۵۷	۲۸/۵	۱۲۲/۸	۱۵۹/۳
GF4-SF15	۶/۴۵	۱۴/۰۷	۲۷/۱۹	۱۵۲/۴	۱۳۱/۲
GF4-MK10	۵/۹۷	۱۳/۷۷	۳۱/۰۳	۱۵۶	۱۷۲/۶
GF4-MK15	۶/۳۸	۱۳/۵	۲۸/۸۶	۱۴۲/۴	۱۵۳/۶
GF4-NS0.75	۵/۳۶	۱۱/۵۳	۲۴/۰۴	۱۲۳/۴	۱۲۵/۱
GF4-NS1.5	۵/۴۴	۱۱/۰۱	۲۰/۴۹	۱۱۱/۴	۹۴/۸
GF6	۵/۹۵	۱۳/۳	۲۵/۳۳	۱۴۷	۱۲۰/۳
GF6-SF10	۵/۸۵	۱۳/۵۶	۲۶/۰۱	۱۵۴/۲	۱۲۴/۵
GF6-SF15	۵/۹۹	۱۴/۰۸۷	۲۸/۵۳	۱۶۱/۹۴	۱۴۴/۴۳
GF6-MK10	۶/۱۷	۱۳/۹	۲۸/۷۵	۱۵۴/۶	۱۴۸/۵
GF6-MK15	۶/۵۷	۱۴/۵۷	۲۸/۱۸۷	۱۶۰	۱۳۶/۱۷
GF6-NS0.75	۵/۳۴	۱۱/۷۸	۲۳/۷۲	۱۲۸/۸	۱۱۹/۴
GF6-NS1.5	۵/۳	۱۲/۱۴	۱۹/۵۴	۱۳۶/۸	۷۴

جدول ۱۲. نتایج مربوط به شاخص های طاقت و درصد تحمل بار پس از ۹۰ روز در نمونه های ساخته شده به روش اسپری

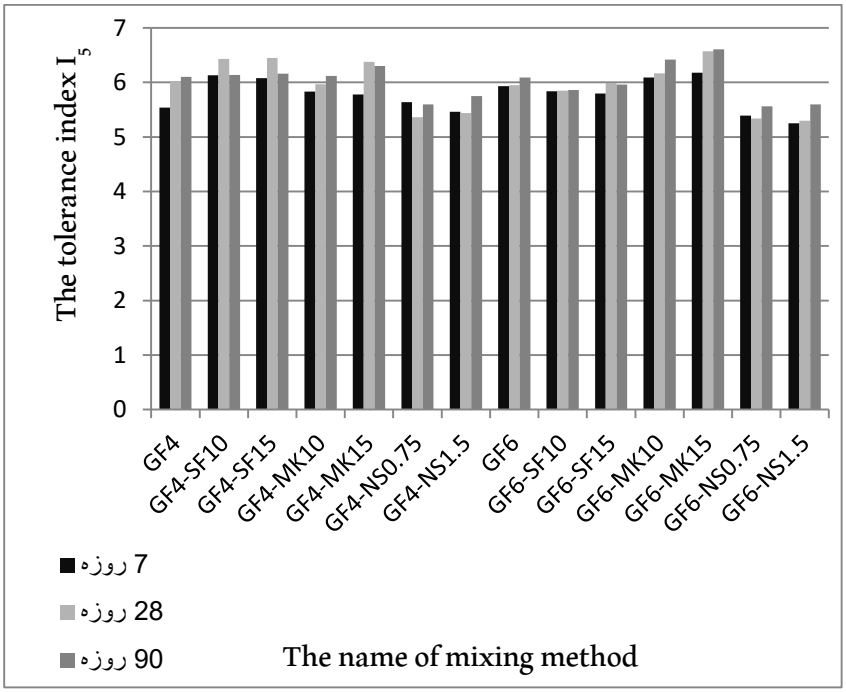
Table 12. Results of tolerate indices and load tolerance percentage after 90 days in specimens made by spray method

نام طرح	شاخص طاقت			درصد تحمل بار بعد از ترک‌خوردگی	
	I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
PC	۱	۱	۱	۰	۰
GF4	۶/۱	۱۲/۱۱	۲۰/۷۷	۱۲۰/۲	۸۶/۶
GF4-SF10	۶/۱۴	۱۲/۴	۲۵/۴۸	۱۲۵/۲	۱۳۰/۸
GF4-SF15	۶/۱۶۳	۱۲/۴۴	۲۶/۵۵	۱۲۵/۵۴	۱۴۱/۱
GF4-MK10	۶/۱۲	۱۳/۵۷	۲۸/۶	۱۴۹	۱۵۰/۳
GF4-MK15	۶/۳	۱۳/۴۷	۲۷/۸۶	۱۴۳/۴	۱۴۳/۹
GF4-NS0.75	۵/۶	۱۱/۵۵	۲۰/۱۸	۱۱۹	۸۶/۳
GF4-NS1.5	۵/۷۵	۱۰/۸۵	۱۹/۸۵	۱۰۲	۹۰
GF6	۶/۰۹	۱۳/۲۲	۲۳/۰۸۸	۱۴۲/۶	۹۸/۶۸
GF6-SF10	۵/۸۶	۱۲/۸۱۵	۲۵/۱۴	۱۳۹/۱	۱۲۳/۲۵
GF6-SF15	۵/۹۶	۱۳/۱۱	۲۷/۵۴	۱۴۳	۱۴۴/۳
GF6-MK10	۶/۴۲	۱۳/۸۲	۲۸/۲	۱۴۸	۱۴۳/۸
GF6-MK15	۶/۶۱	۱۴/۱۵	۲۸/۰۳۸	۱۵۰/۸	۱۳۸/۸۸
GF6-NS0.75	۵/۵۶	۱۱/۶۲	۲۰/۲۱	۱۲۱/۲	۸۵/۹
GF6-NS1.5	۵/۶۲	۱۱/۶۸	۱۹/۳	۱۲۱/۲	۷۶/۲



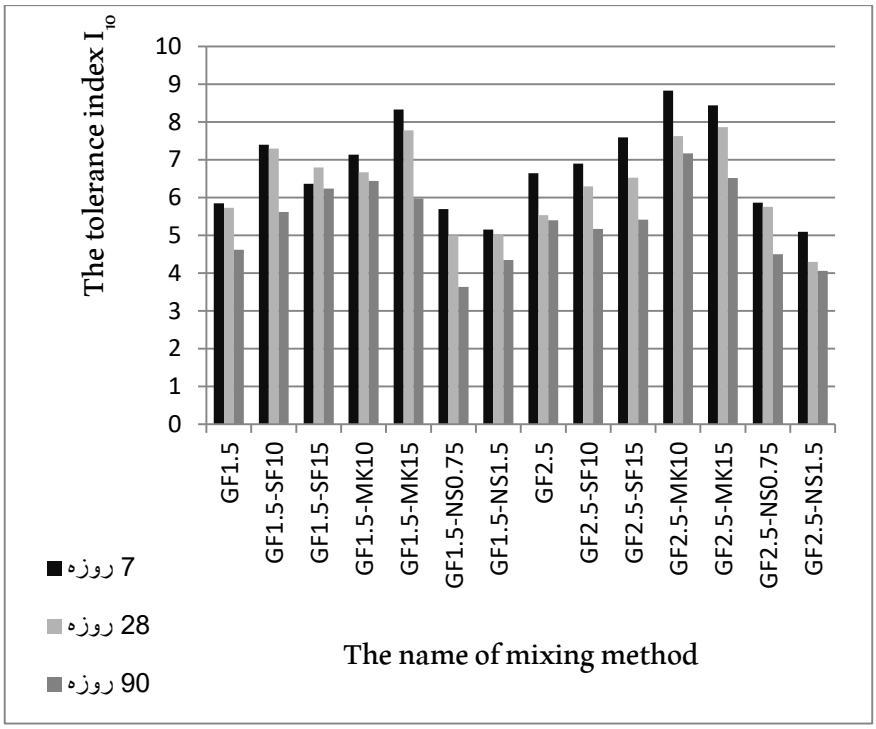
شکل ۷. مقادیر شاخص I5 در طرح های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط

Fig. 7. values of index I5 in designs made by pre-mixed method



شکل ۸. مقادیر شاخص ۵ در طرح های ساخته شده به روش اسپری

Fig. 8 values of index I5 in designs made by spray method



شکل ۹. مقادیر شاخص ۱۰ در طرح های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط

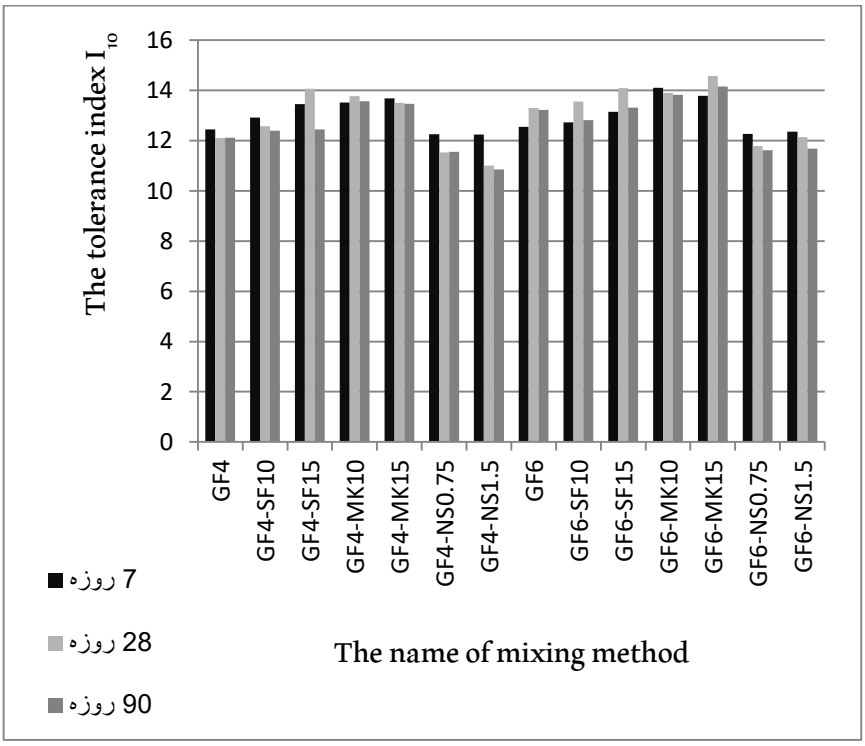
Fig. 9. Values of index I10 in designs made by pre-mixed method

الیاف شیشه در نمونه های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط، مقادیر مربوط به شاخص I_{20} افزایش می‌یابد. با مقایسه ی نتایج مربوط به شاخص I_{20} در نمونه های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط، ملاحظه می شود که پس از گذشت ۲۸ روز، گسیختگی در بسیاری از طرح های اختلاط، در تغییرشکلی کمتر از تغییرشکل معادل با ۱۰/۵ برابر لحظه ی اولین ترک اتفاق می افتد. با توجه به شکل ۱۲ مشخص است که با افزایش میزان الیاف شیشه در نمونه های ساخته شده به روش اسپری، شاخص I_{20} به شدت افزایش می یابد.

در واقع این امر نشان‌دهنده ی این است که در جابه‌جایی های بزرگتر، جذب انرژی بیشتر توسط الیاف شیشه صورت می‌گیرد. با توجه به توزیع یکنواخت الیاف شیشه در سطح بتن و تولید بتن با کیفیت بالا، در روش اسپری استفاده از الیاف شیشه با درصد های بالا تری نسبت به روش پیش‌مخلوط امکان پذیر است. بنابراین پس از گذشت ۲۸ روز، در تمام طرح های اختلاط ساخته شده به روش اسپری، مقادیر قابل قبولی برای شاخص I_{20} بدست آمده است. با مقایسه ی شاخص I_{20} در طرح های ساخته شده به روش اسپری، مشاهده می شود که همانند مقاومت خمشی، بهبود مقادیر شاخص I_{20}، با افزایش مقدار الیاف شیشه از ۴% تا حدود ۵/۶% روند افزایشی و برای مقادیر بیشتر از ۵/۶% روند کاهشی داشته است.

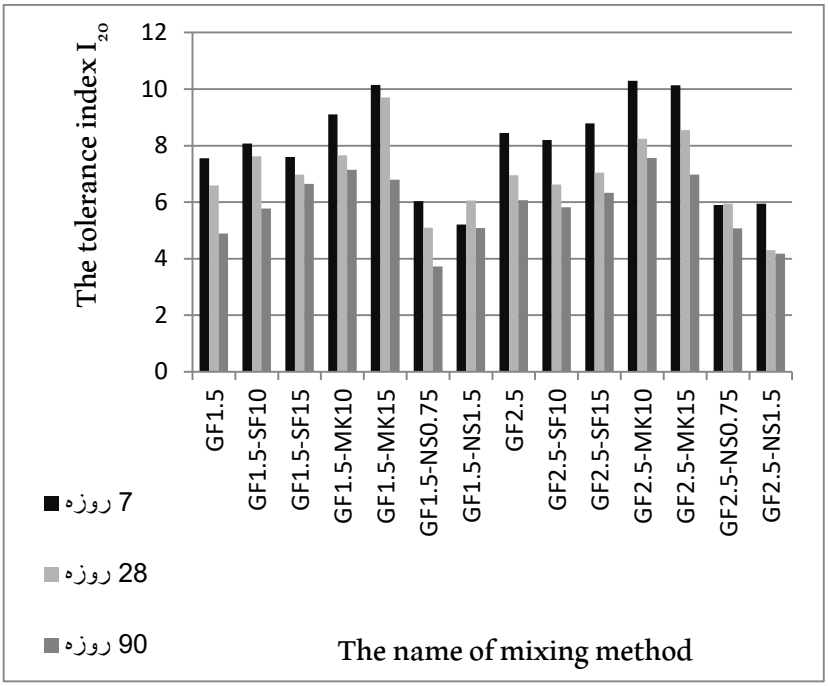
به منظور بررسی نتایج مقاومت باقی‌مانده ی نمونه ها پس از ترک‌خوردگی، نمودار های تغییرات مقادیر $R_{5.10}$ و $R_{10.20}$ در شکل های زیر برای برخی از طرح های اختلاط در روش های پیش‌مخلوط و اسپری، با هم مقایسه شده اند.

همان‌طور که در این نمودار ها ملاحظه می شود، میزان تحمل بار های وارده پس از ترک‌خوردگی، در نمونه های ساخته شده به روش اسپری مقادیر بسیار بیشتری نسبت به نمونه های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط دارند. با توجه به این نتایج در هر دو روش پیش‌مخلوط و اسپری، با افزایش الیاف شیشه مقاومت باقی مانده پس از ترک‌خوردگی افزایش یافته است. با بررسی نتایج بدست آمده ملاحظه می شود که افزودن میکروسیلیس و متاکائولین به بتن مسلح به الیاف شیشه، باعث افزایش مقاومت باقی مانده ی نمونه ها



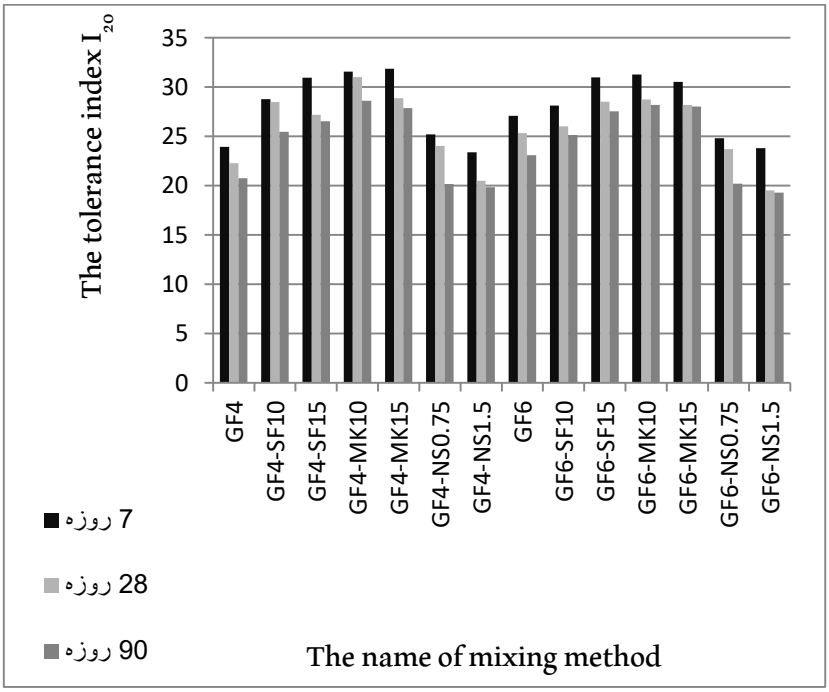
شکل ۱۰. مقادیر شاخص ۱۰ در طرح های ساخته شده به روش اسپری

Fig. 10. Values of index I10 in designs made by spray method



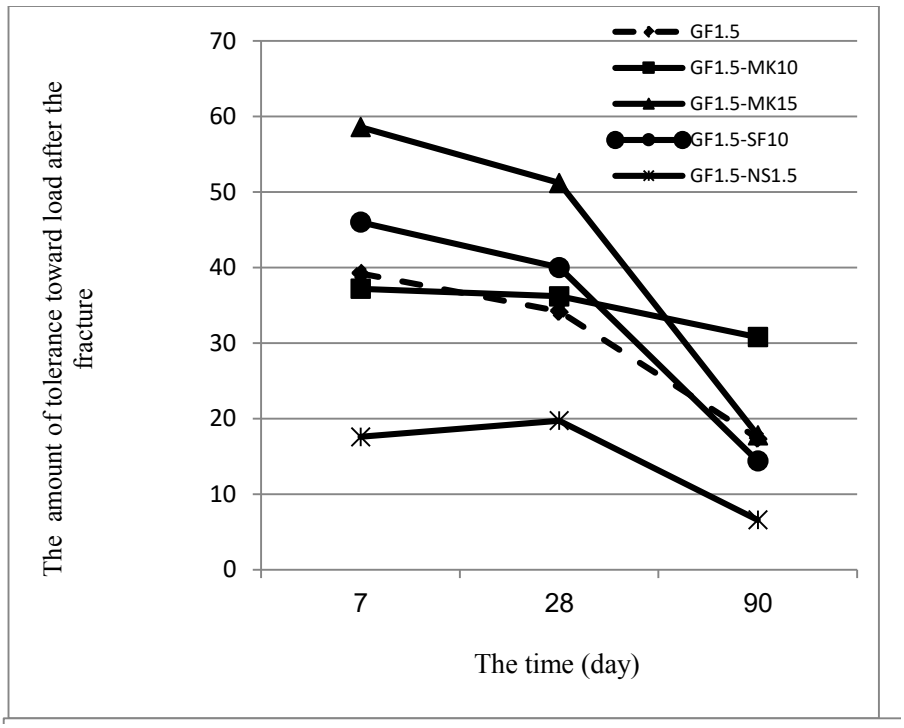
شکل ۱۱. مقادیر شاخص ۲۰ در طرح های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط

Fig. 11. Values of index I20 in designs made by pre-mixed method

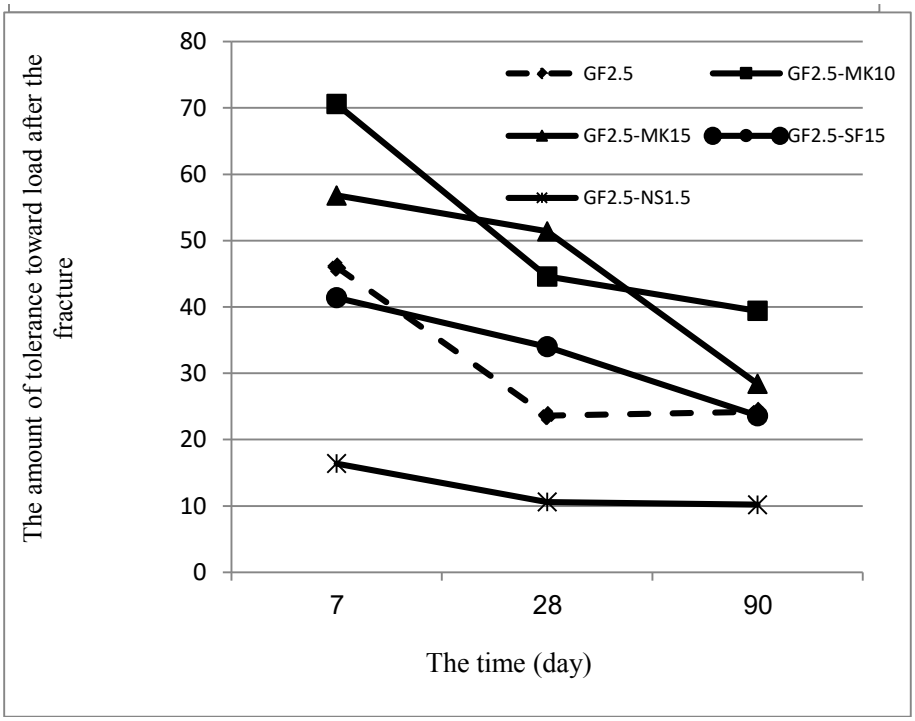


شکل ۱۲. مقادیر شاخص ۲۰ در طرح های ساخته شده به روش اسپری

Fig. 12. Values of index I20 in designs made by spray method



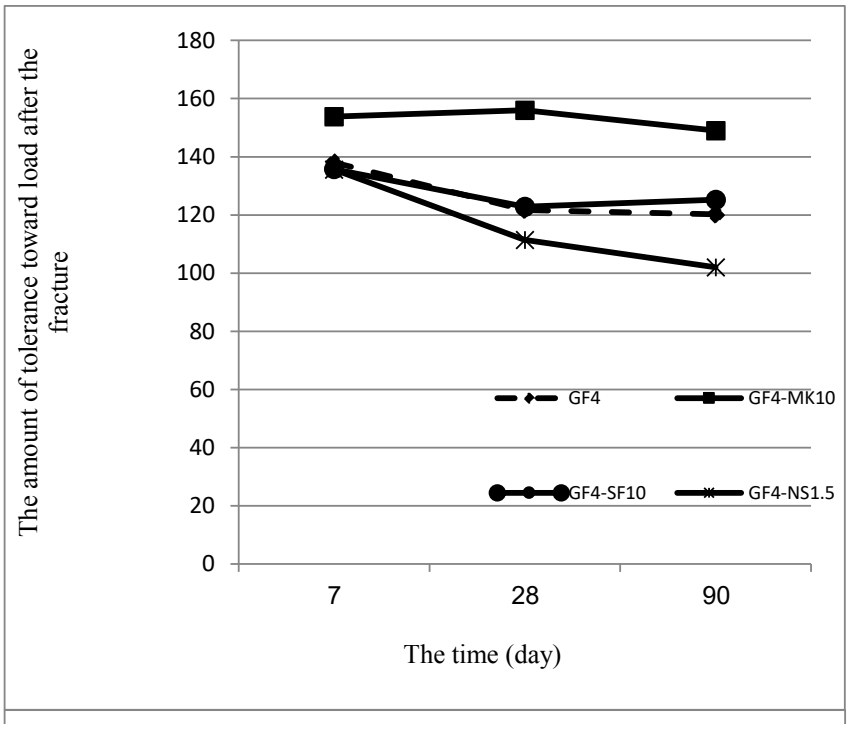
(الف)



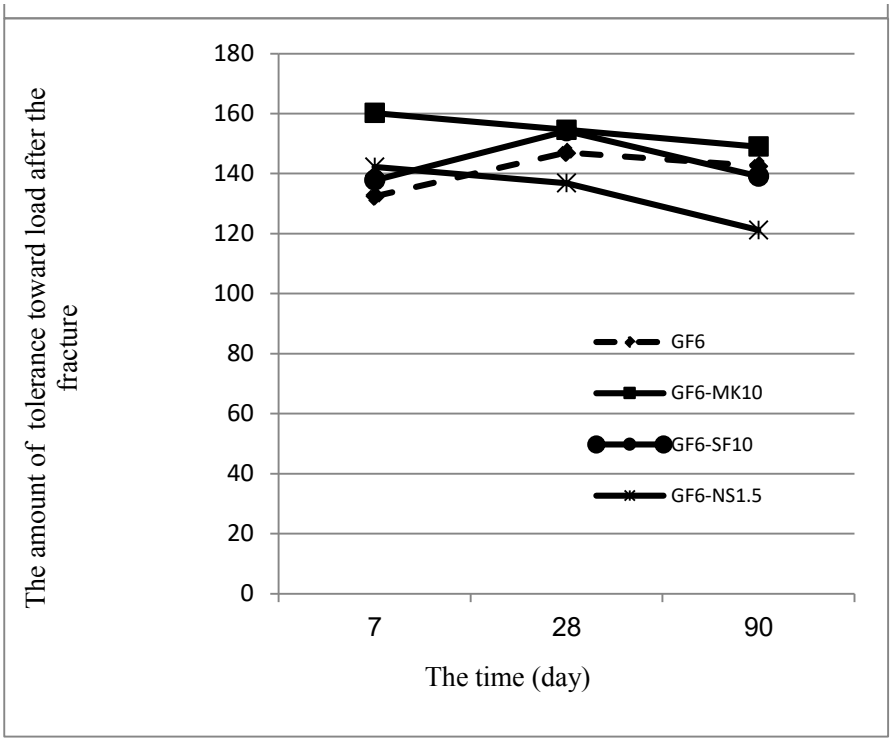
(ب)

شکل ۱۳. R 5،10 در نمونه هایی از طرح های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط؛ الف) نمونه های مسلح به ۱/۵% الیاف؛ ب) نمونه های مسلح به ۲/۵ الیاف

Fig. 13. R5,10 in specimens of designs made by pre-mixing; a) reinforced specimens to 1.5% fibers; b) reinforced specimens to 2.5% fibers



(الف)



(ب)

شکل ۱۴. R5,10 در نمونه هایی از طرح های ساخته شده به روش اسپری؛ الف) نمونه های مسلح به ۴% الیاف؛ ب) نمونه های مسلح به ۶% الیاف

Fig. 14. R5,10 in specimens of designs made by spray; a) reinforced specimens to 4% fibers; b) reinforced specimens to 6% fibers

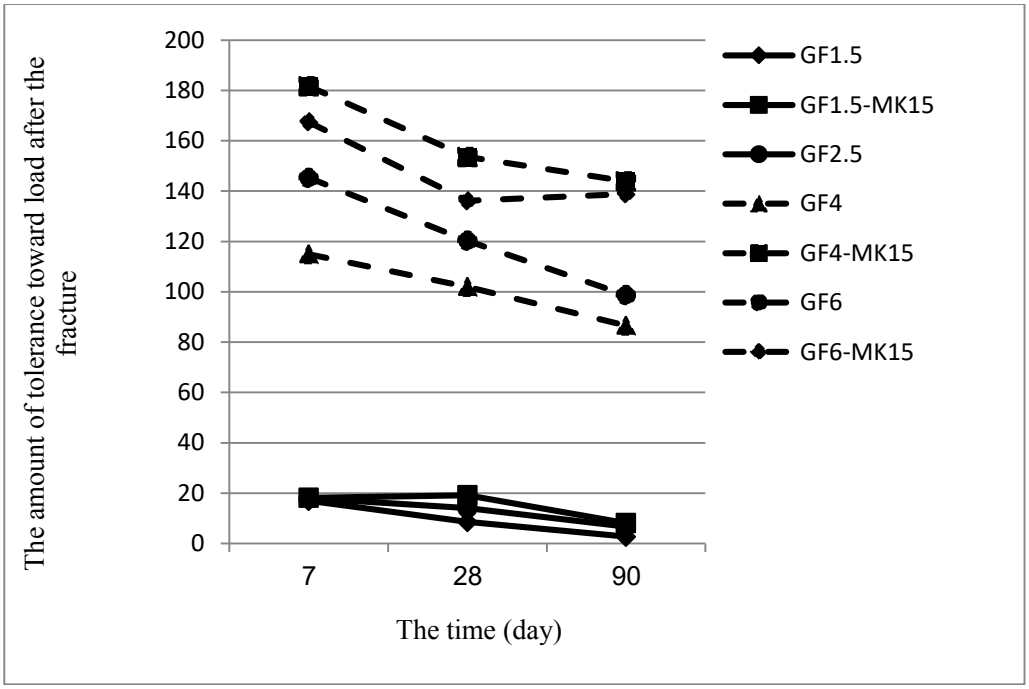
پس از ترک‌خوردگی می شود. همچنین با گذشت زمان، کاهش مقاومت باقی مانده در نمونه های مسلح به الیاف شیشه در حضور متاکائولین به حداقل می رسد. در واقع مواد پوزولانی علاوه بر اینکه از تجمع مواد تولید شده ناشی از فرآیند هیدراسیون در اطراف الیاف شیشه جلوگیری می‌کنند، با افزایش چسبندگی مهاری الیاف، میزان تحمل بتن در برابر بار های وارده پس از ترک‌خوردگی را افزایش می دهند. میزان تأثیر الیاف شیشه بر روی مقاومت باقی مانده پس از ترک‌خوردگی ($R_{10,20}$) در نمودار ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می شود که با افزایش درصد الیاف شیشه از ۱/۵% به ۲/۵% در روش پیش‌مخلوط و همچنین با افزایش الیاف شیشه از ۴% به ۶% در روش اسپری، میزان تحمل بتن مسلح به الیاف شیشه در برابر بار های وارده پس از ترک‌خوردگی افزایش می یابد.

۵- نحوه ی شکست نمونه های خمشی

در این تحقیق، به جز در سه نمونه، تمامی نمونه های تقویت شده با الیاف شیشه تحت آزمایش خمش چهار نقطه ای، در یک سوم میانی دچار ترک‌خوردگی شده اند.

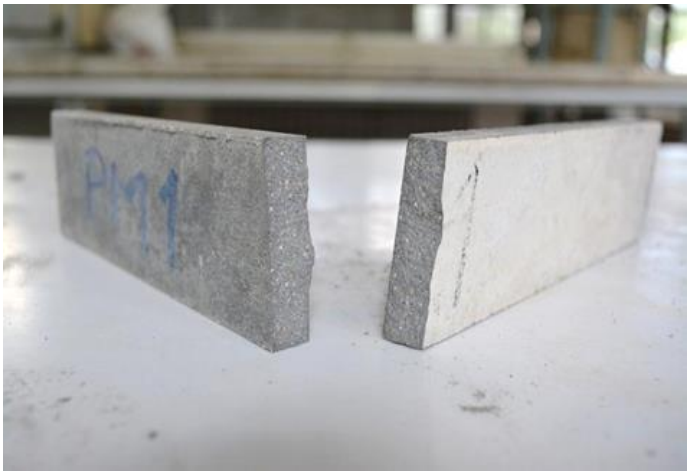
نمونه های فاقد الیاف شیشه پس از رسیدن به بار حداکثر، تحت یک تغییرشکل بسیار کوچک به صورت ترد شکسته شدند. به دلیل عدم وجود الیاف شیشه در این نمونه ها، سطوح شکست تقریباً صاف و بدون ناهمواری می‌باشد (نمودار ۱۶). نمونه های مسلح به الیاف شیشه پس از ترک خوردن نیز همچنان به باربری خود ادامه دادند. در نمونه های مسلح به الیاف شیشه، ابتدا ترک های بسیار ریز در سطح پایینی نمونه ها به وجود آمد. به تدریج با افزایش بار های وارده، عرض این ترک ها افزایش یافت؛ در نهایت این ترک ها باعث گسیختگی نمونه ها شدند. همان‌طور که در شکل ۱۷ مشخص است، سطوح شکست در نمونه های تقویت شده با الیاف شیشه، به صورت دندانه دار می‌باشد.

با نگاهی به شکل ۱۹ به راحتی می‌توان مشاهده کرد که الیاف شیشه در ماتریس سیمانی، به طور همگن پراکنده شدند. علاوه بر این، هیچ نوع گلوله شدن الیاف در بتن (جمع‌شدگی بیش از اندازه الیاف در یک ناحیه) تشخیص داده نشد و در حالتی که از روش اختلاط اسپری استفاده شده است، الیاف شیشه رفتار پیوندی بهتری را با ماتریس سیمانی نشان می‌دهند. این بدان معنی است که الیاف



شکل ۱۵. مقایسه R ۱۰،۲۰ در برخی از طرح های ساخته شده به روش پیش‌مخلوط و روش اسپری

Fig. 15. Comparison of R10,20 in some designs made by pre-mixed method and spray method



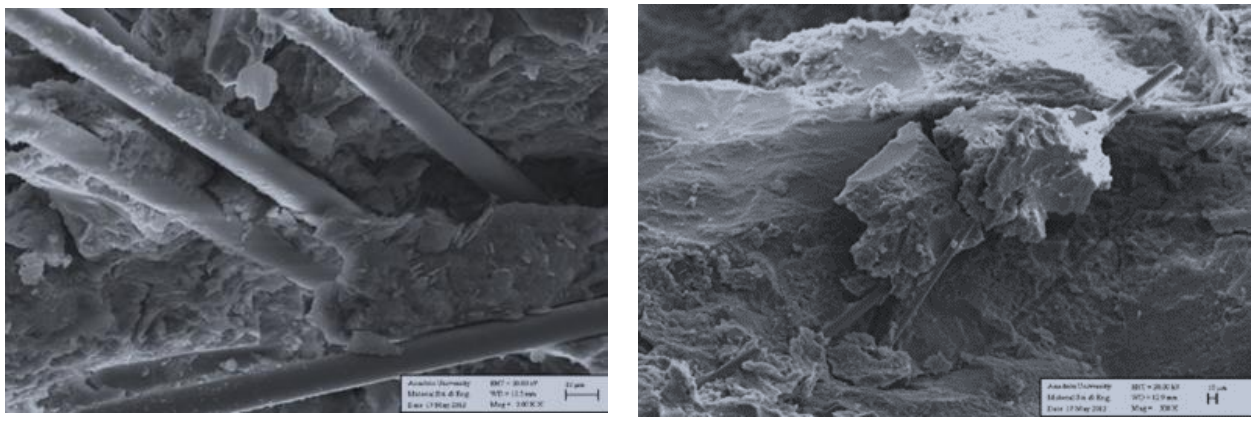
شکل ۱۶. نحوه ی شکست نمونه های فاقد الیاف شیشه

Fig. 16. The fracture figure of the specimens

(ب) (الف)

شکل ۱۷. الف) نمونه ی تقویت شده با ۵/۱٪ الیاف در روش پیش‌مخلوط؛ ب) نمونه ی تقویت شده با ۶٪ الیاف در روش اسپری

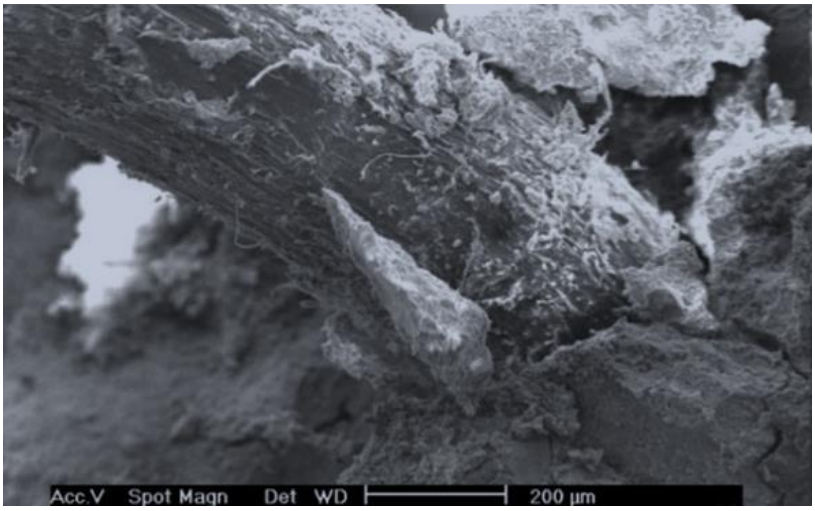
Fig. 17. (a) 1.5% fiber reinforced sample in pre-mixed method; b) 6% fiber reinforced sample in spray method



(ب) (الف)

شکل ۱۸. تصاویر SEM از نمونه های ساخته شده به روش الف) اسپری ب) پیش‌مخلوط

Fig. 18. SEM images of samples made by a) spray b) pre-mix



شکل ۱۹. تصویر SEM از الیاف شیشه در سن ۹۰ روزگی بتن

Fig. 19. SEM image of glass fibers at 90 days of age concrete

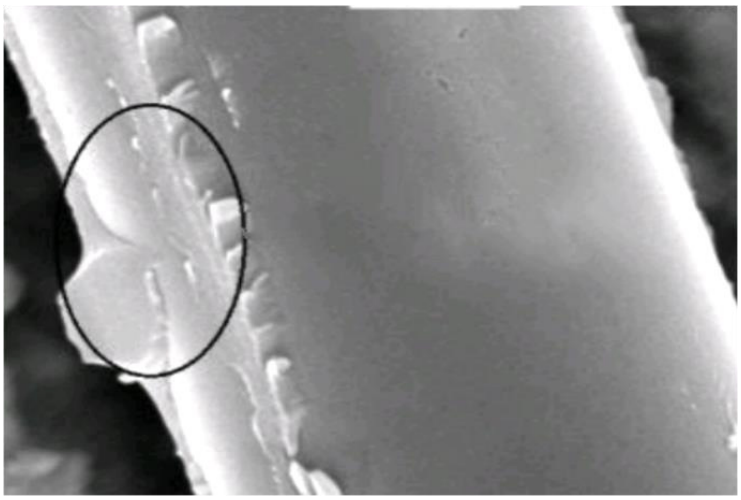
در این حالت به عنوان اجزای حمل بار در ماتریس نقش مؤثری دارند. این در حالی است که در روش پیش‌مخلوط این پیوند به خوبی ایجاد نشده است که باعث می‌شود عملکرد مناسبی نداشته باشند و می‌توان این نتیجه را گرفت که دلیل اصلی کاهش مقاومت فشاری در زمان استفاده از الیاف شیشه همین موضوع باشد.

همان‌طور که در تصاویر SEM نشان داده شده است، تقریباً هیچ خرابی در الیاف شیشه پس از گذشت ۷ روز مشاهده نشده است. از طرف دیگر، تصاویر SEM خسارت چشمگیری را در الیاف (ایجاد ترک و گسیختگی در عمق الیاف و یا حفره) پس از گذشت ۲۸ و ۹۰ روز نشان نمی‌دهد و به نظر می‌رسد آسیب‌دیدگی آن بیشتر به خاطر ایجاد اصطکاک سطح در هنگام شکست نمونه‌ها باشد. شکل ۱۹ ضعف اساسی و بنیادی در الیاف شیشه را نشان می دهد. هرچند که الیاف شیشه با توجه به روش اختلاط (اسپری و پیش‌مخلوط) به خوبی در ماتریس سیمانی توزیع شده باشد، اما زمانی که الیاف در معرض تنش کششی و یا تغییرشکل دیگر (در زمان تست نمونه و پل زنی بین ترک‌ها) قرار می‌گیرند، به راحتی از بتن بیرون کشیده می‌شوند.

همچنین در این تحقیق برای بررسی دقیق تر اثرات گذر زمان بر الیاف شیشه‌ی مدفون در ماتریس سیمانی، نمونه‌های حاوی الیاف پس از گذشت ۲۴ ماه از ساخت آن مورد بررسی قرار داده شد. همان‌طور که تصاویر SEM نشان می‌دهد (شکل ۲۰)، تأثیرات گذر زمان بر شکل ظاهری الیاف شیشه و مقاومت آن محسوس بوده است. به صورتی که پس از گذشت ۲ سال از ساخت نمونه‌ها، الیاف شیشه دچار حفره سطحی و ترک در عمق آن شده است که این امر نشان می‌دهد که به مرور زمان از مقاوت خمشی بتن مسلح به الیاف شیشه کاسته خواهد شد.

۱-۵- مقاومت خمشی نمونه‌ها در حریق و آتش‌سوزی

مطابق تمام استانداردهای بین‌المللی معتبر، دمای آتش‌سوزی طی گذشت زمان، به حدود ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. در تحقیقات گذشته [۱۸] تأثیر منفی حرارت بر بتن الیافی بررسی شده است؛ ولی در تحقیق حاضر علاوه بر بررسی تأثیر منفی حرارت در دو روش اختلاط، سعی شده است که با درصدهای مختلف الیاف و مواد پوزولانی تا حد امکان از این تأثیرات منفی کاست. برای آنکه دماهای آتش‌سوزی شبیه‌سازی شود، نمونه‌ها در یک کوره ریخته گری قرار داده شدند. سیکل تغییر دمای کوره به این ترتیب انتخاب شد که به ازای گذشت هر ۲ ساعت زمان، ۲۰۰ درجه سانتیگراد دمای کوره بالا رود. این روند تا دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد و گذشت زمان ۵ ساعت ادامه پیدا کرد. سپس در پایان ساعت پنجم، دما به ۹۰۰ درجه سانتیگراد و در پایان ساعت ششم، دما به ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد



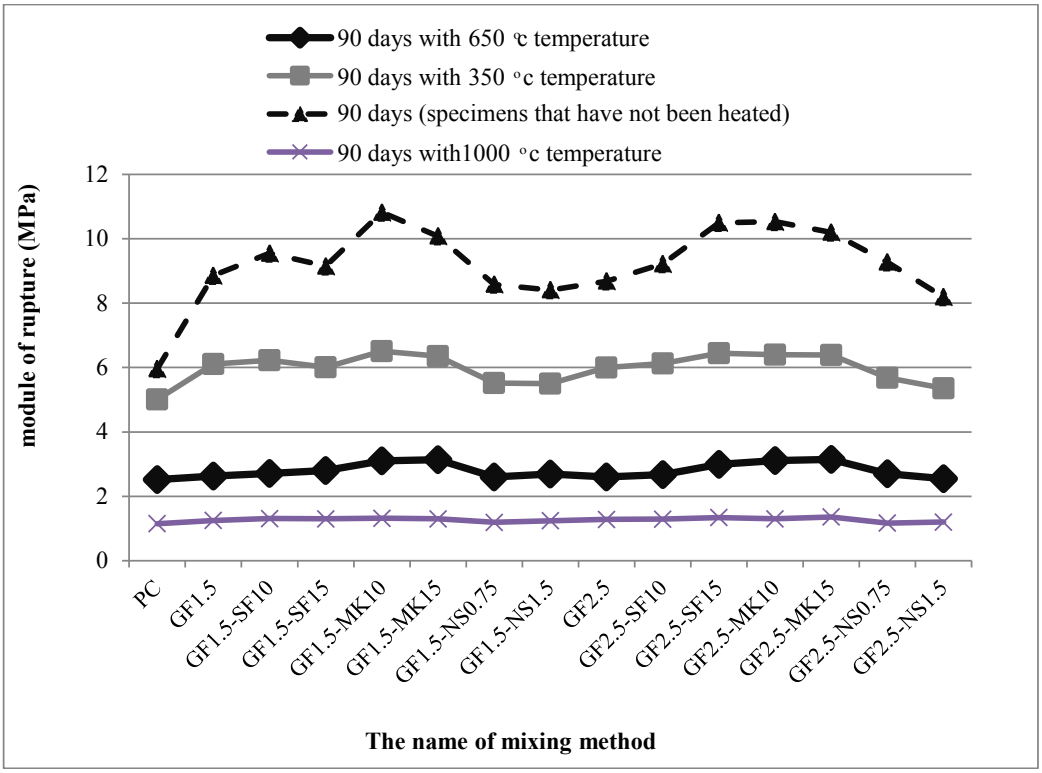
شکل ۲۰. به وجود آمدن ترک در الیاف پس از گذشت ۲۴ ماه از ساخت نمونه

Fig. 20. The formation of cracks in the fibers after 24 months of sample construction

رسید. با توجه به خطر بالا رفتن بیش از حد دما، تصمیم گرفته شد که بیشترین دما روی ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد تنظیم شود. همچنین از هر طرح اختلاط، تعداد ۵ نمونه در آتش قرار داده شد. لازم به ذکر است که دمای کوره در مرحله اول تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد افزایش داده شد و نمونه‌ها داخل کوره قرار گرفته و مورد آزمایش خمشی قرار گرفتند. در مرحله دوم و سوم دمای کوره تا ۶۵۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد افزایش داده شده و نتایج آزمایش خمشی بررسی شد. به منظور مقایسه‌ی مقاومت خمشی نمونه‌های شاهد ساخته شده به دو روش پیش‌مخلوط و اسپری، با زمانی که نمونه‌ها در ۳ دمای ۳۵۰، ۶۵۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده شده‌اند، شکل‌های ۲۱ و ۲۲ به دست آمده است. لازم به ذکر است که نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات گذشتگان در تناقض نمی‌باشد و جنبه نوآوری مقاله حاضر بررسی شکل ظاهری الیاف شیشه در درجه حرارت بالا و تأثیرات میکروسیلیس، متاکائولین و نانوسیلیس بر روی مدول گسیختگی بتن در درجه حرارت بالا می‌باشد که در ذیل به طور کامل شرح داده شده است.

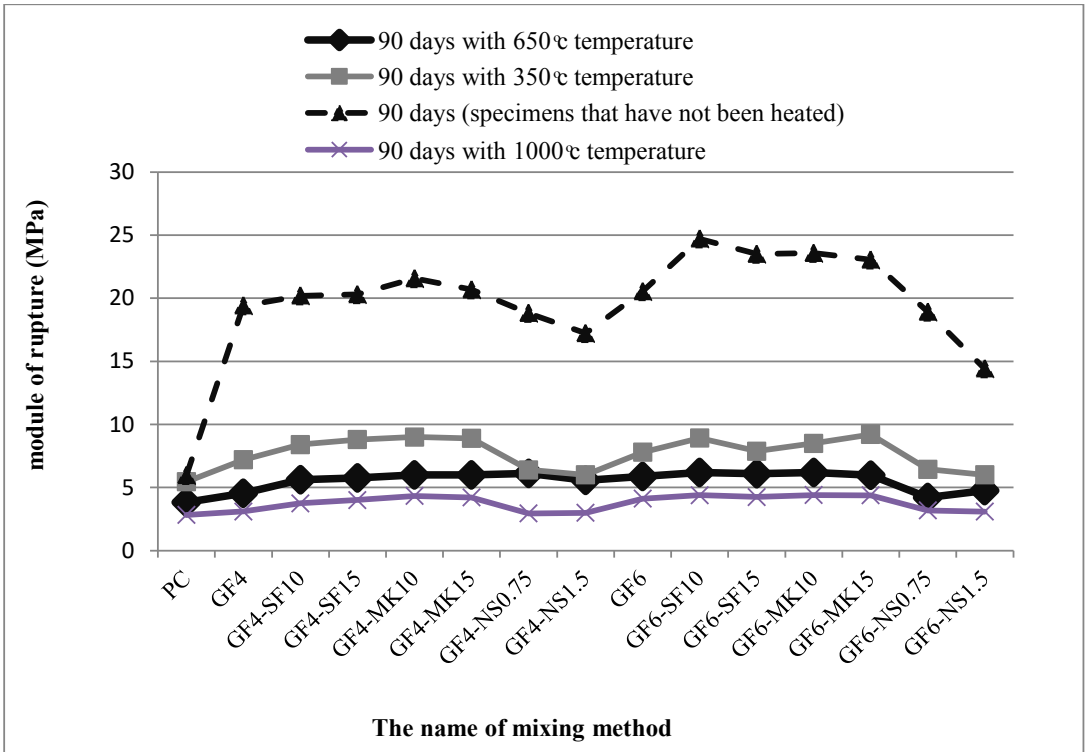
با توجه به شکل‌های ۲۱ و ۲۲ می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی افزایش درجه حرارت باعث کاهش چشمگیر مقاومت خمشی می‌شود. مکانیزم علت کاهش مقاومت در حرارت‌های بالا به دلیل ذوب شدن الیاف و یا تغییرشکل دادن الیاف شیشه به علت درجه حرارت بالا در بتن می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده در درجه حرارت‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که الیاف شیشه تا دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد عملکرد خوبی داشته که به تدریج با افزایش دما تا ۶۵۰ و سپس ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد کارایی الیاف در تحمل بار کم شده و الیاف‌ها در داخل بتن ذوب شده‌اند. تصویر SEM گرفته شده از نمونه تست شده پس از حرارت دادن به خوبی این موضوع را تصدیق می‌کند (شکل ۲۳). در این تحقیق برای کنترل این کاهش مقاومت خمشی و جهت جلوگیری از ذوب شدن و تغییرشکل دادن الیاف در بتن از مواد پوزولانی میکروسیس، نانوسیلیس و متاکایولین استفاده شده است. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که در روش پیش‌مخلوط بهترین عملکرد در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد نسبت به نمونه شاهد برای طرح اختلاط حاوی ۲/۵% الیاف شیشه و ۱۵ درصد متاکائولین و همچنین نمونه‌های حاوی ۲/۵% الیاف شیشه و ۱۵% میکروسیلیس می‌باشد، که در هر دو میزان افزایش مقاومت خمشی ۲۸/۵% نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. همچنین در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد مربوط به نمونه‌های حاوی ۲/۵% الیاف و ۱۵% متاکائولین با افزایش ۲۵% مقاومت می‌باشد. از طرفی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد مربوط به نمونه‌های حاوی ۲/۵% الیاف شیشه و ۱۵% متاکائولین با افزایش ۱۸% مقاومت خمشی می‌باشد.

در روش اسپری به علت اختلاط خوب مواد ماتریس سیمانی،



شکل ۲۱. مدول گسیختگی در تمام طرح های اختلاط ساخته شده پس از قرار دادن در کوره حرارتی به روش پیش‌مخلوط

Fig. 21. Modulus of rupture in all mixing designs made after placing in a thermal furnace to pre-mixed method



شکل ۲۲. مدول گسیختگی در تمام طرح های اختلاط ساخته شده پس از قرار دادن در کوره حرارتی به روش اسپری

Fig. 22. Modulus of rupture in all mixing designs made after placing in a thermal furnace to spray method

بهترین عملکرد در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد برای طرح اختلاط حاوی ۶% الیاف شیشه و ۱۵ درصد متاکائولین می‌باشد که میزان افزایش مقاومت خمشی ۶۸/۸% درصد نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. همچنین در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد مربوط به نمونه‌های حاوی ۶% الیاف و ۱۰% متاکائولین با افزایش ۶۱% مقاومت خمشی می‌باشد. از طرفی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بیشترین افزایش مقاومت مربوط به نمونه‌ها ی حاوی ۶% الیاف شیشه و ۱۰% متاکائولین با افزایش ۵۵% مقاومت خمشی می‌باشد.

۶- نتایج بدست آمده در تحقیق

۶-۱- مدول گسیختگی

۱- مسلح کردن نمونه ها به الیاف شیشه در هر دو روش پیش‌مخلوط و اسپری، باعث افزایش قابل توجه مدول گسیختگی می شود.

۲- با توجه به نتایج بدست آمده مشخص است که با گذشت زمان از ۷ روز به ۹۰ روز، مدول گسیختگی در نمونه های تقویت شده با الیاف شیشه در هر دو روش پیش‌مخلوط و اسپری، به دلیل آسیب های وارده به الیاف شیشه در محیط بتن، کاهش یافته است. این مطالب نشان می‌دهد که مدول گسیختگی بتن مسلح به الیاف شیشه، تا حدود زیادی به شرایط الیاف شیشه موجود در بتن بستگی دارد.

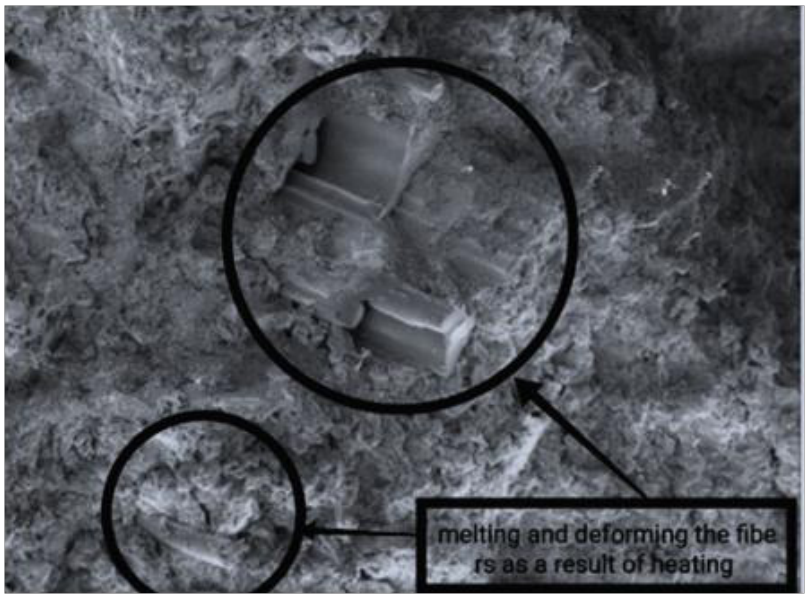
۶-۲- سهم مواد پوزولانی از مقاومت بتن

استفاده از مواد پوزولانی نظیر میکروسیلیس و متاکائولین، باعث افزایش مقاومت ویژه ی سیمان و مقاومت ویژه ی اثر پوزولانیک شده است. بر این اساس با افزایش میزان استفاده از این مواد از ۱۰% به ۱۵%، سهم مواد پوزولانی از مقاومت فشاری و مدول گسیختگی نمونه ها افزایش یافته است؛ اما در صورت استفاده از نانوسیلیس، با افزایش میزان استفاده از این ماده، سهم مواد پوزولانی از مقاومت فشاری و مدول گسیختگی نمونه های حاوی نانوسیلیس کاهش یافته است.

۶-۳- شاخص های طاقت

۱- به طور کلی استفاده از الیاف شیشه در بتن، باعث افزایش طاقت بتن می شود. با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه می شود که با افزایش میزان الیاف شیشه، شاخص های I_{10} و I_{20} به شدت افزایش می یابد.

۲- با بررسی نتایج بدست آمده ملاحظه می شود که مقادیر مربوط به شاخص های I_5 و I_{10} در نمونه های حاوی میکروسیلیس و متاکائولین نسبت نمونه های فاقد مواد پوزولانی، افزایش داشته است. با توجه به این نتایج بیشترین مقادیر شاخص های مذکور،



شکل ۲۳. تصویر SEM گرفته شده از نمونه‌های تست شده پس از حرارت دادن

Fig. 23. SEM image taken from the samples tested after heating

مربوط به نمونه های حاوی متاکائولین است.

۳- در روش پیش‌مخلوط، ملاحظه می شود که پس از گذشت ۲۸ روز، گسیختگی نهایی در بسیاری از طرح های اختلاط، در تغییرشکلی کمتر از تغییرشکل معادل با ۱۰/۵ برابر لحظه ی اولین ترک اتفاق می اُفتد. این موضوع پس از گذشت ۹۰ روز با شدت بیشتری رخ می‌دهد.

۴- در روش اسپری، شاخص I_{20} با افزایش مقدار الیاف شیشه از ۴% تا حدود ۵/۶% روند افزایشی و برای مقادیر بیشتر از ۵/۶% روند کاهشی داشته است. در این شرایط بیشترین مقادیر شاخص I_{20}، مربوط به نمونه های تقویت شده با ۴/۵% الیاف شیشه و حاوی ۱۵% متاکائولین می‌باشد.

۵-۶- مقاومت خمشی در برابر آتش‌سوزی

به منظور بررسی مقاوت الیاف شیشه در برابر حرارت نمونه‌ها موجود پس از گذشت ۹۰ روز مورد بررسی قرار داده شد. هدف اصلی در این تحقیق کنترل کاهش مقاومت خمشی و جلوگیری از ذوب شدن و تغییرشکل دادن الیاف در بتن با استفاده از مواد پوزولانی شامل میکروسیس، نانوسیلیس و متاکائولین با دو روش اختلاط پیش‌مخلوط و اسپری است که نتایج حاصل شده به شرح زیر می‌باشد.

۱- نکته مشترکی که در تمامی طرح‌های اختلاط مشهود است کاهش چشمگیر مقاومت خمشی کلیه طرح‌های اختلاط است.

۲- در روش پیش مخطوط مقاومت خمشی نمونه شاهد در درجه حرارت ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، ۱/۱۵ مگاپاسکال می‌باشد. در حالی که در روش اسپری ۲/۰۳ مگاپاسگال می‌باشد که نشان دهنده این است که در روش اسپری الیاف بهتر با بتن همگن شده است. این ادعا به وضوح در تصاویر SEM نشان داده شد.

۲- جهت کنترل کاهش مقاومت خمشی از میکروسیلیس، نانوسیلیس و متاکائولین در ماتریس سیمانی استفاده شد که ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به نانوسیلیس در هر دو روش اختلاط بود. از طرفی بهترین عملکرد در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد در روش پیش‌مخلوط مربوط به طرح اختلاط حاوی ۲/۵% الیاف شیشه و ۱۵% متاکائولین بود. همچنین در روش اسپری بهترین عملکرد مربوط به نمونه‌های حاوی ۶% الیاف شیشه و ۱۰% متاکائولین در بالاترین دمای آزمایش بود.

مراجع

[1] A. Enfedaque, L. Sunchez Paradela, V. Sunchez-Galvez, An Alternative Methodology to Predict Aging Effects on the Mechanical Properties of Glass Fibre Reinforced Cements (GRC), Construction and Building Materials, (2012) 425-431.

[2] K. L. Biryukovich, D. L Yu, Glass Fiber Reinforced Cement, Translated by G. L. Cairns (CERA Translation, 12), Civil Engineering Research Association, London, 1965.

[3] Y. Choi, L. Yuan, Experimental Relationship Between Splitting Tensile Strength and Compressive Strength of GFRC and PFRC, Cement and Concrete Research, (2005) 1587-1591.

[4] D. Mostofi Nejad, Experimental Investigation of Properties of Glass Fiber Reinforced Concrete (GFRC), Faculty of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Esteghlal Journal, 2001.

[5] A. Benture, S. Diamont, Direct Incorporation of Silica Fume into Glass Fiber Strands as a Means for Developing GFRC Composites of Improved Durability, The international Journal of Cement Composite and Lightweight Concrete, (1987) 127-135.

[6] Y. N. Chan, X. Luo, Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 C, Cement and Concrete Research, (2000) 247-251.

[7] A. Qadi, A. Zaidyeen, Effect of fibre content and specimen shape on residual strength of polypropylene fibre self-compacting concrete exposed to elevated temperatures, Journal of King Saud University Engineering Sciences, (2014) 33-39.

[8] O. Düğenci, T. Haktanir, F. Altun, Experimental research for the effect of high temperature on the mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete, Construction and Building Materials, (2015) 82-88.

[9] A. Nadeem, S. A. Memon, the performance of Fly ash and Metakaolin concrete at elevated temperatures, Construction and Building Materials, (2014) 67-76.

[10] ASTM C78-10, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM International, USA, (2010).

[11] ASTM C 1018 -97, Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete, ASTM International, USA, (1998).

[12] ASTM C1018, Standard Test Method for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading), Annual Book of ASTM Standards.

[13] ASTM committee C33-13, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, USA, (2013).

[14] NEG ARG FIBRE, "High Zirconia Alkali-Resistant Glass Fiber", Nippon Electric Glass, http://www.arg.neg.co.jp/.

[15] Chengdu Chang Yuan Shun CO., "Test Report of AR-Glass Fiber Roving", http://www.169chem.net

[16] ACI Committee 211, Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete, American Concrete Institute (ACI), ACI 211.1(2005).

[17] British Standard BS-EN1170-2, Measuring the Fiber Content in Fresh GRC, Wash out Test, (1998).

[18] B. Demirel, O. Kelestemur, Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume, Fire Safe, (2018) 385-391.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Jadidi, E. Zeighami., (2021). Investigation of the Effect of High-Temperature Glass Fibers and Pozzolanic Materials on Flexural Strength of Concrete by Pre-Mixing and Spraying Method. Amirkabir J. Civil Eng., 53(5): 2063-2090.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17288.6516

این صفحه عمداً خالی است