



Investigation of the Effect of High-Temperature Glass Fibers and Pozzolanic Materials on Flexural Strength of Concrete by Pre-Mixing and Spraying Method

A. Jadidi¹, E. Zeighami^{2,*}

¹Civil Engineering Department, Islamic Azad University (South Tehran Branch), Tehran, Iran.

²Civil Engineering Department, Islamic Azad University (Arak branch), Arak, Iran.

ABSTRACT: This paper uses glass fibers and pozzolanic materials with different percentages. To investigate the flexural strength and toughness indices of concrete produced by pre-mixing and spraying methods, 15 mixing designs containing different percentages of glass fibers and pozzolanic materials in the pre-mixed method and 14 mixing designs with spraying method have been tested. All mixing schemes were also tested at 350, 650, and 1000 °C, and the results were analyzed by scanning electron microscope (SEM). The use of pozzolanic materials in specimens reinforced with glass fiber improves the modulus of rupture. The modulus of rupture in the presence of heat and the event of a fire is greatly reduced, which is a better performance for controlling this reduction process. Also, the flexural strength of high-temperature samples (1000 °C) can be significantly increased by using metakaolin at different percentages of 10 and 15%.

Review History:

Received: Oct. 30, 2019

Revised: Jan. 22, 2020

Accepted: Feb. 01, 2020

Available Online: Mar. 01, 2020

Keywords:

Glass Fibers

Micro Silica

Metakaolin

Fire

Sem Device.

1- Introduction

Due to the thickness and low weight of the parts made of glass-reinforced concrete, it is impossible to use reinforcement in the manufacture of these products. For this purpose, glass fibers are used to improve the concrete behavior under tensile and flexural loads and to increase the toughness. Glass fiber reinforced concrete can be used to make parts in different shapes and designs. In the past, concrete has only been used in the manufacture of non-structural products for the restoration of buildings, sewer lining, tunnel cover, riverbed, and acoustic barriers. But in recent years, this concrete has been used as an acceptable structural material for the construction of industrial halls, prefabricated roofs, and telecommunication towers [1].

In this study, glass fiber and polypropylene fibers with 1% and 1.5% volume of concrete were used. After fabricating the specimens, it was concluded that by increasing the glass fiber content from 1% to 1.5%, the efficiency of the concrete decreased drastically and the uniform distribution of fibers in the mortar became impossible [2]. Mostofi Nejad *et al.* studied the mechanical properties of glass fiber reinforced concrete with different percentages of fibers and different sand-to-sand ratios. They used four different percentages of glass fibers (0%, 1.5%, 3%, and 4.5%). After examining the compressive strength of the specimens reinforced with glass

fibers, they concluded that if 4.5% of the glass fibers was used, the compressive strength would be reduced due to the phenomenon of fibers being shot [3].

2- Experimental program

The purpose of this study is to investigate the effect of fibers and adhesives on glass fiber reinforced concrete parameters. In the following, we describe each of the resistance and behavioral components examined in this study. The bending test was performed according to BS-EN1170-5 [4] and ASTM C78 [5] by a four-point bending machine. Usually, the strength of concrete under flexural loading is determined by the bending behavior of beams with simple supports. In addition to the bending test, the below hammer test was also used to calculate the hardness of the concrete. Flexural loading is commonly used to calculate hardness in glass fiber reinforced concrete. In this study, only fine grains (silica sand) were used. It should be noted that to have high-quality concrete, compliance with the requirements of ASTM C33 [6] is required. In this research, Portland cement of Isfahan cement factory was used. The water used in this study is Arak drinking water which is acceptable in quality. In this study, different percentages of micro silica, metakaolin, and nanosilica were used as substitutes for cement in a glass fiber reinforced concrete mixing scheme.

*Corresponding author's email: e-zeighami@iau-arak.ac.ir



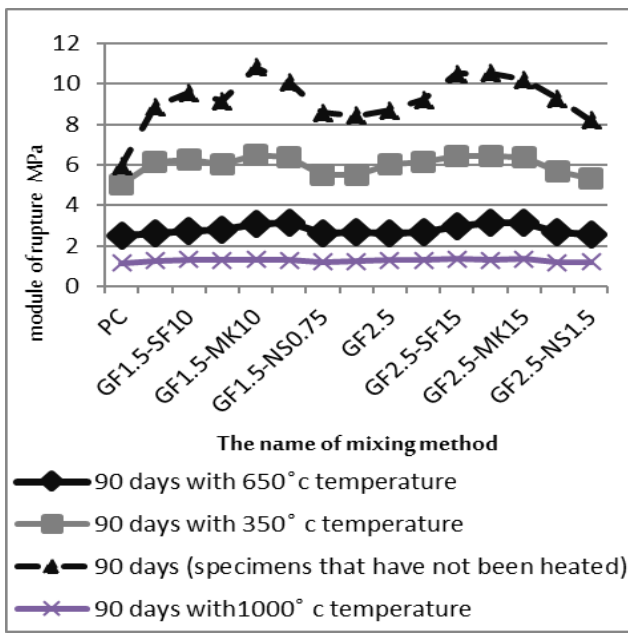


Fig. 1. Modulus of rupture in all mixing designs made after placing in a thermal furnace to pre-mixed method

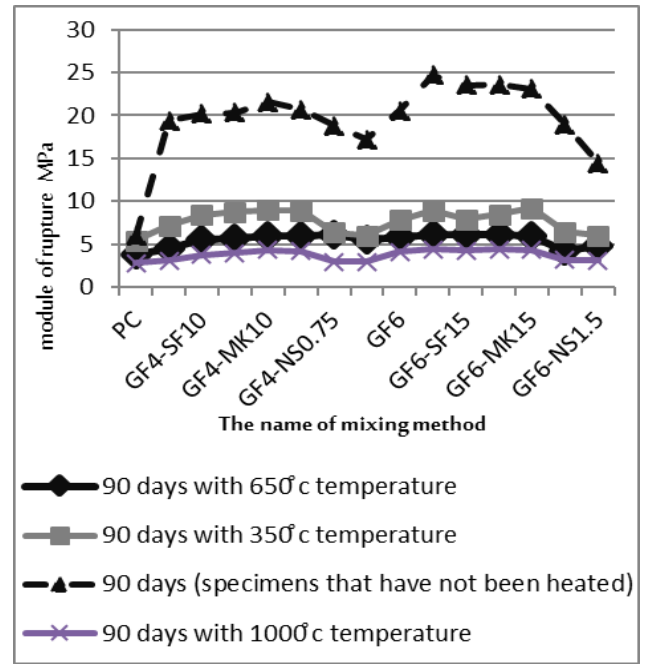


Fig. 2. Modulus of rupture in all mixing designs made after placing in a thermal furnace to spray method

The silica used in this research is a product of Iran Ferroalloy Industries Company. The nanosilica used in this research, with the industrial name of Arosil, is a product of Unicom Germany. In this study, the WD 500 super-lubricant manufactured by Arman Chemical Company was used. Two types of glass fibers are used to make concrete in the pre-mixed and spray methods.

3- Results and Discussion

According to all internationally accepted standards, the temperature of fires reaches around 1100 degrees Celsius over time. To simulate the fire temperatures, the specimens were placed in a casting furnace. The furnace temperature change cycle was chosen so that the furnace temperature could rise to 200 °C for every 2 hours. This process continued at 800 °C for 5 hours. Then at the end of the fifth hour, the temperature reached 900 degrees Celsius and at the end of the sixth hour, the temperature reached 1000 degrees Celsius. Given the risk of overheating, it was decided to set the maximum temperature at 1000 °C. Also, from each mixing scheme, 5 samples were set on fire. It should be noted that the temperature of the furnace was raised to 350 °C in the first stage and the specimens were placed in the furnace for bending tests. In the second and third stages, the furnace temperature was raised to 650 and 1000 °C, and the bending test results were investigated. Figs. 1 and 2 are plotted to compare the flexural strength of the control specimens made by pre-mixing and spraying methods, with the specimens being placed at 3, 350, 650, and 1000 °C.

4- Conclusion

According to Figs. 1 and 2, it can be concluded that generally increasing the temperature significantly decreases the bending strength. This decrease is due to the melting of fibers or the deformation of glass fibers due to the high temperature in the concrete. Also, according to the results obtained at different temperatures, it can be concluded that glass fibers perform well at temperatures up to 350 degrees Celsius, gradually increasing to 650 degrees Celsius and then 1000 degrees Celsius. The SEM image is taken from the tested sample after warm-up confirms this well (Figure 24). In this study, pozzolanic materials such as Microcrystalline, nanosilica, and metakaolin were used to control this decrease in flexural strength and to prevent melting and deformation of fibers in concrete. The results show that in the pre-mixed method, the best performance at 350 °C compared to the control sample for the mixing design was 2.5% glass fiber and 15% metakaolin as well as samples containing 2.5% glass fiber and 15% micro silica, in both the bending strength increased 28.5 percent compared to control sample. Also at 650 °C, it contains samples containing 2.5% fibers and 15% metakaolin with a 25% increase in resistance. On the other hand, at 1000 °C, the samples contained 2.5% glass fiber and 15% metakaolin with an 18% increase in flexural strength.

In the spray method due to the good mixing of cementitious matrix materials, the best performance at 350 °C for mixing design is 6% glass fiber and 15% metakaolin, which increased flexural strength by 68.8% compared to the control. Also at 650 °C, it contains samples containing 6% fibers and 10%

metakaolin with a 61% increase in flexural strength. On the other hand, at 1000 °C, the highest increase was observed for samples containing 6% glass fiber and 10% metakaolin with a 55%

References

[1] Enfedaque, L. Sánchez Paradela, V. Sánchez-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] Y. Choi, L. Yuan, Experimental Relationship Between Splitting Tensile Strength and Compressive Strength

of GFRC and PFRC, *Cement and Concrete Research*, (2005) 1587-1591.

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

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

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

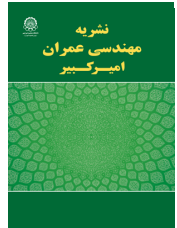
[6] ASTM committee C33-13, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, USA, (2013).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Jadidi, E. Zeighami., *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) (2021) 463-466

DOI: [10.22060/ceej.2020.17288.6516](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17288.6516)





بررسی تأثیر الیاف شیشه و مواد پوزولانی در دمای بالا بر روی مقاومت خمشی بتن با روش پیش مخلوط 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.

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

آتش سوزی

دستگاه SEM.

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 طاق در بتن تولید شده به دو روش پیش مخلوط و اسپری، ۱۵ طرح اختلاط حاوی درصد های مختلف الیاف شیشه و مواد پوزولانی در روش پیش مخلوط و ۱۴ طرح اختلاط در روش اسپری، مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنین کلیه طرح های 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 آتش سوزی به شدت کاهش می یابد که برای کنترل این روند کاهش روش اسپری عملکرد بهتری دارد. همچنین در صورت استفاده از متاکائولین در درصد های مختلف ۱۰ و ۱۵ می توان مقاومت خمشی نمونه های تحت حرارت بالا (۱۰۰۰ درجه سانتیگراد) را تا میزان قابل توجهی افزایش داد.

۱- مقدمه

مخابراتی، مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. مهم ترین یافی 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 می گردد [۲]. چوبی 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

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 طاق، از الیاف شیشه استفاده می شود. از بتن تقویت شده با الیاف شیشه می توان به منظور ساخت قطعات در اشکال و طرح های مختلف استفاده کرد. در گذشته از این بتن تنها در تولید محصولات 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 پیش ساخته و برج های * نویسنده عهده دار مکاتبات: phd.civil.zeighami@gmail.com

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 افت 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 الیاف‌های بتن گردید و در نهایت منجر به افت بیشتر مقاومت در مقایسه با نمونه‌های خنک شده در معرض هوا شد. همچنین عمده افت 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 (پیش مخلوط 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

همکاران مطالعه ای را بر روی خواص مکانیکی بتن مسلح به الیاف شیشه با توجه به درصد‌های مختلف الیاف و نسبت‌های مختلف شن به ماسه انجام دادند. در این تحقیق آن‌ها از چهار درصد مختلف الیاف شیشه (۰٪، ۱/۵٪، ۳٪، ۴/۵٪) استفاده کردند. آن‌ها پس از بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های 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 می‌یابد [۴]. بنتور و همکارانش روش متفاوت برای ساخت بتن مسلح به الیاف شیشه پیشنهاد کردند. در این روش رشته‌های الیاف شیشه قبل از اینکه در ماتریس سیمان گنجانیده شوند، در دوغاب میکروسیلیس قرار داده می‌شدند. آن‌ها پس از انجام آزمایش خمش چهار نقطه‌ای به این نتیجه رسیدند که پس از ۲۸ روز قرار گرفتن در آب داغ ۵۰ درجه سانتیگراد، مدول گسیختگی^۱ و طاقت نمونه‌ها 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 نمونه‌هایی که الیاف آن‌ها 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 می‌یابد. آن‌ها نشان دادند که تمام کامپوزیت‌های 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 افت 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 ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد تأثیر چندانی

1 Module of rupture



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

به استاندارد های مربوط به آزمایش طاقتم خمشی مانند ASTM C ۱۰۱۸ [۱۲]، مقادیر طاقتم از تحلیل منحنی بار- تغییرمکان محاسبه می شود. در این تحقیق به منظور بررسی طاقتم بتن مسلح به الیاف از استاندارد ASTM C ۱۰۱۸ استفاده می شود. در این روش، رفتار تیر های بتنی تحت بار های ناشی از خمش چهار نقطه ای مورد بررسی قرار می گیرد. استاندارد ASTM C ۱۰۱۸، طاقتم را به صورت تابعی از سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان تا یک تغییر شکل معین تعریف می کند. در این روش به منظور بررسی طاقتم نمونه های تحت خمش تا رسیدن به یک جابه جایی مشخص، از شاخص های طاقتم و فاکتور های مقاومت باقی مانده که در زیر معرفی شده اند، استفاده می شود. ۱- شاخص طاقتم I_5 : شاخص مربوط به جابه جایی معادل با ۳ برابر جابه جایی در لحظه ی اولین ترک. ۲- شاخص طاقتم I_{10} : شاخص مربوط به جابه جایی معادل با ۵/۵ برابر جابه جایی در لحظه ی اولین ترک. ۳- شاخص طاقتم I_{20} : شاخص مربوط به جابه جایی معادل با ۱۰/۵ برابر جابه جایی در لحظه ی اولین ترک. پارامتر های استفاده شده در این قسمت عبارتند از:

الف) $R_{5,10}$: این پارامتر بیان کننده ی میزان تحمل تیر در برابر بار های وارده، در فاصله ی بین جابه جایی معادل شاخص های طاقتم I_5 و I_{10} می باشد.

$$R_{5,10} = 20 \times (I_{10} - I_5) \quad (1)$$

ب) $R_{10,15}$: این پارامتر بیان کننده ی میزان تحمل تیر در برابر بار های وارده، در فاصله ی بین جابه جایی معادل شاخص های طاقتم I_{10} و I_{20} می باشد.

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 میکروسلیس، متاکائولین و نانوسلیس بر روی مدول گسیختگی بتن در درجه حرارت بالا می پردازد.

۲-۱- آزمایش خمش ۴ نقطه ای

آزمایش خمش بر اساس استاندارد های BS-EN ۱۱۷۰-۵ [۱۰] و ASTM C ۷۸ [۱۱] به وسیله ی دستگاه خمش چهار نقطه ای (شکل ۱) انجام می شود. در این روش به منظور ترسیم نمودار بار - تغییرمکان، از سه جابه جایی سنج الکترونیکی استفاده می شود. این جابه جایی سنج ها باید به گونه ای نصب شوند که بتوان از طریق نتایج ثبت شده در آن ها، جابه جایی دقیق مرکز تیر را تعیین کرد. در این تحقیق به منظور بررسی مقاومت خمشی، نمونه های ساخته شده به دو روش پیش مخلوط و اسپری پس از ۷ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفته اند.

۲-۲- طاقتم بتن

معمولاً طاقتم 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 طاقتم بتن استفاده می شود. به طور معمول از بارگذاری خمشی برای محاسبه ی طاقتم در بتن های مسلح به الیاف شیشه استفاده می شود. با توجه

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

$$R_{10.20} = 10 \times (I_{20} - I_{10}) \quad (2)$$

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

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]

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

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

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

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



شکل ۲. الیاف شیشه‌ای مورد استفاده در این تحقیق
Fig. 2. Glass fibers used in this study

جدول ۳. مقادیر مصالح مصرفی در طرح‌های اختلاط بتن پیش‌مخلوط [۱۷]
Table 3. Quantity of materials consumed in pre-mixed concrete mixing designs

علامت اختصاری	الیاف	میکروسیلیس	متاکائولی	نانوسیلیس	فوق روان کننده	سیمان		آب
						بر حسب درصد وزنی	بر حسب درصد وزنی	
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	۹۱۷/۵۳	۸۳۴/۱۲	۳۲۱/۱۳
GF1.5-SF15	۱/۵	۱۵	۰	۰	۱	۹۱۳/۲	۷۹۴/۰۹	۳۱۹/۶۲
GF1.5-MK10	۱/۵	۰	۱۰	۰	۱	۹۱۵/۶۷	۸۳۲/۴۳	۳۲۰/۴۸
GF1.5-MK15	۱/۵	۰	۱۵	۰	۱	۹۰۸/۱۸	۷۸۹/۷	۳۱۷/۸۶
GF1.5-NS0.75	۱/۵	۰	۰	۰/۷۵	۱	۹۲۶/۸	۹۱۹/۹	۳۲۴/۳۸
GF1.5-NS1.5	۱/۵	۰	۰	۱/۵	۱	۹۲۵/۹۷	۹۱۲/۲۹	۳۲۴/۰۹
GF2.5-SF10	۲/۵	۱۰	۰	۰	۱	۹۱۰	۸۲۷/۲۷	۳۱۸/۵
GF2.5-SF15	۲/۵	۱۵	۰	۰	۱	۹۰۵/۷۱	۷۸۷/۵۷	۳۱۷
GF2.5-MK10	۲/۵	۰	۱۰	۰	۱	۹۰۸/۱۶	۸۲۵/۶	۳۱۷/۸۵
GF2.5-MK15	۲/۵	۰	۱۵	۰	۱	۹۰۰/۷۲	۷۸۳/۲۳	۳۱۵/۳۵
GF2.5-NS0.75	۲/۵	۰	۰	۰/۷۵	۱	۹۱۹/۱۸۵	۹۱۲/۳۴	۳۲۱/۷۱
GF2.5-NS1.5	۲/۵	۰	۰	۱/۵	۱	۹۱۸/۳۷	۹۰۴/۷۹	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

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

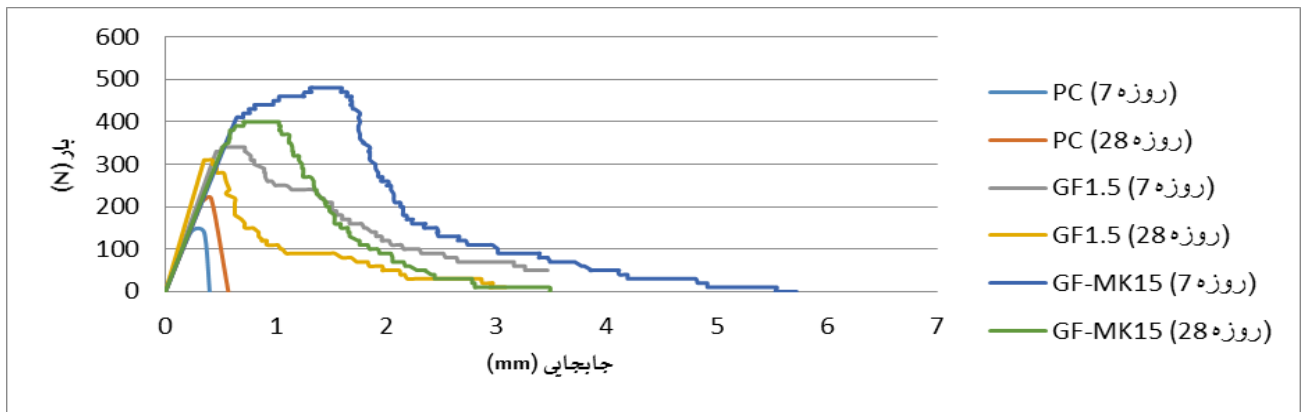
شده است.

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 پیش مخلوط امکان پذیر می باشد.

با مقایسه ی نمونه های ساخته شده در روش اسپری با نمونه های ساخته شده در روش پیش مخلوط، مشخص است که در روش اسپری بار و جابه جایی نمونه ها تا لحظه ی شکست، مقدار بسیار بیشتری نسبت به نمونه های ساخته شده در روش پیش مخلوط دارند. در نمونه های ساخته شده به روش پیش مخلوط، 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 ترک خوردگی 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

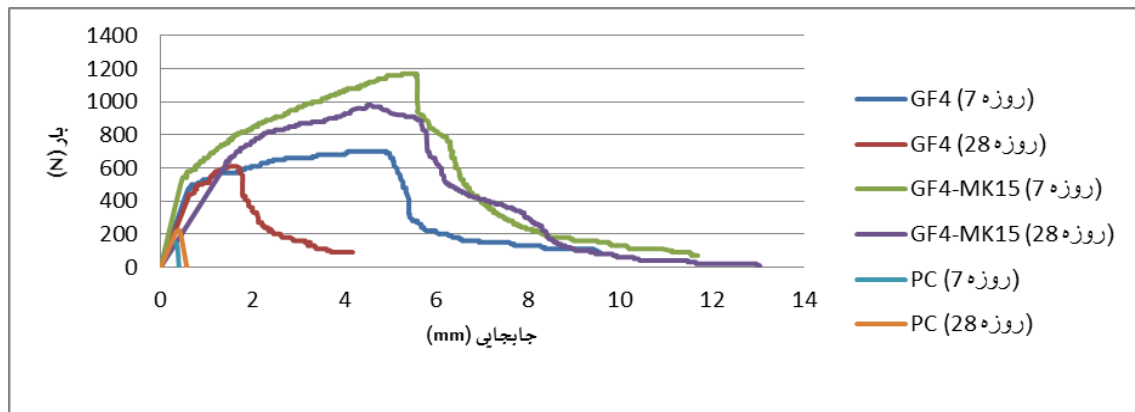
۴- نتایج آزمایش ها

در ادامه نتایج به دست آمده برای آزمایش های انجام شده درج خواهد شد. در این تحقیق به منظور بررسی مقاومت خمشی، نمونه های ساخته شده به دو روش پیش مخلوط 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 نمی باشد. ضخامت در نمونه های ساخته شده بین ۱۲ الی ۱۷ میلی متر متغیر است. نمودار های بار- تغییر مکان در شکل های ۳ و ۴ بیان گر رفتار خمشی تعدادی از نمونه های تقویت شده با الیاف شیشه در روش های پیش مخلوط و اسپری می باشد. همان طور که در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است، با توجه



شکل ۳. نمودار بار- تغییرمکان نمونه هایی از طرح های تقویت شده با ۱/۵٪ الیاف شیشه در روش پیش مخلوط 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

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 می‌شود 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 می‌یابد. 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 می‌شود 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 می‌شود که مقادیر

به الیاف شیشه، به یکی از دو روش زیر محاسبه می‌شود
۱- در صورتی که سطح شکست در ناحیه یک سوم میانی تیر قرار گیرد، تنش در لحظه ی اولین ترک و مدول گسیختگی از رابطه ی (۳) محاسبه می‌شوند.

(۳)

در این رابطه:

$$\sigma = PL / bd^2 \quad (\text{MPa})$$

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 می‌شود.

(۴)

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

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 می‌شود، 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 می‌آید. لازم به ذکر است که نسبت الیاف با توجه به کارایی بتن انتخاب شده است و تا زمانی که بتن کارایی قابل

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

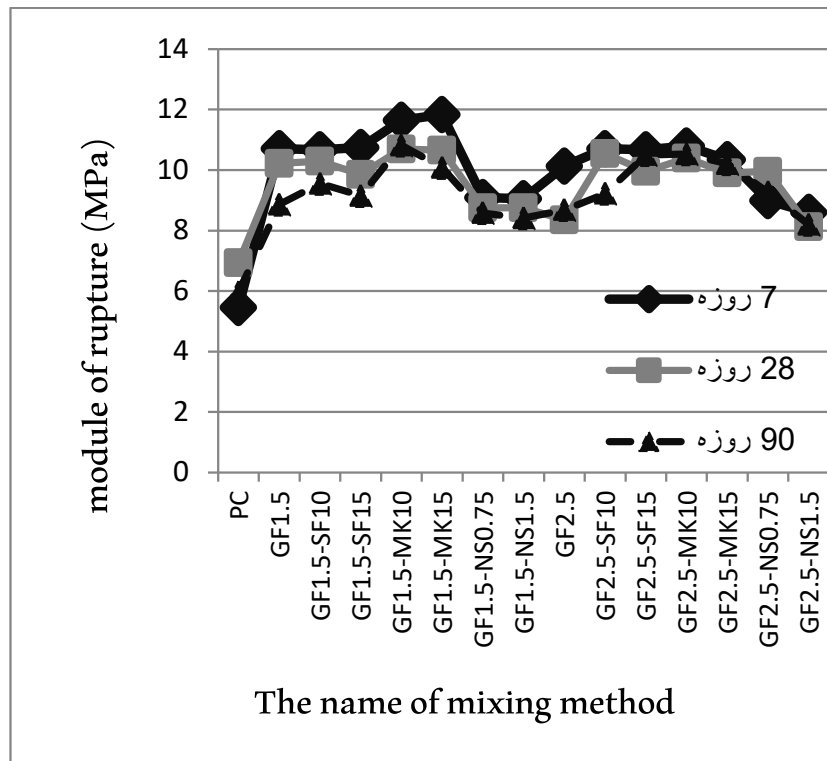
Table 5. Results of bending strength test for specimens made by pre-mixed method

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

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

نتایج تست Wash out	<i>MOR</i> (MPa)	Δ_{MOR} (mm)	<i>P_{MOR}</i> (N)	<i>LOP</i> (MPa)	Δ_{LOP} (mm)	<i>P_{LOP}</i> (N)	نام طرح
۴/۰۴٪	۱۹/۴	۲۹/۰۵	۷۵۰	۱۲/۴۲	۶/۰۵	۴۸۰	GF4
۴/۷٪	۲۰/۱۹۵	۵۱/۶	۸۲۰	۱۳/۳	۴/۴	۵۴۰	GF4-SF10
۴/۱۳٪	۲۰/۳	۳۱/۳	۷۴۰	۱۴	۳	۵۱۰	GF4-SF15
۴/۲۹٪	۲۱/۵۷	۳۹/۳	۱۰۶۰	۱۱/۳۹	۸	۵۶۰	GF4-MK10
۴/۵٪	۲۰/۶۸	۲۲/۳۸	۹۰۰	۱۲/۱۷۸	۵/۴	۵۳۰	GF4-MK15
۴/۶٪	۱۸/۸	۲۸/۸	۶۸۰	۱۳/۰۲	۴/۹	۴۷۰	GF4-NS0.75
۴/۷٪	۱۷/۲۲	۱۴/۶	۶۵۰	۱۲/۱۹	۴/۶	۴۶۰	GF4-NS1.5
۵/۷۳٪	۲۰/۵۴	۳۱/۷۵	۷۰۰	۱۲/۰۳	۵/۷	۴۱۰	GF6
۵/۸٪	۲۴/۷	۴۵/۴۲	۸۳۰	۱۴/۲۸	۲/۶	۴۸۰	GF6-SF10
۵/۶٪	۲۳/۵	۵۲/۷۵	۹۸۰	۱۳/۶۸	۵/۶۵	۵۷۰	GF6-SF15
۵/۹٪	۲۳/۵۷	۳۹/۸	۷۷۰	۱۰/۴	۵/۵	۳۴۰	GF6-MK10
٪۶	۲۳/۰۵	۳۲/۳	۸۴۰	۱۳/۱۷	۶	۴۸۰	GF6-MK15
٪۶	۱۸/۹۱	۳۵	۷۸۰	۱۳/۰۹	۱/۸	۵۴۰	GF6-NS0.75
۶/۱٪	۱۴/۴۰۸	۳۹/۷۵	۵۷۰	۷/۰۷	۳/۲	۲۸۰	GF6-NS1.5



شکل ۵. مدول گسیختگی در تمام طرح های اختلاط ساخته شده به روش پیش مخلوط
 Fig. 5. Rupture modulus in all mixing designs made by pre-mixing method

تقویت شده با ۴٪ الیاف شیشه و فاقد مواد پوزولانی، افزایش یافته است.

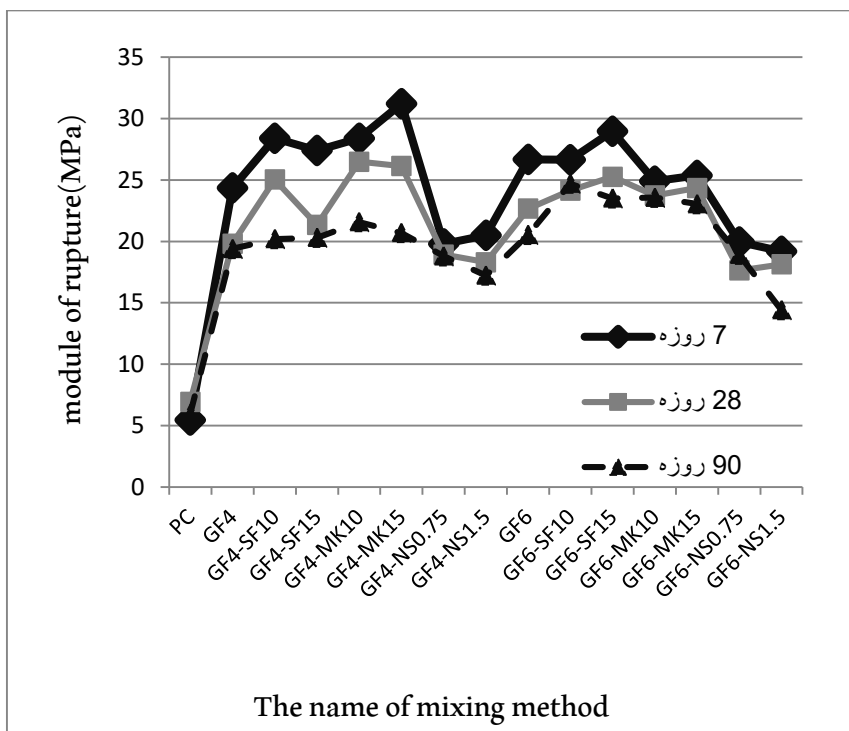
با دقت در شکل های ۹ و ۱۰، مشاهده می گردد که شاخص I_{10} در نمونه های ساخته شده به دو روش پیش مخلوط و اسپری، با افزایش میزان الیاف شیشه ی مورد استفاده، افزایش می یابد. به طور مثال در نمونه های ساخته شده به روش پیش مخلوط، با افزایش درصد الیاف شیشه از ۱/۵٪ به ۲/۵٪، شاخص طاق با طور متوسط به میزان ۹/۱٪ افزایش یافته است. همچنین در نمونه های ساخته شده به روش اسپری، با افزایش درصد الیاف شیشه از ۴٪ به ۶٪، شاخص طاق با 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 پیش مخلوط و اسپری، به ترتیب در شکل های ۱۱ و ۱۲ ترسیم شده است.

همان طور که در این نمودارها ملاحظه می شود با افزایش میزان

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 می باشد. 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



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 پیش مخلوط

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

درصد تحمل بار بعد از ترک خوردگی			شاخص طاقت			نام طرح
$20R_{10}$	$10R_5$	I_{20}	I_{10}	I_5		
۰	۰	۱	۱	۱	PC	
۸/۶	۳۴/۲	۶/۵۹	۵/۷۳	۴/۰۲	GF1.5	
۳/۲	۴۰	۷/۶۲	۷/۳	۵/۳	GF1.5-SF10	
۱/۸	۳۱/۶	۶/۹۸	۶/۸	۵/۲۲	GF1.5-SF15	
۹/۸	۳۶/۲	۷/۶۵	۶/۶۷	۴/۸۶	GF1.5-MK10	
۱۹/۲	۵۱/۲	۹/۷	۷/۷۸	۵/۲۲	GF1.5-MK15	
۰/۹۴	۲۶/۸	۵/۰۹۴	۵	۳/۶۶	GF1.5-NS0.75	
۱۰/۲	۱۹/۷۴	۶/۰۶	۵/۰۴	۴/۰۵۳	GF1.5-NS1.5	
۱۴/۱	۲۳/۶	۶/۹۵	۵/۵۴	۴/۳۶	GF2.5	
۳/۲	۳۱/۶	۶/۶۲	۶/۳	۴/۷۲	GF2.5-SF10	
۵/۱	۳۴	۷/۰۴	۶/۵۳	۴/۸۳	GF2.5-SF15	
۶/۱	۴۴/۶	۸/۲۴	۷/۶۳	۵/۴	GF2.5-MK10	
۶/۸	۵۱/۴	۸/۵۵	۷/۸۷	۵/۳	GF2.5-MK15	
۲	۳۲/۲	۵/۹۶	۵/۷۶	۴/۱۵	GF2.5-NS0.75	
۰/۰۶	۱۰/۶	۴/۳۰۶	۴/۳	۳/۷۷	GF2.5-NS1.5	

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

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

درصد تحمل بار بعد از ترک خوردگی			شاخص طاقت			نام طرح
$20R_{10}$	$10R_5$	I_{20}	I_{10}	I_5		
۰	۰	۱	۱	۱	PC	
۸/۶	۳۴/۲	۶/۵۹	۵/۷۳	۴/۰۲	GF1.5	
۳/۲	۴۰	۷/۶۲	۷/۳	۵/۳	GF1.5-SF10	
۱/۸	۳۱/۶	۶/۹۸	۶/۸	۵/۲۲	GF1.5-SF15	
۹/۸	۳۶/۲	۷/۶۵	۶/۶۷	۴/۸۶	GF1.5-MK10	
۱۹/۲	۵۱/۲	۹/۷	۷/۷۸	۵/۲۲	GF1.5-MK15	
۰/۹۴	۲۶/۸	۵/۰۹۴	۵	۳/۶۶	GF1.5-NS0.75	
۱۰/۲	۱۹/۷۴	۶/۰۶	۵/۰۴	۴/۰۵۳	GF1.5-NS1.5	
۱۴/۱	۲۳/۶	۶/۹۵	۵/۵۴	۴/۳۶	GF2.5	
۳/۲	۳۱/۶	۶/۶۲	۶/۳	۴/۷۲	GF2.5-SF10	
۵/۱	۳۴	۷/۰۴	۶/۵۳	۴/۸۳	GF2.5-SF15	
۶/۱	۴۴/۶	۸/۲۴	۷/۶۳	۵/۴	GF2.5-MK10	
۶/۸	۵۱/۴	۸/۵۵	۷/۸۷	۵/۳	GF2.5-MK15	
۲	۳۲/۲	۵/۹۶	۵/۷۶	۴/۱۵	GF2.5-NS0.75	
۰/۰۶	۱۰/۶	۴/۳۰۶	۴/۳	۳/۷۷	GF2.5-NS1.5	

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

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

درصد تحمل بار بعد از ترک خوردگی			شاخص طاقت			نام طرح
$20R_{10}$	$10R_5$	I_{20}	I_{10}	I_5		
۰	۰	۱	۱	۱	PC	
۲/۷	۱۷/۴	۴/۸۹	۴/۶۲	۳/۷۵	GF1.5	
۱/۶	۱۴/۴	۵/۷۸	۵/۶۲	۴/۹	GF1.5-SF10	
۴/۱	۲۵/۸	۶/۶۵	۶/۲۴	۴/۹۵	GF1.5-SF15	
۷	۳۰/۸	۷/۱۴	۶/۴۴	۴/۹	GF1.5-MK10	
۸/۱	۱۷/۸	۶/۷۹	۵/۹۸	۵/۰۹	GF1.5-MK15	
۰/۸	۲/۸	۳/۷۲	۳/۶۴	۳/۵	GF1.5-NS0.75	
۷/۳	۶/۶	۵/۰۸	۴/۳۵	۴/۰۲	GF1.5-NS1.5	
۶/۷	۲۴/۲	۶/۰۷	۵/۴	۴/۱۹	GF2.5	
۶/۵	۱۸/۸	۵/۸۲	۵/۱۷	۴/۲۳	GF2.5-SF10	
۹/۱	۲۳/۶	۶/۳۳	۵/۴۲	۴/۲۴	GF2.5-SF15	
۳/۹	۳۹/۴	۷/۵۶	۷/۱۷	۵/۲	GF2.5-MK10	
۴/۶	۲۸/۴	۶/۹۸	۶/۵۲	۵/۱	GF2.5-MK15	
۵/۷	۱۱/۶	۵/۰۷	۴/۵	۳/۹۲	GF2.5-NS0.75	
۱/۲	۱۰/۲	۴/۱۸	۴/۰۶	۳/۵۵	GF2.5-NS1.5	

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

درصد تحمل بار بعد از ترک خوردگی			شاخص طاقت			نام طرح
$20R_{10}$	$10R_5$	I_{20}	I_{10}	I_5		
۰	۰	۱	۱	۱	PC	
۱۱۵	۱۳۸	۲۳/۹۴	۱۲/۴۴	۵/۵۴	GF4	
۱۵۸/۵۲	۱۳۵/۷۶	۲۸/۷۷	۱۲/۹۱۸	۶/۱۳	GF4-SF10	
۱۷۵/۱	۱۴۷/۴	۳۰/۹۶	۱۳/۴۵	۶/۰۸	GF4-SF15	
۱۸۰/۵	۱۵۳/۸	۳۱/۵۷	۱۳/۵۲	۵/۸۳	GF4-MK10	
۱۸۱/۷	۱۵۸	۳۱/۸۵	۱۳/۶۸	۵/۷۸	GF4-MK15	
۱۲۹/۵۸	۱۳۲/۴	۲۵/۲۱۸	۱۲/۲۶	۵/۶۴	GF4-NS0.75	
۱۱۱/۶	۱۳۵/۶	۲۳/۴	۱۲/۲۴	۵/۴۶	GF4-NS1.5	
۱۴۵/۳۱	۱۳۲/۴	۲۷/۰۸۱	۱۲/۵۵	۵/۹۳	GF6	
۱۵۴/۱	۱۳۷/۸	۲۸/۱۴	۱۲/۷۳	۵/۸۴	GF6-SF10	
۱۷۸/۵	۱۵۴	۳۱	۱۳/۱۵	۵/۸	GF6-SF15	
۱۷۱/۷	۱۶۰/۲	۳۱/۲۷	۱۴/۱	۶/۰۹	GF6-MK10	
۱۶۷/۵	۱۵۲/۰۶	۳۰/۵۲	۱۳/۷۸	۶/۱۷۷	GF6-MK15	
۱۲۵/۶	۱۳۷/۶	۲۴/۸۳	۱۲/۲۷	۵/۳۹	GF6-NS0.75	
۱۱۴/۶	۱۴۲/۲	۲۳/۸۲	۱۲/۳۶	۵/۲۵	GF6-NS1.5	

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

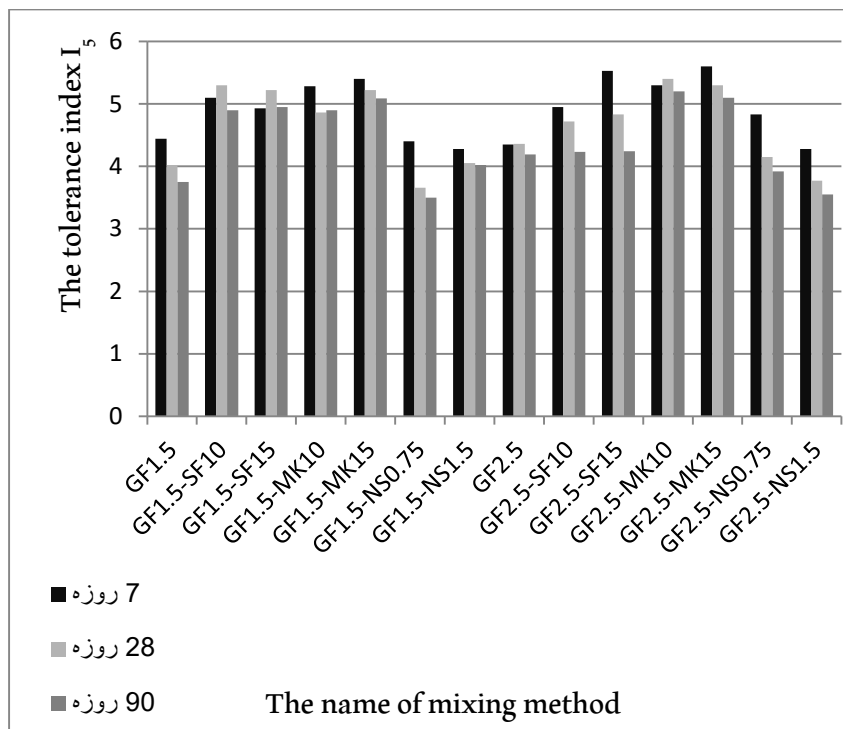
Table 11. Results of tolerate indices and load tolerance after 28 days in specimens made by spray method

درصد تحمل بار بعد از ترک خوردگی			شاخص طاقت			نام طرح
$20R_{10}$	$10R_5$	I_{20}	I_{10}	I_5		
۰	۰	۱	۱	۱	PC	
۱۰۲	۱۲۱/۷۲	۲۲/۳	۱۲/۱	۶/۰۱۴	GF4	
۱۵۹/۳	۱۲۲/۸	۲۸/۵	۱۲/۵۷	۶/۴۳	GF4-SF10	
۱۳۱/۲	۱۵۲/۴	۲۷/۱۹	۱۴/۰۷	۶/۴۵	GF4-SF15	
۱۷۲/۶	۱۵۶	۳۱/۰۳	۱۳/۷۷	۵/۹۷	GF4-MK10	
۱۵۳/۶	۱۴۲/۴	۲۸/۸۶	۱۳/۵	۶/۳۸	GF4-MK15	
۱۲۵/۱	۱۲۳/۴	۲۴/۰۴	۱۱/۵۳	۵/۳۶	GF4-NS0.75	
۹۴/۸	۱۱۱/۴	۲۰/۴۹	۱۱/۰۱	۵/۴۴	GF4-NS1.5	
۱۲۰/۳	۱۴۷	۲۵/۳۳	۱۳/۳	۵/۹۵	GF6	
۱۲۴/۵	۱۵۴/۲	۲۶/۰۱	۱۳/۵۶	۵/۸۵	GF6-SF10	
۱۴۴/۴۳	۱۶۱/۹۴	۲۸/۵۳	۱۴/۰۸۷	۵/۹۹	GF6-SF15	
۱۴۸/۵	۱۵۴/۶	۲۸/۷۵	۱۳/۹	۶/۱۷	GF6-MK10	
۱۳۶/۱۷	۱۶۰	۲۸/۱۸۷	۱۴/۵۷	۶/۵۷	GF6-MK15	
۱۱۹/۴	۱۲۸/۸	۲۳/۷۲	۱۱/۷۸	۵/۳۴	GF6-NS0.75	
۷۴	۱۳۶/۸	۱۹/۵۴	۱۲/۱۴	۵/۳	GF6-NS1.5	

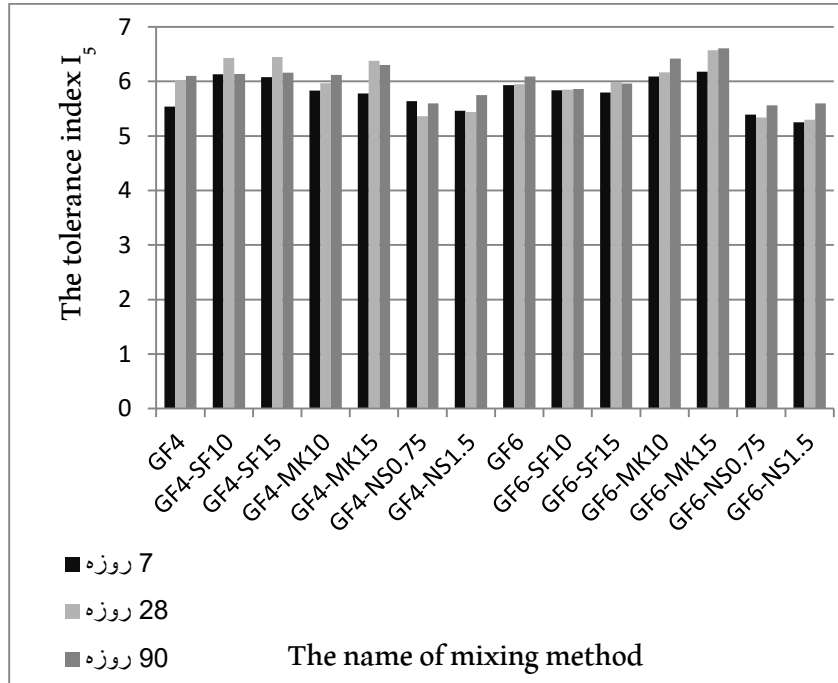
جدول ۱۲. نتایج مربوط به شاخص های طاقت و درصد تحمل بار پس از ۹۰ روز در نمونه های ساخته شده به روش اسپری

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

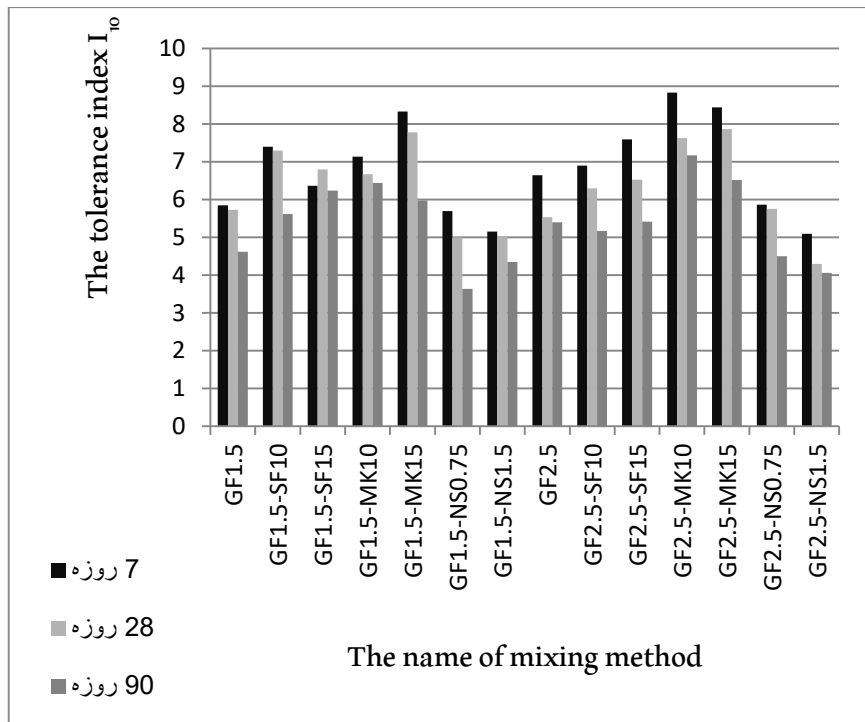
درصد تحمل بار بعد از ترک خوردگی		شاخص طاقت			نام طرح
$20R_{10}$	$10R_5$	I_{20}	I_{10}	I_5	
۰	۰	۱	۱	۱	PC
۸۶/۶	۱۲۰/۲	۲۰/۷۷	۱۲/۱۱	۶/۱	GF4
۱۳۰/۸	۱۲۵/۲	۲۵/۴۸	۱۲/۴	۶/۱۴	GF4-SF10
۱۴۱/۱	۱۲۵/۵۴	۲۶/۵۵	۱۲/۴۴	۶/۱۶۳	GF4-SF15
۱۵۰/۳	۱۴۹	۲۸/۶	۱۳/۵۷	۶/۱۲	GF4-MK10
۱۴۳/۹	۱۴۳/۴	۲۷/۸۶	۱۳/۴۷	۶/۳	GF4-MK15
۸۶/۳	۱۱۹	۲۰/۱۸	۱۱/۵۵	۵/۶	GF4-NS0.75
۹۰	۱۰۲	۱۹/۸۵	۱۰/۸۵	۵/۷۵	GF4-NS1.5
۹۸/۶۸	۱۴۲/۶	۲۳/۰۸۸	۱۳/۲۲	۶/۰۹	GF6
۱۲۳/۲۵	۱۳۹/۱	۲۵/۱۴	۱۲/۸۱۵	۵/۸۶	GF6-SF10
۱۴۴/۳	۱۴۳	۲۷/۵۴	۱۳/۱۱	۵/۹۶	GF6-SF15
۱۴۳/۸	۱۴۸	۲۸/۲	۱۳/۸۲	۶/۴۲	GF6-MK10
۱۳۸/۸۸	۱۵۰/۸	۲۸/۰۳۸	۱۴/۱۵	۶/۶۱	GF6-MK15
۸۵/۹	۱۲۱/۲	۲۰/۲۱	۱۱/۶۲	۵/۵۶	GF6-NS0.75
۷۶/۲	۱۲۱/۲	۱۹/۳	۱۱/۶۸	۵/۶۲	GF6-NS1.5



شکل ۷. مقادیر شاخص ۱۵ در طرح های ساخته شده به روش پیش مخلوط
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 پیش مخلوط
 Fig. 9. Values of index I₁₀ in designs made by pre-mixed method

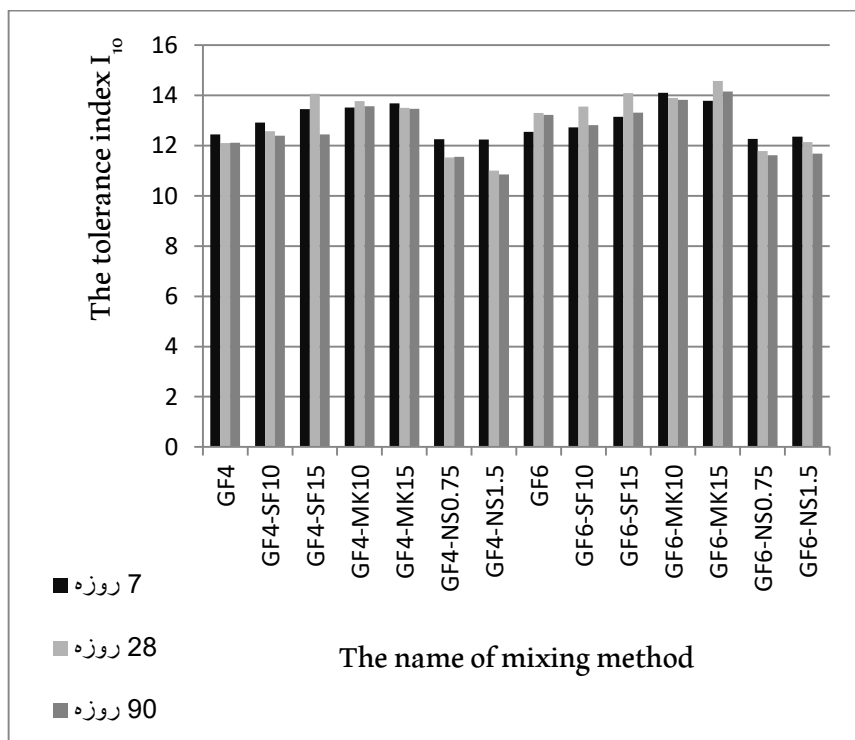
مقایسه ی شاخص I_{20} در طرح های ساخته شده به روش اسپری، مشاهده می شود که همانند مقاومت خمشی، بهبود مقادیر شاخص I_{20} با افزایش مقدار الیاف شیشه از ۴٪ تا حدود ۵/۶٪ روند افزایشی و برای مقادیر بیشتر از ۵/۶٪ روند کاهشی داشته است.

به منظور بررسی نتایج مقاومت باقی مانده ی نمونه ها پس از ترک خوردگی، نمودارهای تغییرات مقادیر $R_{5,10}$ و $R_{10,20}$ در شکل های زیر برای برخی از طرح های اختلاط در روش های پیش مخلوط و اسپری، با هم مقایسه شده اند.

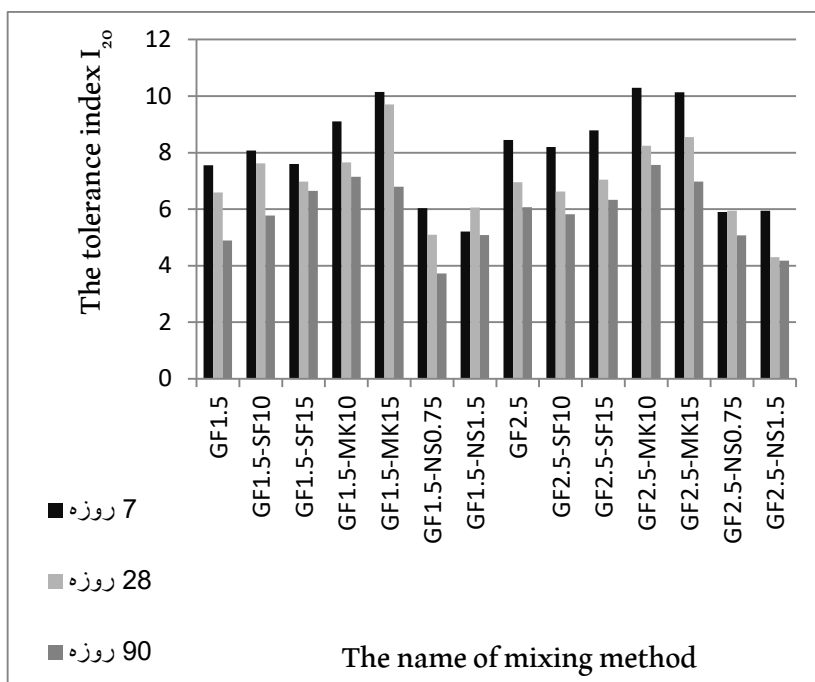
همان طور که در این نمودارها ملاحظه می شود، میزان تحمل بارهای وارده پس از ترک خوردگی، در نمونه های ساخته شده به روش اسپری مقادیر بسیار بیشتری نسبت به نمونه های ساخته شده به روش پیش مخلوط دارند. با توجه به این نتایج در هر دو روش پیش مخلوط و اسپری، با افزایش الیاف شیشه مقاومت باقی مانده پس از ترک خوردگی 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

الیاف شیشه در نمونه های ساخته شده به روش پیش مخلوط، مقادیر مربوط به شاخص I_{20} افزایش می یابد. با مقایسه ی نتایج مربوط به شاخص I_{20} در نمونه های ساخته شده به روش پیش مخلوط، 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.

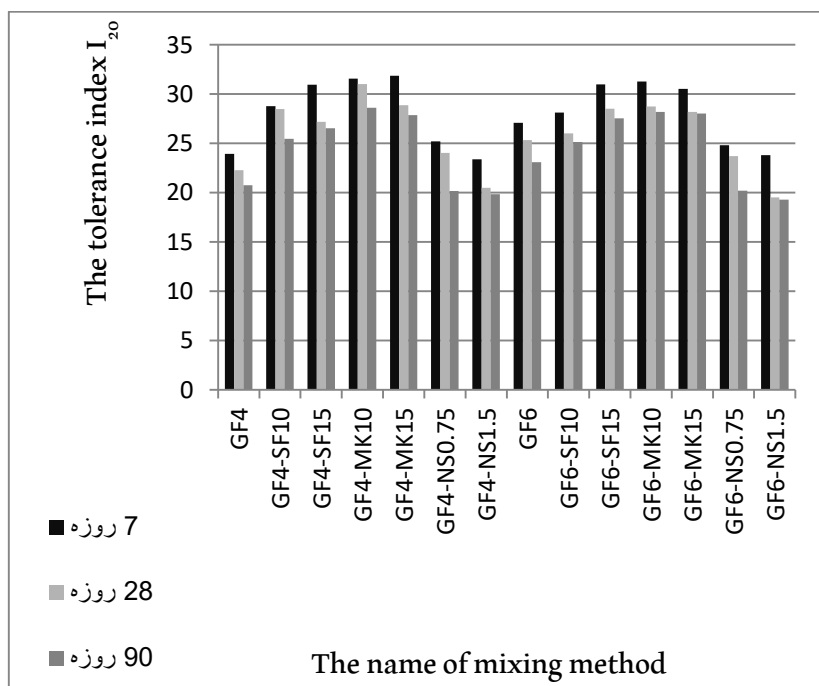
در واقع این امر نشان دهنده ی این است که در جابه جایی های بزرگتر، جذب انرژی بیشتر توسط الیاف شیشه صورت می گیرد. با توجه به توزیع یکنواخت الیاف شیشه در سطح بتن و تولید بتن با کیفیت بالا، در روش اسپری استفاده از الیاف شیشه با درصد های بالاتری نسبت به روش پیش مخلوط امکان پذیر است. بنابراین پس از گذشت ۲۸ روز، در تمام طرح های اختلاط ساخته شده به روش اسپری، مقادیر قابل قبولی برای شاخص I_{20} بدست آمده است. با



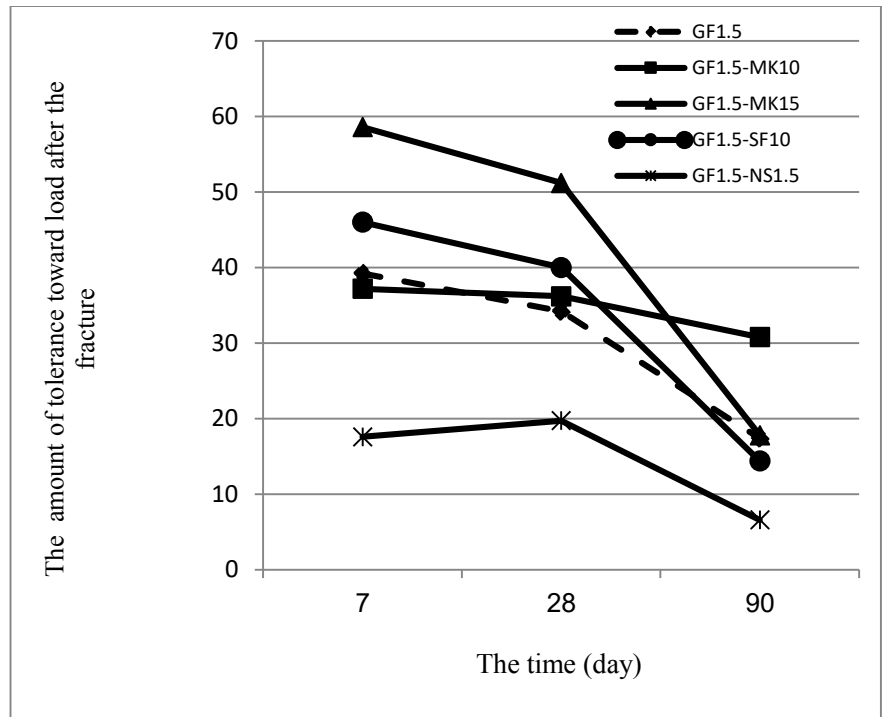
شکل ۱۰. مقادیر شاخص I_{10} در طرح های ساخته شده به روش اسپری
 Fig. 10. Values of index I_{10} in designs made by spray method



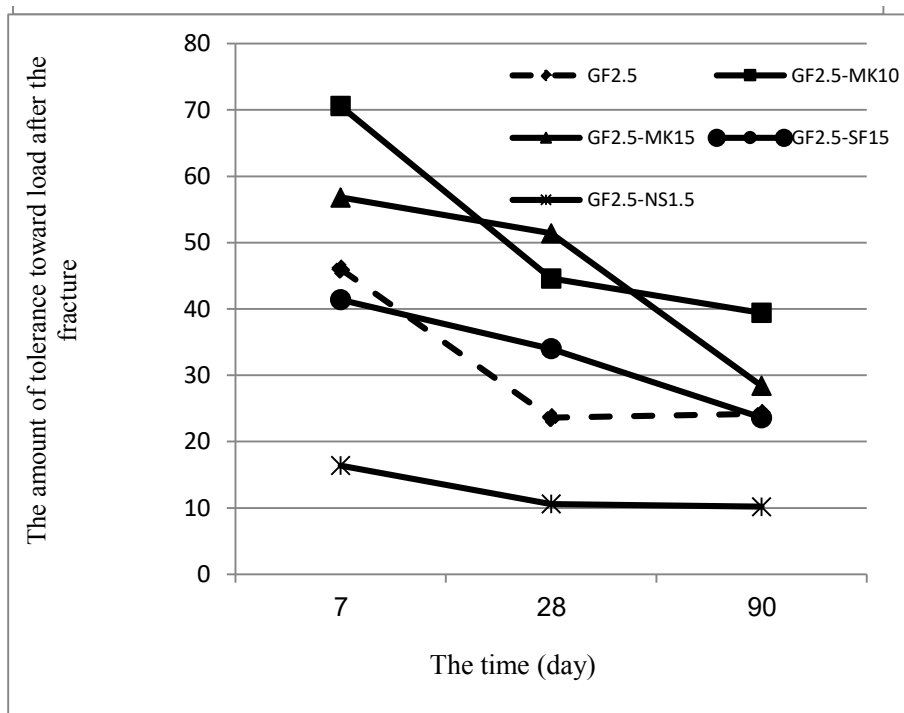
شکل ۱۱. مقادیر شاخص ۲۰ در طرح های ساخته شده به روش پیش مخلوط
Fig. 11. Values of index I20 in designs made by pre-mixed method



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

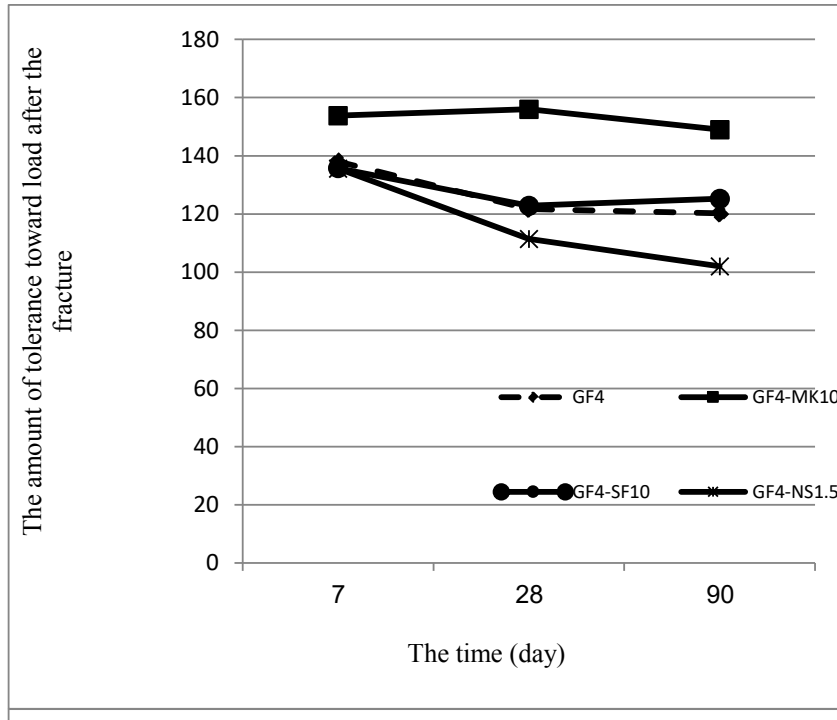


(الف)

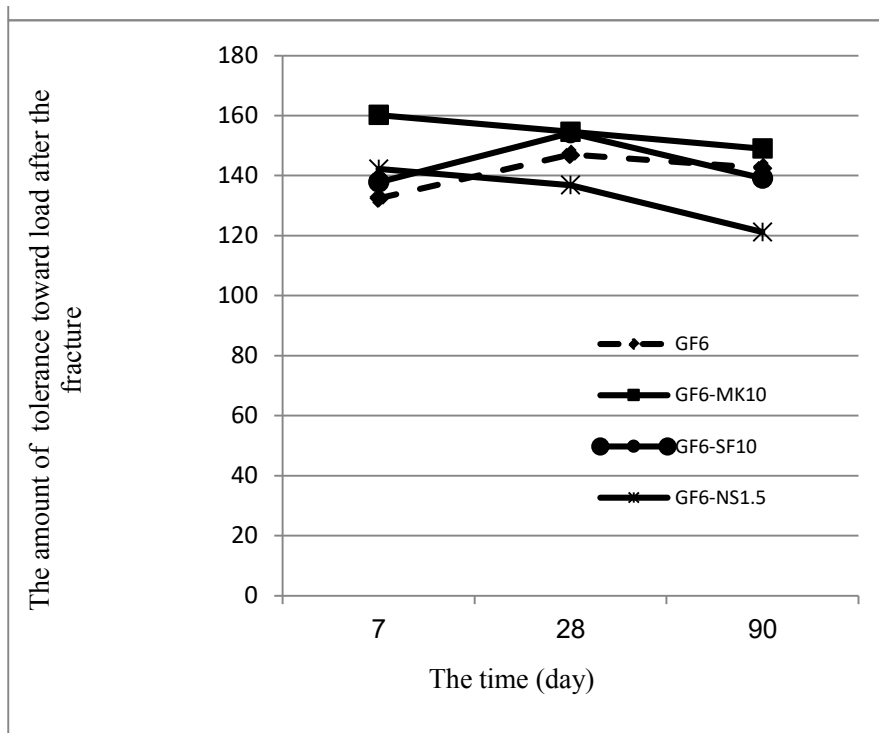


(ب)

شکل ۱۳. R5,10 در نمونه هایی از طرح های ساخته شده به روش پیش مخلوط؛ 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

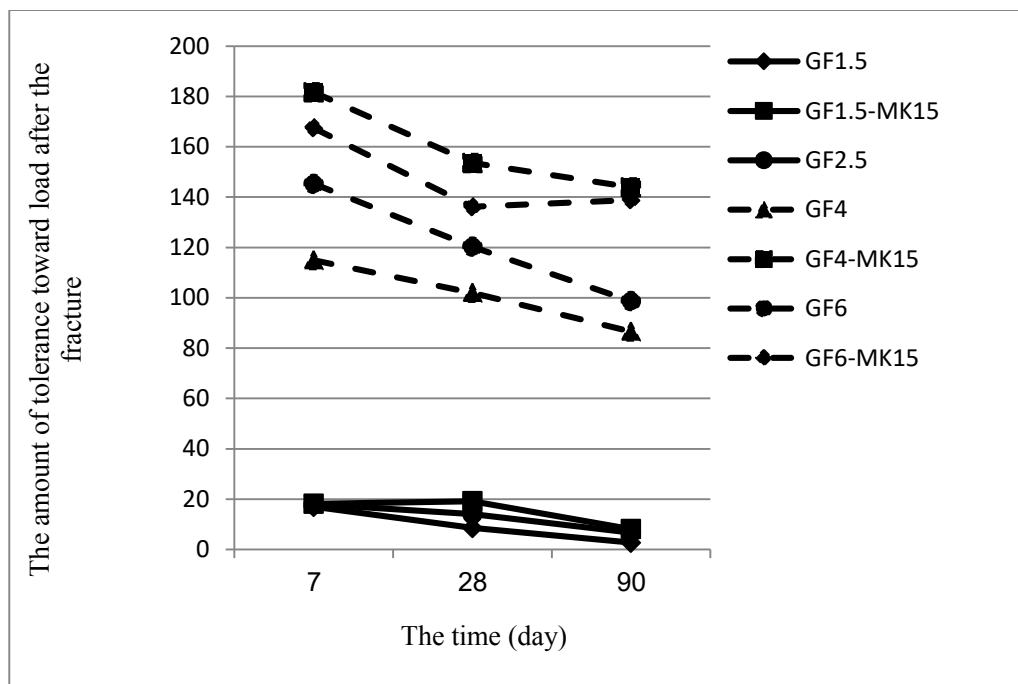
نمونه های فاقد الیاف شیشه پس از رسیدن به بار حداکثر، تحت یک تغییرشکل بسیار کوچک به صورت ترد شکسته شدند. به دلیل عدم وجود الیاف شیشه در این نمونه ها، سطوح شکست تقریباً صاف و بدون ناهمواری می باشد (نمودار ۱۶). نمونه های مسلح به الیاف شیشه پس از ترک خوردن نیز همچنان به باربری خود ادامه دادند. در نمونه های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

با نگاهی به شکل ۱۹ به راحتی می توان مشاهده کرد که الیاف شیشه در ماتریس سیمانی، به طور همگن پراکنده شدند. علاوه بر این، هیچ نوع گلوله شدن الیاف در بتن (جمع شدگی 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 می دهند. این بدان معنی است که الیاف

پس از ترک خوردگی 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 می کنند، با افزایش چسبندگی مهار الیاف، میزان تحمل بتن در برابر بارهای وارده پس از ترک خوردگی را افزایش می دهند. میزان تأثیر الیاف شیشه بر روی مقاومت باقی مانده پس از ترک خوردگی ($R_{10,20}$) 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 پیش مخلوط و همچنین با افزایش الیاف شیشه از ۴% به ۶% در روش اسپری، میزان تحمل بتن مسلح به الیاف شیشه در برابر بارهای وارده پس از ترک خوردگی افزایش می یابد.

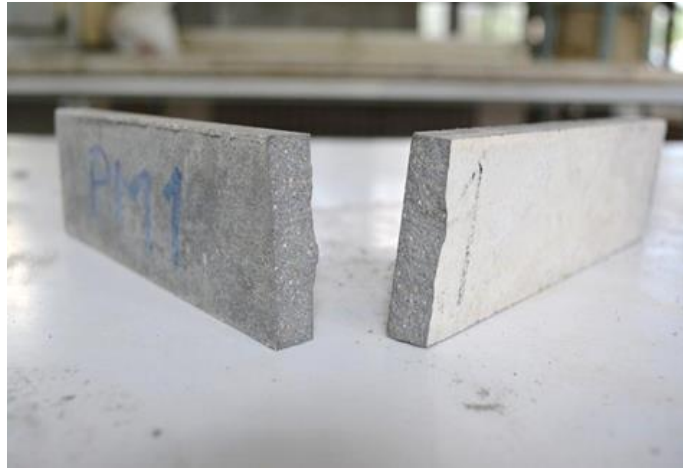
۵- نحوه ی شکست نمونه های خمشی

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 ترک خوردگی شده اند.



شکل ۱۵. مقایسه $R_{10,20}$ در برخی از طرح های ساخته شده به روش پیش مخلوط و روش اسپری

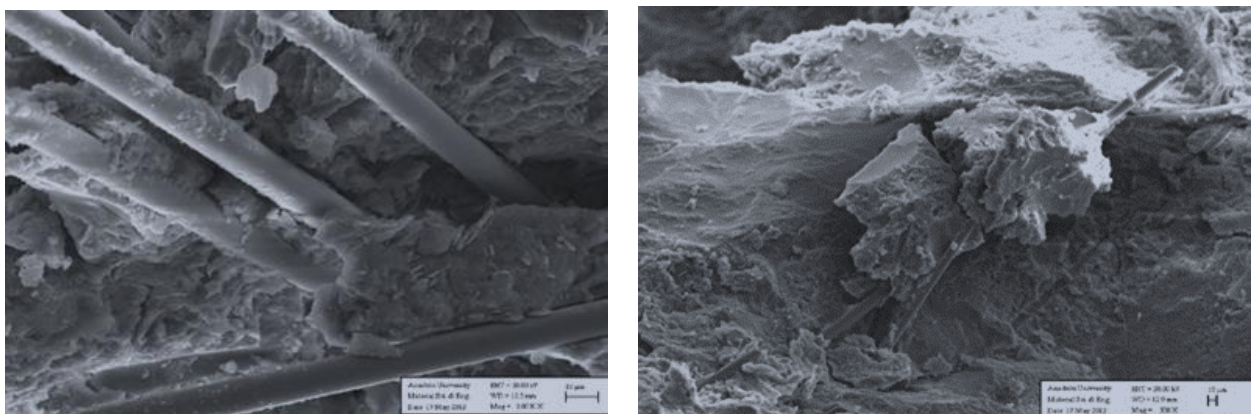
Fig. 15. Comparison of $R_{10,20}$ in some designs made by pre-mixed method and spray method



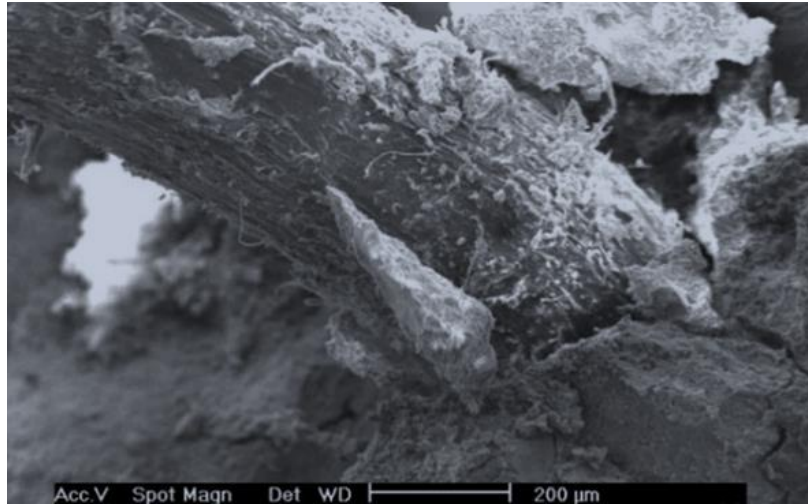
شکل ۱۶. نحوه ی شکست نمونه های فاقد الیاف شیشه
Fig. 16. The fracture figure of the specimens



شکل ۱۷. الف) نمونه ی تقویت شده با ۱/۵٪ الیاف در روش پیش مخلوط؛ 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



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

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 مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف شیشه کاسته خواهد شد.

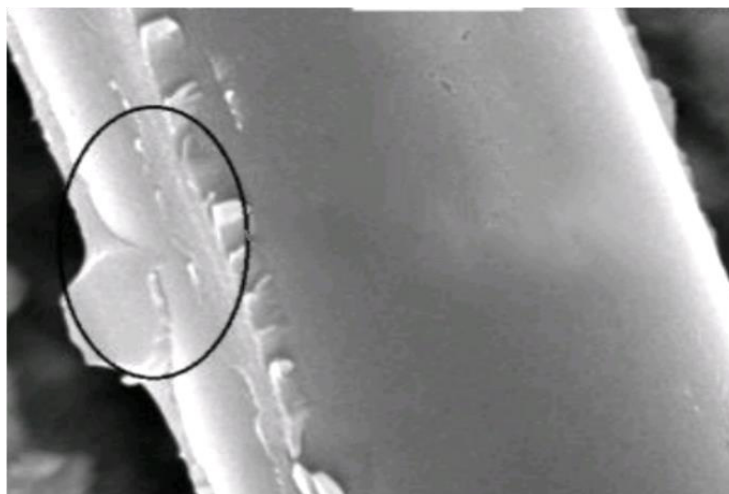
۱-۵- مقاومت خمشی نمونه‌ها در حریق و آتش‌سوزی

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 ریخته‌گری 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

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 می‌دهد. 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 دقیق‌تر 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.

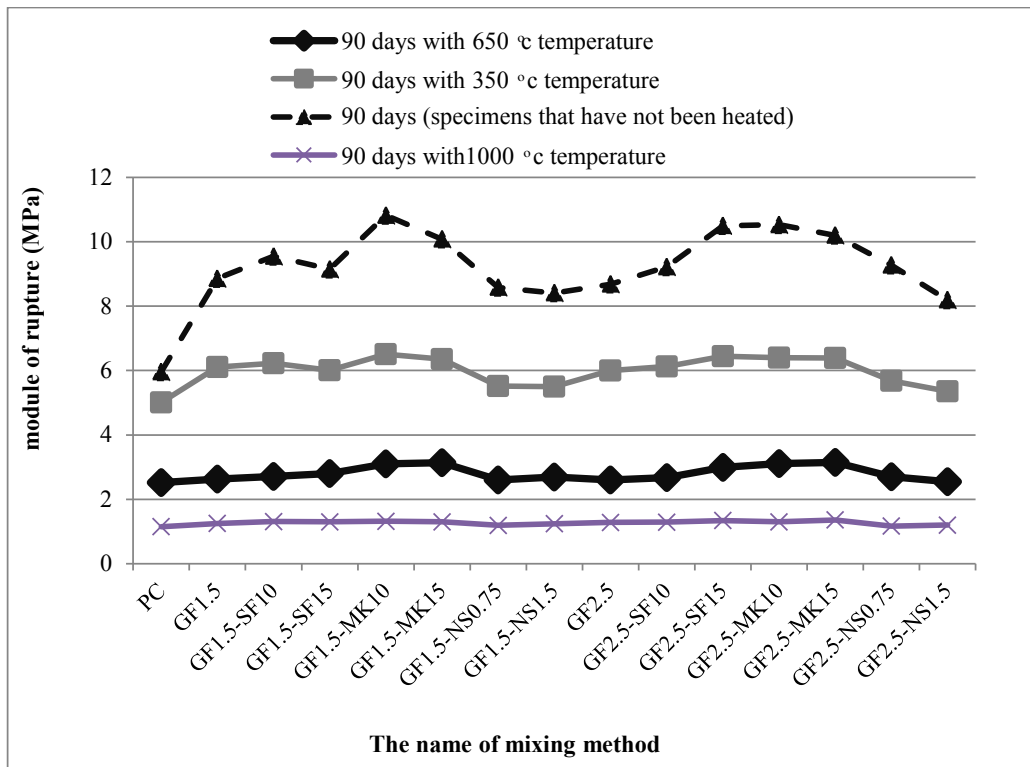


شکل ۲۰. به وجود آمدن ترک در الیاف پس از گذشت ۲۴ ماه از ساخت نمونه
Fig. 20. The formation of cracks in the fibers after 24 months of sample construction

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 تغییر شکل دادن الیاف در بتن از مواد پوزولانی میکروسیس، نانوسیلیس و متاکائولین 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،

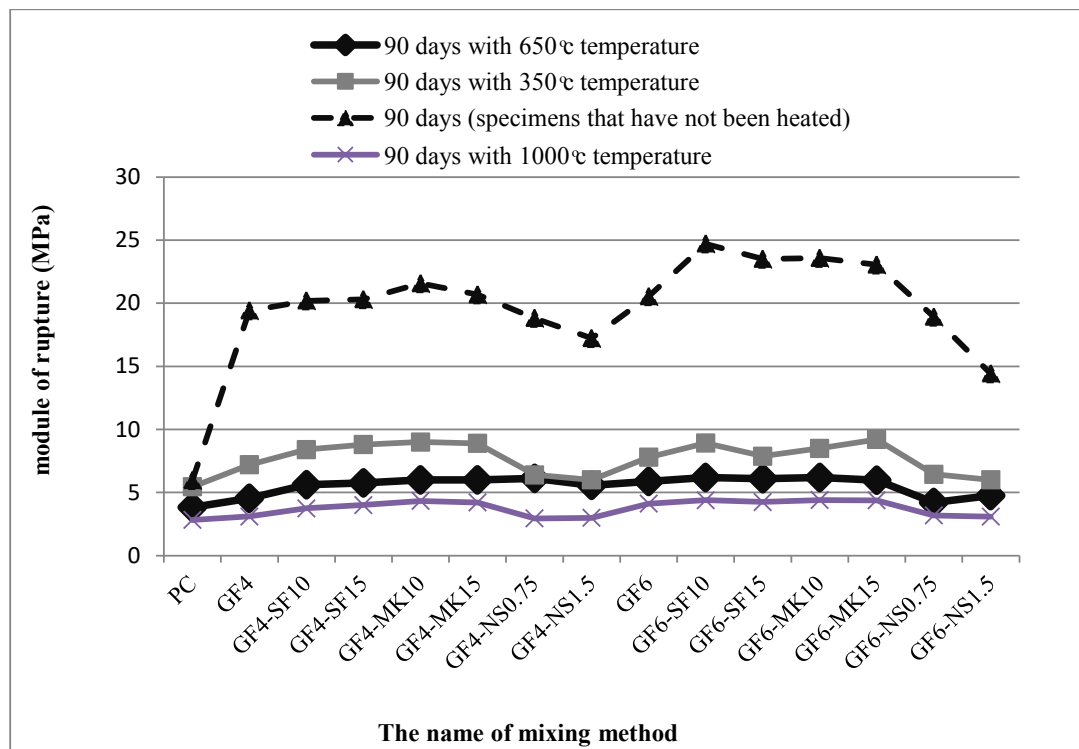
رسید. با توجه به خطر بالا رفتن بیش از حد دما، تصمیم گرفته شد که بیشترین دما روی ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد تنظیم شود. همچنین از هر طرح اختلاط، تعداد ۵ نمونه در آتش قرار داده شد. لازم به ذکر است که دمای کوره در مرحله اول تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد افزایش داده شد و نمونه‌ها داخل کوره قرار گرفته و مورد آزمایش خمشی 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 تغییر شکل دادن الیاف شیشه به علت درجه حرارت



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

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

۲-۶- 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.

۳-۶- 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.

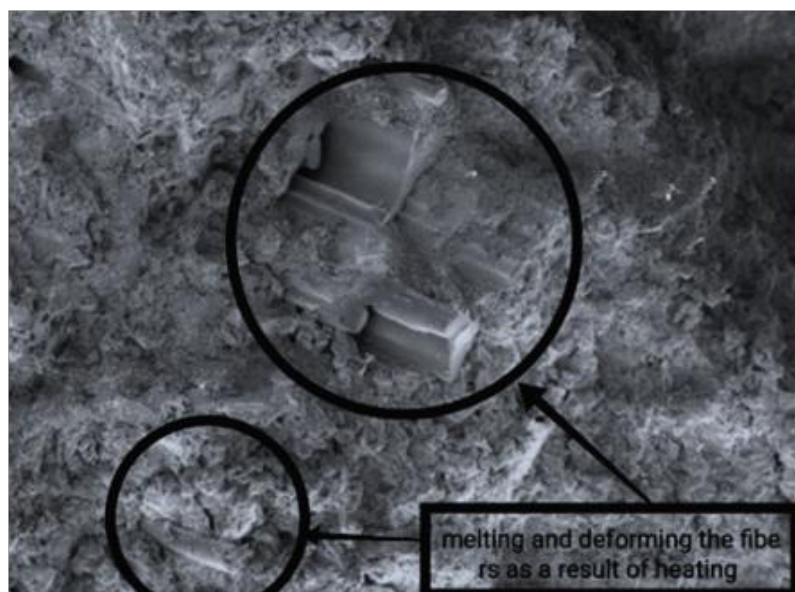
۲- با بررسی نتایج بدست آمده ملاحظه می شود که مقادیر مربوط به شاخص های I_5 و I_{10} در نمونه های حاوی میکروسیلیس و متاکائولین نسبت نمونه های فاقد مواد پوزولانی، افزایش داشته است. با توجه به این نتایج بیشترین مقادیر شاخص های مذکور،

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

۶- نتایج بدست آمده در تحقیق

۱-۶- مدول گسیختگی

۱- مسلح کردن نمونه ها به الیاف شیشه در هر دو روش پیش مخلوط 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 پیش مخلوط و اسپری، به دلیل آسیب های وارده به الیاف شیشه در محیط بتن، کاهش یافته است. این مطالب نشان می دهد که مدول گسیختگی بتن مسلح به الیاف شیشه، تا حدود زیادی به شرایط الیاف شیشه موجود در بتن بستگی دارد.



شکل ۲۳. تصویر SEM گرفته شده از نمونه های 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 پیش مخلوط، 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 افتد. این موضوع پس از گذشت ۹۰ روز با شدت بیشتری رخ می دهد.

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 می باشد.

۵-۶- مقاومت خمشی در برابر آتش سوزی

به منظور بررسی مقاوت الیاف شیشه در برابر حرارت نمونه ها 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 پیش مخلوط و اسپری است که نتایج حاصل شده به شرح زیر می باشد.

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

۲- در روش پیش مخلوط مقاومت خمشی نمونه شاهد در درجه حرارت ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، ۱/۱۵ مگاپاسکال می باشد. در حالی که در روش اسپری ۲/۰۳ مگاپاسکال می باشد 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 ضعیف ترین عملکرد مربوط به نانوسیلیس در هر دو روش اختلاط بود. از طرفی بهترین عملکرد در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد در روش پیش مخلوط مربوط به طرح اختلاط حاوی ۲/۵٪ الیاف شیشه و ۱۵٪ متاکائولین بود. همچنین در روش اسپری بهترین عملکرد مربوط به نمونه های حاوی ۶٪ الیاف شیشه و ۱۰٪ متاکائولین در بالاترین دمای آزمایش بود.

مراجع

- [1] A. Enfedaque, L. Sanchez Paradela, V. Sanchez-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. Dügenci, 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.

- 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.
- [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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Jadidi, E. Zeighami., (2021). Investigation of the Effect of High-Temperature Glass Fibers and Pozzolan 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](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17288.6516)



