

## Effect of copper slag on the mechanical properties and fracture energy of fiber reinforced cementitious composite

M. Mazloom\*, M. Akbari Jamkarani

Faculty of Civil Engineering Department, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

**ABSTRACT:** One of the most important weakness points of concrete is its drawback in tension and cracking. The use of fibers in concrete greatly reduces this disadvantage. Fiber-reinforced cementitious composite (FRCC) is a type of fiber-reinforced concrete (FRC) that does not contain coarse aggregate and only has fine aggregate. In fact, the high level of cement in FRCC is a problem for the environment. This problem can be solved by using different cement replacement materials as a part of cement. In this study, the effect of copper slag on the mechanical properties and fracture energy of fiber-reinforced cementitious composite (FRCC) containing polypropylene fiber is investigated. Silica fume and copper slag were replaced as a part of cement. For this purpose, a control mix without silica fume and copper slag, 4 mixes containing 5%, 7%, 10% and 15% silica fume, and 4 mixtures with 5%, 10%, 20% and 30% copper slag was casted. In specimens containing silica fume, the ones with 15% of it had the highest quantity of fracture energy, compressive, tensile, and flexural strengths. Among the samples having copper slag, the ones containing 10% and 20% of it had the highest values above. It is worth noting that some binary mixtures containing both copper slag and silica fume were prepared too. Comparing the results of all the mentioned mixtures, it is concluded that the best results belong to the binary mixture containing both 15 % copper slag and 15 % silica fume.

### Review History:

Received: Dec. 05, 2019  
Revised: Apr. 07, 2020  
Accepted: Jun. 03, 2020  
Available Online: Jul. 13, 2020

### Keywords:

Concrete  
Fiber-Reinforced Concrete  
Cementitious Composite  
Silica Fume  
Polypropylene

### 1- Introduction

Concrete is one of the most important and useful construction materials and is a brittle material with low tensile strength. One of the most important types of concrete is the one containing Portland cement. Fiber-reinforced concrete can be fabricated by adding short fibers to the mixture in order to improve its tensile behavior. The above fibers act like bridges to prevent the expansion and opening of cracks [1]. Fiber-reinforced cementitious composite (FRCC) is a type of fiber-reinforced concrete that does not have coarse aggregate. In other words, the main compounds are water, cement, fibers and fine aggregates such as silica sand. One of the most important problems in the use of FRCC is its high grade of cement. Therefore, cement replacement materials can be used to lower the cement content. One of these replacement materials is silica fume. Mazloom et al. [2] showed that the use of appropriate values of silica fume leads to an increase in the strength and durability of concrete at different ages. According to previous studies, silica fume increases compressive strength, tensile, flexural and fracture energy of concrete and other cementitious materials [3, 4]. Another cement replacement material is copper slags, which is a waste material. Other researchers have used copper slag as a cement replacement material, and this material had different effects due to the type of mixture [5-7]. In fact, these

researches show that copper slag can be used as an alternative for a part of cement.

The purpose of this study is the fabrication of FRCC with high mechanical and fracture energy properties. In this investigation, copper slag and polypropylene fibers, which were more available, were used instead of fly ash and polyvinylalcohol fibers. In fact, to reduce the amount of cement in this scheme, silica fume and copper slag were used. Finally, compressive strength, tensile strength, flexural strength and fracture energy of FRCC were used to select the best mix design.

### 2- Methodology

One of the mix designs of cementitious composites is introduced by Yu et al. [8]. Their investigated mix was used as a primary basis for this work. According to the existing facilities in Iran, the mix is changed and is presented in the following. The cement used in this study is Portland cement type 1-425. The utilized silica fume had an apparent weight of 250 kilograms per cubic meter, and its specifications were consistent with the ASTM C1240 standard [9]. Very fine silica sand of grained 130 to 250  $\mu\text{m}$  was used here. Also, non-crystalline copper slag was used in this research. The fibers used in this study were polypropylene fibers with a length of 10 mm. The number of fibers used in this study was

\*Corresponding author's email: mazloom@sru.ac.ir



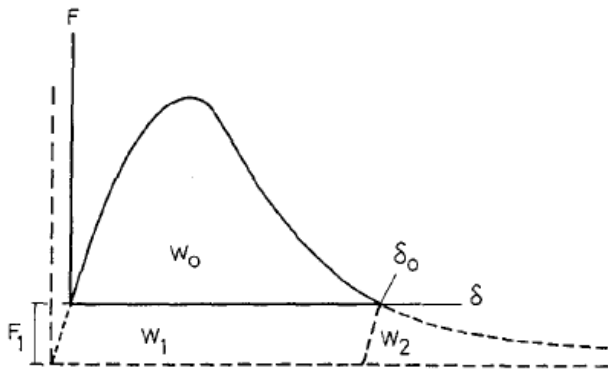


Fig. 1. Higher mode effects (MDOF effects) on HE demand

2 % of the total volume of the mix. In this study, the mixes having only silica fume included 5%, 7%, 10%, and 15% of this material. The ones having only copper slag contained 5%, 10%, 20%, and 30% copper slag. The initial binary mixtures contained the combinations of 10% and 15% silica fume with 10% and 20% copper slag. The final binary mixes included the optimum silica fumes level of 15% and copper slag percentages of 12.5%, 15% and 17.5%.

In order to determine the compressive strength, 150 mm cube samples were constructed. Also, the loading rate was 0.3 MPa per second. The tensile splitting test was used to determine the tensile strength of the samples. For the determination of rupture modulus of concrete, four-point flexural tests with the universal testing machine were used. These experiments were carried out on rectangular samples of 100×100×350 mm<sup>3</sup>. One of the effective parameters in determining the properties of concrete is its fracture energy. In this study, the fracture energy of the samples is obtained based on the method determined in Figure 1 and Eq 1. [10]. In this equation, *A* is the fractured cross-sectional area. In this study, it is the cross-section of the beam.

$$G_f = \frac{W_0 + 2F_1\delta_0}{A} \quad (1)$$

### 3- Results and discussion

The specimens were tested under mentioned conditions. The results of compressive strength, tensile strength, flexural strength and fracture energy are as follows.

#### 3.1. Compressive Strength

In the samples containing silica fume, the maximum compressive strength belonged to the one containing 15% silica fume, and its value was 52.43 MPa. On the other hand, in the samples containing copper slag, the sample with 20% copper slag had the highest compressive strength of 49.42 MPa. The best binary mix contained 15 % silica fume and 15 % copper slag, and its compressive strength was 57.13 MPa.

#### 3.2. Tensile Strength

In the samples containing silica fume, the one containing 15% silica fume had a maximum strength of 4.73 MPa. In the samples having copper slag, the ones containing 10% copper slag, with the value of 4.16 MPa, had the highest tensile strength. The binary samples containing 15% silica fume and 15% copper slag were the best mix, and its tensile strength was 4.98 MPa.

#### 3.1. Flexural Strength

In the samples having silica fume, the one containing 15% silica fume had the maximum flexural tensile strength of 7.22 MPa. In the samples having copper slag, the ones containing 10% copper slag, with the value of 6.62 MPa, had the highest tensile strength. The binary samples containing 15% silica fume and 15% copper slag were the best mix, and its flexural tensile strength was 7.48 MPa.

#### 3.2. Fracture Energy

In the specimens with silica fume, the one containing 15% silica fume had the maximum fracture energy of 6.87 N/mm. In the samples having copper slag, the ones containing 10% copper slag, with the value of 6.3 N/mm, had the highest fracture energy. The binary samples containing 15% silica fume and 15% copper slag were the best mix, and its fracture energy was 7.01 N/mm.

### 4- Conclusions

In this research, the effects of silica fume and copper slag on the mechanical properties and fracture energy of FRCC are investigated. In the mixes containing only silica fume as a cement replacement material, the optimal percentage of it was 15%. In the case of using only copper slag, the optimal percentage of it was 20% for the compressive strength and 10% for the tensile strength, flexural strength and fracture energy. The final optimal mix design for compressive strength, tensile strength and fracture energy chosen through binary samples contained 15% silica fume and 15% copper slag.

### References

- [1] M. Mazloom, S. Mirzamohammadi, Thermal effects on the mechanical properties of cement mortars reinforced with aramid, glass, basalt and polypropylene fibers, *Advances in Material Research*, 8(2) (2019) 137-154.
- [2] M. Mazloom, A. Allahabadi, M. Karamloo, Effect of silica fume and polyepoxide-based polymer on electrical resistivity, mechanical properties, and ultrasonic response of SCLC, *Advances in concrete construction*, 5(6) (2017) 587-611.
- [3] J. Massana, E. Reyes, J. Bernal, N. León, E. Sánchez-Espinosa, Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 165 (2018) 93-103.
- [4] O.A. Naniz, M. Mazloom, Effects of colloidal nano-silica

- on fresh and hardened properties of self-compacting lightweight concrete, *Journal of Building Engineering*, 20 (2018) 400-410.
- [5] A. Behnood, "Effects of high temperatures on the high-strength concretes incorporating copper slag as coarse aggregate", *Proceedings of the 7th International Symposium on Utilization of High-Strength/Performance Concrete*, Washington, DC, USA, (2005) 228-266.
- [6] M. Fadaee, R. Mirhosseini, R. Tabatabaei, M.J. Fadaee, Investigation on using copper slag as part of cementitious materials in self compacting concrete, *Asian Journal of Civil Engineering*, 16(3) (2015) 368-381.
- [7] A. Taeb, S. Faghihi, Utilization of copper slag in the cement industry, *ZKG international*, 55(4) (2002) 98-100.
- [8] K.Q. Yu, J.T. Yu, J.G. Dai, Z.D. Lu, S.P. Shah, Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers, *Construction and Building Materials*, 158 (2018) 217-227.
- [9] ASTM C1240. Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious mixtures, ASTM International, 2005.
- [10] A. Hillerborg, The theoretical basis of a method to determine the fracture energy GF of concrete, *Materials and structures*, 18(4) (1985) 291-296.

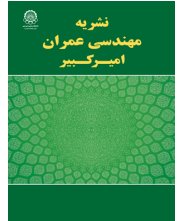
**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

M. Mazloom, M. Akbari Jamkarani, *Effect of copper slag on the mechanical properties and fracture energy of fiber reinforced cementitious composite*. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53 (6) (2021) 575-578.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17458.6573](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17458.6573)







## تأثیر سرباره‌ی مس بر روی مشخصات مکانیکی و انرژی شکست کامپوزیت سیمانی الیافی

موسی مظلوم\*، محمد اکبری جمکرانی

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

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۴  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۴  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

### کلمات کلیدی:

بتن  
بتن مسلح شده به الیاف  
کامپوزیت سیمانی  
میکروسیلیس  
پلی پروپیلن

**خلاصه:** یکی از مهم‌ترین خصوصیت‌های منفی بتن، ضعف آن در کشش و ترک‌خوردگی آن است. به کار بردن الیاف در بتن تا حد زیادی این ضعف را جبران می‌کند. کامپوزیت‌های سیمانی الیافی نوعی از بتن‌های الیافی می‌باشند که در آن‌ها به جای استفاده از سنگدانه‌های درشت، از ریزدانه استفاده می‌شود. البته مقدار عیار سیمان زیاد آن‌ها از نظر زیست‌محیطی مشکل‌ساز است که با استفاده از مواد جایگزین سیمان مختلف، تا حدی این مشکل برطرف می‌شود. در این تحقیق تأثیر سرباره مس بر خواص مکانیکی و انرژی شکست کامپوزیت سیمانی مسلح‌شده با الیاف پلی پروپیلن بررسی شده است. در واقع سرباره کوره مس و میکروسیلیس جایگزین بخشی از سیمان گردیدند و الیاف پلی پروپیلن به خمیر سیمان اضافه شد. به این منظور یک طرح مخلوط شاهد فاقد میکروسیلیس و سرباره مس، ۴ طرح حاوی ۵٪، ۷٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس، و ۴ طرح دارای ۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ سرباره مس ساخته شدند. در نهایت مشخص شد که در نمونه‌های دارای میکروسیلیس، آن‌هایی که دارای ۱۵٪ از این ماده بودند، بیشترین انرژی شکست و مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی را داشتند. در مخلوط‌های حاوی سرباره مس، نمونه‌های دارای ۱۰٪ و ۲۰٪ سرباره دارای بیشینه پارامترهای فوق بودند. لازم به ذکر است که چندین نمونه ترکیبی که شامل میکروسیلیس و سرباره مس به صورت هم‌زمان بودند، هم ساخته شدند. با مقایسه نتایج همه طرح مخلوط‌های ذکر شده، مشخص شد که بهترین طرح مربوط به نمونه‌های ترکیبی حاوی ۱۵٪ سرباره مس به همراه ۱۵٪ میکروسیلیس است.

### ۱- مقدمه

سنگدانه‌های ریز نظیر ماسه سیلیسی می‌باشند. الیاف‌های مختلفی تا به حال در خمیر بتن استفاده شده‌اند. یکی از انواع الیاف مورد استفاده در کامپوزیت‌های سیمانی، الیاف پلیمری می‌باشد. گروهی از محققین با افزودن تنها ۰/۱٪ حجمی الیاف پلی پروپیلن، افزایش مقاومت فشاری و کششی را به ترتیب ۵٪ و ۹/۷٪ عنوان کردند [۲]. گروهی دیگر با بررسی مقاومت فشاری و خمشی کامپوزیت‌های سیمانی الیافی، درصد بهینه الیاف پلی پروپیلن را ۱٪ حجمی بیان کردند [۳]. بنابراین در این تحقیق برای مسلح کردن کامپوزیت سیمانی از الیاف پلی پروپیلن استفاده شد. البته نتیجه استفاده از الیاف مختلف در این کامپوزیت‌ها مورد توجه محققین مختلف بوده است [۴ و ۵].

بتن یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین مصالح ساختمانی است و ماده‌ای ترد با مقاومت کششی کم می‌باشد. یکی از انواع مهم آن، بتن الیافی است. این بتن با اضافه کردن الیاف کوتاه به خمیر به منظور بهبود رفتار شکننده آن و جلوگیری از گسترش ترک‌ها ساخته شد. الیاف فوق مانند پل عمل کرده، از گسترش و باز شدن ترک‌ها جلوگیری می‌کند [۱]. کامپوزیت‌های سیمانی الیافی (FRCC) نوعی از بتن‌های الیافی می‌باشند که در آن‌ها به جای استفاده از سنگدانه‌های درشت، از ریز دانه استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، ترکیبات اصلی تشکیل دهنده آن‌ها آب، سیمان، الیاف و

1 Fiber reinforced cementitious composites

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Mazloom@sru.ac.ir



گروهی از پژوهشگران ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی بتن با جای‌گزینی سرباره مس به جای سیمان را بررسی کردند [۲۰]. نتایج آن‌ها نشان داد که بهترین طرح حاوی ۶۰٪ سرباره بود و پارامترهای مقاومتی را ۲۰٪ بهبود بخشید.

هدف از این مطالعه، ساخت کامپوزیت سیمانی الیافی دارای خواص مکانیکی و انرژی شکست قابل توجه می‌باشد. نوآوری این تحقیق ارائه یک طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی الیافی با اصلاح طرح مخلوط موجود در مرجع [۵] است. به این منظور به جای سرباره کوره آهن‌گدازی از سرباره مس و به جای الیاف پلی‌وینیل الکل، از الیاف پلی پروپیلن که ارزان تر و در دسترس تر بود، استفاده شد. در واقع برای کاهش مقدار سیمان در این طرح، علاوه بر میکروسیلیس از سرباره مس که ماده ای دور ریز می‌باشد، به صورت تکی و ترکیب با میکروسیلیس استفاده گردید. در نهایت، مقاومت‌های فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست این کامپوزیت برای انتخاب بهترین طرح مخلوط مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

یکی از طرح مخلوط های کامپوزیت سیمانی که در سال ۲۰۱۸ ارائه شده است [۵]، به عنوان مبنای اولیه کار مورد بررسی قرار گرفت. طرح مخلوط مذکور در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به این طرح و امکانات موجود در ایران، طرح مخلوطی ارائه شد که در ادامه به صورت کامل ذکر می‌شود.

### ۲-۱- مصالح

سیمان استفاده شده در این تحقیق، سیمان پرتلند نوع ۴۲۵-۱ می‌باشد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن به ترتیب در جدول های ۲ و ۳ آمده اند.

میکروسیلیس مورد استفاده دارای وزن مخصوص ظاهری ۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بود و مشخصات آن با استاندارد ASTM C1240 مطابقت داشت [۲۱]. مشخصات شیمیایی و فیزیکی میکروسیلیس مصرفی به ترتیب در جدول های ۳ و ۴ آمده است.

ماسه سیلیسی مورد استفاده با توجه به نوع طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی و ریزدانه بودن تمامی اجزا، سنگ دانه هایی با قطر ۱۳۰ تا ۲۵۰ میکرومتر بودند. مشخصات شیمیایی ماسه سیلیسی در جدول

مقدار عیار زیاد سیمان می‌باشد که برای رفع آن از پوزولان‌های جایگزین سیمان استفاده می‌شود. یکی از این مواد میکروسیلیس است. تحقیقات مظلوم و همکاران نشان می‌دهد استفاده از مقادیر مناسب میکروسیلیس به افزایش مقاومت و دوام بتن در سنین مختلف می‌انجامد [۶]. در واقع آن‌ها اثر میکروسیلیس را در بتن سبک خود تراکم بررسی کردند. در نهایت آن‌ها اعلام کردند میکروسیلیس باعث افزایش دوام و بهبود خواص مکانیکی این بتن شده است. همچنین این ماده مقاومت فشاری و کششی را به ترتیب ۴۳٪ و ۲۳٪ بهبود بخشیده است [۶]. افزودن نانوسیلیس به بتن هم باعث بهتر شدن هیدراسیون، کاهش کارایی و افزایش مقاومت فشاری می‌شود [۸ و ۷]. در پژوهش‌هایی تاثیر آب مغناطیسی بر خواص مکانیکی بتن‌های مختلف بررسی شده اند و نتیجه آن شده است که در حضور آب مغناطیسی، تاثیر مثبت میکروسیلیس بر خواص مکانیکی بتن کاهش می‌یابد [۹ و ۱۰]. مکانیک شکست بتن حاوی میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی توسط صالحی و مظلوم بررسی شد [۱۱]. در نهایت آن‌ها نتیجه گرفتند انرژی شکست اولیه و چقرمگی شکست بهترین طرح حاوی میکروسیلیس به ترتیب ۲۴٪ و ۱۸٪ افزایش یافتند.

یکی دیگر از مواد جایگزین سیمان مورد استفاده در بتن، سرباره مس می‌باشد که ماده‌ای دور ریز است. در واقع با توجه به تحقیقات انجام شده توسط محققین مختلف، میتوان از این ماده به عنوان ماده جایگزین بخشی از سیمان استفاده کرد [۱۶-۱۲]. میزان تاثیر سرباره مس بر مشخصات مکانیکی بتن، به نسبت آب به سیمان و مقدار جایگزینی سرباره بستگی دارد [۱۷]. همچنین گروهی از پژوهشگران با استفاده از سرباره مس در خمیر سیمان، رفتار این ملات را بررسی کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که سرباره مس پارامترهای مقاومتی ملات را بهبود می‌دهد [۱۸]. صالحی و مظلوم اثر سرباره و میکروسیلیس بر انرژی شکست بتن در حضور آب مغناطیسی را بررسی کردند [۱۱]. نتایج آن‌ها نشان داد بر خلاف میکروسیلیس که انرژی شکست را افزایش می‌دهد، سرباره آن را کاهش می‌دهد. بهترین نمونه آن تحقیق حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس در حضور آب مغناطیسی بود [۱۱]. گروه دیگری از محققین از سرباره مس به عنوان جایگزین سیمان استفاده کردند و بهترین میزان سرباره مس را ۱۰٪ عنوان کردند [۱۹].

جدول ۱. طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی مهندسی شده پر مقاومت (UHP-ECC) [۵]

Table 1. mixed design ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC)

نسبت آب به مواد سیمانی	فوق روان کننده ( $\text{kg/m}^3$ )	الیاف ( $\text{kg/m}^3$ )	ماسه سیلیسی ( $\text{kg/m}^3$ )	سرباره کوره آهن گدازی ( $\text{kg/m}^3$ )	میکروسیلیس ( $\text{kg/m}^3$ )	سیمان ( $\text{kg/m}^3$ )
۰/۱۴	۲۵	۲۰	۵۰۰	۷۵۰	۱۵۰	۸۰۰

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان

Table 2. Physical and mechanical properties of cement

انقباض سیمان با اتوکلاو (%)	مقاومت ۲۸ روزه (مگاپاسکال)	مقاومت ۷ روزه (مگاپاسکال)	مقاومت ۳ روزه (مگاپاسکال)	گیرش نهایی (دقیقه)	گیرش اولیه (دقیقه)	ریزی بلین (مترمربع بر کیلوگرم)	خصوصیت مقدار
۰/۱۵	۴۰	۲۷	۱۷	۲۴۰	۱۲۰	۳۳۰	

جدول ۳. مشخصات شیمیایی سیمان، میکروسیلیس، ماسه سیلیسی و سرباره مس

Table 3. Chemical characteristics of cement, silica fume, silica sand and copper slag

سیمان (%)	میکروسیلیس (%)	ماسه سیلیسی (%)	سرباره مس (%)	
۲۱/۳۰	۹۶/۴	۹۸/۱	۳۴	SiO <sub>2</sub>
۶۳/۴۸	۰/۴۹	۰/۰۶	۶/۵	CaO
۵/۱۳	۱/۳۲	۱/۱	۲	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۳/۴۷	۰/۸۷	۰/۱	-	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۲۳	۰/۳۱	۰/۵	-	Na <sub>2</sub> O
۲/۵۱	۰/۹۷	-	۱-۵	MgO
-	۰/۱۶	-	-	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
۱/۶۷	۰/۱۰	-	-	SO <sub>3</sub>
۰/۵۶	۱/۰۱	۰/۵	-	K <sub>2</sub> O
-	۰/۵	-	-	SiC
-	۰/۳	-	-	C
-	۰/۰۴	-	-	CL
-	۰/۰۸	-	-	H <sub>2</sub> O
-	-	-	۵۴-۴۷	feo
-	-	-	۰/۷	CuO
-	-	-	۰/۰۲	سولفات
-	-	-	۰/۰۰۳	کلرید

جدول ۴. مشخصات فیزیکی میکروسیلیس

Table 4. Physical characteristics of silica fume

حالت فیزیکی	رنگ	دانه ها	چگالی حجمی ( $\text{kg/m}^3$ )	خصوصیت
پودر پوزولان	خاکستری روشن	کروی و غیر کریستاله (آمورف)	۲۵۰	میکروسیلیس

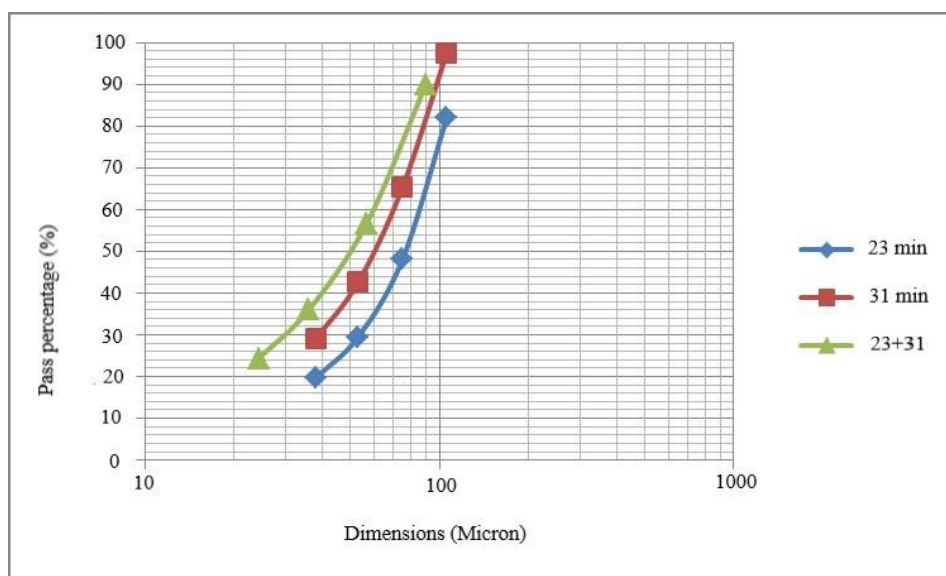
ASTM C1116 مطابقت داشت [۲۲]. مشخصات فیزیکی الیاف در جدول ۶ مشخص شده است.

## ۲-۲- طرح مخلوط و ساخت نمونه

طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی مسلح شده به الیاف در جدول ۸ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به این جدول، مقدار الیاف مورد استفاده در این تحقیق ۲٪ حجم کل بوده است. در نام‌گذاری نمونه‌ها، حرف‌های F، C و M به ترتیب به معنای الیاف، سرباره مس و میکروسیلیس می‌باشند. طرح ۱ نمونه‌ی شاهد الیاف، سرباره مس و میکروسیلیس و سرباره مس است. لازم به ذکر است که در تحقیقات مختلف، درصد بهینه جایگزینی سرباره مختلف گزارش شده است [۲۰-۱۲]. با توجه به اینکه طرح مخلوط و نوع مصالح مصرفی در مقدار درصد بهینه هر پوزولان موثر است، در این تحقیق طرح‌های ۲ تا ۵ شامل ۵٪، ۷٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس

۳ نشان داده شده است. با توجه به آنالیز شیمیایی ماسه سیلیسی، مشاهده می‌شود که مقدار سیلیس موجود در آن بیش از ۹۸٪ است. از سرباره مس غیر بلورین در این طرح استفاده شد. مشخصات شیمیایی سرباره مس در جدول ۳ آمده است. با توجه به این جدول، مجموع سه اکسید سیلیس، آلومینیوم و آهن به طور متوسط حدود ۸۵٪ است. برای پودر کردن ذرات سرباره مس از آسیاب دانشگاه تهران در سه بازه زمانی ۲۳، ۳۱ و ۵۴=۲۳+۳۱ دقیقه استفاده شد. نمودار توزیع اندازه ذرات سرباره مس مربوط به سه حالت فوق در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به مسائل اقتصادی و نزدیک بودن اندازه ذرات در این سه حالت، سرباره برای استفاده در نمونه‌های نهایی به میزان ۲۳ دقیقه آسیاب شد. مشخصات فیزیکی سرباره مس در جدول ۵ آمده است.

الیاف مورد استفاده در این مطالعه، الیاف پلی پروپیلن با طول ۱۰ میلی‌متر بود و مشخصات کامپوزیت سیمانی ساخته شده با استاندارد



شکل ۱. نمودار توزیع اندازه ذرات سرباره مس آسیاب شده  
**Fig. 1. Distributed size chart of grounded copper slag particles**

جدول ۵. مشخصات فیزیکی سرباره مس  
**Table 5. Physical characteristics of copper slag**

رنگ	دانه‌ها	چگالی حجمی (kg/m <sup>3</sup> )	خصوصیت
سیاه	شکسته	۱۷۵۰	سرباره مس



جدول ۶. مشخصات فیزیکی الیاف پلی پروپیلن

Table 6. Physical characteristics of polypropylene fibers

مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	نقطه ی ذوب (°C)	طول (mm)	قطر (μm)	چگالی حجمی (Kg/m <sup>3</sup> )	خصوصیت
۴۰۰	۲/۷	۱۶۵	۱۰	۲۳	۹۱۰	الیاف پلی پروپیلن

جدول ۷. مشخصات فوق روان کننده مصرفی

Table 7. Consumer superplasticizer specifications

ترکیب شیمیایی	طبیعت یونی	کلراید (ppm)	حالت فیزیکی	رنگ	چگالی حجمی	خصوصیت
کوپلیمرهای اصلاح شده پلی کربوکسیلیک اسید	آنیونی	حداکثر ۵۰۰	مایع	قهوه ای تیره	۱ تا ۱/۰۲ کیلوگرم بر لیتر در دمای ۲۰°C	میزان یا مشخصه

۳-۲- روش انجام آزمایش

لازم به ذکر است که بخش قابل توجهی از مقاومت کامپوزیت های سیمانی تا سن ۲۸ روزه حاصل می شود [۲۴]. هدف این مطالعه نیز بررسی تاثیر هم زمان میکروسیلیس و سرباره مس بر روی مشخصات کامپوزیت های سیمانی بوده است. لذا برای حذف تاثیر سن بر روی جواب ها، پارامتر سن ثابت در نظر گرفته شد، و تمامی آزمایش ها در سن ۲۸ روزه انجام شدند.

برای تعیین مقاومت فشاری، نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی متر مکعب ساخته شدند و آزمایش مربوطه مطابق استاندارد BS-1881: ۱۱۶ [۲۵] انجام شد. همچنین نرخ بارگذاری برابر ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه بود. دستگاه تعیین مقاومت فشاری در شکل ۲-الف قابل مشاهده است. از این دستگاه برای تعیین مقاومت کششی دو نیمه شدن یا برزلی هم استفاده شد. در واقع نمونه های مورد استفاده در آزمایش برزلی استوانه هایی به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی متر بودند. این آزمایش مطابق استاندارد انگلیسی BS-1881: 117 [۲۶] انجام شد. همچنین نرخ بارگذاری برابر ۰/۰۲ مگاپاسکال بر ثانیه بود. در این روش، نمونه استوانه ای به صورت افقی در داخل دستگاه جک بتن شکن قرار می گیرد. سپس نیروی فشاری (P) که باعث دو نیمه شدن نمونه می شود، به دست می آید. با استفاده از فرمول (۱) مقدار مقاومت کششی برزلی بتن (f<sub>p</sub>) محاسبه می شود.

و طرح های ۶ تا ۹ شامل ۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ سرباره مس بودند. البته در ابتدا طرحی که دارای ۲۰٪ میکروسیلیس بود، هم ساخته شد. ولی چون مقاومت و کارایی آن کاهش چشمگیری داشت، لذا از ذکر آن در جدول نتایج صرف نظر شد. همچنین در طرح های دارای سرباره مس، چون در نمونه دارای ۳۰٪ سرباره تمام پارامترهای مقاومتی کاهش یافتند، مقادیر بیش از ۳۰٪ بررسی نشدند. طرح های ۱۰ تا ۱۳ حاوی ترکیب همزمان ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس با ۱۰٪ و ۲۰٪ سرباره مس می باشند. طرح های ۱۴ تا ۱۶ شامل مقدار میکروسیلیس بهینه ۱۵٪ به همراه مقدار سرباره ۱۲/۵٪، ۱۵٪ و ۱۷/۵٪ است.

برای ساخت نمونه ها، ابتدا ماسه سیلیسی و کل الیاف در داخل مخلوط کن به مدت ۵ دقیقه مخلوط گردیدند. سپس میکروسیلیس و سیمان اضافه شدند و مخلوط کن به مدت ۱ دقیقه روشن شد. در نهایت آب و فوق روان کننده به مخلوط اضافه گردیدند و مخلوط کن محصول نهایی را به مدت ۳ دقیقه مخلوط نمود. پس از انجام آزمایش اسلامپ و تایید آن، کامپوزیت سیمانی ساخته شده در داخل قالب ها ریخته شد. سپس آن ها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاهی و در قالب نگه داری شدند. پس از خارج کردن نمونه ها از قالب، آن ها در حوضچه های آب در دمای ۲ ± ۲۰ درجه سانتی گراد نگه داری شدند. یعنی قالب ها بعد از ۱ روز باز شدند و نمونه ها برای مدت ۲۷ روز در آب عمل آوری گردیدند تا برای انجام آزمایش آماده شوند.

جدول ۸. طرح مخلوط کامپوزیت‌های سیمانی مسلح شده به الیاف (kg/m<sup>3</sup>)

Table 8. Mixed design of fiber-reinforced cement composites (kg/m<sup>3</sup>)

شماره	نام طرح	نسبت آب به مواد سیمانی	سیمان	آب	ماسه سیلیسی	سرباره مس	میکروسیلیس	فوق روان کننده	الیاف
۱	FC0M0	۰/۲۸	۱۱۲۰	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۰	۰	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۲	FC0M15	۰/۲۸	۹۵۲	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۰	۱۶۸	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۳	FC0M10	۰/۲۸	۱۰۰۸	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۰	۱۱۲	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۴	FC0M7	۰/۲۸	۱۰۴۱/۶	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۰	۷۸/۴	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۵	FC0M5	۰/۲۸	۱۰۶۴	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۰	۵۶	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۶	FC5M0	۰/۲۸	۱۰۶۴	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۵۶	۰	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۷	FC10M0	۰/۲۸	۱۰۰۸	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۱۱۲	۰	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۸	FC20M0	۰/۲۸	۸۹۶	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۲۲۴	۰	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۹	FC30M0	۰/۲۸	۷۸۴	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۳۳۶	۰	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۱۰	FC10M10	۰/۲۸	۸۹۶	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۱۱۲	۱۱۲	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۱۱	FC10M15	۰/۲۸	۸۴۰	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۱۱۲	۱۶۸	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۱۲	FC20M10	۰/۲۸	۷۸۴	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۲۲۴	۱۱۲	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۱۳	FC20M15	۰/۲۸	۷۲۸	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۲۲۴	۱۶۸	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۱۴	FC12.5M1 5	۰/۲۸	۸۱۲	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۱۴۰	۱۶۸	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۱۵	FC15M15	۰/۲۸	۷۸۴	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۱۶۸	۱۶۸	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵
۱۶	FC17.5M1 5	۰/۲۸	۷۵۶	۳۱۳/۶	۵۸۹/۵	۱۹۸	۱۶۸	۲۹/۴۷	۲۱/۴۵



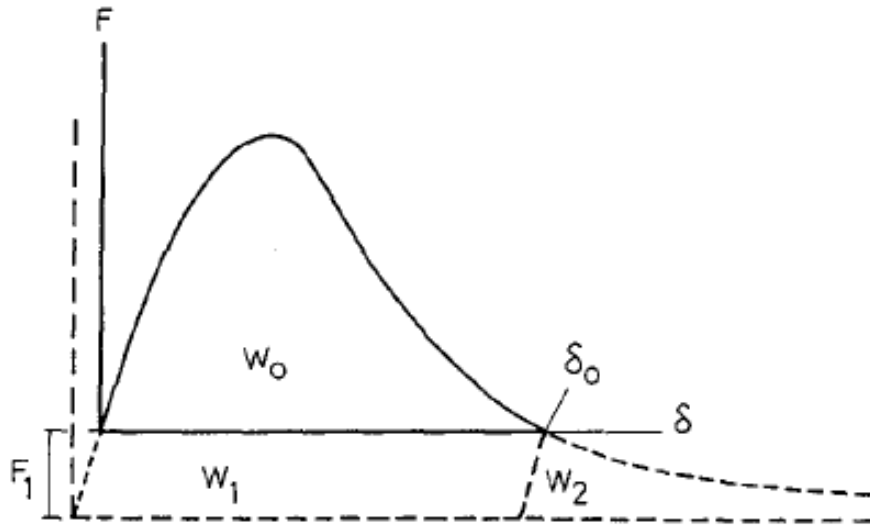
(ب)



(الف)

شکل ۲. الف) دستگاه ADR-Touch برای آزمایش مقاومت فشاری و کششی، ب) دستگاه یونیورسال برای آزمایش مقاومت خمشی

Fig. 2. A) ADR-Touch device for testing compressive and tensile strength, b) Universal device for testing flexural strength



شکل ۳. نمودار نیرو - تغییر مکان مورد استفاده برای محاسبه انرژی شکست نمونه ها

Fig. 3. Force - displacement diagrams used to calculate the fracture energy of samples

سطح مقطع تیر می باشد. برای مثال انرژی شکست نمونه FCOM0 در این بخش ارائه می شود. در این نمونه  $W_0$  مساحت اندازه گیری شده زیر نمودار نیرو تغییر مکان است که  $53835$  نیوتون-میلی متر شده است. همچنین نیروی  $F_1$  ناشی از وزن تیر است و مقدار آن برابر  $71/2$  نیوتون می باشد. عبارت  $\delta_0$  تغییر شکل به دست آمده هنگام گسیختگی تیر است که در این نمونه برابر  $5/37$  میلی متر شده است. در نهایت مقدار انرژی شکست با جاگذاری مقادیر فوق در رابطه ۲ به دست می آید که برابر  $5/46$  نیوتون بر میلی متر می شود. این عدد در ردیف اول جدول ۹ آمده است.

### ۳- نتیجه های آزمایشگاهی

نمونه ها در شرایط ذکر شده مورد آزمایش قرار گرفتند. نتیجه های آزمایش های مقاومت فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست در جدول ۹ نشان داده شده است.

#### ۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

در جدول ۹ و شکل ۴ نتایج آزمایش مقاومت فشاری و درصد تغییرات آن در سن ۲۸ روزه بیان شده است. در واقع برای هر آزمایش سه نمونه ساخته شده است و میانگین جواب آن ها در جدول و

$$f_t = \frac{2P}{\pi D.L} \quad (1)$$

که در آن  $D$  و  $L$  به ترتیب قطر و طول نمونه استوانه ای می باشند.

برای تعیین مقاومت خمشی ۴ نقطه ای از دستگاه یونیورسال استفاده شد که در شکل ۲-ب نشان داده شده است. این آزمایش بر روی نمونه های مکعب مستطیلی به ابعاد  $10 \times 10 \times 35$  سانتی متر مکعب انجام شد. روش انجام این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C1609 [۲۷] بوده است. سرعت در این بخش از کار که بر اساس جابجایی کنترل می شد، برابر  $0/5$  میلی متر بر دقیقه بود. یکی دیگر از پارامترهای موثر در تعیین خواص بتن، انرژی شکست آن است که از روش های متفاوتی محاسبه می شود. در این تحقیق، انرژی شکست نمونه ها ( $G_F$ ) بر اساس روش تعیین شده در شکل ۳ و رابطه ۲ به دست آمده است [۲۸].

$$G_F = \frac{W_0 + 2F_1\delta_0}{A} \quad (2)$$

که در آن  $A$  سطح مقطع شکست است و در این تحقیق همان

### ۳-۲- آزمایش مقاومت کششی

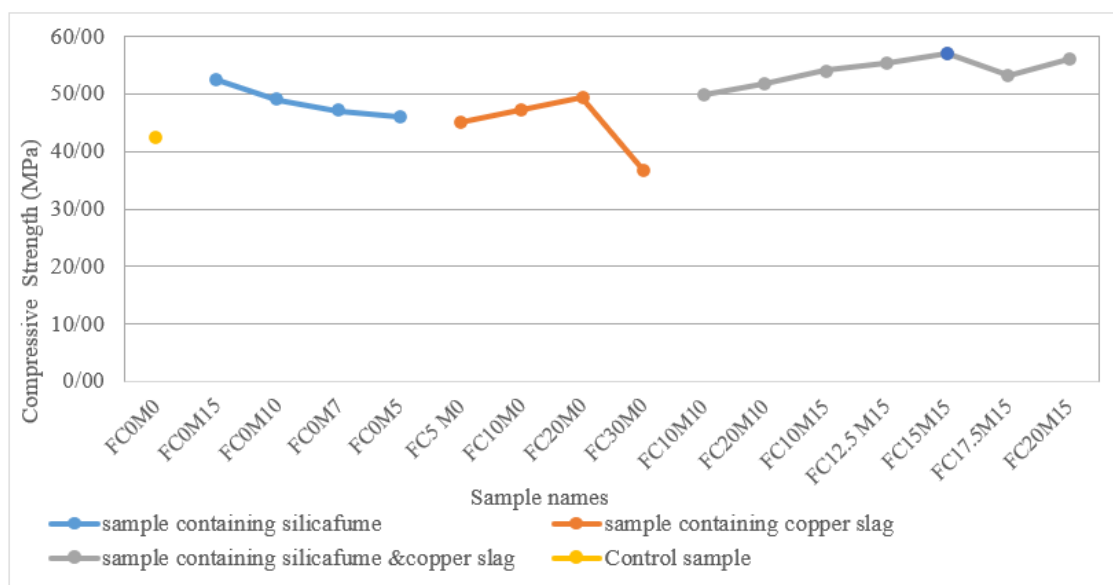
در جدول ۹ و شکل ۵ نتایج آزمایش مقاومت کششی و درصد تغییرات آن در سن ۲۸ روزه بیان شده است. با توجه به نتایج آزمایش کششی مشاهده می‌شود که در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، نمونه‌ی دارای ۱۵٪ میکروسیلیس بیشترین مقاومت را داشت و با مقدار ۴/۷۳ مگاپاسکال، ۲۶/۶٪ نسبت به نمونه شاهد قوی تر بود. از طرفی در نمونه‌های دارای سرباره مس، نمونه حاوی ۱۰٪ سرباره دارای بالاترین مقاومت کششی بود، که با مقدار ۴/۱۶ مگاپاسکال، ۱۱/۲٪ بهبود داشت. همچنین در نمونه‌های ترکیبی حاوی سرباره مس و میکروسیلیس، نمونه‌های دارای ۱۵٪ میکروسیلیس بیشترین مقاومت را داشتند. در نمونه‌های ترکیبی شامل ۱۵٪ میکروسیلیس و مقدار سرباره مس متغیر، مقاومت بهینه برای نمونه‌ی حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ سرباره مس بود، که با مقدار ۴/۹۸ مگاپاسکال، ۳۳/۲٪ نسبت به نمونه شاهد قوی تر بود.

شکل فوق آمده است. با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری، مشاهده می‌شود که مقاومت نمونه شاهد ۴۲/۳۸ مگاپاسکال بود. در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، نمونه دارای ۱۵٪ میکروسیلیس بیشترین مقاومت را داشت، و مقدار آن ۵۲/۴۳ مگاپاسکال بود. یعنی مقاومت این نمونه ۲۳/۷٪ نسبت به نمونه شاهد بهبود داشت. از طرفی در نمونه‌های حاوی سرباره مس، نمونه شامل ۲۰٪ سرباره دارای بالاترین مقاومت بود، و با مقدار ۴۹/۴۲ مگاپاسکال، ۱۶/۶٪ نسبت به نمونه شاهد قوی تر بود. در نمونه‌های ترکیبی حاوی سرباره مس و میکروسیلیس، نمونه‌های دارای ۱۵٪ میکروسیلیس بیشترین مقاومت را داشتند. همچنین در نمونه‌های ترکیبی با میکروسیلیس ثابت ۱۵٪ و مقدار سرباره مس متغیر، مقاومت بهینه مربوط به نمونه حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ سرباره مس بود، که با مقدار ۵۷/۱۳ مگاپاسکال، ۳۴/۸٪ نسبت به نمونه شاهد بهبود داشت.

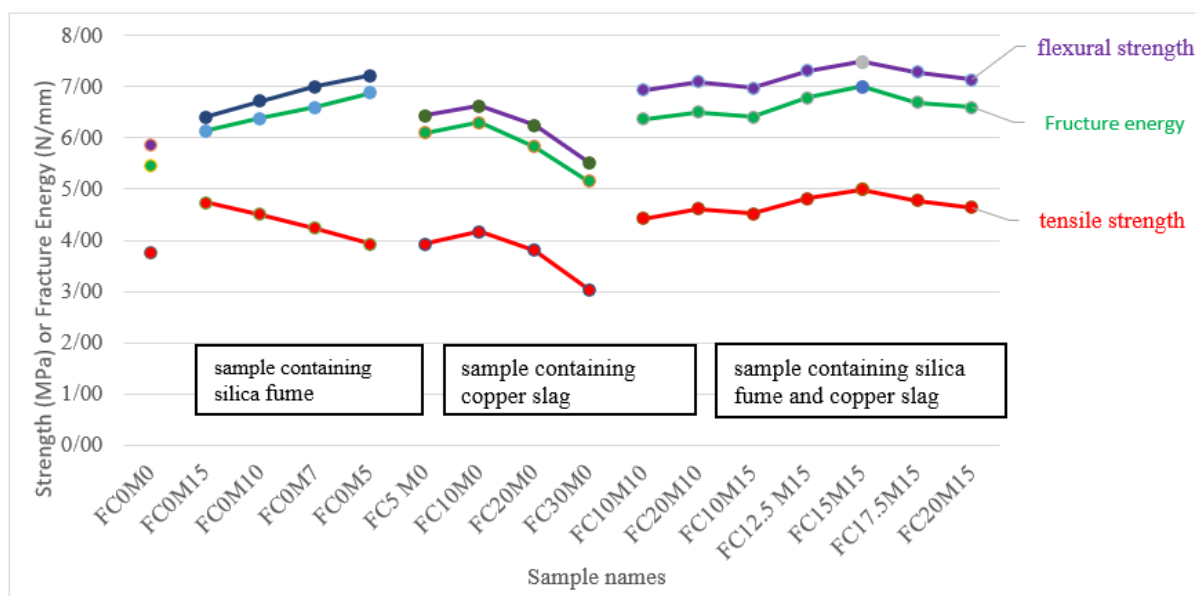
### جدول ۹. نتیجه‌های آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست نمونه‌ها

Table 9. Results of compressive, tensile, bending and fracture energy tests of samples

شماره	نام نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	تغییرات مقاومت فشاری (%)	مقاومت کششی (MPa)	تغییرات مقاومت کششی (%)	مقاومت خمشی (MPa)	تغییرات مقاومت خمشی (%)	انرژی شکست (N/mm)	تغییرات انرژی شکست (%)
۱	FC0M0	۴۲/۳۸	۰/۰۰	۳/۷۴	۰/۰۰	۵/۸۵	۰/۰۰	۵/۴۶	۰/۰۰
۲	FC0M15	۵۲/۴۳	۲۳/۷	۴/۷۳	۲۶/۶	۷/۲۲	۲۳/۴	۶/۸۷	۲۵/۸
۳	FC0M10	۴۸/۹۹	۱۵/۶	۴/۵۱	۲۰/۷	۷/۰۰	۱۹/۷	۶/۵۹	۲۰/۷
۴	FC0M7	۴۷/۱۱	۱۱/۱	۴/۲۳	۱۳/۳	۶/۷۳	۱۴/۹	۶/۳۸	۱۶/۷
۵	FC0M5	۴۵/۹۳	۸/۳	۳/۹۳	۵/۱۷	۶/۴۱	۹/۶	۶/۱۴	۱۲/۳
۶	FC5 M0	۴۵/۰۴	۶/۲	۳/۹۴	۵/۵	۶/۴۴	۱۰/۰	۶/۱۰	۱۱/۷
۷	FC10M0	۴۷/۲۳	۱۱/۴	۴/۱۶	۱۱/۲	۶/۶۲	۱۳/۱	۶/۳۰	۱۵/۳
۸	FC20M0	۴۹/۴۲	۱۶/۶	۳/۸۱	۲/۰	۶/۲۵	۶/۹	۵/۸۳	۶/۷
۹	FC30M0	۳۶/۷۳	-۱۳/۳	۳/۰۵	-۱۸/۴	۵/۵۳	-۵/۴	۵/۱۴	-۵/۷
۱۰	FC10M10	۴۹/۸۵	۱۷/۶	۴/۴۲	۱۸/۳	۶/۹۲	۱۸/۳	۶/۳۶	۱۶/۵
۱۱	FC10M15	۵۴/۰۹	۲۷/۶	۴/۵۲	۲۱/۰	۶/۹۹	۱۹/۴	۶/۴۲	۱۷/۵
۱۲	FC20M10	۵۱/۷۸	۲۲/۱	۴/۶۰	۲۳/۰	۷/۱۰	۲۱/۳	۶/۵۰	۱۸/۹
۱۳	FC20M15	۵۶/۱۰	۳۲/۳	۴/۶۴	۲۴/۳	۷/۱۴	۲۲/۱	۶/۵۹	۲۰/۷
۱۴	FC12.5 M15	۵۵/۳۶	۳۰/۶	۴/۸۲	۲۹/۰	۷/۳۲	۲۵/۱	۶/۸۰	۲۴/۴
۱۵	FC15M15	۵۷/۱۳	۳۴/۸	۴/۹۸	۳۳/۲	۷/۴۸	۲۷/۹	۷/۰۱	۲۸/۳
۱۶	FC17.5M15	۵۳/۳۱	۲۵/۷	۴/۷۸	۲۷/۹	۷/۲۸	۲۴/۴	۶/۶۹	۲۲/۵



شکل ۴. نمودارهای مقاومت فشاری نمونه ها  
 Fig. 4. Compression resistance diagrams of the samples



شکل ۵. نمودارهای مقاومت کششی و خمشی و انرژی شکست نمونه ها

### ۳-۳- آزمایش مقاومت خمشی

نمونه های حاوی میکروسیلیس، مخلوط دارای ۱۵٪ میکروسیلیس بیشترین مقاومت را داشت که با مقدار ۷/۲۲ مگاپاسکال، ۲۳/۴٪ نسبت به نمونه شاهد بهبود داشت. از طرفی در نمونه های حاوی سرباره، نمونه دارای ۱۰٪ سرباره دارای بالاترین مقاومت خمشی

در جدول ۹ و شکل ۵، نتایج آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه ای و درصد تغییرات آن در سن ۲۸ روزه بیان شده است. با توجه به نتایج آزمایش خمشی چهار نقطه ای مشاهده می شود که در

به سرباره در این زمینه اشاره کرده اند [۱۱]. لازم به تاکید است که در نمونه‌های ترکیبی این تحقیق، استفاده هم زمان میکروسیلیس و سرباره مس باعث افزایش قابل توجه مشخصات مکانیکی کامپوزیت سیمانی الیافی شده است.

### ۳-۶- عکس برداری میکروسکوپ الکترونی<sup>۱</sup>

نتایج آزمون عکس برداری میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها در شکل ۶-الف و ب و ج نشان داده شده است. با توجه این تصاویر، توزیع الیاف پلی پروپیلن بسیار همگن و تصادفی بوده است. با توجه به شکل ۶-الف، که مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس است، مشاهده می‌شود که این ماده هم به عنوان پرکننده و هم به عنوان پوزولان عملکرد مناسبی داشته است. شکل ۶-ب نشان می‌دهد که نمونه حاوی ۱۵٪ سرباره مس به خوبی نمونه قبلی عمل نکرده است و در سطح نمونه‌ها لبه تیز سوزنی شکل شفاف و خشک مشاهده می‌شود. این موضوع می‌تواند به علت سنگین بودن و ته نشینی ذرات سرباره و وجود آب آزاد اضافی در سطح نمونه‌ها باشد. در سطح این نمونه حفره‌های نیمه کروی، ترک‌های مویی و کانال‌های مویرگی هم قابل مشاهده است که خود دلیلی بر افزایش تخلخل و کاهش پارامترهای مقاومتی است. در شکل ۶-ج که مربوط به نمونه حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس به همراه ۱۵٪ سرباره مس است، مشاهده می‌شود که ساختار نمونه‌ها بسیار همگن و متراکم است. در این شکل تخلخل و حفرات ریزساختار نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر است. این موضوع دلیل مهمی برای افزایش پارامترهای مقاومتی و بهبود دوام نمونه فوق می‌باشد.

### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی انجام شده، و بررسی مقدار انرژی شکست نمونه‌های کامپوزیت سیمانی الیافی، نتیجه‌های جالب توجهی به دست آمد. در نمونه‌های فاقد سرباره مس و حاوی میکروسیلیس، با افزایش این ماده، مقاومت‌های فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست نسبت به نمونه شاهد افزایش یافتند. در واقع برای طرح‌های حاوی میکروسیلیس، درصد بهینه این ماده ۱۵٪ بود. در مورد طرح‌های دارای سرباره مس،

بود، که با مقدار ۶/۶۲ مگاپاسکال، ۱۳/۱٪ بهبود داشت. همچنین در نمونه‌های ترکیبی شامل سرباره مس و میکروسیلیس، نمونه‌های حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس بیشترین مقاومت را داشتند. در نمونه‌های ترکیبی، درصد بهینه مقاومت خمشی برای نمونه‌ی حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ سرباره مس بود که با مقدار ۷/۴۸ مگاپاسکال، ۲۷/۹٪ بهبود داشت.

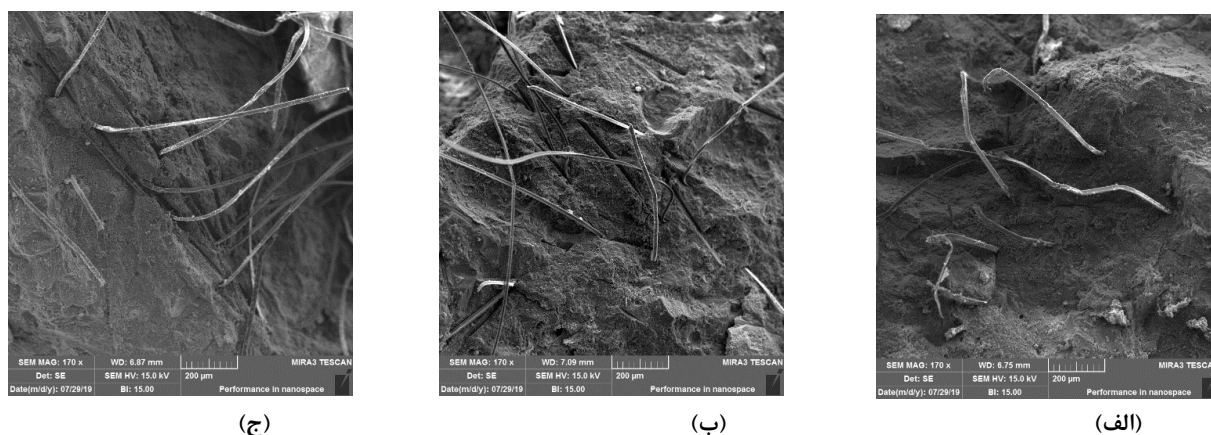
### ۳-۴- انرژی شکست

در جدول ۹ و شکل ۵ نتایج مقدار انرژی شکست ( $G_F$ ) نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه بیان شده است. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، نمونه‌ی دارای ۱۵٪ میکروسیلیس، بیشترین انرژی شکست را داشت که با مقدار ۶/۸۷ نیوتون بر میلی‌متر ۲۵/۸٪ نسبت به نمونه شاهد بهبود داشت. از طرفی در نمونه‌های حاوی سرباره مس، نمونه دارای ۱۰٪ سرباره دارای بیشترین انرژی شکست بود، که با مقدار ۶/۳ نیوتون بر میلی‌متر، ۱۵/۳٪ بهبود داشت. همچنین در نمونه‌های ترکیبی حاوی سرباره مس و میکروسیلیس، نمونه‌های دارای ۱۵٪ میکروسیلیس بیشترین انرژی شکست را داشتند. در نمونه‌های ترکیبی، درصد بهینه انرژی شکست مربوط به نمونه‌ی حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ سرباره مس بود که با مقدار ۷/۰۱ نیوتون بر میلی‌متر ۲۸/۳٪ بهبود داشت.

### ۳-۵- جمع بندی نتیجه‌های آزمایشگاهی

با توجه به تحقیقات گذشته، میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست بتن و سایر مواد پایه سیمانی می‌شود [۱۱ و ۷ و ۶]. البته این افزایش با توجه به طرح مخلوط و نوع مصالح متفاوت است. در این تحقیق نیز میکروسیلیس چهار پارامتر فوق را بهبود بخشید. در تحقیقات سایر پژوهشگران، سرباره مس به عنوان جایگزین سیمان استفاده شده است، و این ماده با توجه به نوع طرح مخلوط و مقدار سرباره، اثرهای متفاوتی داشته است [۲۰-۱۲]. در مواردی سرباره مس، مشخصات مکانیکی را تا حدی کاهش و گاهی افزایش داده است. در این تحقیق نیز به عنوان مثال سرباره مس تا میزان جایگزینی ۲۰٪ باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. البته اثر سرباره در افزایش مقاومت، نسبت به میکروسیلیس کمتر بوده است. سایر محققین هم به برتری میکروسیلیس نسبت

1 Scanning Electron Microscopy (SEM)



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۶. الف) تصویر SEM نمونه حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس؛ ب) تصویر SEM نمونه دارای ۱۵٪ سرباره مس؛ ج) تصویر SEM نمونه حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس و ۱۵٪ سرباره مس

Fig. 6. a) SEM image of a sample containing 15% microsilica; B) Sample SEM image with 15% copper slag; C) Sample SEM image containing 15% microsilica and 15% copper slag

#### مراجع

- [1] M. Mazloom, S. Mirzamohammadi, Thermal effects on the mechanical properties of cement mortars reinforced with aramid, glass, basalt and polypropylene fibers, *Advances in Material Research*, 8(2) (2019) 137-154.
- [2] P.S. Song, S. Hwang, B.C. Sheu, Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes, *Cement and Concrete Research*, 35(8) (2005) 1546-1550.
- [3] A.G. Santos, J.M. Rincón, M. Romero, R. Talero, Characterization of a polypropylene fibered cement composite using ESEM, FESEM and mechanical testing, *Construction and Building Materials*, 19(5) (2005) 396-403.
- [4] S. Yin, R. Tuladhar, F. Shi, M. Combe, T. Collister, N. Sivakugan, Use of macro plastic fibres in concrete: A review, *Construction and Building Materials*, 93 (2015) 180-188.
- [5] K.Q. Yu, J.T. Yu, J.G. Dai, Z.D. Lu, S.P. Shah, Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers, *Construction and Building Materials*, 158 (2018) 217-227.

درصد بهینه این سرباره برای آزمایش مقاومت فشاری ۲۰٪ بود، ولی برای کشش، خمش و انرژی شکست درصد بهینه آن ۱۰٪ شد. طرح بهینه نهایی برای مقاومت های فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست که از بین نمونه های ترکیبی انتخاب شده است، حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس به همراه ۱۵٪ سرباره مس بود. با ترکیب میکروسیلیس و سرباره مس به عنوان جایگزین سیمان، نه تنها مقدار سیمان مصرفی کاهش قابل توجهی یافت، بلکه اثر افزایش پارامترهای مقاومتی مذکور نیز تشدید شد. در واقع نمونه های حاوی میکروسیلیس دارای ریز ساختار بسیار همگن و متراکمی بودند. این موضوع می تواند دلیل اصلی خصوصیت های مقاومتی خوب آن ها باشد. نمونه های حاوی سرباره مس دارای سطح خشک و حفرات نیمه کروی بودند که عامل مهمی در کاهش مقاومت آن ها بود. طرح بهینه دارای ۱۵٪ میکروسیلیس به همراه ۱۵٪ سرباره مس، دارای میزان تخلخل بسیار کم و ریز ساختار بسیار متراکمی شد. این موضوع دلیل مهمی برای انتخاب آن به عنوان بهترین طرح مخلوط این تحقیق به شمار می رود. مقاومت های فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست این طرح نسبت به طرح شاهد به ترتیب ۳۴/۸٪، ۳۳/۲٪، ۲۷/۹٪ و ۲۸/۳٪ افزایش داشتند.

- [16] A. Taeb, S. Faghihi, Utilization of copper slag in the cement industry, *ZKG international*, 55(4) (2002) 98-100.
- [17] Y. Feng, Q. Yang, Q. Chen, J. Kero, A. Andersson, H. Ahmed, F. Engström, C. Samuelsson, Characterization and evaluation of the pozzolanic activity of granulated copper slag modified with CaO, *Journal of Cleaner Production*, 232 (2019) 1112-1120.
- [18] Z. Wang, T. Zhang, L. Zhou, Investigation on electromagnetic and microwave absorption properties of copper slag-filled cement mortar, *Cement and Concrete Composites*, 74 (2016) 174-181.
- [19] M.F.M. Zain, M. Islam, S. Radin, S. Yap, Cement-based solidification for the safe disposal of blasted copper slag, *Cement and Concrete Composites*, 26(7) (2004) 845-851.
- [20] S. Lim, W. Lee, H. Choo, C. Lee, Utilization of high carbon fly ash and copper slag in electrically conductive controlled low strength material, *Construction and Building Materials*, 157 (2017) 42-50.
- [21] ASTM C1240. Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious mixtures, ASTM International, 2005.
- [22] ASTM C1116, Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete, ASTM International, 2015.
- [23] ASTM C494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, 2011.
- [24] M. Mazloom, S. Mirzamohammadi, Fracture of fibre-reinforced cementitious composite after exposure to elevated temperatures, *Magazine of Concrete Research*, (2020) DOI: 10.1680/jmacr.19.00401.
- [25] BS-1881:116, Testing Concrete Part 116. Method for determination of the compressive strength of concrete Cubes, London, British Standard Institution, 1983.
- [26] BS-1881:117, Testing Concrete Part 117. Method for determination of tensile splitting strength, London, British Standard Institution, 1983.
- [27] ASTM C1609, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), ASTM International, 2012.
- [28] A. Hillerborg, The theoretical basis of a method to determine the fracture energy  $G_f$  of concrete, *Materials and structures*, 18(4) (1985) 291-296
- [6] M. Mazloom, A. Allahabadi, M. Karamloo, Effect of silica fume and polyepoxide-based polymer on electrical resistivity, mechanical properties, and ultrasonic response of SCLC, *Advances in concrete construction*, 5(6) (2017) 587-611.
- [7] J. Massana, E. Reyes, J. Bernal, N. León, E. Sánchez-Espinosa, Influence of nano-and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 165 (2018) 93-103.
- [8] O.A. Naniz, M. Mazloom, Effects of colloidal nano-silica on fresh and hardened properties of self-compacting lightweight concrete, *Journal of Building Engineering*, 20 (2018) 400-410.
- [9] H. Salehi, M. Mazloom, Effect of magnetic field intensity on fracture behaviours of self-compacting lightweight concrete, *Magazine of Concrete Research*, 71(13) (2018) 665-679.
- [10] M. Mazloom, S.M. Miri, Effect of magnetic water on strength and workability of high performance concrete, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 3(2) (2016) 30-41 (in Persian).
- [11] H. Salehi, M. Mazloom, Opposite effects of ground granulated blast-furnace slag and silica fume on the fracture behavior of self-compacting lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 222 (2019) 622-632.
- [12] W.A. Moura, J.P. Gonçalves, M.B.L. Lima, Copper slag waste as a supplementary cementing material to concrete, *Journal of materials science*, 42(7) (2007) 2226-2230.
- [13] A. Behnood, "Effects of high temperatures on the high-strength concretes incorporating copper slag as coarse aggregate", *Proceedings of the 7th International Symposium on Utilization of High-Strength/Performance Concrete*, Washington, DC, USA, (2005) 228-266.
- [14] I. Afshoon, Y. Sharifi, Utilization of micro copper slag in SCC subjected to high temperature, *Journal of Building Engineering*, 29 (2020).
- [15] M. Fadaee, R. Mirhosseini, R. Tabatabaei, M.J. Fadaee, Investigation on using copper slag as part of cementitious materials in self compacting concrete, *Asian Journal of Civil Engineering*, 16(3) (2015) 368-381.



چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Mazloom, M. Akbari Jamkarani, Effect of copper slag on the mechanical properties and fracture energy of fiber reinforced cementitious composite. Amirkabir J. Civil Eng., 53(6) (2021) 2625-2638*

DOI: [10.22060/ceej.2020.17458.6573](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17458.6573)



