

## Investigating the mechanical properties of self-compacting lightweight concrete containing copper slag

Moosa Mazloom<sup>1\*</sup>, Mohammad Akbari Jamkarani<sup>2</sup>, Farid Afzali<sup>2</sup>

1- Faculty of Civil Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

2-Master of Science in Structural Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Concrete is one of the most important building materials these days. Due to the improvement in construction industry and the need to lightening the buildings, a variety of lightweight concrete is expanded. One of the most important types of this concrete is self-compacting lightweight concrete. Due to the need to reduce the grade of cement in concrete, in this research, the mechanical properties of self-compacting lightweight concrete have been investigated by replacing copper slag as a part of cement. Due to the positive effects of microsilica in this concrete, and in order to reduce the cement grade in self-compacting lightweight concrete, an initial mix without copper slag and microsilica, and 7 mix designs with 0, 5, 10, 15, 20, 25 and 30% copper slag in addition to 10% microsilica were constructed. To evaluate the properties of fresh concrete, slip flow, T50, V-funnel and J-ring tests were performed. Compressive, tensile and flexural strength tests were also performed on hardened concrete at different ages of 7, 28 and 90 days. Finally, it was found that microsilica reduced workability and improved the compressive, tensile and flexural strengths of concrete. In fact, the compressive, tensile and flexural strengths of concrete containing microsilica increased about 35, 24, and 25 percent. Moreover, copper slag increased the workability and improved its self-compacting properties. The optimal mix design had good self-compacting properties, and in addition to reducing the cement grade, it had higher compressive, tensile and flexural strengths than the control sample.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 17 April 2020

**Revise Date:** 11 October 2020

**Accept Date:** 25 October 2020

### Keywords:

Lightweight concrete

Self-compacting concrete

Microsilica

Copper slag

Self-compacting lightweight concrete

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.227320.2120>

\*Corresponding author: Moosa Mazloom

Email address: mazloom@sru.ac.ir

## بررسی مشخصات مکانیکی بتن سبک خودتراکم حاوی سرباره مس

موسی مظلوم<sup>۱\*</sup>، محمد اکبری جمکرانی<sup>۲</sup>، فرید افضلی<sup>۲</sup>

۱- هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

### چکیده

امروزه یکی از مهم‌ترین مصالح ساختمانی بتن می‌باشد. با توجه به گسترش ساخت و ساز و نیاز به سبک‌سازی ساختمان‌ها، انواع بتن سبک در حال گسترش است. یکی از مهمترین انواع این بتن، بتن سبک خودتراکم است. با توجه به لزوم کاهش عیار سیمان در بتن، در این تحقیق خواص مکانیکی بتن سبک خودتراکم، با جایگزینی سرباره مس به عنوان قسمتی از سیمان بررسی شده است. با توجه به تاثیر مثبت میکروسیلیس در این بتن، و به منظور کاهش عیار سیمان در بتن سبک خودتراکم، یک طرح اولیه بدون سرباره مس و میکروسیلیس و ۷ طرح مخلوط با ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد سرباره مس به همراه ۱۰ درصد میکروسیلیس ارائه شده است. به منظور بررسی خواص بتن تازه آزمایش‌های جریان اسلامپ، T50، قیف ۷ و حلقه J انجام گرفت. همچنین آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی بتن سخت‌شده در سنین مختلف ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. در نهایت مشخص گردید که میکروسیلیس کارایی بتن را کاهش و مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی را بهبود می‌بخشد. در واقع مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی ۲۸ روزه نمونه‌های دارای میکروسیلیس نسبت به نمونه بدون میکروسیلیس حدود ۳۵، ۲۴ و ۲۵ درصد افزایش یافتند. همچنین سرباره مس کارایی بتن را افزایش داده، خواص خودتراکمی را بهتر می‌کند. طرح بهینه خواص خودتراکمی مناسب داشت و علاوه بر کاهش عیار سیمان، مقاومت فشاری، کششی و خمشی بالاتری نسبت به نمونه شاهد داشت.

کلمات کلیدی: بتن سبک، بتن خودتراکم، میکروسیلیس، سرباره مس، بتن سبک خودتراکم

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.227320.2120	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.227320.2120	۱۴۰۰/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۰۸/۰۴	۱۳۹۹/۰۸/۰۴	۱۳۹۹/۰۷/۲۰	۱۳۹۹/۰۱/۲۹
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				موسی مظلوم		
				mazloom@sru.ac.ir		

## ۱- مقدمه

بتن یکی از مصالح ساختمانی بسیار متداول است، که به دلیل شکل پذیری، دسترسی آسان و اقتصادی بودن، در سراسر جهان بسیار مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. با توسعه کاربرد بتن، تولید بتنی که توانایی جریان پذیری تحت وزن خود را داشته باشد دستاوردی مهم می باشد. بتن خود تراکم مخلوطی با روانی و قابلیت شکل پذیری بالا است که بدون به وجود آمدن پدیده جداسازی سنگدانه ها کاملاً یک دست و متراکم می شود. همچنین، هزینه و زمان بتن ریزی بتن کاهش می یابد [۲]. با این حال این بتن به دلیل وجود محتوایی با مواد پودری زیاد و سنگدانه های طبیعی، دارای چگالی بسیار زیادی می باشد. بیشتر وزن بتن را مصالح درشت دانه و ریزدانه آن تشکیل می دهد و معمولاً حدود ۶۰ درصد از حجم یک بتن SCC<sup>۱</sup> را شامل می شود [۳-۵]. سبک سازی سازه ها یکی از راه های اساسی کاهش اثرات مخرب زلزله بر سازه ها می باشد [۶]. کاهش جرم اعضای بتنی این امکان را می دهد تا از دهانه های طولانی تر استفاده شود و ابعاد اعضا کاهش یابد. این کار باعث ساخت و ساز ایمن تر با شرایط اقتصادی بهتر می گردد [۷، ۸]. بنابراین SCLC ترکیبی از بتن SCC و بتن LWC<sup>۲</sup> بوده که دارای ویژگی های این دو بتن بوده و با نام بتن سبک خود تراکم شناخته شده است [۹-۱۳]. حجم بالای سیمان مصرفی در بتن خود تراکم هم از نظر اقتصادی و هم از نظر مسائل زیست محیطی مناسب نمی باشد [۱۴]. علاوه بر آن عیار بالای سیمان دمای هیدراتاسیون را بیش از حد بالا برده و بتن ترک می خورد [۱۵]. به منظور کاهش اثرات زیست محیطی و کاهش عیار سیمان از پوزولان به عنوان جایگزین قسمتی از سیمان استفاده می شود. استفاده از پوزولان مقاومت فشاری و کششی بتن را بهبود می بخشد [۱۶]. در این بتن از سرپاره مس به جای قسمتی از سیمان استفاده شده است.

Zhimin Wu و همکاران که بر روی کارایی SCLC مطالعه کرده اند، استفاده از آزمایش اسلامپ، قیف V و جعبه L و U را برای بررسی کارایی SCLC<sup>۳</sup> مناسب می دانند [۱۷]. در سال ۲۰۰۳ توسط Gesoglu و همکاران ویژگی های تازه و سخت شده SCC با استفاده از ترکیبی از پودر سنگ آهک و مرمر و خاکستر بادی مطالعه شده است [۱۸]. در این تحقیق دو سری طرح اختلاط با و بدون خاکستر بادی طراحی شده که پودر های سنگ آهک و مرمر با درصد های ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزین سیمان شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش درصد فیلرها مقدار فوق روان کننده افزایش، مقدار سیمان کاهش و ویژگی های فاز خمیری بهبود یافته است. در هر دو طرح اختلاط با افزایش درصد فیلرها به میزان ۵ الی ۲۰ درصد، مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه و همچنین مقاومت کششی ۳۰ روزه به میزان ۶ الی ۱۰ درصد افزایش داشته است. Bekir و همکاران ویژگی های بتن SCLC با استفاده از سه نوع سبکدانه و تاثیر میزان حجم پودر سنگ پرداخته اند، در بررسی آنها برای فاز سخت شده از مقاومت فشاری و کششی دونیم شدن برای نمونه های ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه استفاده شده است [۱۹]. Mazloom و همکاران رابطه ی بین کارایی و استحکام بتن را مطالعه کرده اند. در این بررسی از میکروسلیس ۱۰ درصد بعنوان جایگزین سیمان استفاده شده است و از پودر سنگ آهک بعنوان فیلر در بتن استفاده کرده اند، که اشاره می کند میکروسلیس سبب بهبود عملکرد بتن SCC، در مقاومت فشاری شده است [۲۰ و ۲۱]. در مطالعه ای مظلوم و همکاران اثر میکروسلیس را بر بتن سبک خود تراکم بررسی کردند. در نهایت اعلام کردند میکروسلیس دوام و خواص مکانیکی این بتن را افزایش داده است [۲۲]. افزودن میکروسلیس به بتن باعث تسریع هیدراتاسیون و افزایش مقاومت فشاری می شود [۲۳ و ۲۴]. با توجه به تحقیقات تعدادی از محققان تولید سالیانه سرپاره مس را چهارمیلیون تن در کشور ایالات متحده آمریکا، حدود دو میلیون تن در ژاپن، ۳۶۰۰۰۰ تن در ایران، ۲۴۴۰۰۰ تن در برزیل و ۶۰۰۰۰ تن در عمان معرفی می کند [۲۵]. Mazzoli و همکاران ادعان داشتند که جایگزینی ۱۰ تا ۱۵ درصد وزنی سرپاره به جای سیمان تاثیر مهمی بر مقاومت ملات نمی گذارد، هر چند مقاومت فشاری کمی کاهش می یابد اما مقاومت در برابر سایش را در ملات افزایش می دهد [۲۶]. سرپاره مس علاوه بر کاهش تنش مکانیکی، انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی را کاهش می دهد [۲۷]. همچنین Wang و همکاران با جایگزینی سرپاره مس به جای ماسه نشان دادند پارامترهای مقاومتی افزایش یافته است [۲۸]. سرپاره مس با توجه به نسبت آب به سیمان و مقدار جایگزینی سرپاره، بر مشخصات مکانیکی بتن اثر می گذارد [۲۹]. با توجه به گسترش استفاده از بتن خود تراکم، هشدارهای زیست محیطی برای کاهش عیار سیمان و همچنین ضرورت سبک سازی ساختمان ها برای کاهش نیروی زلزله، در این تحقیق بتن سبک خود تراکم بررسی شده است. در این

<sup>1</sup> Self compacting concrete

<sup>2</sup> Lightweight concrete

<sup>3</sup> Self compacting lightweight concrete

مطالعه، تاثیر سرباره مس به عنوان پوزولان جایگزین سیمان، در بتن سبک خودتراکم بررسی شده است. نوآوری این تحقیق استفاده از سرباره مس و ترکیب میکروسیلیس و سرباره مس در بتن سبک خودتراکم است. علت استفاده از این پوزولانها کاهش عیار سیمان با استفاده از سرباره مس و بهبود مشخصات مکانیکی با استفاده از میکروسیلیس می باشد. به عنوان جایگزین سیمان و ویژگی های مربوط به بتن سبک خودتراکم تازه با انجام آزمایش های زمان و قطر جریان اسلامپ، زمان قیف V و حلقه J مورد بررسی قرار گرفته است. وزن مخصوص، مقاومت فشاری، کششی و خمشی در تمامی طرحها مربوط به بتن سخت شده بررسی شده است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح

در این مطالعه، از سیمان تیپ ۴۲۵-۱ کارخانه سیمان تهران با وزن مخصوص ۳/۰۷ گرم بر سانتی متر مکعب و نرمی بلین ۳۲۹۰ سانتی متر مربع بر گرم طبق استاندارد 197-1 EFNARC [۳۰] استفاده شده است، همچنین مشخصات شیمیایی سیمان در جدول ۱ ارائه شده است. میکروسیلیس مصرفی از کارخانه فروسیلیس شهریار و با وزن مخصوص ۲/۲۱ گرم بر سانتی متر مکعب استفاده شده که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. سرباره مس مصرفی از کارخانه مس سرچشمه که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۲ و مشخصات دانه بندی در نمودار شکل ۱ نشان داده شده است. پودر سنگ مصرفی با چگالی ۲/۶۸ گرم بر سانتی متر مکعب محصول کارخانه قم می باشد و مشخصات شیمیایی آن در جدول ۳ نشان داده شده است. سبک دانه اسکوریا با قطر ذرات ۶ تا ۱۲/۵ میلی متر به عنوان درشت دانه، ترکیب ماسه رودخانه ای و سبک دانه اسکوریا با قطر ذرات ۳ تا ۶ میلی متر به عنوان ریزدانه استفاده شده است. ماسه رودخانه ای با چگالی سطحی اشباع و خشک به ترتیب ۲/۶۴ و ۲/۶۶ گرم بر سانتی متر مکعب استفاده شده است، همچنین منحنی دانه بندی ماسه مصرفی مطابق استاندارد ASTM C33 [۳۱] در نمودار شکل ۳ نشان داده شده است. مشخصات دانه بندی سبک دانه اسکوریا و پودر سنگ به ترتیب در نمودار اشکال ۳ و ۴ مشخص شده است. همچنین در این بتن از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات استفاده شده که مشخصات فیزیکی آن در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان و

میکروسیلیس [۲۲]

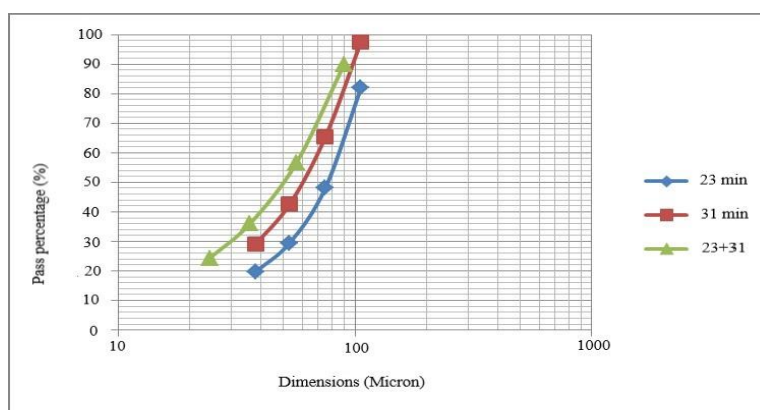
ترکیب	سیمان (درصد)	میکروسیلیس (درصد)
SiO <sub>2</sub>	۲۱/۳۰	۹۶/۴
CaO	۶۳/۴۸	۰/۴۹
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵/۱۳	۱/۳۲
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۴۷	۰/۸۷
Na <sub>2</sub> O	۰/۲۳	۰/۳۱
MgO	۲/۵۱	۰/۹۷
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	۰/۱۶
SO <sub>3</sub>	۱/۶۷	۰/۱۰
K <sub>2</sub> O	۰/۵۶	۱/۰۱
SiC	-	۰/۵
C	-	۰/۳
CL	-	۰/۰۴
H <sub>2</sub> O	-	۰/۰۸

جدول ۲: مشخصات شیمیایی سرباره مس

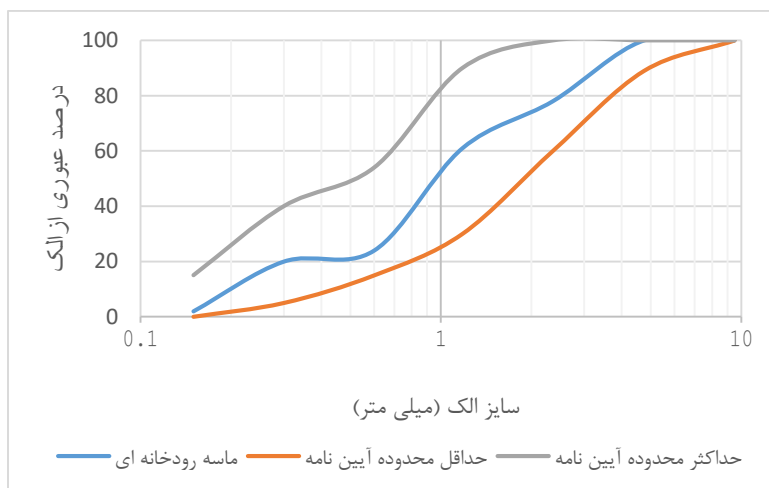
ترکیب	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	feo	CuO	سولفات	کلرید
مقدار (درصد)	۳۴	۶/۵	۲	۵-۱	۵۴-۴۷	Max ۰/۷	۰/۰۲	۰/۰۰۳

جدول ۳: مشخصات شیمیایی پودر سنگ آهک

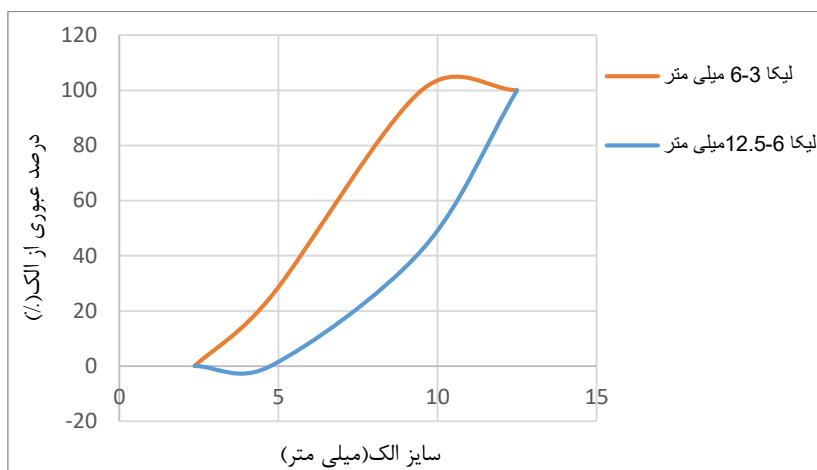
ترکیب	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O
مقدار (درصد)	۵۵/۰۷	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۴۴	۰/۳۴	۰/۱۱



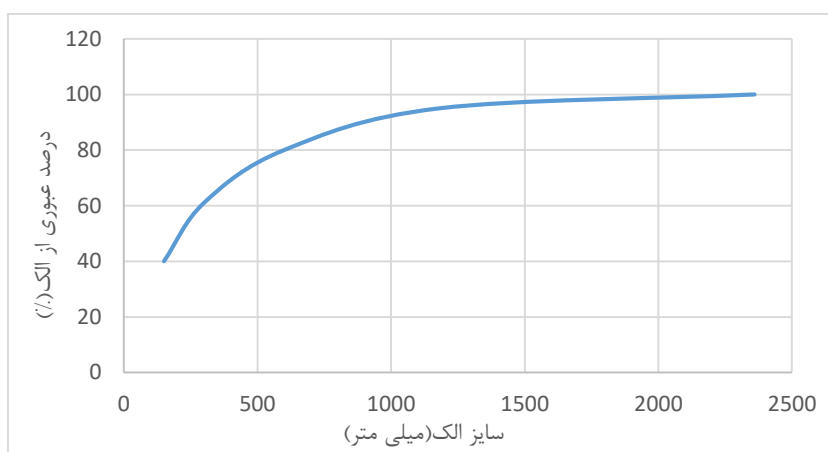
شکل ۱: نمودار دانه بندی سرباره مس



شکل ۲: نمودار دانه بندی ماسه شکسته



شکل ۳: نمودار دانه بندی لیکا



شکل ۴: نمودار دانه بندی پودرسنگ

جدول ۴: مشخصات فوق روان کننده‌ی مورد استفاده

شکل ظاهری	مایع قهوه ای روشن
وزن مخصوص (gt/cm <sup>3</sup> )	۱/۱۱
یون کلر	کمتر از ۰/۱ درصد
PH	۶/۵ - ۷/۵
درجه اشتعال	غیر آتش زا
درجه انجماد	+۲

## ۲-۱- طرح مخلوط و ساخت نمونه

طرح مخلوط بتن سبک خودتراکم مطابق آیین نامه ACI 237R [۳۲] انتخاب شده است. سپس برای دستیابی به کارایی و پایداری در محدوده استاندارد EFNARC 197-1 [۳۰] و وزن مخصوص مورد قبول آیین نامه ACI 213 [۳۳] برای بتن سبک، طرح مخلوط اولیه اصلاح شد. با توجه به مطالعات گذشته که بیانگر تاثیر مثبت ۱۰ درصد میکروسیلیس در بتن سبک خودتراکم بود، ۱۰ درصد از وزن سیمان با میکروسیلیس جایگزین شد. همچنین یک طرح بدون میکروسیلیس برای صحت سنجی این ادعا ارائه شد. همچنین ۷ طرح با

مقدار سرباره مس ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد ارائه شد. جزئیات طرح مخلوط نمونه‌ها با نسبت آب به سیمان ۰/۴ در جدول ۷ قابل مشاهده است. در نام‌گذاری نمونه‌ها در جدول ۵، میکروسیلیس با M و سرباره مس با C مشخص شده است. همچنین نمونه اولیه (M0C0) بدون میکروسیلیس بود. نمونه مشابه دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس (M10C0) مقاومت بیشتری داشت و نمونه فوق به عنوان نمونه شاهد انتخاب شد. همچنین به علت وجود لیکا ابتدا به منظور کاهش تاثیر منفی جذب آب موثر در مخلوط بتن توسط سبکدانه‌ها، قبل از مخلوط کردن مصالح پیش خیس کردن سبکدانه‌ها انجام شد. برای این منظور بخشی از آب اختلاط آب به سبکدانه‌ها اضافه شد و حدود پانزده دقیقه عملیات پیش خیس کردن در مخلوط کن ادامه یافت. سپس ماسه و پودر سنگ اضافه شده و اختلاط به مدت ۱ دقیقه انجام شد. در نهایت سیمان و مواد پوزولانی به همراه باقی مانده‌ی آب به همراه فوق روان کننده اضافه گردید به نحوی که در پایان مقدار آب جذب شده توسط لیکا معادل جذب آب نیم ساعته‌ای که از قبل اندازه‌گیری شده بود شد.

جدول ۵: طرح مخلوط نمونه‌های بتن سبک خودتراکم ( $\text{kg/m}^3$ )

نام نمونه	لیکا ( $12/5\text{mm}$ )	لیکا ( $6\text{mm}$ )	ماسه شکسته	سیمان	پودر سنگ	سرباره مس	میکروسیلیس	آب	فوق روان کننده
M0C0	۱۵۵	۲۶۵	۵۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۰	۰	۲۰۰	۹
M10C0	۱۵۵	۲۶۵	۵۰۰	۴۵۰	۲۰۰	۰	۵۰	۲۰۰	۹
M10C5	۱۵۵	۲۶۵	۵۰۰	۴۲۵	۲۰۰	۲۵	۵۰	۲۰۰	۹
M10C10	۱۵۵	۲۶۵	۵۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۵۰	۵۰	۲۰۰	۹
M10C15	۱۵۵	۲۶۵	۵۰۰	۳۷۵	۲۰۰	۷۵	۵۰	۲۰۰	۹
M10C20	۱۵۵	۲۶۵	۵۰۰	۳۵۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۰۰	۹
M10C25	۱۵۵	۲۶۵	۵۰۰	۳۲۵	۲۰۰	۱۲۵	۵۰	۲۰۰	۹
M10C30	۱۵۵	۲۶۵	۵۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۵۰	۵۰	۲۰۰	۹

در این تحقیق آزمایش‌های جریان اسلامپ، T50 و قیف V مطابق با روند EFNARC 197-1 [۳۰] انجام گرفت. همچنین آزمایش حلقه J طبق ASTM C1621 [۳۴] به منظور ارزیابی قابلیت عبوری بتن سبک خودتراکم انجام شد. با دستگاه آزمایش جریان اسلامپ زمان رسیدن مخلوط SCLC به قطر ۵۰۰ mm که جریان‌پذیری را نشان می‌دهد و قطر نهایی پخش شدن (Dt) که توانایی پرنندگی و جریان‌پذیری را می‌سنجد، اندازه‌گیری می‌شود. آزمون حلقه J برای مشخص کردن توانایی عبور بتن از بین آرماتورهای متراکم موجود در قالب می‌باشد. تغییر بیشتر در اختلاف ارتفاع نشان دهنده قابلیت عبور کم می‌باشد که می‌تواند منجر به پدید آمدن انسداد گردد. آزمون قیف V برای ارزیابی مدت زمان نهایی برای جریان‌پذیری و عبور از مکان‌های محدود بدون انسداد طراحی شده و باید در محدوده تعیین شده EFNARC 197-1 [۳۰] باشد. بلافاصله بعد از انجام آزمایش‌های بتن تازه جهت بررسی خواص مکانیکی، بتن در قالب ریخته شده و آزمون‌ها در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در محیط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شده‌اند و پس از آن تا زمان انجام آزمایش در دمای آزمایشگاه تحت عمل آوری مرطوب در حوضچه‌ی آب قرار گرفته‌اند. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتی متری با نرخ بارگذاری برابر  $0/3$  مگاپاسکال بر ثانیه مطابق با BS: part 116, 1881 [۳۵] انجام گرفت. آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ارتفاع ۲۰ سانتی متر و قطر سطح مقطع ۱۰ سانتی متر با نرخ بارگذاری  $0/02$  مگاپاسکال بر ثانیه طبق BS: part 116, 1881 [۳۵] و آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های منشوری  $10 \times 10 \times 35$  سانتی متری با نرخ سرعت بارگذاری  $0/5$  میلی متر بر دقیقه مطابق با ASTM C1609 [۳۶] در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه جهت بررسی خواص مکانیکی بتن انجام شده است. دستگاه ADR ساخت کشور انگلستان برای آزمایش‌های مقاومت فشاری و کشش غیر مستقیم استفاده شد همچنین نمونه تحت آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۵ نشان داده شده است. دستگاه یونیورسال ساخت کشور آلمان برای آزمایش مقاومت خمشی استفاده شد و نمونه منشوری تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: نمونه منشوری تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای



شکل ۵: نمونه مکعبی تحت آزمایش مقاومت فشاری

## ۳- نتایج

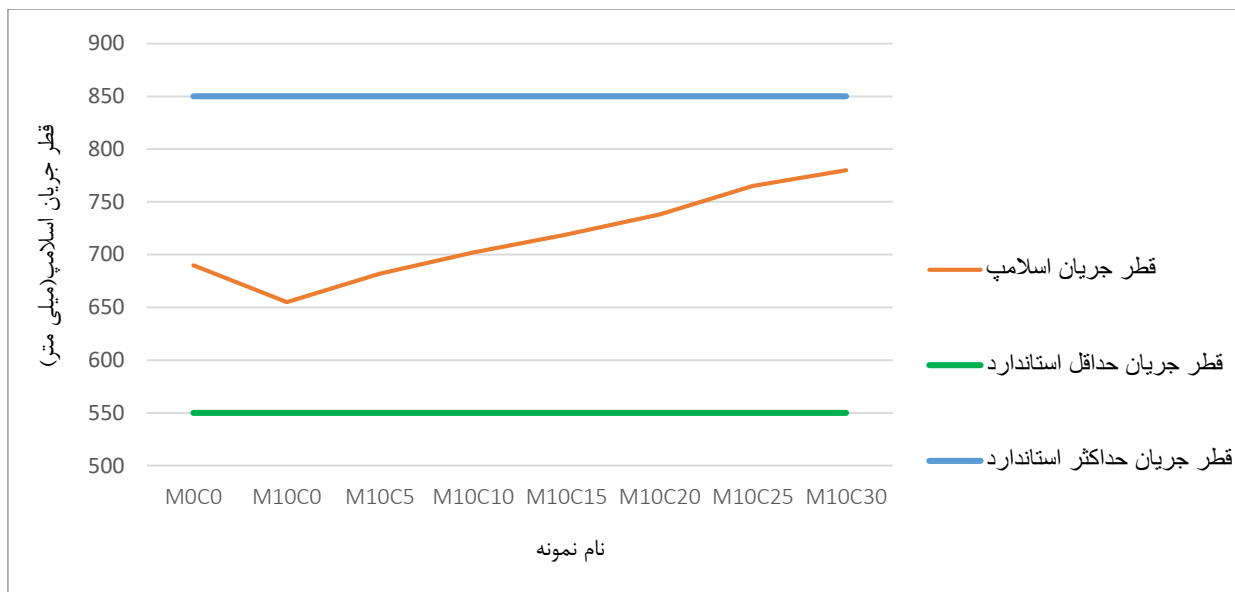
## ۳-۱- نتایج آزمایش‌های بتن تازه

نتایج آزمایش‌های بتن تازه در جدول ۶ و شکل‌های ۷ تا ۱۰ مشخص شده‌است.

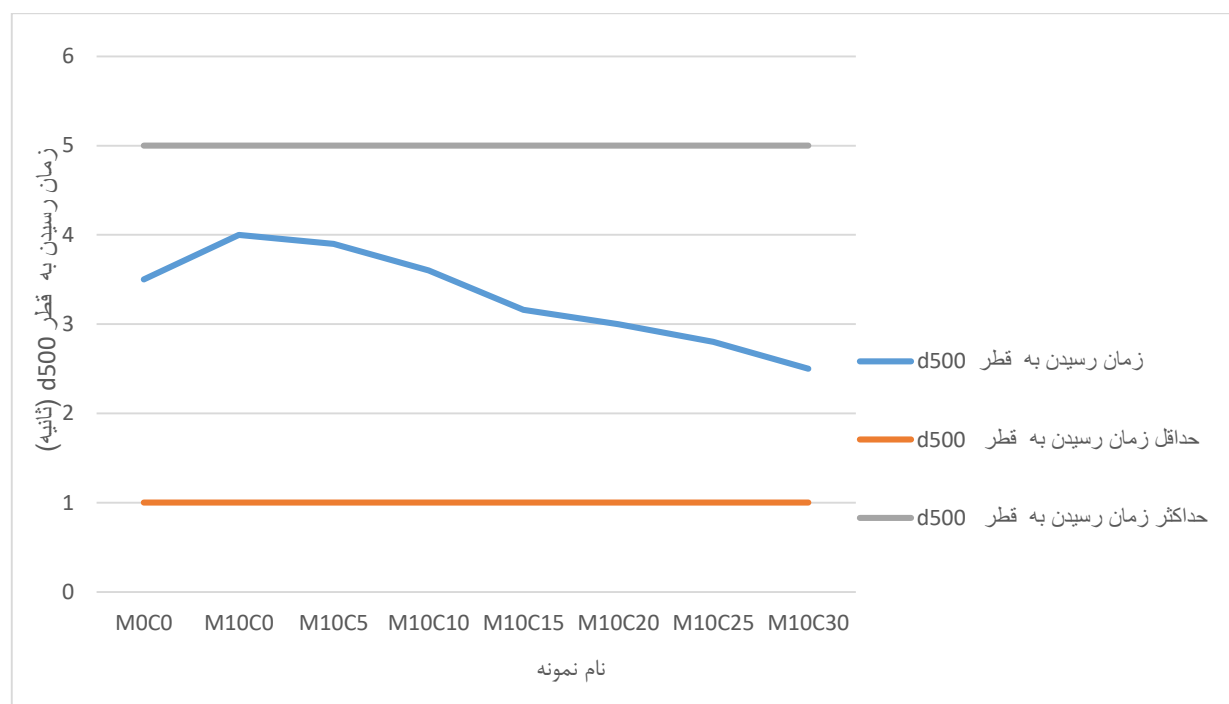
جدول ۶: نتایج آزمایش‌های بتن تازه نمونه‌های سبک خودتراکم

نام نمونه	قطر جریان اسلامپ (mm)	زمان رسیدن به (S)d500	اختلاف ارتفاع حلقه L (mm)	جریان قیف (S) V
M0C0	۶۹۰	۳/۵	۷/۵	۸/۲
M10C0	۶۵۵	۴	۹/۶	۱۱/۳
M10C5	۶۸۲	۳/۹	۹/۲	۹/۸
M10C10	۷۰۲	۳/۶	۸/۸	۸/۷
M10C15	۷۱۹	۳/۱۶	۸/۱	۸/۵
M10C20	۷۳۸	۳	۷/۶	۸/۱
M10C25	۷۶۵	۲/۸	۶/۹	۷/۶
M10C30	۷۸۰	۲/۵	۶/۳	۶/۹

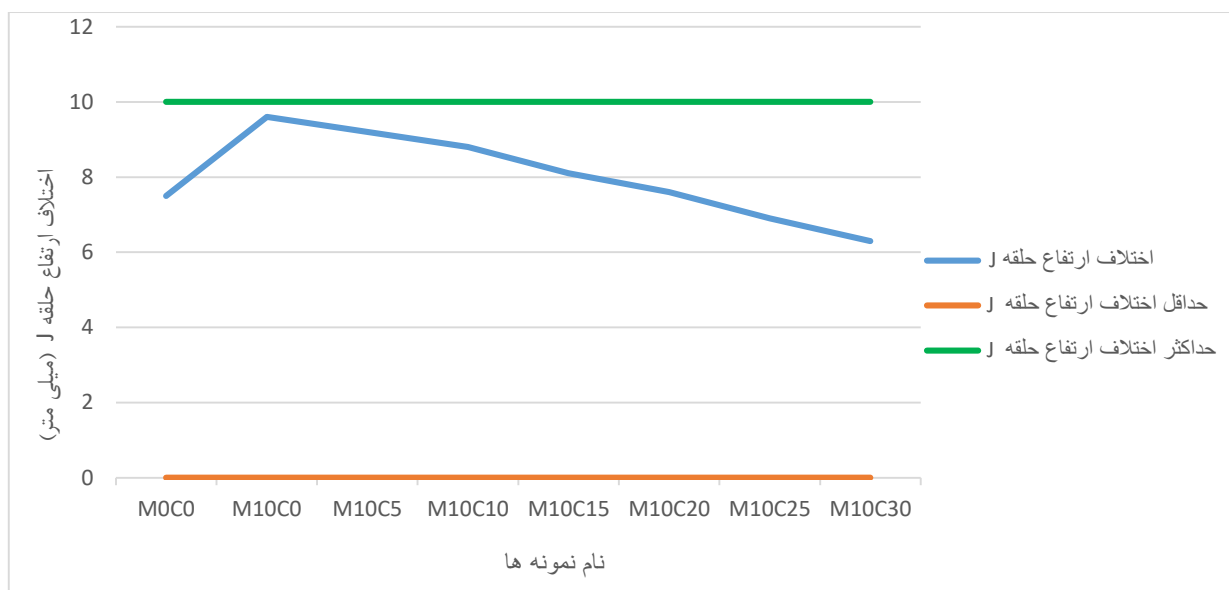




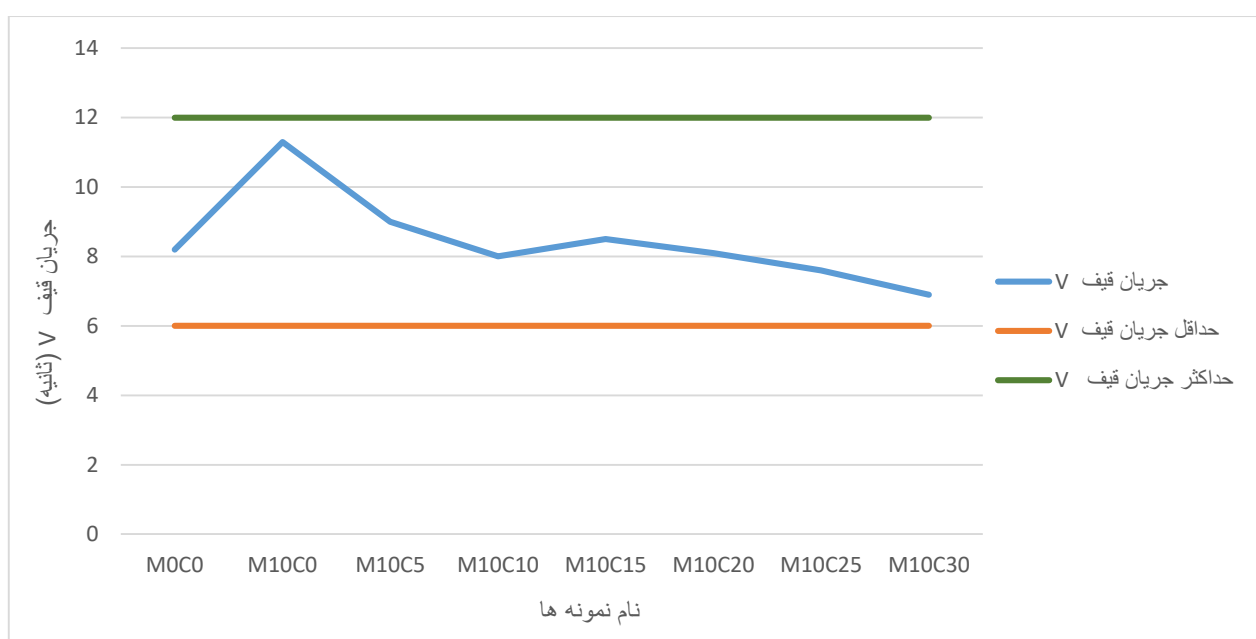
شکل ۷: نمودار قطر جریان اسلامپ



شکل ۸: نمودار زمان رسیدن به قطر d500 نمونه‌ها



شکل ۹: نمودار اختلاف ارتفاع حلقه J



شکل ۱۰: نمودار جریان قیف V

طبق آیین نامه EFNARC 197-1 [۳۰] قطر نهایی جریان اسلامپ باید در محدوده ۸۵۰-۵۵۰ mm قرار گیرد. با توجه به شکل ۷ اسلامپ نمونه‌ها در محدوده ۷۸۰-۶۵۵ mm بود که نشان می‌دهد قطر جریان اسلامپ تمام نمونه‌ها در محدوده آیین نامه EFNARC 197-1 [۳۰] قرار دارد. همچنین با افزودن میکروسیلیس به نمونه اولیه قطر جریان اسلامپ کاهش یافته‌است و می‌توان گفت میکروسیلیس باعث کاهش کارایی نمونه‌ها می‌شود. با افزایش مقدار سرباره مس قطر جریان اسلامپ افزایش داشته و به عبارتی کارایی بتن افزایش یافت. مولفه دیگر ارزیابی بتن سبک خودتراکم تازه، مدت زمان رسیدن بتن به قطر ۵۰ سانتیمتر که لزجت خمیری بتن تازه را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار شکل ۸ زمان مذکور برای تمامی نمونه‌ها در محدوده آیین نامه EFNARC 197-1 [۳۰] قرار دارد. همچنین با افزودن سرباره مس این زمان کاهش داشته و به عبارتی جریان‌پذیری نمونه‌ها افزایش داشت. آزمون حلقه-J بر مبنای اندازه‌گیری اختلاف ارتفاع بتن قبل و بعد

از شبکه آرماتورهاست. با توجه نمودار شکل ۹ اختلاف ارتفاع حلقه J برای تمامی نمونه‌ها در محدوده آیین نامه EFNARC 197-1 [۳۰] قرار دارد. همچنین اختلاف ارتفاع حلقه-J با افزایش سرباره مس کاهش یافته که نشان‌دهنده روانی بالا نمونه‌ها بوده و احتمال انسداد کاهش یافته است. آزمون قیف V برای ارزیابی مدت زمان نهایی برای جریان‌پذیری و عبور از مکان‌های محدود بدون انسداد مخلوط‌ها طراحی شده است، با توجه به نمودار شکل ۱۰ زمان جریان قیف V تمامی نمونه‌ها در محدوده آیین نامه EFNARC 197-1 [۳۰] قرار دارد. با افزایش سرباره مس جریان قیف V کاهش یافته و به عبارتی روانی بتن افزایش می‌یابد.

### ۳-۲- نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده

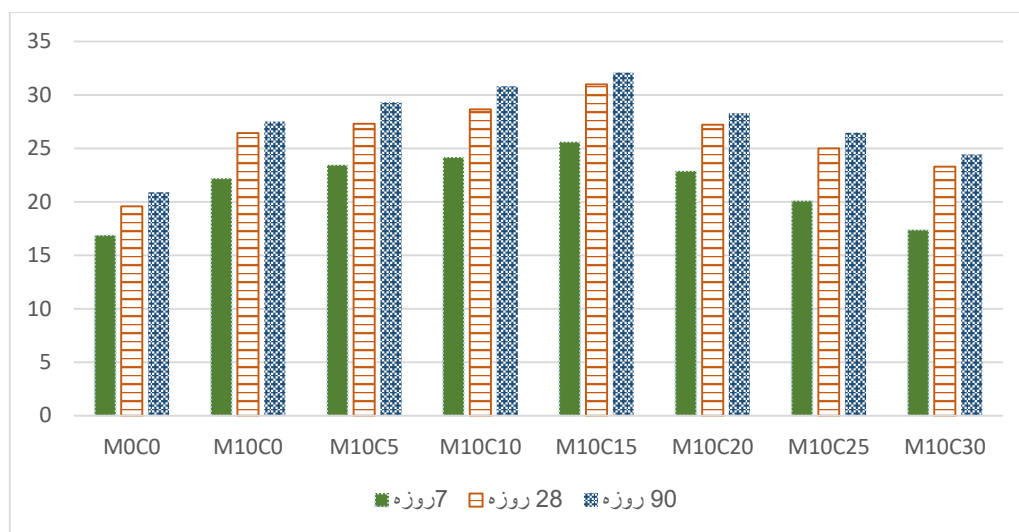
نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی و وزن مخصوص خشک نمونه‌ها در جدول ۷ نشان داده شده است. طبق آیین نامه ACI-213 [۳۳] بتن سبک سازه‌ای بتنی است که حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای ۱۷ مگاپاسکال (برای نمونه مکعبی ۲۱ مگاپاسکال) و وزن مخصوص ۱۹۲۰-۱۱۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب داشته باشد. همچنین چگالی توده آن از ۱۱۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب برای ریز دانه سبک و ۸۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب برای درشت دانه سبک تجاوز نکند. وزن مخصوص نمونه‌ها طبق جدول ۹، در بازه ۱۸۸۴-۱۸۵۶ کیلوگرم بر متر مکعب بوده و طبق آیین نامه ACI-213 [۳۳] تمامی نمونه‌ها سبک می‌باشند. با توجه به جدول ۷ تمامی نمونه‌های ارائه شده در این تحقیق از نوع خودتراکم و سبک می‌باشند.

جدول ۷: نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی

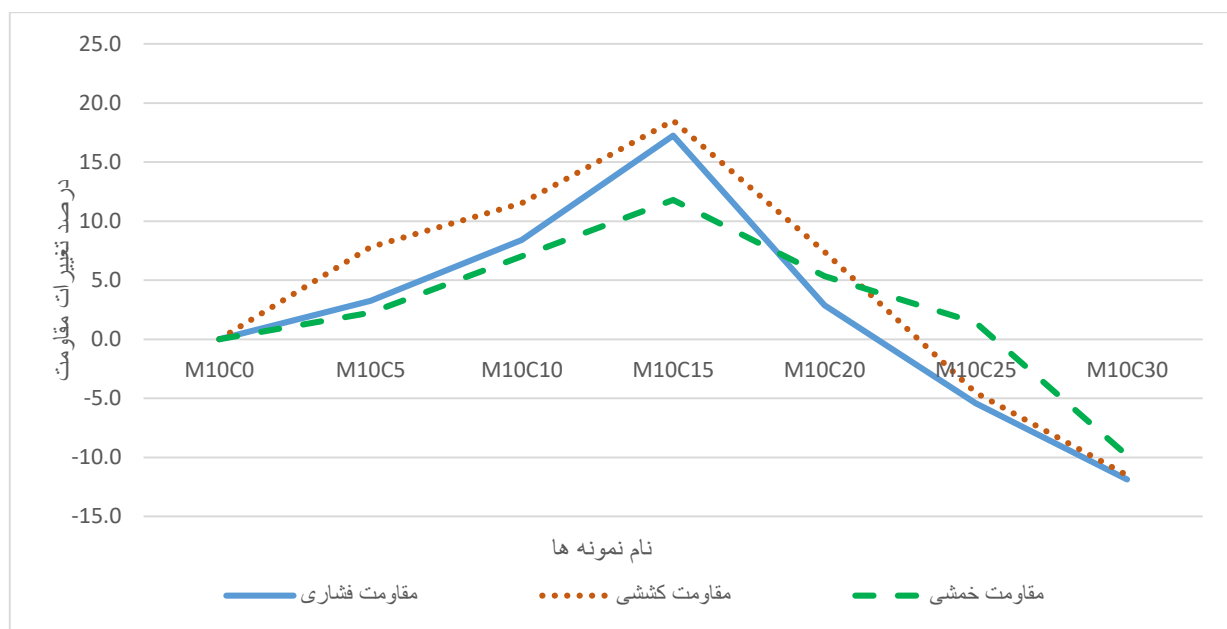
وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت فشاری (MPa)			مقاومت کششی (MPa)			مقاومت خمشی (MPa)			نام نمونه
	۹۰	۲۸	۷	۹۰	۲۸	۷	۹۰	۲۸	۷	
	روزه	روزه	روزه	روزه	روزه	روزه	روزه	روزه	روزه	
۱۸۶۱	۲/۹۵	۲/۸۳	۲/۵۲	۲/۰۲	۱/۹۵	۱/۶۶	۲۰/۹۰	۱۹/۵۶	۱۶/۸۷	M0C0
۱۸۵۶	۳/۶۸	۳/۵۶	۳/۱۱	۲/۵۳	۲/۴۳	۲/۰۴	۲۷/۵۰	۲۶/۴۴	۲۲/۲۰	M10C0
۱۸۶۴	۳/۷۵	۳/۶۴	۳/۲۴	۲/۷۵	۲/۶۲	۲/۱۵	۲۹/۳۰	۲۷/۳۰	۲۳/۴۷	M10C5
۱۸۶۸	۳/۹۱	۳/۸۱	۳/۳۹	۲/۸۴	۲/۷۱	۲/۲۴	۳۰/۸۰	۲۸/۶۶	۲۴/۱۸	M10C10
۱۸۷۱	۴/۱۳	۳/۹۸	۳/۶۲	۲/۹۸	۲/۸۸	۲/۳۸	۳۲/۱۰	۳۱/۰۰	۲۵/۶۳	M10C15
۱۸۷۵	۳/۸۴	۳/۷۵	۳/۲۵	۲/۶۵	۲/۶۱	۲/۲۱	۲۸/۳۰	۲۷/۲۰	۲۲/۹۰	M10C20
۱۸۷۹	۳/۷۴	۳/۶۱	۳/۱۵	۲/۳۸	۲/۳۲	۲/۰۱	۲۶/۴۵	۲۵/۰۱	۲۰/۱۱	M10C25
۱۸۸۴	۳/۲۱	۳/۲۱	۲/۸۹	۲/۲۶	۲/۱۵	۱/۶۲	۲۴/۴۳	۲۳/۳۰	۱۷/۳۸	M10C30

### ۳-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول ۷ و شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنین درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نمونه اولیه (M0C0) با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۱۹/۵۶ مگاپاسکال می‌باشد. نمونه شاهد در این تحقیق شامل ۱۰ درصد میکروسیلیس با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲۶/۴۴ مگاپاسکال بوده و نسبت به نمونه اولیه حدود ۳۵ درصد افزایش مقاومت داشت. با افزایش مقدار سرباره مس ابتدا مقاومت فشاری افزایش و سپس کاهش یافت. نمونه دارای ۱۵ درصد سرباره مس بیشترین مقاومت فشاری در تمامی سنین را داشت. این نمونه با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۱ مگاپاسکال حدود ۱۷ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. کمترین مقاومت فشاری را نمونه حاوی ۳۰ درصد سرباره مس داشت که با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲۳/۳ مگاپاسکال حدود ۱۲ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت.



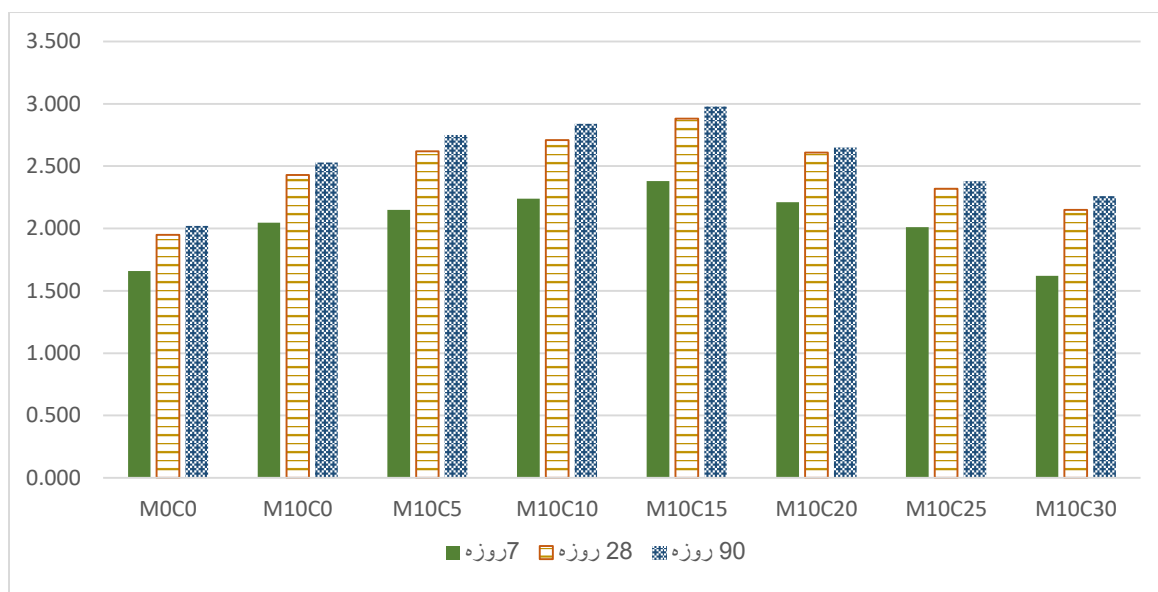
شکل ۱۱: نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز



شکل ۱۲: نتایج درصد تغییرات مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز

### ۳-۲-۲- آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

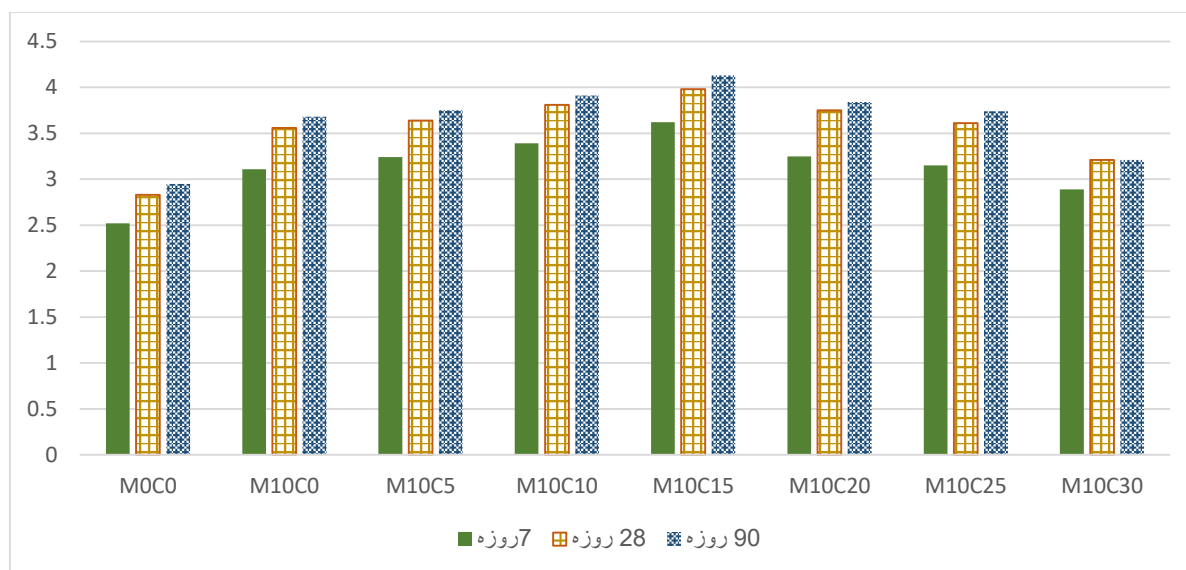
نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها در جدول ۷ و شکل ۱۳ نشان داده شده است. همچنین درصد تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نمونه اولیه (MOC0) با مقاومت کششی ۲۸ روزه ۱/۹۵ مگاپاسکال می‌باشد. نمونه شاهد در این تحقیق شامل ۱۰ درصد میکروسیلیس با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲/۴۳ مگاپاسکال بوده و نسبت به نمونه اولیه حدود ۲۴ درصد افزایش مقاومت داشت. با افزایش مقدار سرباره مس ابتدا مقاومت فشاری افزایش و سپس کاهش یافت. نمونه دارای ۱۵ درصد سرباره مس بیشترین مقاومت کششی در تمامی سنین را داشت. این نمونه با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲/۸۸ مگاپاسکال حدود ۱۸ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. کمترین مقاومت فشاری را نمونه حاوی ۳۰ درصد سرباره مس داشت که با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲/۱۵ مگاپاسکال حدود ۱۱ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت.



شکل ۱۳: نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

### ۳-۲-۳- آزمایش مقاومت خمشی

نتایج آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها در جدول ۷ و شکل ۱۴ نشان داده شده است. همچنین درصد تغییرات مقاومت خمشی نمونه‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نمونه اولیه (M0C0) با مقاومت خمشی ۲۸ روزه ۲/۸۳ مگاپاسکال می‌باشد. نمونه شاهد در این تحقیق شامل ۱۰ درصد میکروسیلیس با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳/۵۶ مگاپاسکال بوده و نسبت به نمونه اولیه حدود ۲۶ درصد افزایش مقاومت داشت. با افزایش مقدار سرباره مس ابتدا مقاومت خمشی افزایش و سپس کاهش یافت. نمونه دارای ۱۵ درصد سرباره مس بیشترین مقاومت خمشی در تمامی سنین را داشت. این نمونه با مقاومت خمشی ۲۸ روزه ۳/۹۸ مگاپاسکال حدود ۱۲ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت داشت. کمترین مقاومت خمشی را نمونه حاوی ۳۰ درصد سرباره مس داشت که با مقاومت خمشی ۲۸ روزه ۳/۲۱ مگاپاسکال حدود ۱۰ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت. لازم به ذکر است الگوی ترک نمونه خمشی به صورت یک ترک مرکزی در اوسط نمونه و تعدادی ریز ترک در اطراف بود.

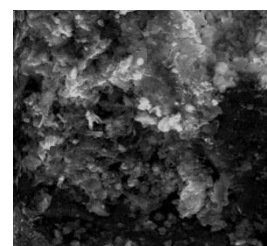
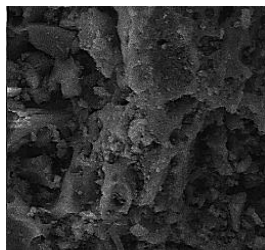
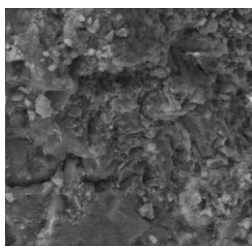


شکل ۱۴: نتایج آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روز

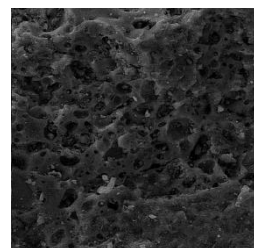
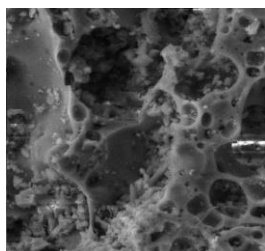
با توجه به تحقیقات گذشته، میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی، خمشی و انرژی شکست بتن می‌شود [۳۷]. در این تحقیق نیز میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت‌های فوق شد. در تحقیقات سایر پژوهشگران، سرباره مس به عنوان جایگزین سیمان استفاده شد و تاثیر متفاوتی بر مشخصات مکانیکی و انرژی شکست داشت [۳۸ و ۳۹]. در مواردی سرباره مس، با توجه به نوع بتن و مصالح مصرفی، مشخصات مکانیکی را تا حدی کاهش و گاهی افزایش داده است. Pachideh و همکاران در تحقیقی تاثیر سرباره کوره آهن گدازی و میکروسیلیس را در دماهای مختلف بررسی کردند و اذعان داشتند در دماهای تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی ۷۳، ۴۵ و ۱۰۶ درصد افزایش یافتند [۴۰ و ۴۱]. در این تحقیق نیز به عنوان مثال سرباره مس تا میزان جایگزینی ۱۵٪، باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. اثر سرباره در افزایش مقاومت، نسبت به میکروسیلیس کمتر بوده است. البته با توجه به تحقیقات گذشته، تاثیر کمتر سرباره مس نسبت به میکروسیلیس دور از انتظار نبوده است. علت اصلی استفاده از سرباره مس، کاهش عیار سیمان بود و بهبود مقاومت بیشتر با میکروسیلیس به وقوع پیوست.

### ۳-۲-۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)

با توجه به اهمیت نتایج عکس برداری SEM، در این پژوهش نیز از این روش استفاده شده است. برای هر طرح مخلوط، نمونه ۲۸ روزه آن عکس برداری شده است. نتایج عکس برداری در شکل‌های ۱۵ تا ۱۹ آمده است.



شکل ۱۵: نتایج عکس برداری طرح (M0C0) شکل ۱۶: نتایج عکس برداری طرح (M10C0) شکل ۱۷: نتایج عکس برداری طرح (M10C10)



شکل ۱۸: نتایج عکس برداری طرح (M10C15)      شکل ۱۹: نتایج عکس برداری طرح (M10C20)

شکل های ۱۵ تا ۱۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه ها در ۲۸ روز را نشان می دهد. با توجه به تصویر شکل های ۱۶ تا ۱۹ برای نمونه های حاوی میکروسیلیس، مشاهده می شود این ماده به علت ریز بودن ذرات آن به عنوان پرکننده عمل کرده و واکنش پوزولانی تصادفی تولید می کند. نمونه های با درصد میکروسیلیس بالاتر متراکم تر بوده و حفرات و ناپیوستگی بین ذرات کمتر است. همچنین ساختار نمونه ها بسیار همگن و متراکم است. تخلخل و حفرات ریز در ساختار این نمونه ها نسبت به سایر نمونه ها کمتر است. برای نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس به همراه سرباره مس، در سطح نمونه ها لبه تیز سوزنی شکل شفاف و خشک مشاهده می شود که می تواند به علت سنگین بودن و ته نشینی ذرات سرباره و وجود آب آزاد اضافی در سطح نمونه ها باشد. همچنین در نمونه های حاوی سرباره مس حفرات نیمه کروی، ترک های مویی و کانل های مویرگی قابل مشاهده است که خود دلیل بر افزایش تخلخل و کاهش پارامترهای مقاومتی است. همچنین با افزایش سرباره مس در نمونه ها، حجم و تعداد حفرات افزایش یافته و خود این عامل دلیلی بر کاهش مقاومت نمونه های دارای مقدار زیادی سرباره است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تاثیر سرباره مس به عنوان جایگزین سیمان به همراه میکروسیلیس، بر مشخصات مکانیکی بتن سبک خودتراکم پرداخته شد. به منظور بررسی این بتن آزمایش های بتن تازه و سخت شده انجام شد و نتایج زیر حاصل شد. با جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس در تمامی طرح ها مقاومت فشاری، کششی و خمشی افزایش داشت. مقاومت فشاری، کششی و خمشی ۲۸ روزه نمونه های دارای میکروسیلیس نسبت به نمونه بدون میکروسیلیس حدود ۳۵٪، ۲۴٪ و ۲۵٪ افزایش یافت. با افزایش مقدار سرباره مس مقاومت نمونه ها ابتدا افزایش و سپس کاهش داشتند. حالت بهینه برای این جایگزینی مقدار ۱۵ درصد سرباره مس بود. در طرح دارای ۱۵ درصد سرباره مس مقاومت های فشاری، کششی و خمشی بیشینه بودند. مقاومت های فشاری، کششی و خمشی نمونه بهینه در سن ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد ۱۷٪، ۱۸٪ و ۱۱٪ افزایش داشتند. با افزودن میکروسیلیس، به علت سبک بودن این پوزولان، وزن مخصوص بتن کاهش یافت. همچنین با توجه به سنگین بودن ذرات سرباره مس، وزن مخصوص نمونه های حاوی این ماده افزایش یافت. همچنین وزن مخصوص نمونه بهینه برابر با ۱۸۷۱ کیلوگرم بر متر مکعب بود. با توجه به فعال بودن و ریز بودن ذرات میکروسیلیس، وجود میکروسیلیس باعث کاهش کارایی بتن شد. همچنین سرباره مس تاثیری بر خلاف میکروسیلیس داشت و باعث افزایش کارایی بتن شد. البته تمامی نمونه ها خواص خودتراکمی را داشتند.

## مراجع

- [1] Ahsan, M. B., & Hossain, Z. (2018). *Supplemental use of rice husk ash (RHA) as a cementitious material in concrete industry*. Construction and Building Materials, 178, 1-9.
- [2] Nunes, S., Figueiras, H., Oliveira, P. M., Coutinho, J. S., & Figueiras, J. (2006). *A methodology to assess robustness of SCC mixtures*. Cement and Concrete Research, 36(12), 2115-2122.
- [3] Fapohunda, C., Akinbile, B., & Shittu, A. (2017). *Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement—A review*. International Journal of Sustainable Built Environment, 6(2), 675-692.
- [4] Rehman, M. S. U., Umer, M. A., Rashid, N., Kim, I., & Han, J. I. (2013). *Sono-assisted sulfuric acid process for economical recovery of fermentable sugars and mesoporous pure silica from rice straw*. Industrial crops and products, 49, 705-711.
- [5] Awang, H., Atan, M. N., Abidin, N. Z., & Yusof, N. (2016). *Cost-Reduction of Self-Compacting Concrete Incorporating Raw Rice Husk Ash*. Journal of Engineering Science and Technology, 11(1), 096-108.
- [6] Yuan, Q., Pump, J., & Conrad, R. (2014). *Straw application in paddy soil enhances methane production also from other carbon sources*. Biogeosciences, 11(2), 237.
- [7] Schmidhuber, J., & Tubiello, F. N. (2007). *Global food security under climate change*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(50), 19703-19708.
- [8] Ahmad, S., & Umar, A. (2018). *Rheological and mechanical properties of self-compacting concrete with glass and polyvinyl alcohol fibres*. Journal of Building Engineering, 17, 65-74.
- [9] Mazloom, M., Homayooni, S. M., & Miri, S. M. (2018). *Effect of rock flour type on rheology and strength of self-compacting lightweight concrete*. Computers and Concrete, 21(2), 199-207.
- [10] Mazloom, M., Allahabadi, A., & Karamloo, M. (2017). *Effect of silica fume and polyepoxide-based polymer on electrical resistivity, mechanical properties, and ultrasonic response of SCLC*. Advances in concrete construction, 5(6), 587.
- [11] Mazloom, M., & Hatami, H. (2016). *The behavior of self-compacting light weight concrete produced by magnetic water*. International Journal of Civil and Environmental Engineering, 9(12), 1683-1687.
- [12] Mazloom, M., & Mahboubi, F. (2017). *Evaluating the settlement of lightweight coarse aggregate in self-compacting lightweight concrete*. Computers and Concrete, 19(2), 203-210.
- [13] Salehi, H., & Mazloom, M. (2018). *Experimental and numerical studies of crack propagation in self-compacting lightweight concrete*. Modares Mechanical Engineering, 18(6), 144-155.
- [14] Topçu, İ. B., & Uygunoğlu, T. (2010). *Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC)*. Construction and Building Materials, 24(7), 1286-1295.
- [15] Hwang, C. L., & Tran, V. A. (2015). *A study of the properties of foamed lightweight aggregate for self-consolidating concrete*. Construction and Building Materials, 87, 78-85.
- [16] Pachideh, G., & Gholhaki, M., & Ketabdari, H. (2020). *Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars*. Journal of Building Engineering, 29, 101178.
- [17] Wu, Z., Zhang, Y., Zheng, J., & Ding, Y. (2009). *An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete*. Construction and Building Materials, 23(5), 2087-2092.
- [18] Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Kocabağ, M. E., Bayram, V., & Mermerdaş, K. (2012). *Fresh and hardened characteristics of self-compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash*. Construction and Building Materials, 37, 160-170.
- [19] Topçu, İ. B., & Uygunoğlu, T. (2010). *Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC)*. Construction and Building Materials, 24(7), 1286-1295.
- [20] Mazloom, M., Ramezaniapour, A. A., & Brooks, J. J. (2004). *Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete*. Cement and Concrete Composites, 26(4), 347-357.
- [21] Mazloom, M., & Ranjbar, A. (2010). *Relation between the workability and strength of self-compacting concrete*. 35th Our World in Concrete and Structures (OWICs)-2010, <http://www.Cipremier.com/page.php>, 162.
- [22] Mazloom, M., Allahabadi, A., & Karamloo, M. (2017). *Effect of silica fume and polyepoxide-based polymer on electrical resistivity, mechanical properties, and ultrasonic response of SCLC*. Advances in concrete construction, 5(6), 587.
- [23] Naniz, O. A., & Mazloom, M. (2018). *Effects of colloidal nano-silica on fresh and hardened properties of self-compacting lightweight concrete*. Journal of Building Engineering, 20, 400-410.
- [24] Mazloom, M., & Salehi, H. (2018). *The relationship between fracture toughness and compressive strength of self-compacting lightweight concrete*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 431, No. 6, p. 062007). IOP Publishing.



- [25] Taeb, A., & Faghihi, S. (2002). *Utilization of copper slag in the cement industry*. ZKG international, 55(4), 98-100.
- [26] Mazzoli, A., Monosi, S., & Plescia, E. S. (2015). *Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) using image analysis methods*. Construction and Building Materials, 101, 596-601.
- [27] González-Ortega, M. A., Cavalaro, S. H. P., de Sensale, G. R., & Aguado, A. (2019). *Durability of concrete with electric arc furnace slag aggregate*. Construction and Building Materials, 217, 543-556.
- [28] Wang, Z., Zhang, T., & Zhou, L. (2016). *Investigation on electromagnetic and microwave absorption properties of copper slag-filled cement mortar*. Cement and Concrete Composites, 74, 174-181.
- [29] Feng, Y., Yang, Q., Chen, Q., Kero, J., Andersson, A., Ahmed, H., & Samuelsson, C. (2019). *Characterization and evaluation of the pozzolanic activity of granulated copper slag modified with CaO*. Journal of Cleaner Production, 232, 1112-1120.
- [30] EFNARC. 2002. *Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. ISBN0 953973344.
- [31] ASTM C330. 2014. *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*. ASTM International.
- [32] ACI 237. 2007. *Self-consolidating concrete*. American Concrete Institute.
- [33] ACI 213. 2014. *Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete*. American Concrete Institute.
- [34] ASTM C1621. (2006). *Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring*. ASTM International.
- [35] BSI, BS 1881-124: 1988: *Testing concrete—Part 124: Methods for analysis of hardened concrete, in, BSI London, UK, 1988*.
- [36] ASTM C1609/M-05. 2006. *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete (using Beam with Third-point loading)*. ASTM International.
- [37] Massana, J., Reyes, E., Bernal, J., León, N., & Sánchez-Espinosa, E. (2018). *Influence of nano-and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete*. Construction and Building Materials, 165, 93-103.
- [38] Afshoon, I., & Sharifi, Y. (2020). *Utilization of micro copper slag in SCC subjected to high temperature*. Journal of Building Engineering, 29.
- [39] Fadaee, M., Mirhosseini, R., Tabatabaei, R., & Fadaee, M.J. (2015). *Investigation on using copper slag as part of cementitious materials in self-compacting concrete*. Asian Journal of Civil Engineering, 16(3) 368-381.
- [40] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2020). *Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag*. Journal of Structural Fire Engineering.
- [41] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. (2019). *On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or Granulated Blast-Furnace Slag*. Journal of Building Engineering, 24, 100757.