

Investigating the Effect of Light Aggregate and Curing Methods on the Properties of Cement-Slag Concretes

Gholam Abbas Bahraminia¹, Seyed Fathollah Sajedi^{2*}, Fereidoon Moghadas Nejad³

¹Department of Civil Engineering, Qeshm Branch, Islamic Azad University, Qeshm, Iran.

²Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

³Department of Civil and Environmental Engineering, AUT (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

Review History:

Received: Jul. 13, 2024

Revised: Jul. 20, 2025

Accepted: Aug. 09, 2025

Available Online: Oct. 28, 2025

Keywords:

Cement- Slag Concrete

Scoria

Leca

Curing

Natural Aggregates

ABSTRACT: One of the optimal methods for producing cement and concrete is to replace part of the cement with cheap additives. These pozzolans help reduce cement consumption, energy, and greenhouse gas emissions. They also improve the mechanical properties and durability of concrete. In this study, 11 mixing designs were made, including a reference and 10 cement-slag concrete designs. Slag powder from the Ahvaz Steel Plant was used instead of 40% cement (by weight). In five designs, scoria lightweight aggregate was used instead of part of the natural aggregate, and in the other five designs, Leca was used. These two types of lightweight aggregate were used with two curing methods with drinking water and laboratory temperature. Standard cubic and prismatic samples were used for the tests. In the mixing design, scoria and Leca lightweight aggregates were replaced by 30%, 40%, 50%, 60% and 70% with natural aggregates (pea and almond). Also, a third-generation modified superplasticizer and a polycarboxylate-based extreme water reducer were used. To determine the rheological, mechanical and durability properties, slump tests, concrete specific gravity, compressive strength, indirect tensile strength, electrical resistance, volumetric water absorption and water penetration depth were performed. The results showed that using 40% steel slag with a combination of scoria and Leca aggregates in concrete production has positive results. At the age of 91 days, the compressive strength of cement-slag concrete should not be less than the same strength as the reference concrete. Therefore, 40% replacement of slag with scoria and Leca aggregates can be considered optimal.

1- Introduction

Concrete is one of the main materials in the construction of engineering structures [1]. The physical and mechanical properties of concrete, along with the ease of production, have made it the most widely used material in the construction industry. After being formed in a mold, concrete quickly acquires suitable mechanical properties [2]. Mufti et al. [4] studied in an article how 10%, 20%, 30% and 40% of cement can be replaced with scoria powder. This was to control the alkaline silica reactions. They measured the expansion of prismatic mortar. The results showed that with increasing the amount of replacement, the expansion of the specimens decreased. However, only the design containing 40% scoria was able to control the expansion in accordance with the requirements of the code. Naderi and Boni [3]. This study is a continuation of the previous study by Sajedi and Bahraminia [6] and similar studies [4-5] on the effect of slag on the properties of cement-slag concrete. Based on the results of those studies, the use of natural porous materials such as scoria and lico aggregates that absorb and

retain water well was selected. The aim of this selection is to achieve concrete with appropriate internal curing. In this study, ten mixing designs with 40% slag from the Ahvaz Steel Plant in powdered form were used as a replacement for part of the cement consumed. Also, 30%, 40%, 50%, 60% and 70% scoria and Leca aggregates were used separately as a replacement for part of the aggregate (pea and almond) in the manufacture of concretes. The samples made from the designs were cured at the ages of 28 and 91 days in two environments of drinking water and laboratory temperature and were subjected to the necessary tests. These tests included slump, specific gravity, compressive strength, indirect tensile strength, electrical resistance, volumetric water absorption, and water penetration depth. The results of these tests were reviewed and analyzed.

2- Materials and Methods

In this study, eleven mixing designs were investigated based on the Iranian Concrete Code (ABA) [7]. Scoria and Leca aggregates were used in proportions of 30%, 40%, 50%,

*Corresponding author's email: fa.sajedi@iau.ac.ir

Table 1. Details of the research mixture design (kg/m³)

Row	Project name	Project code	Weight of materials							
			Almond sand	Peanut sand	Sand	Leca	Scoria	Water (Lit)	Superplasticizer (Lit)	w/c
1	Reference concrete	RC	33.2	38.3	94.8	0	0	11.62	0.24	0.44
2	Concrete with 40% slag and 30% scoria	S40Sc30	23.7	27.91	94.8	0	19.89	18.2	0.34	0.41
3	Concrete with 40% slag and 40% scoria	S40Sc40	19.3	23.6	94.8	0	28.6	18.2	0.34	0.41
4	Concrete with 40% slag and 50% scoria	S40Sc50	16.1	19.7	94.8	0	35.7	18.2	0.34	0.41
5	Concrete with 40% slag and 60% scoria	S40Sc60	12.8	15.8	94.8	0	42.9	18.4	0.37	0.42
6	Concrete with 40% slag and 70% scoria	S40Sc70	9.65	11.8	94.8	0	50.05	18.4	0.37	0.42
7	Concrete with 40% slag and 30% Leca	S40Le30	28	29.2	94.8	21.8	0	18.2	0.32	0.41
8	Concrete with 40% slag and 40% Leca	S40Le40	24	25.1	94.8	29	0	18.2	0.35	0.41
9	Concrete with 40% slag and 50% Leca	S40Le50	20	20.9	94.8	36.3	0	18.2	0.35	0.41
10	Concrete with 40% slag and 60% Leca	S40Le60	16	16.8	94.8	43.6	0	18.4	0.39	0.42
11	Concrete with 40% slag and 70% Leca	S40Le70	12	12.5	94.8	50.8	0	18.4	0.39	0.42

*The steel slag used in this mixing plan is 17.6 kg/m³; The cement used 18.4, 0.39, 0.42, this mixing plan is 26.4 kg/m³.

60% and 70% as a substitute for natural aggregate. Also, 40% of Ahvaz steel slag was used as a substitute for cement. The naming method of the mixing designs is as follows:

S represents slag, 40% is the weight of slag in the designs, Sc represents scoria lightweight aggregate and Le represents Leca aggregate. The number after each letter indicates the percentage of use of those materials as a substitute. For example, S40Sc30 means that the concrete contains 40% slag and 30% scoria aggregate. RC means reference concrete. Details of the final mixing designs of the study are presented in Table 1.

3- Analysis of compressive strength results

According to the results of Figure 1, It was predictable that using slag from the Ahvaz Steel Plant as a partial replacement for cement and using scoria and Leca as a partial replacement for aggregates would reduce mechanical properties. A point that is common to all samples is that the main effect of slag is evident at older ages. An examination of the results shows that using 30% and 40% scoria and Leca aggregates at the age of 91 days increases the strength compared to the reference sample. Although the increase of 6% seems insignificant, it indicates a positive effect of steel slag with scoria and Leca aggregates on compressive strength up to the age of 91 days.

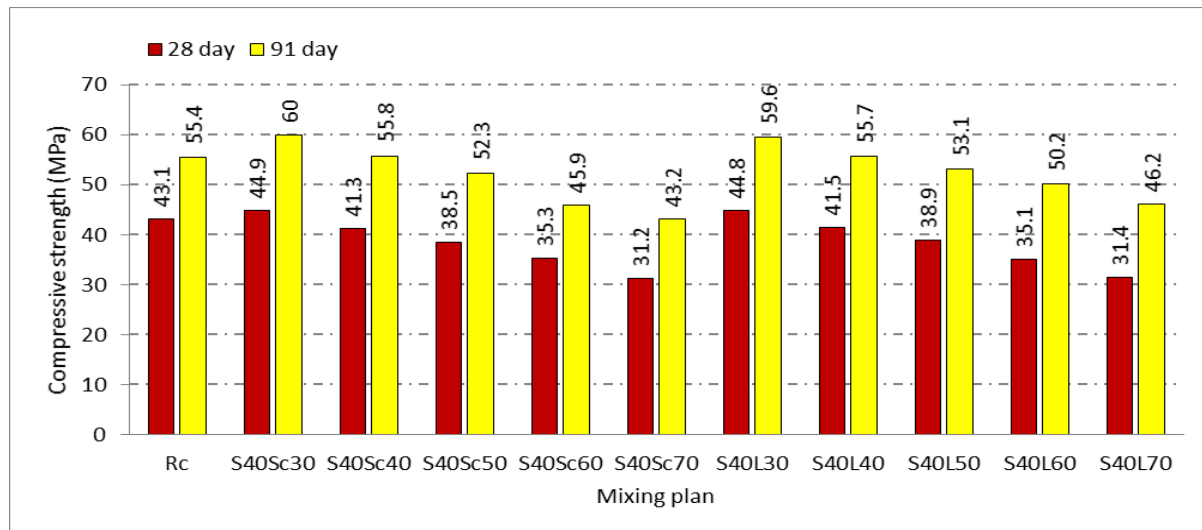


Fig. 1. Compressive strength results of samples treated with drinking water

The possible reason for this small increase is the further progress of cement and slag hydration reactions over time. One of the reasons for the late effect of slag is the high iron oxide content in it, which is more than 43%. In Figure 9, the compressive strength results at 28 and 91 days are shown only for samples cured in drinking water and laboratory temperature. The effect of scoria and Leca aggregates with 40% Ahvaz steel slag in the early days of setting was lower than that of the reference concrete. However, over time, the strength of the samples approached that of the reference concrete and the samples containing 30% and 40% scoria and Leca aggregate showed higher strength than the reference sample. The results of this study can be compared with the study of Momeni and Qovidel [8], which showed that samples containing Leca aggregate performed better in mechanical tests.

4- Summary and Conclusions

This study is a continuation of the study by Sajedi and Bahraminia [20], which investigated the effect of slag from Ahvaz Steel Plant on the properties of cement-slag concretes. In this study, 40% slag from Ahvaz Steel Company was considered as the optimal composition.

The aim is to develop environmentally friendly concretes. These concretes were made using slag pozzolan produced in Ahvaz Steel Company and natural scoria and Leca aggregates. Various mechanical properties and durability tests were performed on concrete samples at the ages of 28 and 91 days. The key results of the study are as follows:

- Samples containing 30% and 40% scoria aggregates cured in drinking water showed the highest compressive strength at the age of 91 days. This indicates the positive effect of proper curing and selection of the optimal percentage of replacement on the hydration process and strength

development.

- Finally, simultaneous replacement of 40% scoria aggregate and 40% Leca aggregate instead of 40% Ahvaz steel slag resulted in a suitable and significant improvement in mechanical properties at the age of 91 days. This combination is proposed as the final optimal design from the perspective of concrete strength performance and durability in this study.

References

- [1] Sajedi, S.F.; Darash, F. 2019, Experimental Study of Workability and Mechanical Properties of Concrete Containing Powder Glass and Mineral Waste Glass with Separate and Simultaneous Applications. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. Vol. 50(6), pp. 1155-1176.
- [2] Emam Ali, E.; Al-Tersawy S., 2012 "Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 35, pp. 785-791.
- [3] ASME, 2003. ASME Manual MS-4, An ASME Paper, latested. The American Society of Mechanical Engineers, New York. See also URL <http://www.asme.org/pubs/MS4.html>.
- [4] Neville A, M, 2004, Properties of volcanic scoria-based lightweight concrete. *Mag Concr Res*. Vol 56(2), pp111–120.
- [5] Wójcik M, Grzybowska K. 2021, Mechanical properties of lightweight expanded clay aggregate (LECA) concrete. *Ann Warsaw Univ Life Sci-SGGW, Land Reclam*. Vol 53(4), pp 339–349.
- [6] Sajedi, S. F., Bahraminia, G. A. 2023, Laboratory investigation of the effect of slag from Ahvaz Steel Plant on the properties of cement-slag concrete. *Concrete*

Research No. 16, pp. 79-93. [In Persian]

- [7] Iranian Concrete Regulations (ABA), Technical Affairs and Standards Development Office, Publication No. 120, National Management and Planning Organization, Third Edition, 2002.[In Persian]

- [8] Momeni, K., and Ghavidel, R. (2019). Investigation of hydraulic conductivity and clogging of lightweight permeable concrete containing Leca and scoria. Civil Engineering (Technical and Engineering Modares), No. 20(3), pp. 161-174.



بررسی تاثیر سنگدانه‌های سبک و روش عمل‌آوری بر خواص بتن‌های سیمان - سرباره‌ای

غلامعباس بهرامی نیا^{۱*}، سیدفتح اله ساجدی^{۲*}، فریدون مقدس نژاد^۳

۱- گروه عمران، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران.

۲- گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۳- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۰۶

کلمات کلیدی:

بتن سیمان - سرباره‌ای

اسکوریا

لیکا

عمل‌آوری

سنگدانه طبیعی

خلاصه: یکی از روش‌های بهینه تولید سیمان و بتن، جایگزینی بخشی از سیمان با مواد افزودنی ارزان است. پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی، نمونه‌هایی از این مواد هستند. این پوزولان‌ها به کاهش مصرف سیمان، انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کنند. همچنین، خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود می‌بخشند. در این تحقیق، یازده طرح اختلاط شامل یک طرح مرجع و ده طرح بتن سیمان - سرباره‌ای ساخته شدند. در ده طرح، پودر سرباره کارخانه فولاد اهواز به جای ۴۰٪ وزنی سیمان استفاده شد. در پنج طرح، به جای بخشی از سنگدانه‌های طبیعی، از سبکدانه اسکوریا و در پنج طرح دیگر از لیکا بهره‌برداری شد. این دو نوع سبکدانه با دو روش عمل‌آوری شامل آب شرب و دمای آزمایشگاه استفاده شدند. در انجام آزمایش‌ها، از نمونه‌های مکعبی و منشوری استاندارد استفاده شد. سبکدانه‌های اسکوریا و لیکا به میزان ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ با سنگدانه‌های طبیعی (نخودی و بادامی) جایگزین شدند. از فوق روان‌کننده اصلاح‌شده نسل سوم و کاهش‌دهنده شدید آب بر پایه پلی‌کربوکسیلات استفاده شد. برای تعیین خواص رئولوژی، مکانیکی و دوام، آزمایش‌های اسلامپ، وزن مخصوص بتن، مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت الکتریکی، جذب آب حجمی و عمق نفوذ آب انجام شدند. نتایج نشان داد از بین طرح‌ها، استفاده از ۴۰٪ سرباره با ترکیب سنگدانه‌های ۴۰٪ اسکوریا و ۴۰٪ لیکا به صورت مجزا با افزایش ۶٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع، بیشترین اثر را بر خواص بتن داشته است. بنابراین این طرح مخلوط، به عنوان طرح بهینه معرفی می‌گردد.

۱- مقدمه

بتن یکی از مصالح اصلی در ساخت سازه‌های مهندسی است [۱]. خواص فیزیکی و مکانیکی بتن، همراه با سهولت تولید، بتن را به پرمصرف‌ترین ماده در صنعت ساخت و ساز تبدیل کرده است. بتن پس از شکل‌گیری در قالب، به سرعت خواص مکانیکی مناسبی پیدا می‌کند [۲]. همواره بتن به عنوان اصلی‌ترین مصالح در ساخت و سازها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. بتن ترکیبی شگفت‌انگیز و در البته گران‌قیمت است و همواره تلاش بر این بوده که با تغییر مواد و مصالح تشکیل‌دهنده آن، کیفیت حفظ و قیمت نیز کاهش یابد [۳]. مفتی و همکاران [۴] در مقاله‌ای بررسی کردند که چگونه می‌توان ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ از سیمان را با پودر اسکوریا جایگزین کرد. این کار برای کنترل واکنش‌های قلیایی سیلیسی بود. آن‌ها انبساط ملات منشوری را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان جایگزینی، انبساط آزمون‌ها کاهش یافت. با این حال، تنها طرح حاوی ۴۰٪

اسکوریا توانست انبساط را مطابق با الزامات آیین‌نامه کنترل کند. مجدی و همکاران [۵] در تحقیقی ظرفیت مقاومتی یکی از سبکدانه‌های طبیعی ایران، یعنی اسکوریا و پومیس، را بررسی کردند. نتایج نشان داد که اسکوریا نسبت به پومیس ظرفیت مقاومتی بالاتری دارد و می‌تواند در ساخت بتن سبکدانه سازه‌ای استفاده شود. شکرچی‌زاده و همکاران [۶] نشان دادند که اسکوریا بیشتر شبیه سنگدانه‌های طبیعی در روند کسب مقاومت است. آن‌ها به مقایسه مقاومت فشاری بتن سبک حاوی سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا پرداختند. نتایج نشان داد که چگالی میانگین مقاومت فشاری بتن حاوی لیکا کمی بالاتر از بتن حاوی اسکوریا است. نادری و بنیادی [۷] در تحقیقی سه طرح بتن سبکدانه مصنوعی لیکا را بررسی کردند. این تحقیق شامل ۶۰ نمونه مکعبی بود که آزمایش‌های مقاومت فشاری و لنگر پیچشی بر روی آن‌ها انجام شد. برای تعیین مقاومت فشاری، از روش جک فشاری و یک روش جدید به نام روش پیچش استفاده شد. این روش خرابی جزئی دارد. صدرممتازی و همکاران [۸] نشان دادند که بتن با ۶۰ درصد سنگدانه

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: f_sajedi@yahoo.com

اسکوریا، بهترین مقاومت فشاری را دارد. این نمونه حدود ۶۳/۷ مگاپاسکال مقاومت فشاری داشت، که ۸۵ درصد بیشتر از نمونه شاهد بود. همچنین، بتن حاوی ۴۰ درصد سنگدانه اسکوریا، بالاترین مقاومت کششی ۳/۸ و خمشی ۶/۷ مگاپاسکال را نشان داد و مقاومت خمشی آن نیز بیشتر از نمونه شاهد بود. رمضانی‌زاده در بند [۹] به بررسی خواص مکانیکی بتن‌های سبک با لیکا، اسکوریا و پرلیت پرداخت. نتایج نشان داد که افزایش دما، مقاومت فشاری بتن را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. در تحقیقی دیگر [۱۰] خواص مکانیکی و جذب آب بتن سبک ساخته شده با سنگدانه لیکا و اسکوریا را بررسی کرد. نتایج نشان داد که این بتن دارای نرخ جذب آب بالا و مقاومت فشاری مناسبی نسبت به نمونه مرجع است. پورحسین پریزاد [۱۱] در پژوهشی نشان داد که ساخت بتن خودتراکم سبک با دانه‌های اسکوریای ایران با مقاومت سازه‌ای ممکن است. اما، کسب وزن مخصوص‌های پایین‌تر با حفظ خواص خودتراکمی بتن دشوار است. وزن مخصوص بالای اسکوریا، مصرف فیلر و مصالح ریزدانه را افزایش می‌دهد. این امر دستیابی به بتن‌هایی با وزن مخصوص کمتر از ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب را مشکل می‌کند. شهرامی و همکاران [۱۲] نشان دادند که استفاده از سبکدانه اسکوریا، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن را به حدود ۸۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌رساند. ولی وزن مخصوص این بتن به دلیل وزن اسکوریا، از محدوده مجاز بتن‌های سبک سازه‌ای بیشتر می‌رود. در مقابل، استفاده از سبکدانه لیکا، مقاومت حدود ۳۷۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و وزن مخصوص مجاز را به همراه دارد. قوش و همکاران [۱۳] عملکرد سنگدانه ریز آجر نسوز بازیافتی را بررسی کردند. آن‌ها ۱۰ تا ۴۰ درصد سنگدانه ریز طبیعی را با آجر نسوز بازیافتی و سیمان سرباره پرتلند ترکیب کردند. این کار نوید تولید بتن پایدار برای کاربردهای مختلف در شرایط دمایی بالا را می‌دهد. مهدی و همکاران [۱۴] به بررسی برخی از خواص بتن سبک پایدار بر پایه اپوکسی، اسکوریا و زغال چوب پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری، چگالی ظاهری و جذب آب نمونه (اپوکسی با اسکوریا ریز و اسکوریا درشت) با نسبت ۱ به ۲ و ۴ درصد وزنی بهترین عملکرد را دارد. نویل [۱۵] در پژوهشی، خواص بتن سبک حاصل از جایگزینی تدریجی سنگدانه‌های درشت با اسکوریا را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که بتن حاوی اسکوریا دارای مقاومت فشاری کافی و چگالی مناسبی برای استفاده در سازه‌های سبک است. با این حال، در مقایسه با بتن معمولی، ضریب ارتجاعی آن کمتر بوده و از نفوذپذیری و جذب سطحی آب اولیه بیشتری برخوردار است.

1. Gong et al.
2. Neville.

دگفا و تیکو [۱۶] تأثیر جایگزینی ماسه با اسکوریا را در درصد‌های مختلف بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که افزایش میزان اسکوریا باعث کاهش روانی و مقاومت فشاری بتن می‌شود، اما در برخی موارد بهبود خواص حرارتی بتن را نیز به دنبال دارد. ژنسل و همکاران [۱۷] در مطالعه‌ای جامع، اثر اسکوریا را بر خواص نظیر مقاومت فشاری، کششی، چگالی و تخلخل بتن سبک مورد بررسی قرار دادند. یافته‌ها حاکی از آن داشت که افزایش محتوای ریزدانه‌ها می‌تواند منجر به کاهش مقاومت‌های مکانیکی شود، ولی با کنترل دقیق نسبت آب به سیمان، امکان بهبود این خواص وجود دارد. بهرامی و قاسمی [۱۸] خواص فیزیکی و مکانیکی بتن سبک حاوی لیکا را تحلیل کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بتن لیکا با چگالی پایین‌تر و مقاومت فشاری قابل قبول، می‌تواند در کاهش بار مرده سازه و بهبود عملکرد حرارتی ساختمان‌ها مؤثر باشد. وویچک و گریزبوسکا [۱۹] در مطالعه‌ای دیگر، عملکرد مکانیکی بتن ساخته‌شده با جایگزینی کامل سنگدانه‌های درشت با لیکا را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن میکروسیلیس به ترکیب بتن لیکا می‌تواند خواص مکانیکی آن، به‌ویژه مقاومت کششی، را به طور محسوسی افزایش دهد.

در این تحقیق، طبق نتایج آزمایش XRF^۶، درصد اکسید آهن در سرباره کارخانه فولاد اهواز ۴۳٪ است. این مقدار بسیار بالا است و با سرباره‌های معمول در دنیا متفاوت است. هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیرات این نوع سرباره بر خواص رئولوژی، مکانیکی و دوام بتن است. تا کنون، مقاله‌ای درباره ترکیب سرباره فولاد با سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا وجود نداشته است. این پژوهش در ادامه تحقیق قبلی ساجدی و بهرامی‌نیا [۲۰] و تحقیقات مشابه [۱۹-۱۵] در باره تأثیر سرباره بر خواص بتن سیمان - سرباره‌ای انجام شده است. براساس نتایج آن تحقیقات، استفاده از مصالح متخلخل طبیعی مانند سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا که آب را به خوبی جذب و حفظ می‌کنند، انتخاب شده است. هدف این انتخاب دستیابی به بتن با عمل‌آوری داخلی مناسب است. در این تحقیق، ده طرح اختلاط با ۴۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به‌صورت پودر شده به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی استفاده شد. همچنین، ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا به‌صورت مجزا به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه (نخودی و بادامی) در ساخت بتن‌ها به کار رفتند. نمونه‌های ساخته‌شده از طرح‌ها در سنین

3. Degefa & Tiku
4. Gencel et al.
5. Wójcik & Grzybowska
6. X-ray fluorescence

جدول ۱. نتایج آزمایش XRF انجام شده روی سیمان و سرباره مصرفی در تحقیق (%)

Table 1. Results of XRF testing performed on cement and slag used in the research (%)

مشخصات	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
سیمان نوع ۲ کارون	۲۵/۵۳	۳/۷۶	۰/۰۸	۲/۷۲	۵۶/۸۷	۰/۱۳	۱/۲۷	۰/۳۴	۱/۲۷
سرباره کارخانه فولاد اهواز	۲۱/۱	۵/۷	۰/۴۸	۴۳/۰	۱۹/۵	۱/۳	۸/۳	-	۰/۱۷

جدول ۲. نتایج آزمایش XRF انجام شده روی سرباره فولاد در تحقیقات (%)

Table 2. Results of XRF testing performed on steel slag in research (%)

مرجع	کشور	Mno	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Collins & sanjayan(2001)	استرالیا	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۴	۶/۱۳	۳۹/۴۳	۰/۲۹	۱۳/۹۱	۳۵/۰۴
Shi(1992)	کانادا	---	۰/۵۰	۱/۰۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۱۴/۶۰	۳۴/۷۰	۰/۶۰	۹/۹۰	۳۵/۳۰
Gjorv(1989)	فنلاند	۰/۸۵	۰/۹۰	۱/۱۰	---	---	۸/۰۰	۴۱/۰۰	۱/۳۰	۹/۰۰	۳۶/۰۰
Sato et al (1986)	ژاپن	۰/۴۲	۱/۶۵	۱/۰۰	۰/۳۸	۰/۲۶	۶/۸۰	۴۱/۸۰	۰/۳۰	۱۲/۹۰	۳۵/۴۰
Gjorv(1989)	نروژ	۱/۲۵	۲/۰۰	۰/۶۰	---	---	۷/۵۰	۳۶/۵۰	۲۰/۳۰	۱۳/۵۰	۳۵/۰۰
Byfors et al (1989)	سوئد	۰/۹۸	۰/۷۲	۱/۱۶	---	۰/۹۸	۱۰/۰۳	۳۹/۷۰	۱/۱۰	۹/۴۰	۳۵/۳۰
Hogan & Rose (1986)	امریکا	---	۰/۳۹	۱/۱۶	۰/۵۰	۰/۲۴	۱۰/۳۰	۴۲/۸۷	۱/۰۲	۷/۱۲	۳۴/۹۰
Osborne & Singh (1995)	اوکراین	۰/۲۵	۰/۷۷	۰/۴۸	۰/۴۰	۰/۲۶	۸/۲۱	۴۱/۶۰	۱/۱۷	۱۱/۳۰	۳۴/۲۰
م탈ورژی رازی	ایران(اهواز)	۰/۲۹	۱/۳	۰/۰۶	۰/۱۷	---	۸/۳	۱۹/۵	۴۳/۰	۵/۷	۲۰/۱

سانتی متر مکعب و سطح ویژه (بلین) آن ۲۹۲۲ گرم بر سانتی متر است. این سیمان تحت شرایط مناسب دپو و نگهداری شد و الزامات استاندارد ۳۸۹ ایران [۲۱]، و ASTM C150 [۲۲] را دارد. ترکیبات شیمیایی این سیمان از آنالیز به دست آمده است. این آنالیز در آزمایشگاه متالورژی رازی انجام و نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است.

۲۸ و ۹۱ روزه در دو محیط آب شرب و دمای آزمایشگاه عمل آوری شده و تحت آزمایش های لازم قرار گرفتند. این آزمایش ها شامل اسلامپ، وزن مخصوص، مقاومت فشاری، کشش غیر مستقیم، مقاومت الکتریکی، جذب آب حجمی و عمق نفوذ آب بودند. نتایج این آزمایش ها بررسی و تحلیل گردید.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مواد و مصالح مصرفی

۲-۱-۱ سیمان مصرفی

سیمان مورد استفاده در ایران معمولاً پرتلند نوع ۲ است. ویژگی اصلی آن، مقاومت در برابر سولفات ها و نمک ها است. زمان گیرش این سیمان مشابه سیمان معمولی (نوع ۱) است. چون بسیاری از کارخانه های سیمان در ایران این نوع را تولید می کنند، در این تحقیق از آن استفاده شده است. سیمان این تحقیق از کارخانه سیمان کارون تأمین شد. چگالی آن ۳/۱۵ گرم بر

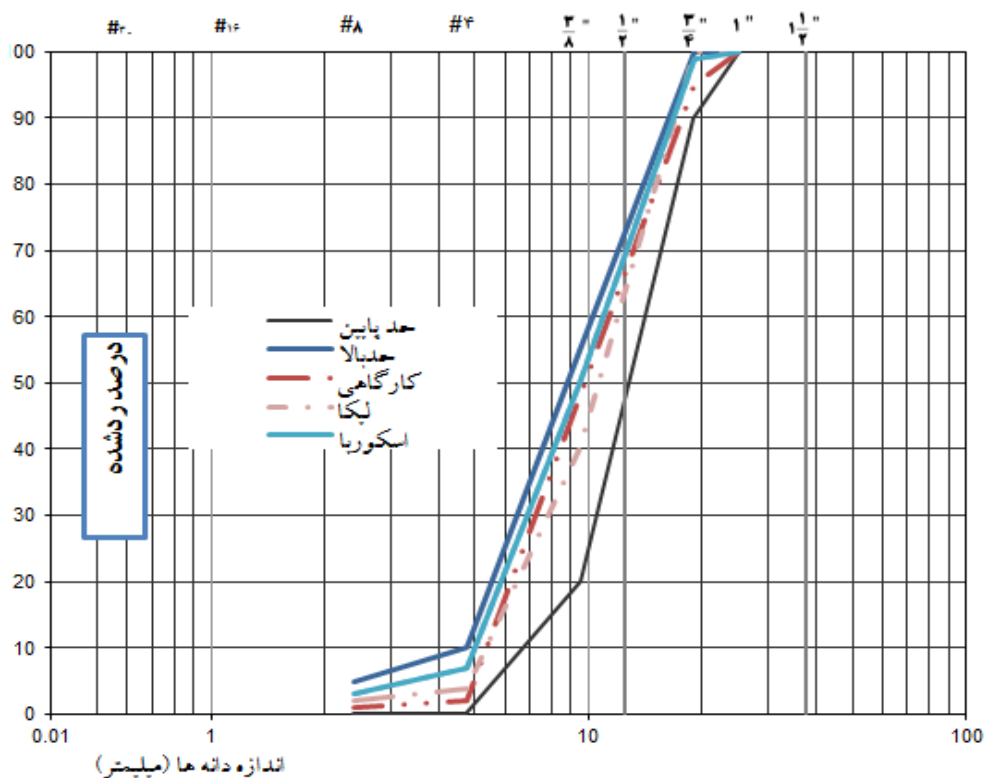
۲-۱-۲ سرباره کارخانه فولاد اهواز

سرباره فولادی این تحقیق از کارخانه فولاد اهواز به عنوان سنگدانه تهیه شد. سپس، به روش گندله یا پلت به پودر تبدیل گردید. این پودر دارای توده ویژه وزن مخصوص ۲/۵۶ گرم بر سانتی متر مکعب است و در شرایط مطلوب نگهداری شد. ترکیبات شیمیایی این سرباره با استفاده از آزمایش طیف نگاری فلورسانس اشعه ایکس مشخص شد که در جدول ۱ نشان داده شده است. جدول ۲ مقایسه ای از انواع سرباره های فولادی رایج در دنیا و سرباره فولاد اهواز را ارائه می دهد. در این جدول، درصد اکسید آهن در

جدول ۳. نتایج آزمایش XRF انجام شده روی سنگدانه مصرفی در تحقیق (%)

Table 3. Results of XRF testing performed on aggregate used in the research (%)

K ₂ O	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂	مشخصات
۳/۱۷	۳/۵۹	۵/۱۶	۱/۸۲	۸/۵۱	۷/۸۸	۱/۵۴	۱۰/۵۹	۵۰/۷۸	اسکوریا
۲/۲۶	۰/۶۹	۱/۹۹	۰/۷۸	۲/۴۶	۷/۱۰	۰/۲۱	۱۶/۵۷	۶۶/۰۵	لیکا



شکل ۱. منحنی دانه بندی مخلوط شن درشت دانه و ریزدانه مصرفی

Fig. 1. Grading curve of the coarse and fine sand mixture used

استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۴۰ استفاده شده است.

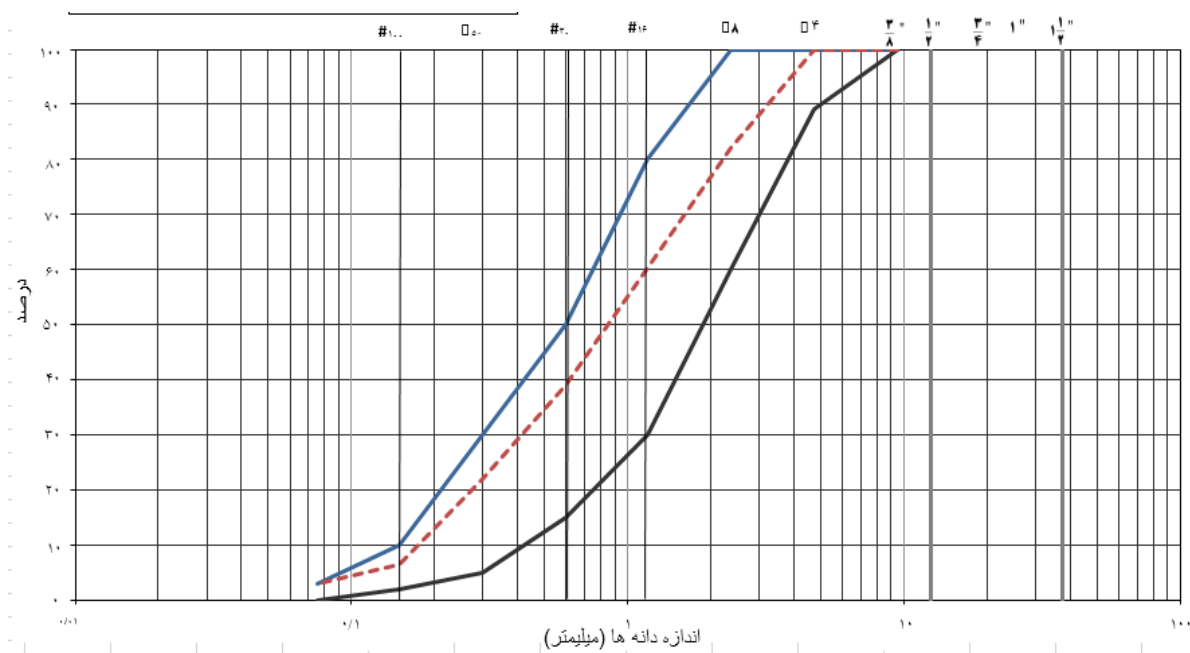
سرباره کارخانه فولاد اهواز ۴۳٪ ذکر شده است. این مقدار بسیار بالا است و تفاوت قابل ملاحظه ای با سرباره های متداول دنیا دارد.

۲-۱-۴- لیکا

سنگدانه سازه ای لیکا استفاده شده در تحقیق به صورت یکجا از شرکت لیکا واقع در استان مرکزی، شهرستان زرندیه، با وزن مخصوص ۱/۱۲ گرم بر سانتی متر مکعب تهیه و در شرایط مطلوب دپو و نگهداری شد، ترکیبات شیمیایی این سنگدانه که حاصل آزمایش طیف نگاری فلوتورسانس اشعه ایکس می باشد، در جدول ۳ نشان داده شده است. آزمایش دانه بندی، طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۴۰ [۲۳]، انجام شد و منحنی دانه بندی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این تحقیق سنگدانه لیکا به صورت نخودی و بادامی استفاده شده است.

۲-۱-۳- اسکوریا

سنگدانه سازه ای اسکوریا استفاده شده در تحقیق به صورت یکجا از معدن قروه کردستان، با وزن مخصوص ۱/۵۴۲ گرم بر سانتی متر مکعب تهیه و در شرایط مطلوب دپو و نگهداری شد، ترکیبات شیمیایی این سنگدانه که حاصل آزمایش طیف نگاری فلوتورسانس اشعه ایکس می باشد، در جدول ۳ نشان داده شده است. آزمایش دانه بندی، طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۴۰ [۲۳]، انجام شد و منحنی دانه بندی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این تحقیق سنگدانه اسکوریا به صورت نخودی و بادامی براساس



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه طبیعی تحقیق

Fig. 2. Natural sand grading curve of the research

۲-۱-۶- ریزدانه‌های مصرفی (ماسه)

ریزدانه‌های مصرفی در این تحقیق ماسه شکسته و شسته شده با وزن مخصوص ۲/۶۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، مطابق با استاندارد ASTM C128 [۲۶] بوده و میزان ضریب نرمی ۳/۲۱ و جذب آب آن ۱/۶ (مطابق با استاندارد ASTM C127) می‌باشد. این سنگدانه از محل تأمین ماسه مصرفی از معادن شهرستان شوشتر در استان خوزستان تهیه شد. در شکل ۲ دانه‌بندی ماسه استفاده‌شده در تحقیق ارائه شده است.

۲-۱-۷- فوق روان‌کننده

در این تحقیق فوق روان‌کننده با نام تجاری Flowcem R900 که یک فوق روان‌کننده اصلاح‌شده از نسل سوم و کاهش‌دهنده شدید آب برپایه پلی کربو کسپلات محصول شرکت دوروچم خاورمیانه^۱ تهیه گردید. مشخصات فنی این فوق روان‌کننده در جدول ۴ ارائه شده است. ضمناً آب این فوق روان‌کننده به‌عنوان بخشی از آب لحاظ شده است.

۲-۱-۸- آب

برای ساخت و عمل‌آوری طرح‌های اختلاط از آب شرب اهواز استفاده

۲-۱-۵- سنگدانه‌های مصرفی

دانه‌بندی سنگدانه‌ها نقش مهمی در کارایی بتن دارد. کارایی بر جداسازی و آب انداختن بتن تأثیر دارد و نحوه بتن‌ریزی و پرداخت سطح بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، دانه‌بندی سنگدانه‌ها در تعیین نسبت مواد تشکیل‌دهنده مخلوط بتن اهمیت زیادی دارد [۲۴]. در این تحقیق، شن مصرفی نوع شکسته طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۴۰ از معادن شهرستان اندیمشک در استان خوزستان تهیه شد. حداکثر اندازه اسمی آن ۱۹/۵ و ۱۲/۵ میلی‌متر (شن نخودی) است. ویژگی‌های سنگدانه‌های بتن استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ [۲۵] انجام شد. وزن مخصوص اشباع با سطح خشک برای شن‌های بادامی ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و برای شن نخودی ۲/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. وزن مخصوص ظاهری نیز به ترتیب ۲/۶۱ و ۲/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب تعیین شد. همچنین، جذب آب آن‌ها ۰/۷۱ و ۰/۹۱ محاسبه گردید. شکل ۱ دانه‌بندی شن‌های استفاده شده در تحقیق را نشان می‌دهد. در شکل ۱ حد بالا و حد پایین به منظور محدوده استاندارد دانه بندی طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ می‌باشد.

جدول ۴. مشخصات فنی فوق روان کننده مصرفی در تحقیق

Table 4. Technical specifications of the superplasticizer used in the research

ظاهر	وزن مخصوص (g.cm ³)	کلرید محلول در آب (m.g)	قلیائیت (mEq/L)	pH	یون کلر
قهوه‌ای	۱/۰۶	۰/۰۰۳۵	۰/۰۳۲	۳/۹۶	ندارد

جدول ۵. مشخصات آب شرب اهواز مصرفی در تحقیق

Table 5. Chemical characteristics of Ahvaz drinking water used in the study

عنصر	CaCO ₃	SO ₄ ²⁻	Cr ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
mg/lit	۳۶۰۰۰	۳۸۴	۴۱۶	۲۲	<۱	۸۰۰۰	۲۹۰۰

pH آب مصرفی ۷/۱۳ می‌باشد.

فوق روان کننده اضافه شد. آب باقیمانده به آرامی افزوده و سپس به مدت ۶ دقیقه دیگر اختلاط ادامه یافت. پس از آماده شدن مخلوطها، نمونه‌گیری از بتن طبق استاندارد ASTM C172 [۲۹] انجام شد. در این راستا ابتدا سطوح داخلی قالبها (مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ و استوانه‌ای ۳۰×۱۵ سانتی‌متری) به‌وسیله روغن مخصوص به‌اندازه کافی چرب شدند تا پس از سخت شدن بتن، نمونه‌ها به‌راحتی از قالب جدا گردند. سپس بتن در قالبهای مکعبی و استوانه‌ای در سه لایه ریخته شد و هر لایه توسط کوبش مخصوص به تعداد ۲۵ ضربه کوبیده شد و پس از کوبش هر لایه، سطح نمونه‌ها با استفاده از خطکش صاف و سپس در زیر یک پوشش مرطوب در شرایط ۹۰٪ رطوبت، به مدت ۲۴±۲ ساعت قرار داده شدند و پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج و تا زمان آزمایش به حوضچه عمل‌آوری با دمای ثابت حدود ۲۳ درجه سانتی‌گراد منتقل گردیدند. برای یکسان‌سازی شرایط عمل‌آوری، نمونه‌ها در کوتاه‌ترین بازه زمانی ممکن ساخته شدند. در خصوص عمل‌آوری نمونه‌ها شرایط استاندارد ASTM C511 [۳۰] رعایت شد. در شکل ۳ مصالح متخلخل شامل سنگدانه‌های لیکا و اسکوریا و سرباره پودر شده فولاد و همچنین در شکل ۴ عمل‌آوری نمونه‌های تحقیق در حوضچه آب شرب و دمای آزمایشگاهی نشان داده می‌شود. عمل‌آوری نمونه در دمای آزمایشگاهی به این منظور است که نمونه بعد از ساخت در دمای ثابت ۲۳ درجه سانتی‌گراد بدون هیچ ارتباطی با آب نگهداری شده است. در این تحقیق سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا جایگزین بخشی از سنگدانه‌های طبیعی (نخودی و بادامی) در محدوده وزنی ٪ (۷۰~۳۰) شده است.

گردید. نمونه‌ها پس از ساخت و قالب‌گیری در محیط‌های آب عمل‌آوری شدند. مشخصات آب شرب در جدول ۵ ارائه شده است.

۲-۲- طرح اختلاط‌های تحقیق

در این تحقیق، یازده طرح اختلاط بر اساس آیین‌نامه بتن ایران (آبا) بررسی شدند [۲۷]. سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا در نسبت‌های ٪۳۰، ٪۴۰، ٪۵۰، ٪۶۰ و ٪۷۰ به‌عنوان جایگزین سنگدانه طبیعی استفاده شده‌اند. همچنین، ٪۴۰ سرباره فولاد اهواز به‌عنوان جایگزین سیمان به کار رفته است. روش نام‌گذاری طرح‌های اختلاط به این صورت است:

S، بیانگر سرباره است، ٪۴۰ میزان وزنی سرباره در طرح‌ها، Sc معرف سبکدانه اسکوریا و Le معرف سنگدانه لیکا هستند. عدد بعد از هر حرف نشان‌دهنده درصد استفاده از آن مصالح به‌عنوان جایگزین است. به عنوان مثال، S40Sc30 به این معنی است که بتن دارای ٪۴۰ سرباره و ٪۳۰ سنگدانه اسکوریا است. RC به معنی بتن مرجع است. جزئیات طرح‌های اختلاط نهایی تحقیق در جدول ۶ ارائه شده است.

۲-۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

تمام موارد ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در آزمایشگاه طبق استاندارد ASTM C192 [۲۸] انجام گردید. قبل از ریختن مصالح به مخلوط‌کن، جداره آن کمی مرطوب شد تا رطوبت سنگدانه‌ها تغییر نکند. برای آماده‌سازی مخلوط، ابتدا ماسه به همراه سیمان و سرباره در مخلوط‌کن ریخته شد و به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند. سپس نصف آب و

جدول ۶. جزئیات طرح اختلاط‌های تحقیق (kg/m^3)

Table 6. Details of the research mixture design (kg/m^3)

ردیف	نام طرح	کد طرح	شن بادی	شن نخودی	ماسه	لیکا	اسکوریا	آب (Lit)	فوق روان کننده (Lit)	نسبت آب به سیمان
۱	بتن مرجع	RC	۳۳/۲	۳۸/۳	۹۴/۸	۰	۰	۱۱/۶۲	۰/۳۴	۰/۴۴
۲	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۳۰٪ اسکوریا	S40Sc30	۲۳/۷	۲۷/۹۱	۹۴/۸	۰	۱۹/۸۹	۱۸/۲	۰/۳۴	۰/۴۱
۳	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۴۰٪ اسکوریا	S40Sc40	۱۹/۳	۲۳/۶	۹۴/۸	۰	۲۸/۶	۱۸/۲	۰/۳۴	۰/۴۱
۴	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۵۰٪ اسکوریا	S40Sc50	۱۶/۱	۱۹/۷	۹۴/۸	۰	۳۵/۷	۱۸/۲	۰/۳۴	۰/۴۱
۵	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۶۰٪ اسکوریا	S40Sc60	۱۲/۸	۱۵/۸	۹۴/۸	۰	۴۲/۹	۱۸/۴	۰/۳۷	۰/۴۲
۶	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۷۰٪ اسکوریا	S40Sc70	۹/۶۵	۱۱/۸	۹۴/۸	۰	۵۰/۰۵	۱۸/۴	۰/۳۷	۰/۴۲
۷	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۳۰٪ لیکا	S40Le30	۲۸	۲۹/۲	۹۴/۸	۲۱/۸	۰	۱۸/۲	۰/۳۲	۰/۴۱
۸	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۴۰٪ لیکا	S40Le40	۲۴	۲۵/۱	۹۴/۸	۲۹	۰	۱۸/۲	۰/۳۵	۰/۴۱
۹	بتن با ۴۰٪ در صد سرباره و ۵۰٪ در صد لیکا	S40Le50	۲۰	۲۰/۹	۹۴/۸	۳۶/۳	۰	۱۸/۲	۰/۳۵	۰/۴۱
۱۰	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۶۰٪ لیکا	S40Le60	۱۶	۱۶/۷	۹۴/۸	۴۳/۶	۰	۱۸/۴	۰/۳۹	۰/۴۲
۱۱	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۷۰٪ لیکا	S40Le70	۱۲	۱۲/۵	۹۴/۸	۵۰/۸	۰	۱۸/۴	۰/۳۹	۰/۴۲

*سرباره فولاد استفاده شده در این طرح اختلاط kg/m^3 ۱۷/۶ است؛ *سیمان استفاده شده در این طرح اختلاط kg/m^3 ۲۶/۴ است.



ج) سرباره پودر شده

ب) اسکوریا

الف) لیکا

شکل ۳. مصالح متخلخل

Fig. 3. Porous materials



ب: عمل آوری با آب شرب

الف: عمل آوری در دمای آزمایشگاهی

شکل ۴. عمل آوری نمونه‌ها

Fig. 4. Sample curing

۲-۲-۲- معرفی آزمایش

برای سنجش روانی بتن‌های تازه از آزمایش اسلامپ بر اساس استاندارد ASTM C143 [۳۱] استفاده شد. این آزمایش برای اندازه‌گیری مخلوط در حالت تازه به کار می‌رود. پس از آماده شدن مخلوط‌های بتنی، اقدام به نمونه‌گیری از آن‌ها مطابق استاندارد ASTM C172 برای تعیین وزن مخصوص بتن تازه براساس استاندارد ۳۲۰۳-۶ "موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (سازمان ملی استاندارد ایران)" منطبق بر استاندارد ASTM C138 [۳۲] استفاده شده است. جهت آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی استاندارد پس از عمل آوری با آب شرب، به مدت ۲۸ و ۹۱ روزه مطابق استاندارد ASTM C511، از حوضچه خارج شدند و آزمایش تعیین مقاومت فشاری، با جک هیدرولیکی بتن‌شکن، با سرعت بارگذاری ۱۳۵۰ کیلوگرم بر ثانیه، براساس استاندارد BS1888 [۳۳] بر روی نمونه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک انجام پذیرفت، هر طرح میانگین اختلاط در هر سن دارای نمونه (مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متری) می‌باشد، نتایج نهایی میانگین نمونه در صورت عدم تجاوز از انحراف معیار ۱/۴ مگاپاسکال طبق استاندارد ASTM C192، بیانگر مقدار مقاومت فشاری می‌باشد، در غیر این صورت داده موردنظر حذف و میانگین دو مقاومت فشاری باقیمانده لحاظ شد. آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن از نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد ۳۰×۱۵ سانتی متری پس از ۲۸ روز عمل آوری در آب، مطابق استاندارد ASTM C511 از حوضچه خارج شدند و آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن، با استفاده از جک هیدرولیکی بتن‌شکن، با سرعت بارگذاری ۰/۹۴ کیلونیوتن بر ثانیه، بر اساس استاندارد ASTM C496 [۳۴] بر روی نمونه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک انجام پذیرفت. در محاسبه

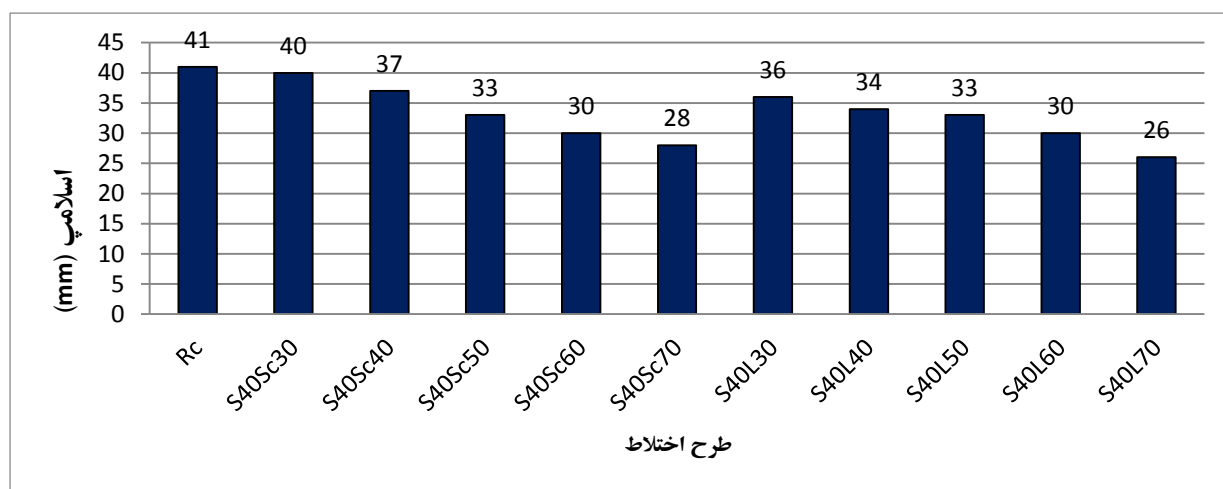
مقاومت کششی دونیم شدن از هر طرح ۳ نمونه تهیه شد و سپس از شکست آنها میانگین مقاومت نمونه‌ها برای مقدار P موجود در رابطه (۱) استفاده شد.

$$T = (2p) / \pi LD \quad (1)$$

(در رابطه (۱)، T: بیانگر مقاومت کششی به روش دونیم شدن برحسب کیلوگرم بر سانتیمترمربع، P: حداکثر بار اعمال شده برحسب کیلوگرم، L: طول نمونه برحسب سانتی‌متر و D: قطر نمونه برحسب سانتی‌متر می‌باشند). آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی (نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵) انجام می‌گیرد؛ ابتدا سطوح بالا و پایین نمونه مکعبی، آغشته به یک لایه نازک از خمیر سیمان غلیظ می‌گردند، سپس نمونه را میان الکترود مسی دستگاه قرار داده و در خاتمه پس از گذشت ۱۰ ثانیه زمان، عدد مقاومت کل (R) از دستگاه قرائت می‌شود. حال با توجه به مشخص بودن طول نمونه میان دو الکترود که قابل اندازه‌گیری است و نیز مساحت میانگین سطوح نمونه که بر روی الکترودها قرار گرفته (A)، از رابطه (۲) مقاومت الکتریکی ویژه (یا به اختصار مقاومت الکتریکی) ملات تعیین می‌شود.

$$\rho = (R \times A) / L \quad (2)$$

(در رابطه (۲)، ρ: مقاومت الکتریکی برحسب اهم بر متر، R: مقاومت کل قرائت شده از دستگاه برحسب اهم، A: مساحت نمونه مرتبط با الکترودهای مسی برحسب مترمربع، L: طول نمونه میان دو الکترود برحسب متر [۳۵].



شکل ۵. اسلامپ طرح اختلاطها در تحقیق

Fig. 5. Slump of the mixing design in the research

تحت فشار ثابت ۷ اتمسفر قرار می‌گیرند. طبق استاندارد سطحی از نمونه که با فشار بر آن اثر می‌کند، با برس سیمی کمی زبر می‌شود. پس از گذشت ۷۲ ساعت، نمونه‌ها به دونیم تقسیم‌شده و مقدار نفوذ آب با کولیس اندازه‌گیری می‌شود.

۳- تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۳-۱- اسلامپ

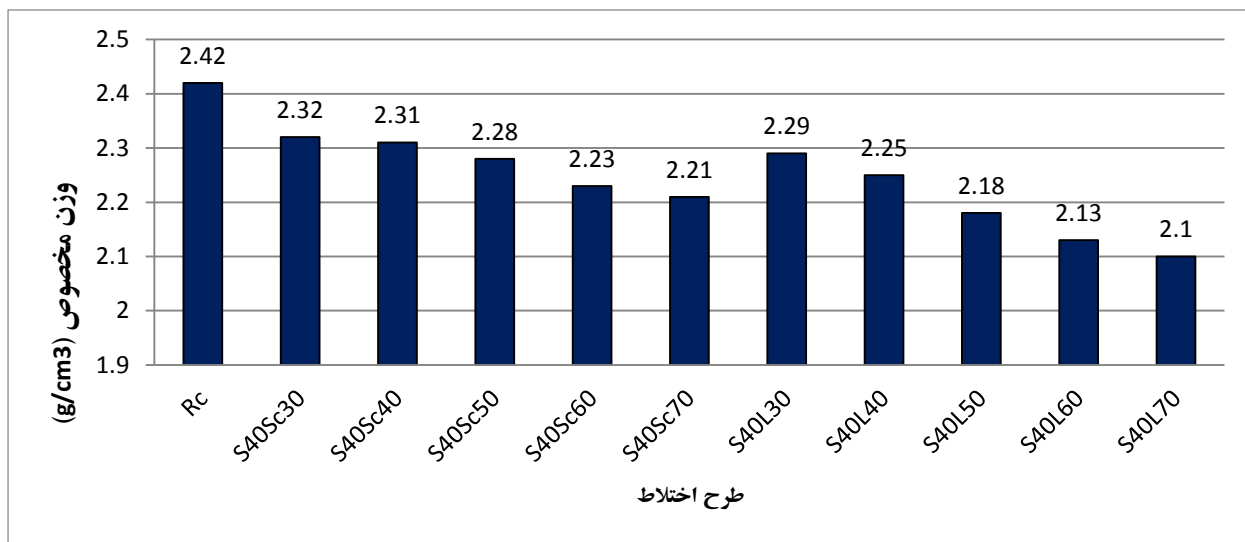
آزمایش اسلامپ، کارایی بتن را اندازه‌گیری نمی‌کند، اما می‌تواند روانی بتن را توصیف کند. این آزمایش برای بررسی تغییرات یکنواختی مخلوط بتن با نسبت‌های مشخص بسیار مفید است. در شکل ۵، تاثیر بالای جذب آب سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا دیده می‌شود. این امر باعث افزایش روانی یا اسلامپ بتن شده است. نکته قابل توجه، تاثیر ۴۰٪ سرباره فولاد است که بخشی از سیمان را با ترکیب سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا جایگزین می‌کند. وجود سرباره فولاد باعث افت ناگهانی نشده است، حتی با اینکه ۷۰٪ سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا جایگزین سنگدانه طبیعی شده‌اند. اما کاهش زیادی نسبت به نمونه مرجع مشاهده نمی‌شود. در بررسی نتایج، نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ افزودن سنگدانه اسکوریا با ۴۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب ۱۰٪ و ۵٪ کاهش اسلامپ نسبت به طرح مرجع نشان می‌دهند. همچنین، ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه لیکا با ۴۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب ۲۵٪ و ۱۵٪ کاهش اسلامپ دارند. طرح ۷۰٪ سبکدانه اسکوریا با ۴۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز، بیشترین اسلامپ را به میزان ۴۱/۶٪ نسبت به طرح مرجع نشان می‌دهد. همچنین، سنگدانه‌های اسکوریا

در این پژوهش آزمایش جذب آب حجمی از استاندارد BS1881 استفاده شده است که نمونه‌های مغزه‌گیری شده با قطر ۷/۵ و ارتفاع ۷/۵ سانتی متر پس از قرارگیری در کوره به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد آب نمونه‌ها در این مدت زمان تعیین می‌شود. همچنین در استاندارد ASTM C642 [۳۶] جذب آب حجمی نسبت تفاضل وزن نمونه در حالت اشباع با سطح خشک و کاملاً خشک (در کوره ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۴۸ ساعت) به وزن نمونه خشک است که به درصد بیان می‌شود. نمونه‌ها پس از حرارت و خنک‌سازی، به مدت ۳۰ دقیقه در داخل آب قرار داده شدند. پس از این مدت، نمونه‌ها از آب خارج و سطح خارجی آنها با حوله بدون پرز خشک و توزین شدند. (W2) در خاتمه درصد جذب آب (WA) هر نمونه مطابق رابطه (۳) تعیین شد.

$$W_A = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

(در رابطه (۳)، W1 و W2 برحسب گرم می‌باشند).

آزمایش نفوذپذیری بتن معمولاً از طریق محاسبه مقدار آب تحت فشار که برای جریان یافتن به درون یک نمونه بتنی داخل می‌شود، در یک فاصله زمانی مشخص تعیین می‌شود. با اندازه‌گیری عمق نفوذ آب پس از شکستن نمونه‌ها می‌توان به معیاری برای نفوذپذیری بتن دست‌یافت. در روش مذکور براساس استاندارد DIN1048 [۳۷] نمونه مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متری



شکل ۶. وزن مخصوص طرح‌های اختلاط در تحقیق

Fig. 6. Specific gravity of mixing designs in the study

شده است، که اشاره دارند به اینکه جذب بالای آب و بافت سطحی زبر این نوع مصالح، منجر به افت جریان‌پذیری مخلوط بتن می‌شود.

۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری

افزایش بیشتر مقاومت فشاری با رعایت نکات اقتصادی و حفظ وزن مخصوص بتن خشک در محدوده بتن‌های سبک عملاً مقدور نیست. افزایش مقاومت فشاری به نمونه‌های حاوی اسکوریا و لیکا در این تحقیق نسبت به تحقیقات گذشته در ایران به دلیل تفاوت نوع عمل‌آوری در دو محیط مختلف استفاده از پوزولان طبیعی سرباره فولاد اهواز به عنوان جایگزین مناسب برای سیمان همچنین اثر بخشی نوع طرح اختلاط مناسب جهت ساخت نمونه‌های بتنی می‌باشد. نتایج مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه می‌باشد.

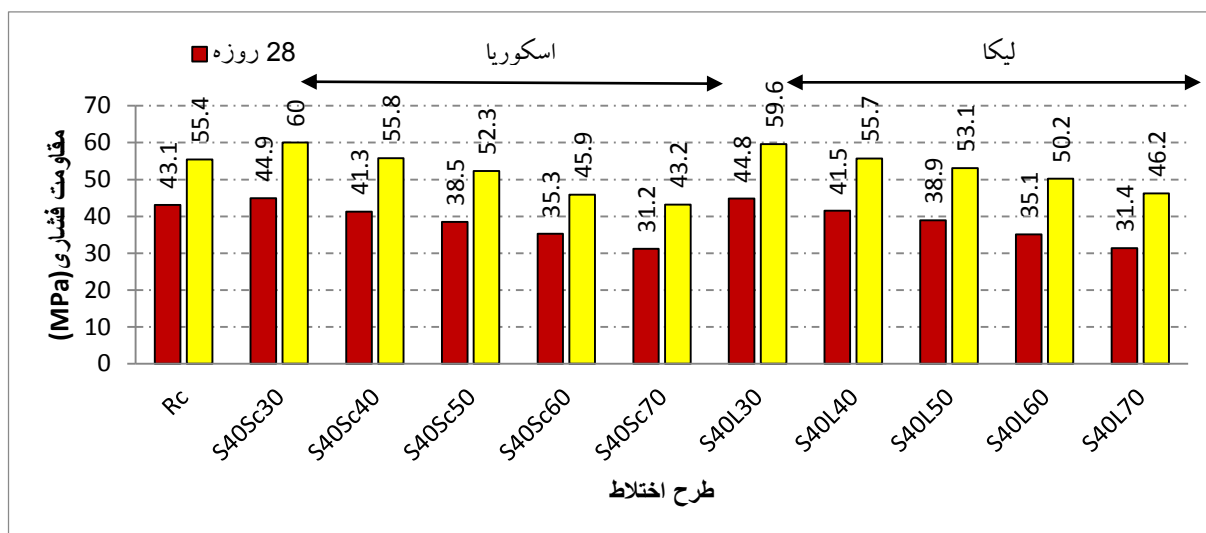
۳-۳-۱- مقاومت فشاری عمل‌آوری شده در آب شرب

در شکل ۷، نتایج مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه با آب شرب نشان داده شده است. تاثیر سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا به عنوان جایگزین سنگدانه طبیعی در روزهای اولیه گیرش، در مقایسه با بتن مرجع پایین است. اما با گذشت زمان، مقاومت نمونه‌ها به بتن مرجع نزدیک می‌شود. نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه مرجع دارند. همچنین، نمونه‌های حاوی سنگدانه اسکوریا در محیط عمل‌آوری در حوضچه آب شرب، مقاومت نسبی بهتری نسبت به نمونه‌های

در بتن روانی بیشتری نسبت به سنگدانه‌های لیکا دارند. با افزایش درصد سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا به جای سنگدانه‌های طبیعی، میزان اسلامپ افزایش یافته است.

۳-۲- وزن مخصوص بتن تازه

وزن مخصوص بیشتر سنگدانه‌های بتن معمولی بین ۲۴۰۰ تا ۲۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. بنابراین، چگالی بتن ساخته‌شده با سنگدانه‌های طبیعی معمولی بین ۲۲۰۰ تا ۲۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب قرار دارد. این بدان معناست که وزن مرده قطعات بتنی معمولاً زیاد است و بخش بزرگی از بار سازه را تشکیل می‌دهد. نتایج وزن مخصوص بتن تازه طرح‌های اختلاط، همان‌طور که در شکل ۶ آمده، نشان می‌دهد که وزن مخصوص بتن مرجع بیشترین مقدار را دارد. با توجه به اینکه ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا در نمونه‌ها به کار رفته، تأثیر سرباره فولاد باعث نزدیکی وزن نمونه‌ها به نمونه مرجع می‌شود. در این حالت، بتن با وزن کمتر از ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب مشاهده نمی‌شود. در بررسی نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و ۳۰٪ سنگدانه لیکا، بیشترین وزن مخصوص به ترتیب ۲/۳۲، ۲/۳۱ و ۲/۲۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. در مقابل، نمونه‌های حاوی ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب کمترین وزن مخصوص را با ۲/۱۳ و ۲/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب دارند. به‌طور کلی، افزایش درصد سنگدانه‌های سبک، به‌ویژه لیکا با تخلخل بالاتر نسبت به اسکوریا، موجب افت قابل توجه روانی بتن تازه می‌شود. این موضوع در مقالات متعددی همچون [۱۵] نیز تأیید



شکل ۷. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها عمل‌آوری شده با آب شرب

Fig. 7. Compressive strength results of samples cured with drinking water

در دمای آزمایشگاهی عمل‌آوری شدند، نسبت به نمونه‌های با سنگدانه اسکوریا، مقاومت نسبی بهتری داشتند. در سن ۹۱ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۵۸/۱ و ۵۴/۲ مگاپاسکال به دست آمد. در حالی که مقاومت فشاری نمونه مرجع ۵۴/۱ مگاپاسکال بود. نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه لیکا نیز با اندکی افزایش، ۵۸/۴ و ۵۴/۵ مگاپاسکال ثبت شدند. مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۴۸/۶، ۴۵/۱ و ۴۵/۱ مگاپاسکال است. در مقابل، مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب ۵۱/۱، ۴۹/۱ و ۴۵/۵ مگاپاسکال به دست آمد.

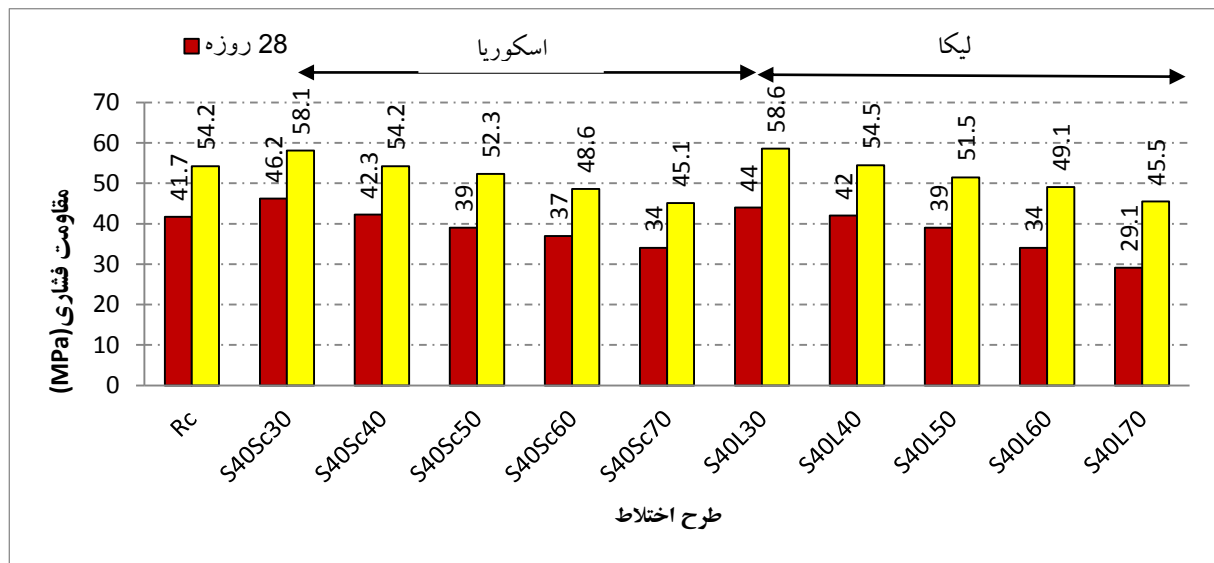
۳-۳-۳ تحلیل نتایج مقاومت فشاری

قابل پیش‌بینی بود که استفاده از سرباره کارخانه فولاد اهواز به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان و استفاده از اسکوریا و لیکا به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌ها، خواص مکانیکی را کاهش دهد. نکته‌ای که برای همه نمونه‌ها وجود دارد، این است که تاثیر عمده سرباره در سنین بالا خود را نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا در سن ۹۱ روزه نسبت به نمونه مرجع، افزایش مقاومت را به همراه دارد. هرچند مقدار افزایش ۶٪ ناچیز به نظر می‌رسد، اما نشان‌دهنده اثر مثبت سرباره فولاد با سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا بر مقاومت فشاری تا سن ۹۱ روز است. دلیل احتمالی این افزایش کم، پیشرفت بیشتر

سنگدانه لیکا نشان می‌دهند. در آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا در سن ۹۱ روزه، به ترتیب ۶۰ و ۵۵/۸ مگاپاسکال به دست آمده است. این در حالی است که نمونه مرجع ۵۵/۴ مگاپاسکال می‌باشد. مقاومت فشاری نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه لیکا، با کاهش کمی نسبت به نمونه‌های اسکوریا به ترتیب ۵۹/۶ و ۵۵/۷ مگاپاسکال است. همچنین، مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۵۳/۳، ۴۵/۹ و ۴۳/۲ مگاپاسکال به دست آمده است. این در حالی است که نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب ۵۳/۱، ۵۰/۲ و ۴۶/۲ مگاپاسکال هستند. یکی از دلایل تاثیر دیر هنگام سرباره، می‌تواند میزان بالای آهن موجود در نمونه سرباره فولاد باشد. طبق جدول ۱، مقدار آهن بیش از ۴۳٪ و دی‌اکسید سیلیکون به میزان ۲۱٪ است که باعث کندی بهبود خواص مکانیکی می‌شود.

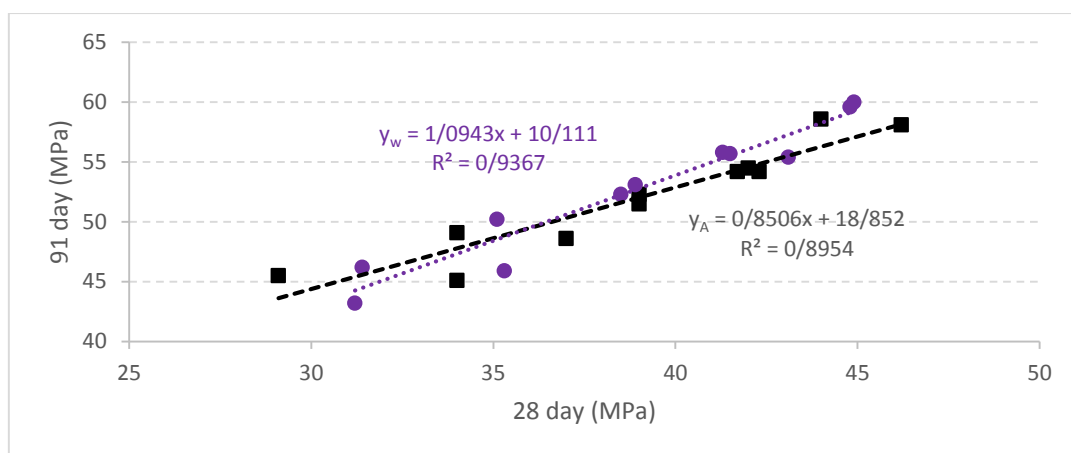
۳-۳-۲ مقاومت فشاری در دمای آزمایشگاهی

شکل ۸ نتایج مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه در شرایط دمای آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. تاثیر سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا به‌عنوان جایگزین سنگدانه طبیعی در روزهای اولیه گیرش، در مقایسه با بتن مرجع، کم بود. اما با گذشت زمان، مقاومت نمونه‌ها به بتن مرجع نزدیک شد. نسبت نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ حاوی سنگدانه اسکوریا و لیکا از نمونه مرجع بیشتر بود. همچنین در بررسی نتایج، نمونه‌های حاوی سنگدانه لیکا که



شکل ۸. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها عمل‌آوری شده دمای آزمایشگاهی

Fig. 8. Compressive strength results of laboratory temperature cured samples



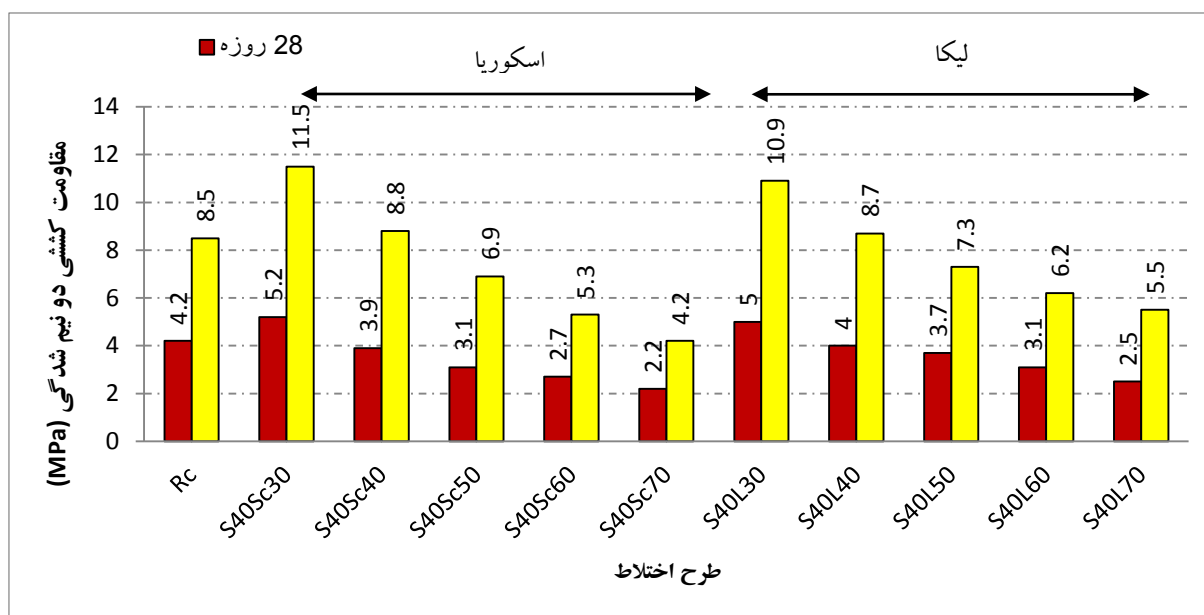
شکل ۹. رابطه بین مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سربره‌ای با سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا

Fig. 9. Relationship between compressive strength at 28 and 91 days of slag cement concretes with scoria and Leca aggregates

گذشت زمان، مقاومت نمونه‌ها به بتن مرجع نزدیک شده و نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ حاوی سنگدانه اسکوریا و لیکا، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه مرجع نشان داده‌اند. نتایج این تحقیق می‌تواند با تحقیق مومنی و قویدل [۳۸] مقایسه شود که نشان داد، نمونه‌های حاوی سنگدانه لیکا، عملکرد بهتری در آزمون‌های مکانیکی دارند.

با توجه به رابطه واقع در شکل ۹ دامنه تغییرات خطای موجود مقاومت

واکنش‌های هیدراسیون سیمان و سربره در طول زمان است. یکی از دلایل تاثیر دیر هنگام سربره، میزان اکسید آهن بالای موجود در آن است که بیش از ۴۳٪ می‌باشد. در شکل ۹، نتایج مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه فقط برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب شرب و دمای آزمایشگاه نشان داده شده است. تاثیر سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا با ۴۰٪ سربره فولاد اهواز در روزهای اولیه گیرش، نسبت به بتن مرجع پایین‌تر بوده است. اما با



شکل ۱۰. نتایج مقاومت کششی دونیم شدگی نمونه‌ها عمل‌آوری شده در حوضچه آب شرب

Fig. 10. Results of the halving tensile strength of samples cured in a drinking water pond

مقاومت کششی در روزهای اولیه دارند. اما با گذشت زمان، مقاومت کششی این نمونه‌ها به بتن مرجع نزدیک می‌شود. نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا حتی از نمونه مرجع نیز بالاتر می‌روند. همچنین، نمونه‌های با سنگدانه اسکوریا نسبت به نمونه‌های سنگدانه لیکا مقاومت کششی بهتری دارند. در سن ۹۱ روزه، مقاومت کششی نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ اسکوریا به ترتیب ۱۱/۵ و ۸/۸ مگاپاسکال است. در مقابل، نمونه مرجع ۸/۸ مگاپاسکال دارد. نکته دیگر این است که نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه لیکا، با کاهش جزئی، ۱۰/۹ و ۸/۷ مگاپاسکال را نشان می‌دهند. همچنین، مقاومت کششی نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۶/۹، ۵/۳ و ۴/۲ مگاپاسکال است. در حالی که برای سنگدانه لیکا، این مقادیر به ترتیب ۷/۳، ۶/۲ و ۵/۵ مگاپاسکال به دست آمده است.

۳-۴-۲- مقاومت کششی دونیم‌شدن در دمای آزمایشگاهی

شکل ۱۱ نتایج مقاومت کششی دونیم‌شدن در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه در شرایط دمای آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. تاثیر سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا جایگزین سنگدانه طبیعی در مقاومت کششی دونیم‌شدن در روزهای اولیه گیرش در مقایسه با بتن مرجع در حد پایین قرار داشته ولی با گذشت زمان مقاومت نمونه‌ها به بتن مرجع نزدیک و نسبت نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪

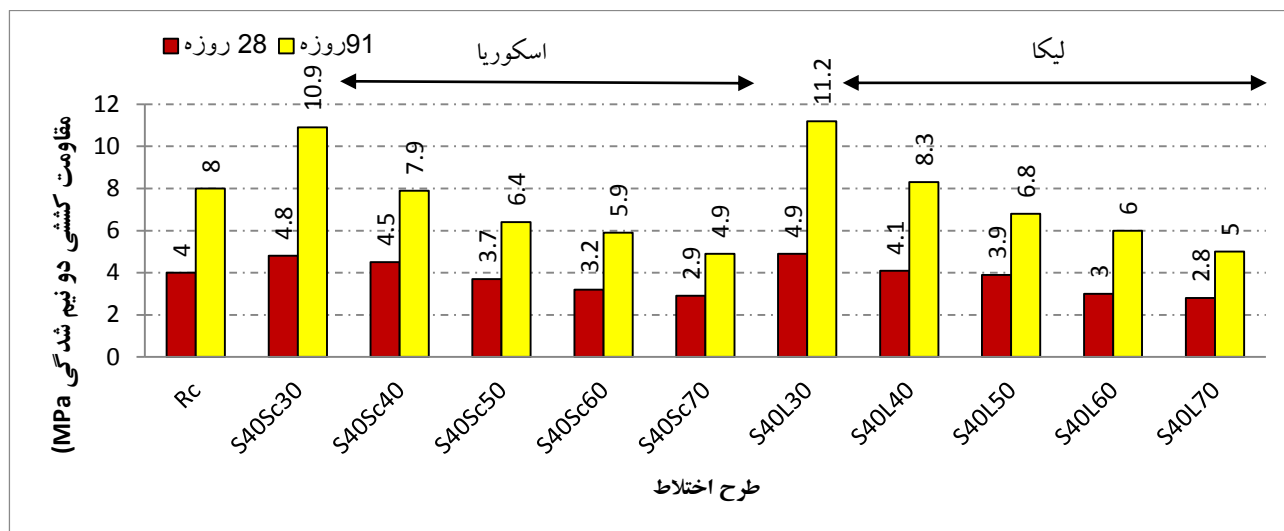
فشاری عمل‌آوری شده با آب شرب در سن ۹۱ روزه برحسب سن ۲۸ روزه در محدوده ۶/۱۶۶٪ تا ۶/۱۸۶٪ اشاره دارد که در مقایسه با محیط آزمایشگاهی محدوده آن ۴/۱۶۶٪ تا ۵/۱۲۵٪ می‌باشد. مشهود است که می‌توان با دقت قابل قبول، مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه برحسب ۲۸ روزه را پیش‌بینی نمود. از نتایج بالا چنین استنباط می‌گردد که یک رابطه خطی بین ضریب تعیین عمل‌آوری شده با آب شرب ۰/۹۳۶۷ و ضریب تعیین در محیط دمای آزمایشگاهی ۰/۸۹۵۴ در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه برقرار می‌باشد.

۳-۴-۳- مقاومت کششی دونیم شدن

این آزمایش به منظور تعیین مقاومت کششی تک محوری غیرمستقیم یک نمونه سنگ می‌باشد که تحت عنوان تست برزیلی معروف است. در واقع یک تنش کششی بر سنگ اعمال شده و تنش دیگری که مقدار آن حداکثر سه برابر تنش اصلی کششی، به صورت فشاری اعمال می‌گردد. در این صورت در تنش کششی تک محوری شکست کششی حاصل می‌شود.

۳-۴-۱- مقاومت کششی دونیم‌شدن عمل‌آوری شده آب شرب

در شکل ۱۰، نتایج مقاومت کششی دونیم‌شدن آب شرب در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه نمایش داده شده است. سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا تأثیر کمتری بر



شکل ۱۱. نتایج مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌های عمل‌آوری شده دردمای آزمایشگاهی

Fig. 11. Results of the split tensile strength of samples cured at laboratory temperature

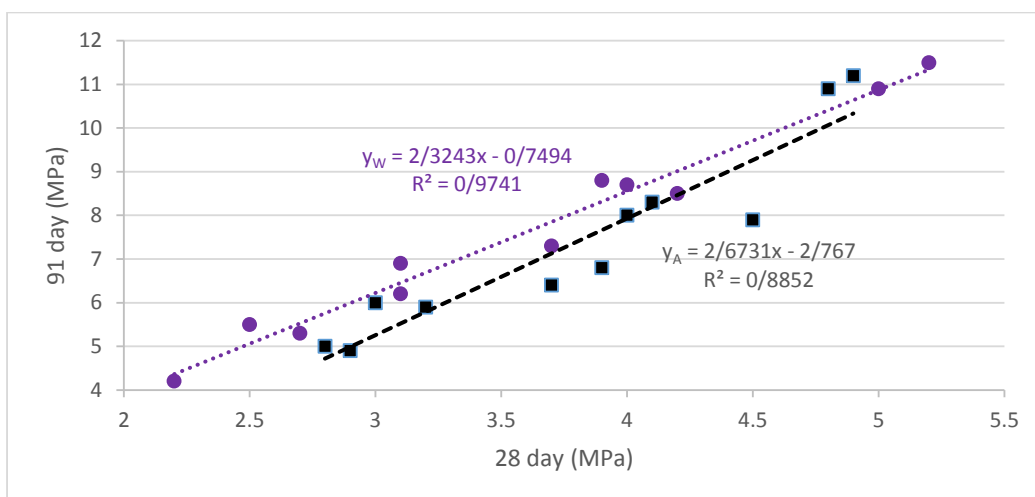
سرباره در طول زمان مربوط باشد. نتایج نشان داد که با افزایش جایگزینی سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا با سنگدانه طبیعی حاوی ۴۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز، مقاومت کششی دو نیم‌شدن نمونه‌ها در سنین پایین نسبت به نمونه مرجع کاهش یافت. اما با گذشت ۹۱ روزه، این مقاومت نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است. تاثیر جایگزینی سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا با سنگدانه طبیعی حاوی ۴۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز، در سن ۹۱ روزه، به میزان ۳۰٪ و ۴۰٪ افزایش مقاومت کششی دونیم‌شدن همراه است. علت این امر پیشرفت بیشتر واکنش‌های هیدراسیون سیمان و سرباره در طول زمان است. نتایج این پژوهش را می‌توان با تحقیق خانزاده و همکاران [۳۹] مقایسه کرد. مقاومت کششی غیرمستقیم بتن‌های سبک‌دانه پرمیاری حاوی لیکا، در واقع به طور متوسط حدود ۱۱٪ مقاومت فشاری استوانه‌ای با ۳۱٪ مگاپاسکال بود.

نمودار همبستگی سن ۲۸ روزه و سن ۹۱ روزه در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. این مقایسه شامل نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب شرب و دمای آزمایشگاه است. مقاومت کششی دونیم‌شدن در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای با سنگدانه اسکوریا و لیکا با نمودار رگرسیون نشان داده شده است. بر اساس شکل ۱۱، دامنه تغییرات خطای مقاومت کششی دونیم‌شدن در حوضچه آب شرب در سن ۹۱ روزه نسبت به سن ۲۸ روزه بین ۷۰/۹۷۵٪ تا ۷/۵۴۱٪ است. در دمای محیط آزمایشگاهی، این دامنه بین ۱۲/۶۱۸٪ تا ۱۲/۲۳۹٪ می‌باشد. این نشان می‌دهد که می‌توان با

حاوی سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا بیشتر از نمونه مرجع شده است. همچنین در بررسی نتایج تحقیق برخلاف عمل‌آوری در محیط آب شرب نمونه‌های حاوی سنگدانه لیکا نسبت به نمونه‌های سنگدانه اسکوریا از مقاومت نسبی بهتری برخوردار است. در بررسی نتایج آزمایش مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا در سن ۹۱ روزه ۱۰/۹ و ۷/۹۵ مگاپاسکال بدست آمده است درحالی‌که مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه مرجع ۸ مگاپاسکال می‌باشد، اما مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه لیکا با اندکی افزایش نسبت به نمونه‌های دارای سنگدانه اسکوریا، ۱۱/۳ و ۸/۳ مگاپاسکال بدست آمده است. مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا جایگزین سنگدانه طبیعی به ترتیب ۶/۴، ۵/۹ و ۴/۹ مگاپاسکال می‌باشد در حالی‌که مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا جایگزین سنگدانه طبیعی به ترتیب ۶/۸، ۶ و ۵ مگاپاسکال بدست آمده است.

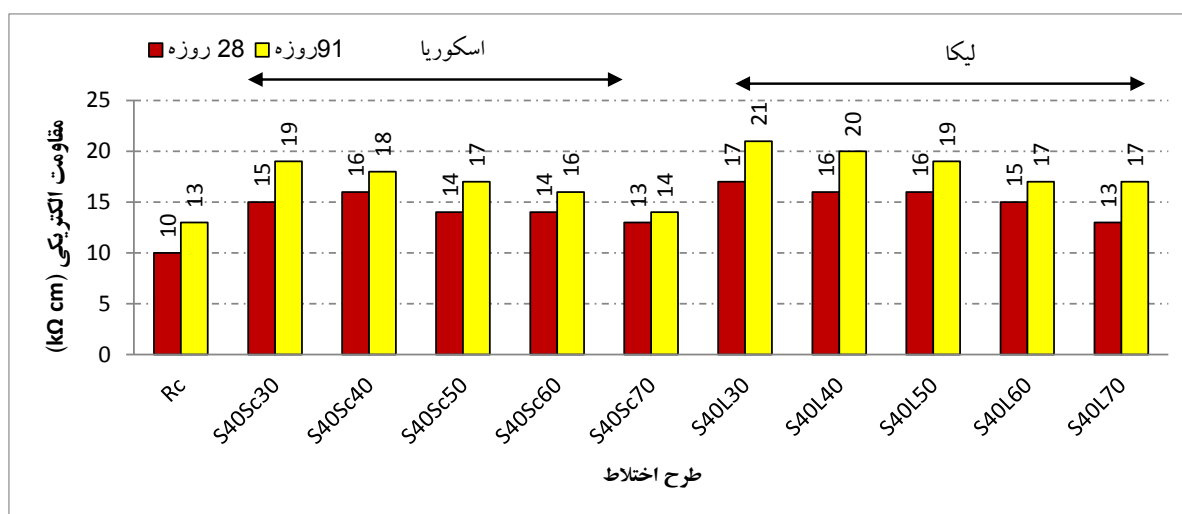
۳-۴-۳- تحلیل نتایج مقاومت کششی دونیم‌شدن

وجود سرباره به‌عنوان جایگزین سیمان و سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا در سنین پایین، باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شود. در بررسی نمونه‌ها، مشخص است که ترکیب ۴۰٪ سرباره فولادی و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا در سن ۹۱ روزه، نسبت به نمونه مرجع، افزایش مقاومت خمشی دارد. این افزایش ممکن است به پیشرفت واکنش‌های هیدراسیون بین سیمان و



شکل ۱۲. رابطه بین مقاومت‌های کششی دونیم‌شدن در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای با سنگدانه اسکوریا و لیکا

Fig. 12. Relationship between the split tensile strengths at 28 and 91 days of slag cement concretes with scoria and Leca aggregates



شکل ۱۳. نتایج مقاومت الکتریکی نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب شرب

Fig. 13. Electrical resistance results of samples cured in drinking water

معیاری برای مقاومت در برابر خوردگی فلزات مدفون در آن مطرح می‌شود. این مقاومت با نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر ارتباط مستقیم دارد. به همین دلیل، آزمایش سنجش مقاومت ویژه الکتریکی بتن به خاطر سرعت بالا و غیر مخرب بودنش، مورد توجه قرار گرفته است.

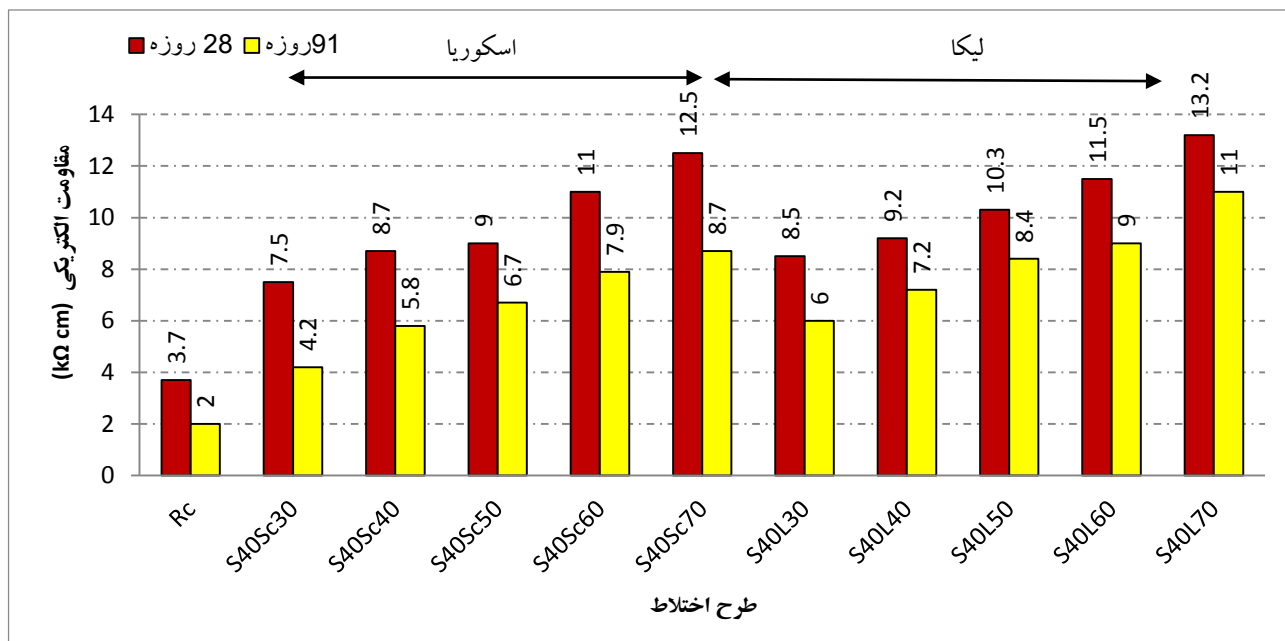
دقت قابل‌قبولی، مقاومت کششی دونیم‌شدن در سن ۹۱ روزه را بر اساس سن ۲۸ روزه پیش‌بینی کرد. از نتایج به‌دست آمده، یک رابطه خطی بین ضریب تعیین در حوضچه آب شرب (۰/۹۷۴۱) و دمای محیط آزمایشگاهی (۰/۸۸۵۲) در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه وجود دارد.

۳-۵-۱- مقاومت الکتریکی عمل‌آوری شده آب شرب

نتایج مقاومت الکتریکی در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که ۴۰٪ سرباره آهنگدازی با سنگدانه اسکوریا عمل‌آوری شده با آب شرب، باعث کاهش مقاومت الکتریکی نسبت به سبکدانه لیکا شده است. سرباره به عنوان یک

۳-۵-۲- آزمایش مقاومت الکتریکی

دوام بالا در مخلوط‌های سیمانی نشان‌دهنده کیفیت بهتر آن‌ها در شرایط مختلف است. با افزایش دوام این مخلوط‌ها، می‌توان انتظار طول عمر بیشتری برای سازه بتنی داشت. مقاومت الکتریکی یک ماده به عنوان



شکل ۱۴. نتایج مقاومت الکتریکی نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاه

Fig. 14. Electrical resistance results of samples cured at laboratory temperature

با افزایش درصد جایگزینی، نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته، همچنین نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه لیکا در مقایسه با سنگدانه اسکوریا مقاومت کمتری دارد. در شکل ۱۴، نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاهی مقاومت الکتریکی بیشتری را نشان می‌دهد. این نشان‌دهنده تاثیر آب در حفره‌های بین سنگدانه‌ها است. با گذشت زمان، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در سن ۹۱ روزه، نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۷۹، ۸۴، ۹۱، ۹۱ و ۹۷ کیلو اهم در سانتی‌متر مقاومت الکتریکی دارند. در همین سن، نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب ۶۳، ۷۱، ۷۸، ۸۶ و ۹۸ کیلو اهم در سانتی‌متر مقاومت الکتریکی نشان می‌دهد.

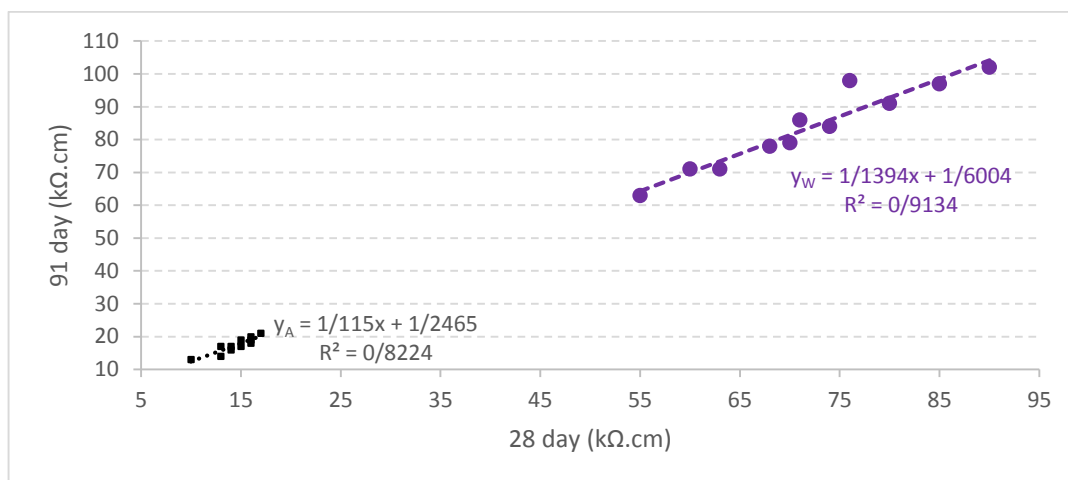
۳-۵-۳ تحلیل نتایج مقاومت الکتریکی

نتایج آزمون مقاومت الکتریکی نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی سنگدانه اسکوریا و لیکا افزایش مقاومت را تجربه کرده‌اند. وجود سرباره سبب پر شدن فضای بین مصالح سنگی می‌شود. این موضوع نتوانسته است مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی سرباره و سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا را نسبت به نمونه مرجع کاهش دهد. به طور کلی، مقاومت الکتریکی نمونه‌های سیمانی به ابعاد و توزیع تخلخل در ریزساختار این مصالح و رسانایی محلول منفذی در حفرات ماتریس بستگی دارد. سرباره فولاد به عنوان یک پوزولان

پوزولان در ماتریس بتن عمل می‌کند و با مصرف کریستال‌های کلسیم - هیدروکسید، غلظت یون‌های OH در محلول منفذی را کاهش می‌دهد. این موضوع منجر به افت رسانایی الکتریکی محلول منفذی بتن می‌شود [۴۰]. در شکل ۱۳، نمونه‌های دارای سنگدانه اسکوریا نسبت به سنگدانه لیکا مقاومت الکتریکی کمتری دارند و با افزایش سن نمونه‌ها، این مقدار بیشتر می‌شود. همچنین، نتایج شکل ۱۲ نشان می‌دهد که نمونه مرجع کمترین مقدار مقاومت الکتریکی را دارد. در سن ۹۱ روزه، نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۱۹ و ۱۸ کیلو اهم و ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۱۶، ۱۴ و ۱۴ کیلو اهم مقاومت الکتریکی بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین، با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه اسکوریا، مقاومت الکتریکی عمل‌آوری شده با آب شرب کاهش می‌یابد. در نمونه‌های دارای سنگدانه لیکا، به دلیل سبکی این سنگدانه نسبت به اسکوریا، مقاومت الکتریکی بیشتر از نمونه مرجع است. نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه لیکا در سن ۹۱ روزه به ترتیب ۲۱ و ۲۰ کیلو اهم مقاومت الکتریکی دارند. با افزایش مقدار جایگزینی در بتن، این مقدار کمی کاهش می‌یابد.

۳-۵-۲ مقاومت الکتریکی عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاه

شکل ۱۴ نتایج مقاومت الکتریکی در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه در دمای آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. تاثیر سبکدانه اسکوریا بر مقاومت الکتریکی



شکل ۱۵. رابطه بین مقاومت‌های الکتریکی در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای دارای سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا

Fig. 15. Relationship between electrical resistivities at 28 and 91 days of slag cement concretes containing Scoria and Leca aggregates

را با توجه به سن ۲۸ روزه پیش‌بینی کرد. همچنین، یک رابطه خطی از ضریب تعیین عمل‌آوری شده با آب شرب ۰/۸۲۲۴ و ضریب تعیین در دمای آزمایشگاهی ۰/۹۱۳۴ در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه برقرار است.

۳-۶- آزمایش جذب آب حجمی

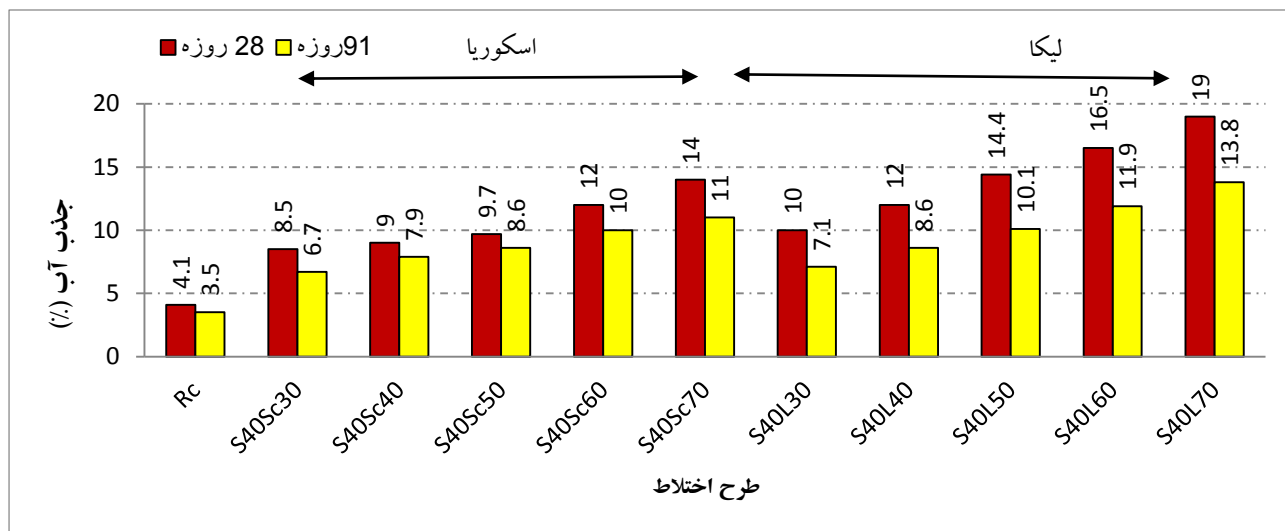
۳-۶-۱- جذب آب عمل‌آوری شده با آب شرب

در بررسی نتایج جذب آب در شکل ۱۶، مشاهده می‌شود که با افزایش سنگدانه‌های اسکوریا، جذب آب افزایش یافته است. اما با گذشت زمان، این مقدار کاهش نشان می‌دهد. همچنین، جذب آب نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه لیکا بیشتر از نمونه‌های اسکوریا است. نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا در سن ۹۱ روز به ترتیب ۶/۷٪، ۷/۹٪، ۸/۶٪، ۱۰٪ و ۱۱٪ جذب آب را نشان می‌دهد. در حالی که نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب ۷/۱٪، ۸/۷٪، ۱۰/۱٪، ۱۱/۹٪ و ۱۳/۸٪ جذب آب دارد. بنابراین، استفاده از ۴۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به جای سیمان در نمونه‌های لیکا، جذب آب را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

۳-۶-۲- جذب آب عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاهی

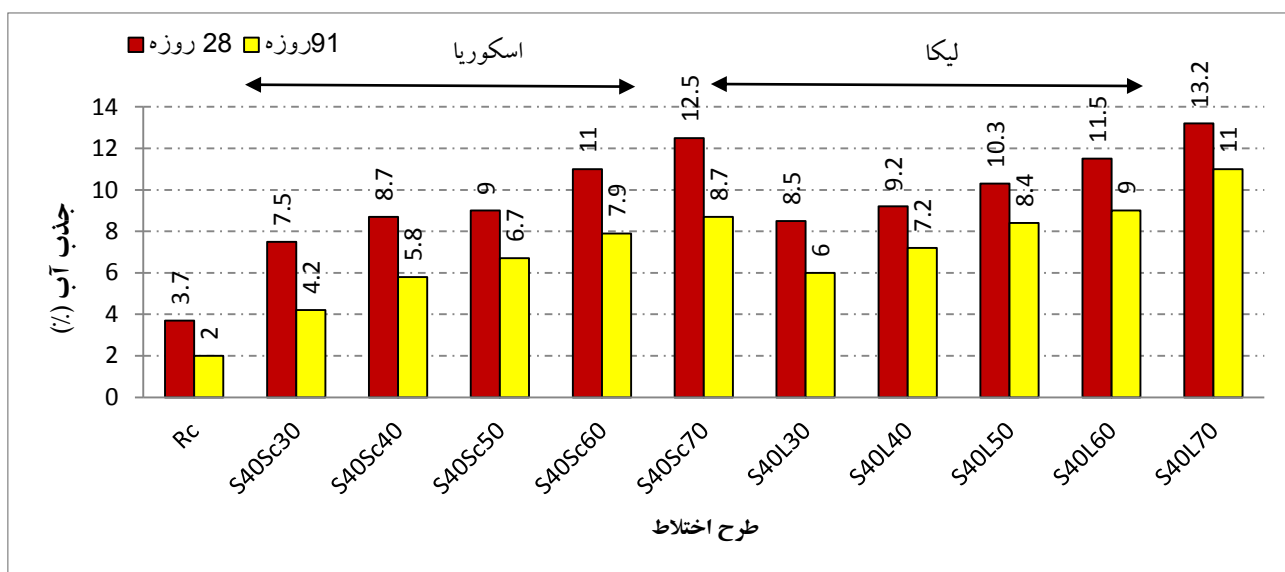
در شکل ۱۷، با افزایش سنگدانه‌های اسکوریا، جذب آب افزایش می‌یابد. نمونه‌های ساخته شده با لیکا نسبت به نمونه‌های اسکوریا جذب آب بیشتری

و سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا به عنوان اسکلت بتن درون ماتریس قرار می‌گیرند. این مواد با مصرف بلورهای هیدروکسید کلسیم، غلظت یون‌های OH در محلول منفذی را کاهش می‌دهند [۳۶]. این امر منجر به کاهش رسانایی الکتریکی محلول منفذی بتن سیمانی و در نهایت افزایش مقاومت الکتریکی ماتریس می‌شود. این افزایش مقاومت به کاهش نرخ خوردگی میلگردهای فولادی که در زیر لایه بتن قرار دارند، کمک می‌کند. عملکرد پوزولانی در سنین اولیه ضعیف است و لذا این مواد تاثیر زیادی بر بهبود مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ روزه ندارد. با افزایش درصد جایگزینی سرباره با سیمان، مقدار سیمان که عامل اصلی مقاومت و چسبندگی است، کاهش می‌یابد. این افزایش تخلخل می‌تواند رسانایی ماتریس را بالا ببرد و مقاومت الکتریکی آن را کاهش دهد. با بررسی نتایج شکل ۱۴، مشخص می‌شود که تاثیر سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا افزایش مقاومت الکتریکی را به همراه دارد. نمودار همبستگی میان سن ۲۸ روزه و سن ۹۱ روزه نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب شرب و دمای آزمایشگاه در شکل ۱۵ ارائه شده است. مقاومت الکتریکی در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای با سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا، نمودار رگرسیون را نشان می‌دهد. تغییرات خطای موجود در مقاومت الکتریکی عمل‌آوری شده با آب شرب در سن ۹۱ روزه نسبت به سن ۲۸ روزه، در محدوده ۱۱/۴۵۳٪ تا ۸/۸۸۸٪ است. در دمای آزمایشگاهی، این تغییرات در سن ۹۱ روزه در محدوده ۱۰/۰۰۵ تا ۳/۳۵۵ قرار دارد. به وضوح می‌توان با دقت قابل قبولی، مقاومت الکتریکی در سن ۹۱ روزه



شکل ۱۶. نتایج جذب آب نمونه‌ها عمل‌آوری شده با آب شرب

Fig. 16. Water absorption results of samples cured with drinking water



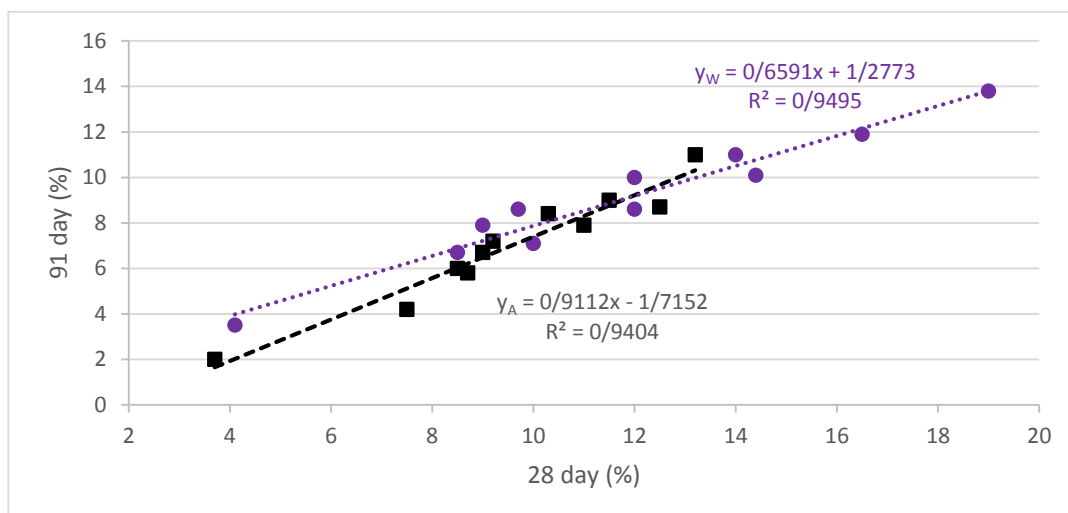
شکل ۱۷. نتایج جذب آب نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاهی

Fig. 17. Water absorption results of samples cured at laboratory temperature

۳-۶-۳- تحلیل نتایج جذب آب

آزمون جذب آب نمونه‌های بتن سیمانی نشان می‌دهد که این مصالح قابلیت جلوگیری از نفوذ آب و مایعات را دارند. افزایش آب جذب‌شده نشان‌دهنده ضعف ماتریس در جلوگیری از نفوذ است که به تخریل بالای بتن اشاره دارد. در مقایسه، نمونه‌های لیکا و ۴۰٪ سرباره نسبت به نمونه مرجع جذب آب بیشتری دارد. همچنین، سرباره بر نفوذپذیری نمونه‌ها تأثیر

دارد. همچنین، استفاده از ۷۰٪ سنگدانه لیکا و ۴۰٪ سرباره در محیط آزمایشگاهی، جذب آب را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا در سن ۹۱ روز به ترتیب ۴/۲٪، ۵/۸٪، ۶/۷٪، ۷/۹٪ و ۸/۷٪ جذب آب را نشان می‌دهد. در حالی که نمونه‌های لیکا به ترتیب ۶٪، ۷٪، ۷/۲٪، ۸/۴٪ و ۹٪ و ۱۱٪ جذب آب دارد.



شکل ۱۸. رابطه بین جذب آب در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای دارای سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا

Fig. 18. Relationship between water absorption at 28 and 91 days of slag cement concretes containing scoria and Leca aggregates

مهمی در سازه‌های بتنی ایفا می‌کند.

۳-۷-۱- عمق نفوذ آب عمل‌آوری شده آب شرب

نتایج عمق نفوذ آب عمل‌آوری شده با آب شرب در شکل ۱۹ نشان می‌دهد که با افزایش میزان سنگدانه‌های اسکوریا، عمق نفوذ آب افزایش می‌یابد. اما با گذشت زمان، این مقدار کاهش می‌یابد. نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا در سن ۹۱ روزه به ترتیب ۳۱، ۳۴، ۴۱، ۴۶ و ۵۰ میلی‌متر عمق نفوذ آب را نشان می‌دهد. در حالی که نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب ۳۸، ۴۱، ۴۶، ۵۱ و ۵۷ میلی‌متر عمق نفوذ آب را دارد. همچنین، عمق نفوذ آب نمونه‌های لیکا بیشتر از نمونه‌های اسکوریا است.

۳-۷-۲- عمق نفوذ آب در دمای آزمایشگاهی

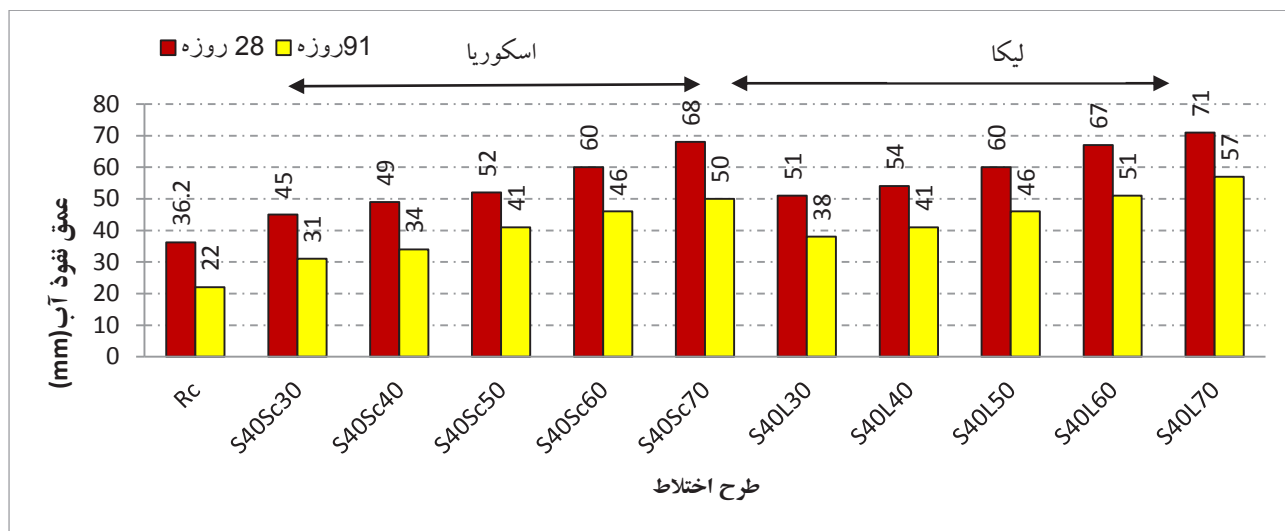
در شکل ۲۰، نتایج عمق نفوذ آب عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش میزان سنگدانه اسکوریا، عمق نفوذ آب افزایش می‌یابد. عمق نفوذ آب نمونه‌های لیکا در این شرایط نیز بیشتر از نمونه‌های اسکوریا است. نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا در سن ۹۱ روزه به ترتیب ۲۰، ۲۴، ۳۰، ۳۸ و ۴۴ میلی‌متر عمق نفوذ آب را نشان می‌دهد. در حالی که نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب ۲۰، ۲۸، ۳۴، ۴۰ و ۴۵ میلی‌متر عمق نفوذ آب را دارند.

دارد و باعث بهبود ساختار تخلخل می‌شود. سنگدانه‌های متخلخل نیز جذب آب بالایی دارد و نمونه‌هایی با درصد بالای این سنگدانه‌ها، جذب آب بیشتری دارد. نتایج این پژوهش را می‌توان با تحقیق رضانی‌دربند [۴۱] درباره خواص مکانیکی و جذب آب بتن سبک مقایسه کرد. نتایج نشان‌دهنده نرخ جذب آب بالای این بتن‌ها است.

نمودار همبستگی میان دو عامل سن ۲۸ روزه و سن ۹۱ در شکل ۱۸ نشان داده شده است. این نمودار مقاومت فشاری به جذب آب در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای با سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا را نمایش می‌دهد. تغییرات خطای جذب آب عمل‌آوری شده با آب شرب در سن ۹۱ روزه برحسب سن ۲۸ روزه بین ۸/۵۱۸٪ تا ۱۴/۵۶۱٪ است. در دمای محیط آزمایشگاهی، این مقدار بین ۱۰/۱۲۹ تا ۱۱/۸۵۵ می‌باشد. با دقت قابل قبول، می‌توان جذب آب در سن ۹۱ روزه را بر اساس سن ۲۸ روزه پیش‌بینی کرد. همچنین، رابطه خطی با ضریب تعیین در آب شرب ۰/۹۴۹۵ و در دمای محیط ۰/۹۴۰۴ در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه برقرار است.

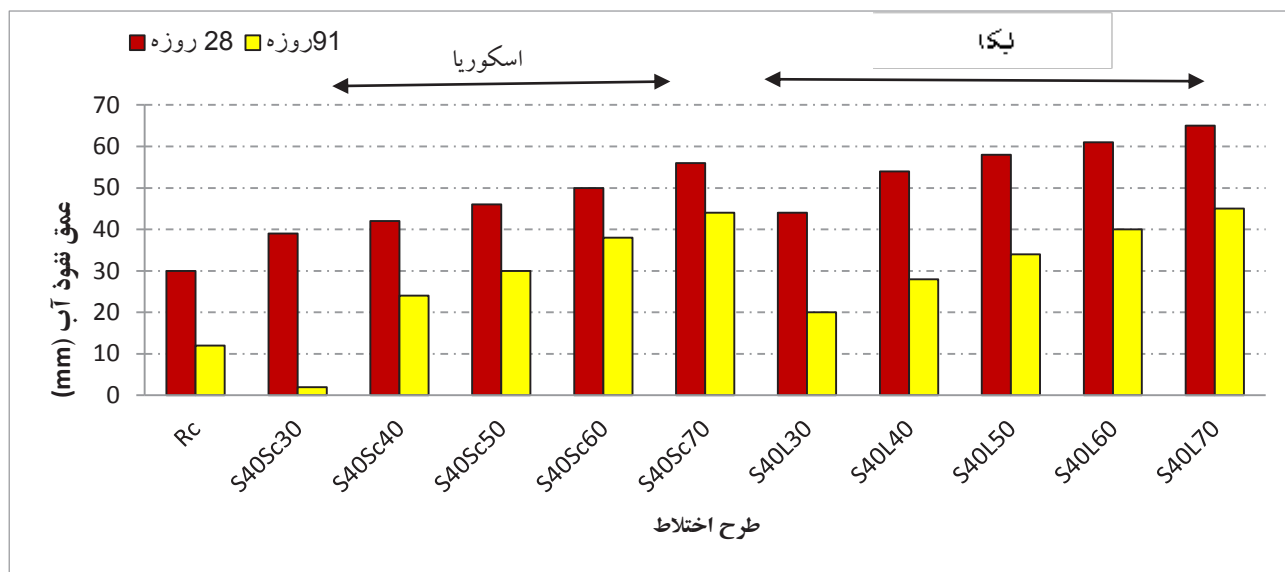
۳-۷-۳- آزمایش نفوذپذیری آب

نفوذپذیری معمولاً با محاسبه مقدار آب تحت فشار در یک دوره ۷۲ ساعته تعیین می‌شود. با اندازه‌گیری عمق نفوذ آب پس از شکستن نمونه‌ها، می‌توان به معیاری برای نفوذپذیری بتن دست یافت. نفوذ آب به داخل بتن می‌تواند به خوردگی و ترک خوردن آن منجر شود. بنابراین، نفوذ آب نقش



شکل ۱۹. نتایج عمق نفوذ نمونه‌ها عمل‌آوری شده با آب شرب

Fig. 19. Penetration depth results of samples cured with drinking water



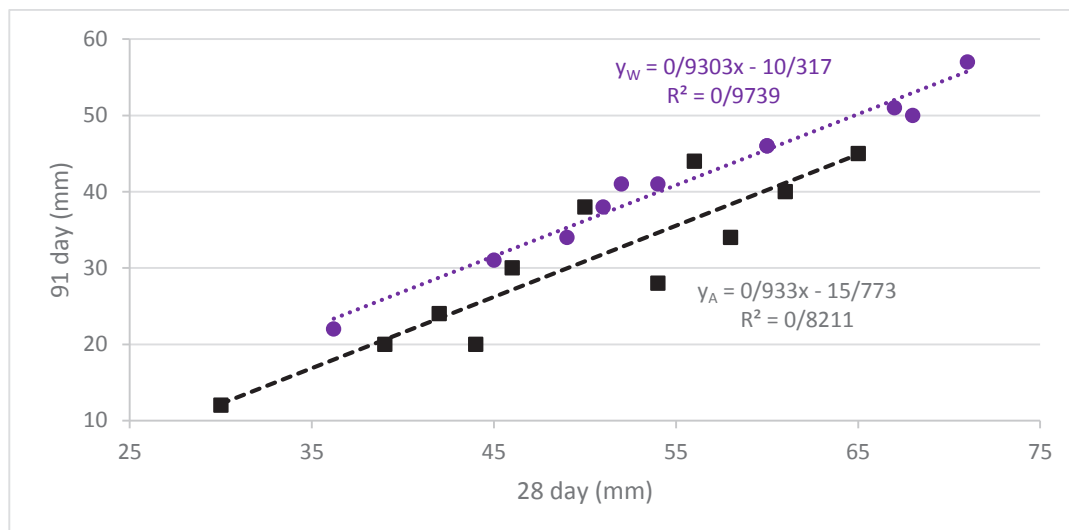
شکل ۲۰. نتایج عمق نفوذ نمونه‌ها عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاهی

Fig. 20. Penetration depth results of samples cured at laboratory temperature

عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاهی اسکوریا نسبت به لیکا عمق نفوذ آب کمتری نشان داد. نتایج این پژوهش را می‌توان با پژوهش نادری و همکاران [۴۲] تحت عنوان روشی دقیق برای تعیین نفوذپذیری آب در بتن و مصالح ساختمانی مقایسه کرد. با افزایش میزان سنگدانه‌های متخلخل، عمق نفوذپذیری آب نیز افزایش می‌یابد. نمونه ساخته شده با ۷۰٪ سنگدانه لیکا در

۳-۷-۳- تحلیل نتایج عمق نفوذ آب

آزمایش عمق نفوذپذیری آب بتن یک آزمایش استاندارد نیست. نتایج روش‌های متداول تعیین نفوذپذیری عمدتاً کیفی و مقایسه‌ای هستند. نتایج این تحقیق نشان داد که عمق نفوذ در نمونه‌های عمل‌آوری شده با آب شرب در نمونه‌های لیکا بیشتر از نمونه‌های اسکوریا است، درحالی که نمونه‌های



شکل ۲۱. رابطه بین عمق نفوذ در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای دارای سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا

Fig. 21. Relationship between penetration depth at 28 and 91 days of slag cement concretes containing Scoria and Leca aggregates

روی نمونه‌های بتن در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه انجام شدند. نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر است:

- نمونه‌ای که شامل ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا و ۴۰٪ سرباره فولاد اهواز بود، بیشترین میزان اسلامپ را در بین طرح‌ها نشان داد. این موضوع بیانگر روانی مطلوب مخلوط در شرایط یادشده است که می‌تواند به توزیع مناسب‌تر مواد در قالب و سهولت اجرا منجر شود.
- بیشترین وزن مخصوص بتن مربوط به نمونه‌هایی با ۳۰٪ سنگدانه اسکوریا و ۳۰٪ لیکا بود. این ترکیب نشان می‌دهد که حضور همزمان دو نوع سنگدانه سبک می‌تواند توازن مناسبی بین سبکی و چگالی ایجاد کند.
- نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا که در آب شرب عمل‌آوری شده‌اند، بالاترین مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه را نشان دادند. این امر بیانگر تأثیر مثبت عمل‌آوری مناسب و انتخاب درصد بهینه جایگزینی بر فرآیند هیدراسیون و توسعه مقاومت می‌باشد.
- نتایج مقاومت کششی (شکست دینیم‌شدگی) حاکی از آن است که نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا که در آب شرب عمل‌آوری شده‌اند، در سن ۹۱ روزه دارای بالاترین مقاومت کششی نسبت به طرح مرجع هستند. این موضوع، نشان‌دهنده تأثیر مثبت دانه‌بندی مناسب و عمل‌آوری مرطوب بر مقاومت کششی بتن است.

محیط آب شرب، بیشترین عمق نفوذ آب را نشان داده است.

نمودار همبستگی میان دو عامل سن ۲۸ روزه و سن ۹۱ در شکل ۲۱ ارائه شده است. این نمودار مقاومت فشاری به عمق نفوذ آب در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای را نشان می‌دهد. دامنه تغییرات خطای نفوذ آب عمل‌آوری شده با آب شرب در سن ۹۱ روزه بین ۷/۱۷۴٪ تا ۶/۸۸۱٪ است. در دمای محیط آزمایشگاهی، این مقدار بین ۱۸/۸۴۴٪ تا ۱۸/۳۹۵٪ می‌باشد. این نتایج امکان پیش‌بینی دقیق جذب آب در سن ۹۱ روزه بر اساس سن ۲۸ روزه را فراهم می‌کند. همچنین، رابطه خطی بین ضریب تعیین در حوضچه آب شرب ۰/۹۷۳۹ و در دمای محیط ۰/۸۲۱۱ در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه برقرار است.

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

این پژوهش در ادامه تحقیق ساجدی و بهرامی‌نیا [۲۰] انجام شده است، که به بررسی تأثیر سرباره کارخانه فولاد اهواز بر خواص بتن‌های سیمان - سرباره‌ای می‌پردازد. در این تحقیق، ۴۰٪ سرباره شرکت فولاد اهواز به عنوان ترکیب بهینه در نظر گرفته شده است.

هدف، توسعه بتن‌های سازگار با محیط زیست است. این بتن‌ها با استفاده از پوزولان سرباره تولیدی در شرکت فولاد اهواز و سنگدانه‌های طبیعی اسکوریا و لیکا ساخته شدند. آزمایش‌های مختلف خواص مکانیکی و دوام بر

- نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب شرب با ترکیب ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا در سن ۹۱ روزه، کمترین میزان جذب آب را داشتند. این ترکیب به عنوان طرح بهینه از منظر نفوذپذیری و دوام شناسایی شد.
- بررسی عمق نفوذ آب تحت شرایط عمل‌آوری در آب شرب و دمای محیط نشان داد که نمونه حاوی ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا در سن ۹۱ روزه به ترتیب دارای عمق نفوذ ۳۴ و ۴۱ میلی‌متر بودند. کاهش عمق نفوذ نشان‌دهنده ساختار متراکم‌تر و نفوذپذیری کمتر این ترکیب است.
- در نهایت، جایگزینی همزمان ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و ۴۰٪ سنگدانه لیکا به جای ۴۰٪ سرباره فولاد اهواز منجر به بهبود مناسب و مورد توجه خواص مکانیکی در سن ۹۱ روزه شد. این ترکیب به عنوان طرح بهینه نهایی از منظر عملکرد مقاومتی و دوام بتن در این تحقیق پیشنهاد می‌شود.

منابع

- [1] Sajedi, S.F.; Darash, F. 2019, Experimental Study of Workability and Mechanical Properties of Concrete Containing Powder Glass and Mineral Waste Glass with Separate and Simultaneous Applications. Amirkabir Journal of Civil Engineering. Vol. 50(6), pp. 1155-1176
- [2] Emam Ali, E.; Al-Tersawy S., 2012 "Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self-compacting concrete", Construction and Building Materials, Vol. 35, pp. 785-791.
- [3] Luhar, S; Cheng, TW; Nicolaides, D; Luhar, I; Panias, D; Sakkas K. 2019, Valorisation of glass waste for development of Geopolymer composites–Mechanical properties and rheological characteristics: A review. Construction and Building Materials. Vol. 220, pp. 547-564.
- [4] Moufti, M.; Sabtan, R.; El-Mahdy, A.A.; Shehata O., 2000, Assessment of the industrial utilization of Scoria materials in central Harrat Rahat, Saudi Arabia, Engineering Geology, Vol. 57, pp. 155–162.

[۵] مجدی، ع؛ شکرچی زاده، م؛ جعفری، ا؛ علی لیبر، ن، ۱۳۹۰، «بررسی ظرفیت مقاومتی سبکدانه اسکوریا به منظور کاربرد در بتن

سبکدانه سازه‌ای»، اولین کنفرانس ملی بتن سبک، تهران. [۶] شکرچی زاده، م؛ علی لیبر، ن؛ جلیلی، م، ۱۳۹۰، «راهنمای ساخت بتن سبکدانه سازه‌ای»، انتشارات علم و ادب با همکاری انستیتو مصالح ساختمانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، چاپ اول. [۷] نادری، م؛ بنیادی، ع، ۱۳۹۰، «بتن سبک ساخته شده با لیکا و مقایسه آن با بتن معمولی از لحاظ مقاومت فشاری به روش پیچش و جک فشاری»، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان.

[۸] صدرممتازی، ع؛ هوشمندی دیارجانی؛ کهنی، ر، ۱۳۹۹، «بررسی مشخصات مکانیکی و دوام در برابر محیط اسیدی بتن سبک ژئوپلیمری بر پایه سرباره حاوی سبکدانه اسکوریا»، دوازدهمین کنفرانس ملی بتن، تهران.

[۹] رضانی زاده دربند، م، ۱۴۰۲، «بررسی خواص مکانیکی بتن سبک سازه‌ای ساخته شده با سبکدانه های لیکا، اسکوریا و پرلیت تحت تاثیر دما»، هشتمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، سازه و زلزله، تهران

[۱۰] رضانی زاده دربند، مهدی، ۱۴۰۱، «بررسی خواص مکانیکی و جذب آب بتن سبک سازه ای ساخته شده با سنگدانه لیکا و اسکوریا»، اولین رویداد مدیریت بحران ایران قوی، تهران.

[۱۱] پورحسین پریزاد، سبحان، ۱۴۰۲، «طراحی طرح اختلاط بتن سبک خودتراکم حاوی سبکدانه اسکوریا»، بیست و دومین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست، شیروان

[۱۲] شهرامی، ش، شکیبپور، ا، توکلی، ع، ۱۳۹۶، «بررسی و مقایسه تاثیر استفاده از سبکدانه لیکا و سبکدانه اسکوریا بر روی مقاومت بتن سبک»، نهمین کنفرانس ملی بتن، قرچک.

[13] Gong, R, Qi,Y, Lian, G, Gao ,X, Yao ,F, Srinivasan, V, Liu,Y, Liu, B, Dong, X, 2024, Developing poplar wood into a green structure-decoration integrated material for prefabricated wooden building application, Journal of Building Engineering, Vol 90.

[14] Mahdi, Z, Obaidi, H, Abdul Rahman, E, 2024, Study of some properties of sustainable lightweight concrete-based on epoxy, scoria and charcoal, AIP Conference Proceedings, Vol 3105, Issue 1.

[15] Neville A, M, 2004, Properties of volcanic scoria-based lightweight concrete. Mag Concr Res. Vol 56(2), pp111–120.

[16] Degefa A, Tiku S. 2019, Suitability of scoria as fine

- [29] ASTM C172, "Testing fresh concrete in the field", (2017).
- [30] British Standards Institution, BS 1881, Part 2, Methods of testing fresh concrete, London, BSI, (1970).
- [31] ASTM C143, "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete", (2017).
- [32] ASTM C138, "Método de Ensayo Normalizado de Densidad (Peso Unitario), Rendimiento, y Contenido de Aire (Gravimétrico) Del Concretot", (2017).
- [33] British Standards Institution, BS 1881, Part 2, Methods of testing fresh concrete, London, BSI, (1970).
- [34] ASTM C496-96, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", (1996).
- [35] ACI 222 R-01, 222R-01: Protection of Metals in Concrete against Corrosion, (2010).
- [36] Mazloom, M, Ramezani pour, A, Brooks, J, J, 2004 "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete", Cement & Concrete Composites, vol. 26, pp. 347-357.
- [37] DIN 1991) 5-1048), "Testing concrete; testing of hardened concrete (specimens prepared in mould)", Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany
- [38] مومنی، ک، و قویدل، ر. (۱۳۹۹). بررسی رسانایی هیدرولیکی و گرفتگی بتن های نفوذپذیر سبک حاوی لیکا و اسکوریا. مهندسی عمران (فنی و مهندسی مدرس)، شماره ۲۰(۳)، صص ۱۶۱-۱۷۴.
- [39] خانزادی، م، چاله کایی، ع، احمدی، ر، ۱۳۸۹، ساخت بتن سبکدانه پرمقاومت حاوی اسکوریا و لیکا، دومین کنفرانس ملی بتن ایران، تهران.
- [40] حسن زاده، م، کرمی، ع، ملکی، م، حسن زاده، ف، ۱۳۹۰، «بررسی برخی از خصوصیات ملات حاوی سرباره های ذوب آهن اصفهان»، سومین کنفرانس ملی بتن ایران.
- [41] ASTM C511, "Standard Specification for Seamless Stainless Steel Mechanical Tubing", (2018).
- [42] Ahmadi, B, Shekarchi, M, 2010 "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material", Cement & Concrete Composites, vol. 32, pp. 134-141.
- aggregate and its effect on the properties of concrete. Sustainability. Vol 11(17), pp4647.
- [17] Gencil O, Brostow W, Ozel C, Filiz M. 2017, Effect of scoria aggregate on various specific aspects of lightweight concrete. Int J Concr Struct Mater. Vol 11, pp 345-359.
- [18] Bahrami A, Ghasemi M. 2024, Physical and Mechanical Properties of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete. Buildings. Vol 14(6), pp1871.
- [19] Wójcik M, Grzybowska K. 2021, Mechanical properties of lightweight expanded clay aggregate (LECA) concrete. Ann Warsaw Univ Life Sci-SGGW, Land Reclam. Vol 53(4), pp 339-349.
- [۲۰] ساجدی، س ف، بهرامی نیا، غ ع. ۱۴۰۲، «بررسی آزمایشگاهی تاثیر سرباره کارخانه فولاد اهواز برخواص بتن های سیمان - سرباره ای». تحقیقات بتن شماره ۱۶، صص ۷۹-۹۳.
- [۲۱] رمضانپور، ع، ۱۳۶۹، "نقش مواد افزودنی در تکنولوژی بتن"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.
- [22] ASTM C150, "Standard Specification for Portland Cement", (2004).
- [۲۳] استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۴۰، ۱۳۸۳، «ماده مرجع مورد مصرف در تعیین مقاومت خمشی و فشاری سیمان، ویژگی ها و روش آزمون».
- [۲۴] مستوفی نژاد، د، نظری منفرد، ح، ۱۳۸۵، «افزودن سرباره و پودر سنگ آهک به بتن جهت افزایش دوام در محیط سولفاتی»، پژوهشنامه حمل و نقل، سال سوم، شماره دوم.
- [۲۵] استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۲، ۱۳۹۴، استاندارد ویژگی های سنگدانه های بتن
- [26] ASTM C128, "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate", (2012).
- [۲۷] آئین نامه بتن ایران (آبا)، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، نشریه شماره ۱۲۰، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، چاپ سوم، سال ۱۳۸۱.
- [28] Kohistani A, S, Singh , K, A Review-Utilization of Plastic waste and Alccofine in Self-Compacting Concrete, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). (2018), vol. 04, pp 1565-1568

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Gh. A. Bahraminia, S. F. Sajedi, F. Moghadas Nejad, *Investigating the Effect of Light Aggregate and Curing Methods on the Properties of Cement-Slag Concretes*, Amirkabir J. Civil Eng., 57(7) (2025) 1289-1316.

DOI: [10.22060/ceej.2025.23341.8146](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23341.8146)

