



Experimental study of the effect of slag of Ahvaz Steel Plant on the properties of cement-slag mortars

S. F. Sajedi^{*1}, S. H. Hashemi²

¹ Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

² Department of Civil Engineering, Qeshm Branch, Islamic Azad University, Qeshm, Iran

Review History:

Received: Aug. 15, 2021

Revised: Mar. 15, 2021

Accepted: Apr. 09, 2022

Available Online: Apr. 17, 2022

Keywords:

Cement-slag mortar

Mechanical properties

Durability

Slag

Ahvaz Steel Plant

ABSTRACT: One way to improve cement production is to replace some of it with inexpensive and available additives. Considering the importance of using cement mortars in the construction of masonry structures, the effect of slag produced by Ahvaz Steel Plant, which is a special slag due to significant differences in its chemical composition compared to common slags in the world. The rheological, mechanical and durability properties of mortars were studied. The effect of using slag powder from Ahvaz Steel Plant on the production of cement-slag mortars was investigated. The powder of this slag was replaced with a part of cement at 20% to 70% with 10% increases and the specimens were tested at the ages of 28, 56, 91 and 120 days. Flow table, compressive, flexural, and electrical strength as well as two penetration depth and water absorption tests were performed. The results showed that slag powder at 28 and 56 days of age did not have much effect on the mechanical properties of the specimens, but at 120 days of age the compressive and flexural strengths of specimens containing 20% and 30% of slag powder increased compared to the reference sample; From a technical and economic point of view, 30% is suggested as the optimal replacement percentage. Water absorption at 120 days of age in specimens containing 20% and 30% slag increased by 30% and 61% and water penetration depth of 25% and 33%, respectively, compared to the reference specimen; but the electrical resistance decreased by 11% and 23%, respectively.

1- Introduction

Mortar is a paste material that is used to connect building materials to each other and to create a bed for load distribution in the interior and exterior coatings of buildings. Mortar should be considered as one of the oldest building materials that is used to bond stone pieces with other building and plating parts. Remains of building mortars or plastering mortars date back to about 5000 years ago, but after the 1950s, cement-based mortars gradually found their place among other types of mortars and were considered as one of the most widely used mortars [1]. In the present study, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% and 70% of the slag of Ahvaz Steel Plant in powder form replaced part of the cement used in making mortars and the specimens were tested at the ages of 28, 56, 91 and 120 days. Flow table, compressive and flexural strengths, electrical resistance, water penetration depth and volumetric water absorption tests were performed on cement-slag mortar specimens.

2- Methodology

Consumable cement in the research was prepared from Karun Cement Factory located in Khuzestan, and has met

the requirements of Iran Standard 389 [2] and ASTM C150 [3]. Consumer slag is a product of Ahvaz Steel Factory. The chemical composition of cement and slag used is presented in Table 1. Table 2 provides a complete comparison of the common steel slag types in the world with the slag used in the research. The biggest differences between the chemical components of slag in this study and other slags in other countries of the world are related to silica (silicon oxide) and ferrite (iron oxide 3). The minimum and maximum silica content in the slag of other countries are 34.2% and 36.0%, respectively, and in Ahvaz steel slag are 20.1%. The percentage of silica in the slag of this study is 41% and 44% lower than the minimum and maximum amount of silica in the slag of other countries, respectively. Also, the percentage of slag ferrite in this study is 14727% and 112% higher than the lowest and highest slag ferrite in other countries, respectively. These percentages indicate the existence of extraordinary differences in two important chemical compounds (silica and ferrite) affecting the properties of mortars produced using this research slag compared to other common slags in the world that have caused adverse changes in the properties of research mortars.

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



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

LOI	MnO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Properties
1.06	0.09	2.0	0.88	0.02	4.0	0.41	61.7	4.6	0.08	4.16	21.0	Karun cement type 2
0.00	0.29	0.06	0.17	0.00	8.3	1.3	19.5	43.0	0.48	5.7	20.1	Ahvaz Steel Plant slag

Table 2. XRF test results performed on steel slag in different countries of the world (%) [4]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MnO	Country	Reference
35.04	13.91	0.29	39.43	6.13	0.34	0.39	0.44	0.42	0.43	Australia	Collins & sanjayan (2001)
35.30	9.90	0.60	34.70	14.60	0.30	0.40	1.00	0.50	---	Canada	Shi (1992)
36.00	9.00	1.30	41.00	8.00	---	---	1.10	0.90	0.85	Finland	Gjorv (1989)
35.40	12.90	0.30	41.80	6.80	0.26	0.38	1.00	1.65	0.42	Japan	Sato et al (1986)
35.00	13.50	20.30	36.50	7.50	---	---	0.60	2.00	1.25	Norway	Gjorv (1989)
35.30	9.40	1.10	39.70	10.03	0.98	---	1.16	0.72	0.98	Sweden	Byfors et al (1989)
34.90	7.12	1.02	42.87	10.30	0.24	0.50	1.16	0.39	---	America	Hogan & Rose (1986)
34.20	11.30	1.11	41.60	8.21	0.26	0.40	0.48	0.77	0.25	Ukraine	Osborne & Singh (1995)
20.1	5.7	43.00	19.5	8.3	---	0.17	0.06	1.30	0.29	Iran	Razi Metallurgical Laboratory- Iran (2022)

Table 3. Details of the research mix design (g/cm³)

SP	Water	Slag	Cement	Sand	Design code	Description of mortar	Row
9	600	0	1500	4125	MC	Reference	1
9	600	300	1200	4125	MC80S20	with 20% slag	2
9	600	450	1050	4125	MC70S30	with 30% slag	3
9	600	600	900	4125	MC60S40	with 40% slag	4
9	600	750	750	4125	MC50S50	with 50% slag	5
9	600	900	600	4125	MC40S60	with 60% slag	6
9	600	1050	450	4125	MC30S70	with 70% slag	7

The fine aggregates used in this study are crushed and washed sand with a specific gravity of 2.64 g/cm³, in accordance with ASTM C127 [5]. These aggregates were prepared from the supply of consumed sand from the mines of Shushtar city in Khuzestan province. The water needed to make mortars and curing specimens in all mixing designs was Ahvaz drinking water. To make the specimens, first designs were made based on previous research records [6-8], fresh mortar tests were performed on the specimens, and finally the reference mortar mixing design was selected, and then the rest of the designs were made and the specimens were tested. Seven mixing designs were made. The MC70S30, for example, means that the mortar contains 30% slag as a

substitute for cement and 70% as cement. In all designs, the ratio of water to cement was 0.41. Details of the research mix designs are provided in Table 3.

3- Results and discussion

Compressive strength (CS) test was performed on specimens at 28, 56, 91 and 120 age days based on ASTM C109 [9]. CS changes are shown in Figure 1. Changes in water penetration depth in terms of CS of specimens at 28 and 120 days of age are shown in Figure 2.

4- Conclusions

In this research, slag produced in Ahvaz Steel Plant was

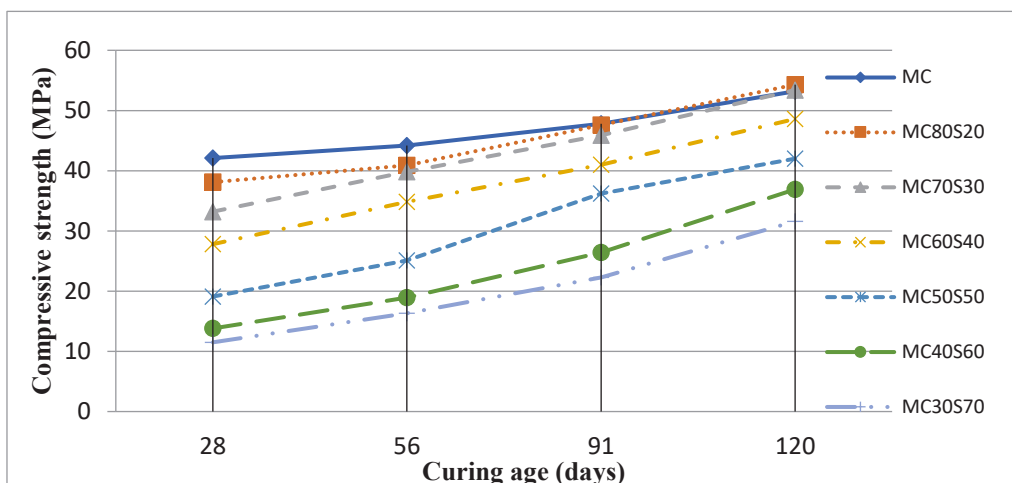


Fig. 1. CS changes of specimens containing slag powder of Ahvaz Steel Plant at different curing ages

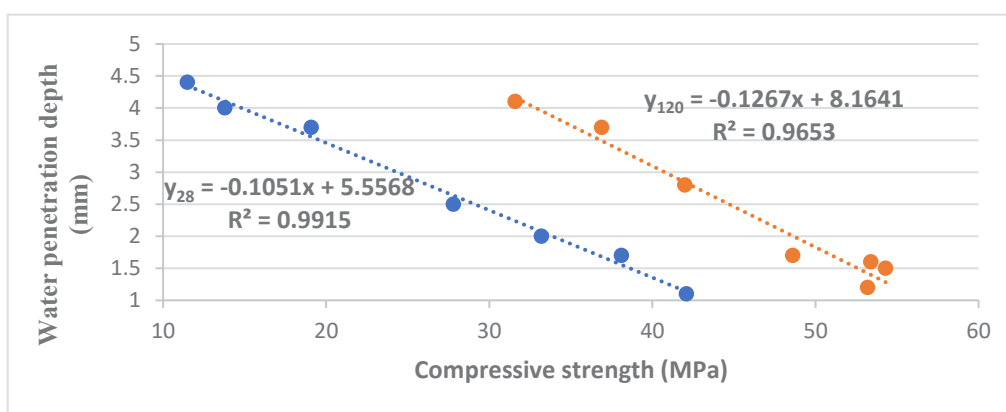


Fig. 2. Relation between water penetration depth and CS of cement-slag specimens at 28 and 120 age days

used to develop the production of environmentally friendly cement-slag mortars. The key results are as follows:

- The flow table test showed that the presence of slag in the mortars increased their flow.
- Slag at 28 and 56 days of age did not have a significant effect on the mechanical properties of mortars, but at 91 days of age, the CS of specimens containing 20% slag was close to the strength of the reference specimen.
- At 120 days of age, specimens containing 20% and 30% slag showed an increase in CS compared to the reference specimen.
- In the specimens containing slag compared to the reference one, a decrease in electrical resistance occurred.
- In the results of the water penetration test, specimens containing 20%, 30% and 40% slag at the ages of 56, 91 and 120 days, no significant change is observed; however, specimens containing 50%, 60% and 70% slag showed a greater difference in water penetration depth than specimens containing lower replacement percentages.

References

- [1] Flowcem R900 brand superplasticizer, Middle East Durochem factory, in.
- [2] E. Güneysi, M. Gesoğlu, E. Özbay, Effects of marble powder and slag on the properties of self-compacting mortars, *Materials and Structures*, 42(6) (2009) 813-826.
- [3] M. Hassanzadeh, Karami, A, Maleki, M, Hassanzadeh, F, A study of some properties of mortar containing Isfahan steel slag, in: the third national conference of Iranian concrete 2011.
- [4] A. Jarahi, Maghsoudi, V, Mostofinejad, D, The effect of blast furnace slag replacement on the compressive strength and electrical resistance of mortar, in: the third international conference on new approaches in science, engineering and technology 2015.
- [5] M. Mazloom, A. Ramezani-pour, J. Brooks, Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, *Cement and Concrete Composites*, 26(4) (2004) 347-357.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. F. Sajedi, S. H. Hashemi, *Experimental study of the effect of slag of Ahvaz Steel Plant on the properties of cement-slag mortars*, Amirkabir J. Civil Eng., 54(9) (2022) 721-724.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20414.7416





بررسی آزمایشگاهی تاثیر سرباره کارخانه فولاد اهواز بر خواص ملات های سیمان - سرباره ای

سیدفتح اله ساجدی^{*}، سیدحمید هاشمی

۱- دانشکده مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲- دانشکده مهندسی عمران، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۴
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸

کلمات کلیدی:

ملات سیمان - سرباره ای
خواص مکانیکی
دوام، پودر سرباره
کارخانه فولاد اهواز

خلاصه: یکی از راه‌های بهسازی تولید سیمان، جایگزینی بخشی از آن با مواد افزودنی ارزان قیمت و در دسترس است که پوزولان های طبیعی و مصنوعی از جمله این مواد هستند. با توجه به اهمیت کاربرد ملات های سیمانی در ساخت سازه‌های بنایی و هم چنین تأثیر استفاده از سرباره بر خواص این نوع ملات ها، تاثیر سرباره تولیدی از کارخانه فولاد اهواز که به دلیل تفاوت قابل توجه در ترکیبات شیمیایی آن نسبت به سرباره های متداول در دنیا یک سرباره خاص است، بر خواص رئولوژی، مکانیکی و دوامی ملات ها بررسی شده است. در این تحقیق، تاثیر استفاده از پودر سرباره کارخانه فولاد اهواز در ساخت ملات های سیمان - سرباره ای بررسی شد. پودر این سرباره در درصدهای ۲۰ تا ۷۰ با افزایش های ده درصدی، جایگزین بخشی از سیمان شد و نمونه ها در سنین ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روزه تحت آزمایش قرار گرفتند. آزمایش های میز جریان، مقاومت های فشاری، خمشی، و الکتریکی، و همین طور دو آزمایش عمق نفوذ و جذب آب انجام شدند. نتایج نشان داد که پودر سرباره در سنین ۲۸ و ۵۶ روزه بر خواص مکانیکی نمونه ها اثر زیادی نداشت، اما در سن ۱۲۰ روزه مقاومت های فشاری و خمشی نمونه های حاوی ۲۰٪ و ۳۰٪ پودر سرباره، نسبت به نمونه مرجع افزایش داشتند؛ از منظرهای فنی و اقتصادی، ۲۰٪ به عنوان درصد بهینه جایگزینی پیشنهاد می شود. جذب آب در سن ۱۲۰ روزه در نمونه های حاوی ۲۰٪ و ۳۰٪ سرباره، به ترتیب ۳۰٪ و ۶۱٪ و عمق نفوذ آب ۲۵٪ و ۳۳٪، نسبت به نمونه مرجع افزایش نشان دادند؛ اما مقاومت الکتریکی به اندازه ۱۱٪ و ۲۳٪ کاهش یافتند.

۱- مقدمه

دلایل اقتصادی، فنی و زیست محیطی متداول گردیده است [۳]. در صورتی که این ماده آسیاب شود (با اندازه دانه کمتر از ۴۵ میکرون) به پوزولان تبدیل می شود که قابلیت کاربرد در ساخت سیمان و انواع محصولات پایه سیمانی را خواهد یافت. نکته قابل توجه واکنش پذیری پوزولانی ضعیف پودر سرباره تولیدی در کشور می باشد که این موضوع ناشی از ترکیبات شیمیایی این ماده بوده و به عنوان عامل اصلی دخیل در مصرف کم سرباره در ساخت سیمان و بتن می باشد [۴]. اولین تحقیقاتی (۱۷۷۴) که درباره پودر آسیاب شده سرباره به عنوان یک ماده سیمانی انجام شد، توسط فردی به نام لوریت^۱ بوده که از پودر سرباره در ساخت نوعی شفته آهکی استفاده کرد. پس از آن پودر سرباره در فرانسه (۱۹۸۹) در ساخت سیمان های سرباره ای که از پودر آسیاب شده سرباره فولاد و سیمان معمولی ساخته شدند، به کار برده شد که از این مخلوط در ساخت متروی پاریس استفاده گردید. هم اکنون پودر سرباره در تولید سیمان های آمیخته نزدیک به ۲۰٪ وزنی سیمان در اروپا

ملات ماده ای است خمیری که برای اتصال مصالح بنایی به همدیگر و ایجاد بستری برای توزیع بار در اندوهای داخلی و خارجی ساختمان ها مصرف می شود. ملات را باید یکی از قدیمی ترین مصالح ساختمانی دانست که از آن برای چسباندن قطعات سنگ با دیگر قطعات بنایی و اندودکاری استفاده می شود. آثار باقی مانده از ملات های بنایی یا ملات اندودکاری به حدود ۵۰۰۰ سال قبل برمی گردد، اما پس از دهه ۱۹۵۰ کم کم ملات های پایه سیمانی جای خود را در بین انواع دیگر ملات ها باز کرده و به عنوان یکی از پرمصرف ترین ملات ها محسوب شدند [۱]. با استفاده از طرح های تولید ملات آماده و جایگزین مواد افزودنی خشک با بخشی از سیمان، از هدر رفت سیمان و ملات در سازه های ساختمانی جلوگیری می شود و تحولی اساسی در مصرف سیمان صورت می گیرد [۲]. به منظور به کارگیری مصالح جایگزین سیمان و کاهش حجم سیمان تولیدی، استفاده از سرباره کوره آهن گدازی به

1 Laurette

^{*} نویسنده عهده دار مکاتبات: sajedi@iauhvaz.ac.ir



داد که پوزولان‌های طبیعی و سرباره مقاومت فشاری را کاهش می‌دهند، در حالی که میکروسیلیس در تمام سنین مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد، همچنین تمام پوزولان‌ها باعث بهبود خواص دوامی ملات‌ها به جز مقاومت در برابر کرناسیون می‌شوند. نهایتاً می‌توان ذکر کرد که از بین چهار پوزولان مصرفی، میکروسیلیس بهترین و پومیس ضعیف‌ترین عملکرد را داشته‌اند [۱۱]. جراحی و همکاران (۱۳۹۴) به تاثیر جایگزینی سرباره کوره بلند بر مقاومت‌های فشاری و الکتریکی ملات پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که ۱۵٪ و ۳۰٪ سرباره به ترتیب از نظر مقاومت فشاری و دوام بهترین درصدهای جایگزینی هستند [۱۲]. وین‌رایت و رای (۲۰۰۰) نشان دادند که جایگزینی بیش از ۸۵٪ سرباره تأثیر چندانی بر آب انداختگی بتن ندارد و در نمونه‌های حاوی سرباره میزان آب‌انداختگی کمتر از نمونه‌های سیمانی است [۱۳]. ساجدی (۲۰۱۲) در تحقیقی عنوان کرد که روش مکانیکی که طی آن پودر سرباره تولیدی با آسیاب بیشتر به ذرات ریزتر با و سطح مخصوص بالاتر تبدیل می‌شود، به عنوان یک راهکار عملی فعال‌سازی می‌باشد. در همین راستا، با افزایش سطح مخصوص ذرات سرباره، فعالیت پوزولانی این ماده افزایش می‌یابد و مقاومت و دوام خمیر، ملات و بتن‌های تولیدی افزایش بیشتری خواهد یافت [۱۴]. در خصوص نوآوری این تحقیق قابل ذکر است که طبق نتایج آزمایش XRF بر سرباره مصرفی (جدول ۱) مشهود است که درصد اکسید آهن^۵ موجود در سرباره کارخانه فولاد اهواز ۴۳٪ است، که بسیار زیاد است و با سرباره‌های متداول دنیا تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. با همین نگاه و با شدت کمتر می‌توان به درصد سلیس موجود در این سرباره نگریست. هدف اصلی انجام این تحقیق با استفاده از این نوع سرباره این است که تأثیرات این نوع سرباره متفاوت که تاکنون تحقیقات لازم روی آن انجام نشده، بر خواص رئولوژی، مکانیکی و دوام ملات‌های حاوی آن صورت پذیرد. لذا در تحقیق حاضر ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ از سرباره کارخانه فولاد اهواز به صورت پودر شده جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در ساخت ملات‌ها شدند و نمونه‌ها در سنین ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روزه تحت آزمایش‌های لازم قرار گرفتند. آزمایش‌های میز جریان، مقاومت‌های فشاری، خمشی و الکتریکی، عمق نفوذ آب و جذب آب حجمی بر نمونه‌های ملات‌های سیمان - سرباره‌ای انجام شدند.

استفاده می‌شود [۵]. آجوج و همکاران^۱ (۲۰۱۴) اثر پودر سنگ، ۳۰٪ سرباره آهن‌گذاری خیلی ریز و پوزولان‌های طبیعی و همچنین تأثیرات متقابل آن‌ها را به همراه فوق روان کننده پلی‌کربوکسیلات روی خواص رئولوژی ملات بررسی نمودند. نتایج نشان داد که افزایش درصد فوق روان کننده استفاده شده بر پایه کربوکسیلات باعث کاهش قابل قبولی در لزجت و تنش برشی ملات تازه می‌شود [۶]. لیوچونلین و همکاران^۲ (۲۰۱۱) بر روی امکان‌سنجی ساخت ملات با سرباره فولادی تحقیق انجام دادند و نتیجه شد که استفاده از سنگدانه‌های سرباره‌ای در بتن از نظر مقاومت فشاری مطلوب است، اما مقاومت خمشی را نسبت به بتن معمولی اندکی کاهش می‌دهد و جمع شدگی نسبت به بتن معمولی نیز کمتر است [۷]. گوئینزی و همکاران^۳ (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای بر روی ملات خودتراکم با کاربرد پودر سنگ مرمر و سرباره آهن، طرح اختلاط‌های مختلفی را با جایگزینی بخشی از سیمان با سرباره تهیه نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که افزودن پودر سنگ مرمر منجر به کاهش مقاومت فشاری می‌شود، در حالی که افزودن سرباره تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ندارد [۸]. حسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) برخی از خواص ملات حاوی سرباره کارخانه فولاد ذوب آهن اصفهان را بررسی کردند؛ در تحقیق آن‌ها که سرباره فولاد جایگزین ماسه شد، نتایج نشان داد که سرباره جایگزین ماسه به مقدار ۲/۵٪ حجم ماسه باعث افزایش مقاومت در سن ۴۲ روزه نسبت به نمونه مرجع گردید [۹]. صدرممتازی و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی به بررسی تأثیر میکروسیلیس و سرباره آهن‌گذاری بر خواص فیزیکی و مکانیکی ملات‌های سیمانی پرداختند. در این تحقیق اثر جایگزینی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ وزن سیمان با سرباره آهن‌گذاری و ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس جایگزین با سیمان به طور همزمان به عنوان پوزولان‌های مصنوعی بر خواص فیزیکی و مکانیکی ملات‌های سیمانی را مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که استفاده از میکروسیلیس و سرباره آهن‌گذاری به صورت جایگزین وزنی سیمان سبب بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی ملات‌های سیمانی می‌شود [۱۰]. رضانیان‌پور و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی و مقایسه خواص مکانیکی و دوام ملات‌های سیمانی حاوی پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی پرداختند. آن‌ها خواص مکانیکی و دوامی ملات‌های حاوی پومیس خاش و تراس جاجرود به عنوان پوزولان‌های طبیعی و سرباره کوره آهن‌گذاری اصفهان و میکروسیلیس به عنوان پوزولان‌های مصنوعی را بررسی و با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج تحقیق مذکور نشان

- 1 Ezziane et al.
- 2 Liu Chunlin et al.
- 3 Güneysi et al.

4 Wainwright and Rey
5 Fe₂O₃

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

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

MnO	LOI	SO ₃	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
۰/۰۹	۱/۰۶	۲/۰	۰/۸۸	۰/۰۲	۴	۰/۴۱	۶۱/۷	۴/۶	۰/۰۸	۴/۱۶	۲۱	سیمان نوع ۲ کارون
۰/۲۹	۰	۰/۰۶	۰/۱۷	۰	۸/۳	۱/۳	۱۹/۵	۴۳/۰	۰/۴۸	۵/۷	۲۰/۱	پودر سرباره کارخانه فولاد اهواز

جدول ۲. نتایج آزمایش XRF انجام شده روی سرباره فولاد در کشورهای مختلف جهان (%) [۱۷]

Table 2. XRF test results performed on steel slag in different countries of the world (%) [17]

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

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سیمان مصرفی

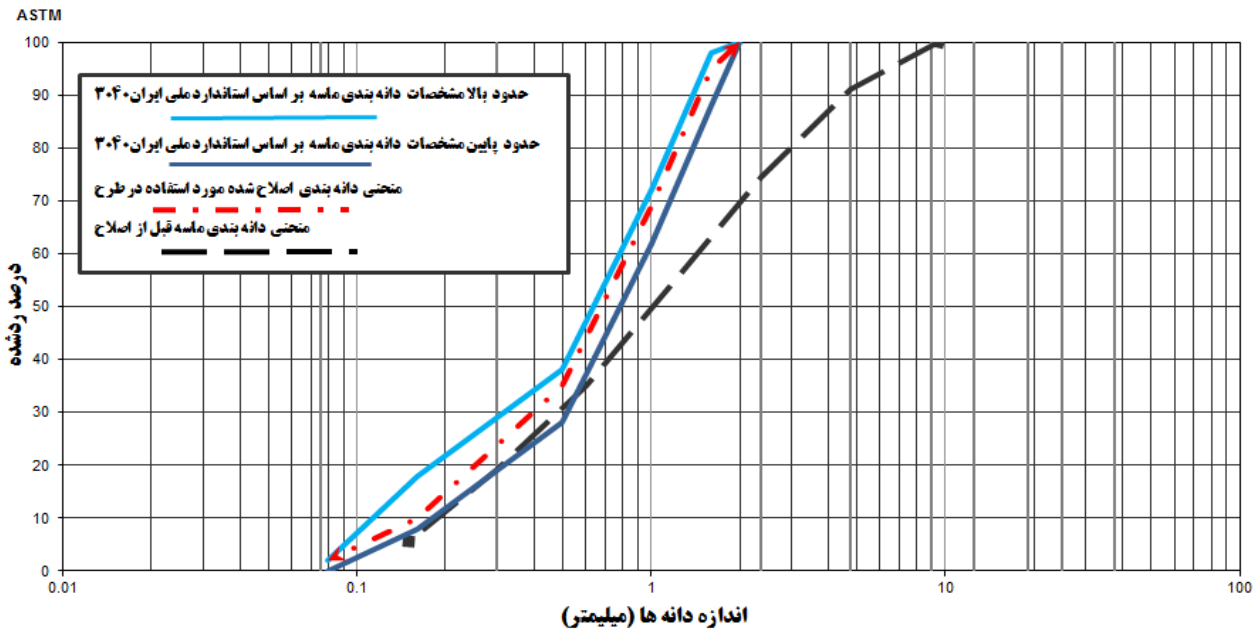
تبدیل به پودر سرباره، با توده ویژه وزن مخصوص $2/56 \text{ g/cm}^3$ تهیه و در شرایط مطلوب دپو و نگهداری شد، ترکیبات شیمیایی این سرباره که حاصل آزمایش طیف‌نگاری فلورسانس اشعه ایکس می‌باشد، در جدول ۱ داده شده است.

در جدول ۲ مقایسه کاملی از انواع سرباره‌های فولادی رایج در دنیا با سرباره کارخانه فولاد اهواز ارائه شده است. طبق این جدول بیشترین تفاوت موجود در اجزای شیمیایی سرباره این تحقیق با دیگر سرباره‌های موجود در دیگر کشورهای دنیا، مربوط به سیلیس (اکسید سیلیسیم) و فرایت (اکسید آهن ۳) است. میزان حداقل و حداکثر سیلیس در سرباره دیگر کشورها طبق این جدول به ترتیب $34/2\%$ و $36/0\%$ و در سرباره فولاد اهواز $20/1\%$ می‌باشند. درصد سیلیس در سرباره این تحقیق نسبت به حداقل و حداکثر میزان سیلیس در سرباره دیگر کشورها به ترتیب 41% و 44% کمتر است. همچنین، درصد فرایت موجود در سرباره این تحقیق نسبت به کمترین و

سیمان مصرفی در این تحقیق از کارخانه سیمان کارون واقع در خوزستان، با وزن مخصوص $3/10 \text{ g/cm}^3$ و سطح ویژه 2922 g/cm^2 تهیه و در شرایط مطلوب دپو و نگهداری شد و الزامات استاندارد ۳۸۹ ایران [۱۵] و استاندارد ASTM C150 را تامین نموده است [۱۶]، ترکیبات شیمیایی این سیمان که حاصل آزمایش طیف‌نگاری فلورسانس اشعه ایکس می‌باشد، در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۱-۲- سرباره کارخانه فولاد اهواز

سرباره فولادی مصرفی در این تحقیق از کارخانه فولاد اهواز به صورت سنگدانه تهیه و سپس به روش گندله یا پلت توسط کارخانه نرم کوبان ساوه



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه طبیعی تحقیق بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۴۰

Fig. 1. Natural sand grain size distribution curve of research according to Iranian National Standard No. 3040

سنگدانه‌ها از محل تأمین ماسه مصرفی از معادن شهرستان شوشتر در استان خوزستان تهیه شدند. آزمایش دانه‌بندی، طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۴۰ [۲۱]، انجام شد و منحنی دانه‌بندی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۱-۴- فوق روان کننده

در این تحقیق فوق روان کننده با نام تجاری Flowcem R900 که یک فوق روان کننده اصلاح شده از نسل سوم و کاهش دهنده شدید آب می‌باشد، از کارخانه دوروچم خاورمیانه^۱ تهیه گردید. مشخصات فنی این فوق روان کننده در جدول ۳ ارائه شده است. ضمناً آب این فوق روان کننده به عنوان بخشی از آب اختلاط در نظر لحاظ شده است [۲۱].

۲-۱-۵- آب

آب مورد نیاز جهت ساخت ملات‌ها و عمل‌آوری نمونه‌ها در تمام طرح اختلاط‌ها آب شرب خوزستان بود. نمونه‌ها پس از ساخت و قالب‌گیری در محیط‌های آب عمل‌آوری شدند. مشخصات شیمیایی آب شرب در جدول ۴ ارائه شده است.

بیشترین میزان فرایت در سرباره دیگر کشورها هم به ترتیب ۱۴۷۲۷٪ و ۱۱۲٪ بیشتر است. این درصدها بیانگر وجود تفاوت خارق‌العاده در دو ترکیب مهم شیمیایی (شامل سیلیس و فرایت) موثر بر خواص ملات‌های تولیدی با استفاده از سرباره این تحقیق نسبت به دیگر سرباره‌های متداول در دنیا هستند که باعث رخداد تغییرات نامطلوب در خواص ملات‌های تحقیق شده‌اند.

۲-۱-۳- ماسه

سنگدانه‌های ریز مصرفی در این تحقیق ماسه شکسته و شسته شده با وزن مخصوص $2/64 \text{ g/cm}^3$ ، مطابق با استاندارد ASTM C127 می‌باشد [۱۸]، آزمایش دانه‌بندی ماسه عبوری الک ۲۰۰ بر مبنای استاندارد ASTM C117 انجام گرفته است [۱۹]، همچنین آزمایش افت وزنی مصالح در مقابل سولفات سدیم طبق استاندارد ASTM C88 انجام گرفته است، این آزمایش مصالح دانه‌بندی به مدت ۷۲ ساعت در محلول سولفات سدیم قرار داده و سپس مصالح سنگی به مدت ۲۴ ساعت در کوره با حرارت ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا رطوبت کامل آن گرفته شود، این روال آزمایش ۵ سیکل تکرار و در نهایت مصالح سنگی الک می‌شود [۲۰]. این

جدول ۳. مشخصات فنی فوق روان کننده مصرفی در تحقیق

Table 3. Technical specifications of the superplasticizer used in the research

وزن مخصوص	کلرید محلول در آب	قلیائیت	pH
۱/۰۶	۰/۰۰۳۵	۰/۰۳۲	۳/۹۶

جدول ۴. مشخصات شیمیایی آب شرب خوزستان مصرفی در تحقیق

Table 4. Chemical characteristics of Khuzestan drinking water used in research

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

pH آب مصرفی ۷/۱۳ می‌باشد.

۲-۲- طرح اختلاط‌های تحقیق

برای ساخت نمونه‌ها ابتدا طرح‌هایی بر اساس سوابق تحقیقات قبلی ساخته شد [۹-۱۳]، آزمایش‌های ملات تازه بر روی آن‌ها انجام گرفت و نهایتاً با کمک استاندارد ۳۹۳ ملی ایران [۱۵]، طرح اختلاط ملات مرجع انتخاب گردید و سپس با توجه به طرح اختلاط مرجع، بقیه طرح‌ها ساخته شدند و نمونه‌های حاصل از آن‌ها تحت آزمایش قرار گرفتند. در این مطالعه اثرات پودر سرباره کارخانه فولاد اهواز بررسی شدند. سرباره با درصد‌های ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ جایگزین سیمان شدند و تعداد هفت طرح اختلاط که این طرح‌ها برای سنین ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روز با آزمایشات مکانیکی و دوام که تعداد نمونه‌ها ۳۶ نمونه مکعبی ۵×۵ و ۱۶ نمونه مکعبی ۱۶×۴ ساخته شده است که هر نمونه دارای آزمونه نیز می‌باشد ساخته شدند. روش نام‌گذاری طرح‌های اختلاط به این صورت است که MC بیانگر ملات سیمانی مرجع است، S بیانگر سرباره و عدد پس از حرف لاتین نام، بیانگر درصد استفاده از سرباره به عنوان جایگزین سیمان می‌باشد. به عنوان مثال MC70S30، به این معنی است که ملات دارای ۳۰٪ سرباره فولاد جایگزین سیمان و ۷۰٪ سیمان پرتلند است. در تمام طرح‌های اختلاط ارائه شده نسبت آب به سیمان معادل ۰/۴۱ بوده است. فرآیند اختلاط مصالح در مخلوط‌کن آزمایشگاهی ۵ لیتری صورت گرفت. جزئیات طرح اختلاط‌های ملات‌های تحقیق در جدول ۵ ارائه شده است.

۲-۲-۱- روش‌ها و آزمایش‌ها

قبل از ساخت نمونه‌های مدنظر برای تعیین میزان روانی ملات از آزمایش میز جریان طبق استاندارد ASTM C230 استفاده شده است [۲۱]. مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روزه از قالب‌های مکعبی ۵×۵×۵ سانتی‌مترمکعب بر اساس استاندارد ASTM C109 استفاده شده است [۲۲]. هر یک از قالب‌ها در سه لایه و هر لایه با ۲۵ ضربه چکش تراکم مخصوص، مطابق شکل ۲ با ملات پر شده است. سطح جانبی هر یک از نمونه‌ها بعد از بیرون آوردن از حوض با یکپارچه کنفی خشک شده (حالت اشباع با سطح خشک) و سپس در زیر جک ملات‌شکن قرار می‌گیرد [۲۳]. با توجه به اهمیت دوام در این تحقیق، جذب آب دراز مدت بر اساس استاندارد ASTM C642 انجام شده است. نمونه‌ها در سنین ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روز از حوضچه عمل‌آوری خارج شده و در کوره با درجه حرارت ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت قرار داده شدند و میزان جذب آب آن‌ها اندازه‌گیری شده است [۲۴]. آزمایش تعیین مقاومت خمشی در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بر اساس استاندارد ASTM C348 در قالب‌های ۱۶×۴×۴ سانتی‌مترمکعب انجام گرفته است [۲۵]. برای تعیین مقاومت الکتریکی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ACI 222 عمل گردید. این آزمایش با استفاده از دو صفحه مسی یا برنجی که بر سطح آزمونه بتنی اشباع از آب به کمک خمیر سیمان تازه می‌چسبد و مقاومت الکتریکی به

جدول ۵. جزئیات طرح اختلاط های تحقیق (g/cm^3)

Table 5. Details of the research mix design (g/cm^3)

ردیف	شرح طرح	نام طرح	وزن مصالح			
			ماسه	سیمان	سرباره	آب
۱	ملات مرجع	MC	۴۱۲۵	۱۵۰۰	۰	۶۰۰
۲	حاوی ۲۰٪ سرباره	MC80S20	۴۱۲۵	۱۲۰۰	۳۰۰	۶۰۰
۳	حاوی ۳۰٪ سرباره	MC70S30	۴۱۲۵	۱۰۵۰	۴۵۰	۶۰۰
۴	حاوی ۴۰٪ سرباره	MC60S40	۴۱۲۵	۹۰۰	۶۰۰	۶۰۰
۵	حاوی ۵۰٪ سرباره	MC50S50	۴۱۲۵	۷۵۰	۷۵۰	۶۰۰
۶	حاوی ۶۰٪ سرباره	MC40S60	۴۱۲۵	۶۰۰	۹۰۰	۶۰۰
۷	حاوی ۷۰٪ سرباره	MC30S70	۴۱۲۵	۴۵۰	۱۰۵۰	۶۰۰

۱- درصد رطوبت موجود ماسه ۵/۸٪ می باشد. درصد جذب آب ماسه ۱/۶٪ می باشد.

۲- مقدار آب اضافی در ماسه برابر $(\frac{4}{2} = \frac{5}{8} - \frac{1}{6})$ درصد بوده است.

$(\frac{4}{2} \times \frac{4}{2}) / 100 = 1/73$ آب موجود در ماسه جهت ساخت نمونه های آزمایشگاهی محاسبه شده و از آب اختلاط

کم گردیده و این مقدار به وزن ماسه اضافه شد.

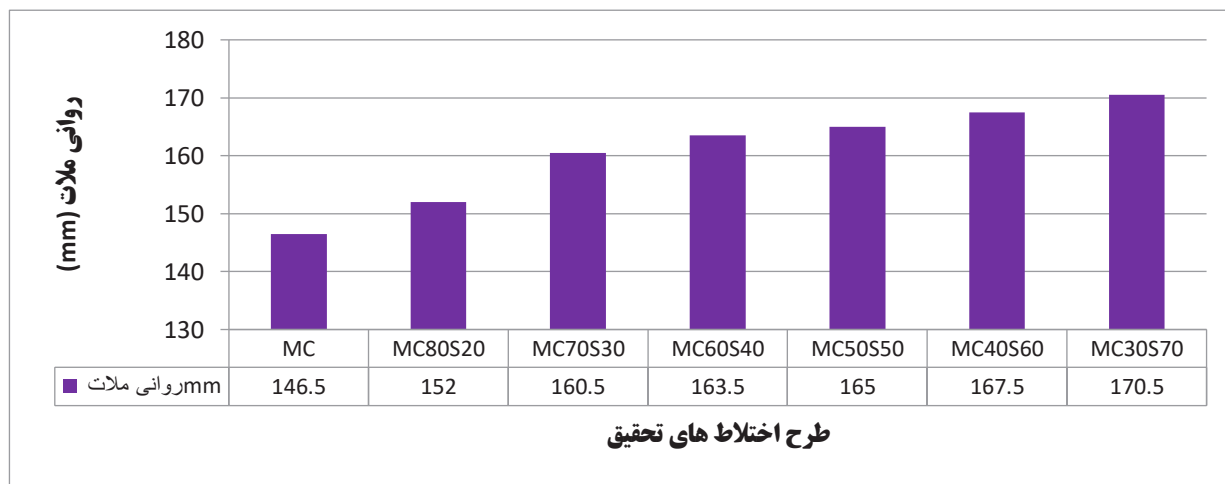


شکل ۲. ساخت و قالب گیری نمونه ها از ملات های سیمان- سرباره ای

Fig. 2. Fabrication and molding of specimens of cement-slag mortars

تحت فشار ثابت ۷ اتمسفر قرار می گیرند. طبق استاندارد سطحی از نمونه که با فشار بر آن اثر می کند، با برس سیمی کمی زیر می شود. پس از گذشت ۷۲ ساعت نمونه ها به دو نیم تقسیم شدند و مقدار نفوذ آب با کمک کولیس اندازه گیری شد [۲۷].

کمک یک جریان متناوب با فرکانس مشخص به دست می آید، انجام شده است. می توان با داشتن سطح بتن و فاصله بین دو صفحه فلزی، مقاومت ویژه الکتریکی را به دست آورد [۲۶]. آزمایش عمق نفوذ آب بر اساس استاندارد DIN 1048 نمونه های مکعبی $5 \times 5 \times 5$ سانتی متر مکعبی نمونه ها



شکل ۳. نتایج آزمایش میز جریان

Fig. 3. Flow table test results

فولاد نسبت به سیمان با افزایش درصد جایگزینی سرباره کارخانه فولاد اهواز جایگزین سیمان، میزان روانی ملات بیشتر شده است. شکل ۵ نشان می‌دهد که نمونه حاوی ۲۰٪ سرباره نسبت به نمونه مرجع ۳/۷٪ افزایش روانی داشته است و نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره به ترتیب ۹/۶٪، ۱۱/۶٪، ۱۱/۶٪، ۱۴/۳٪ و ۱۶/۴٪ نسبت به نمونه مرجع روانی بیشتری دارند. در مجموع نمونه حاوی ۷۰٪ سرباره با ۱۶/۴٪ نسبت به نمونه مرجع بیشترین میزان روانی را نشان می‌دهد. دلیل اصلی افزایش روانی در نمونه‌های حاوی سرباره می‌تواند ناشی از جذب سطحی بالای سرباره کارخانه فولاد اهواز باشد.

۳-۲- تفسیر نتایج مقاومت فشاری

آزمایش تعیین مقاومت فشاری در سنین ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روزه ساخته شده بر اساس استاندارد ASTM C109 انجام شده است [۲۲]. هر عدد بیانگر متوسط مقاومت ۳ نمونه مکعبی ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متری می‌باشد. در این آزمایش از جک ملات‌شکن نوع دیجیتالی با ظرفیت مناسب استفاده شده است این جک دقتی معادل ± 1 درصد بار ثبت شده و همچنین سرعت بارگذاری معادل $\pm 200 \pm 2400$ نیوتن بر ثانیه را دارد. برای محاسبه مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال از رابطه ۱ استفاده گردید.

$$R_c = F_c / 1600 \quad (1)$$

۲-۲- عمل‌آوری نمونه‌ها

ساخت ملات با توجه به استاندارد ۳۹۳ ملی ایران با همزن ملات انجام گرفته است [۱۵]. برای اختلاط، ابتدا ماسه و سیمان به صورت خشک به مدت ۱ دقیقه مخلوط شده و در ادامه به آن دو سوم آب اختلاط اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه اختلاط صورت گرفته است. نهایتاً آب باقی‌مانده به همراه پوزولان و فوق‌روان‌کننده به مخلوط اضافه شده و مواد و مصالح به مدت ۶ دقیقه به صورت کامل با یکدیگر مخلوط شده‌اند. نمونه‌های ساخته شده با ملات پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تحت عمل‌آوری قرار گرفتند. دمای محیط آزمایشگاه و همچنین محیط عمل‌آوری در محدوده 23 ± 1 درجه سانتی‌گراد حفظ گردیده است.

۳- تفسیر نتایج آزمایش‌ها

۳-۱- تفسیر نتایج آزمایش میز جریان

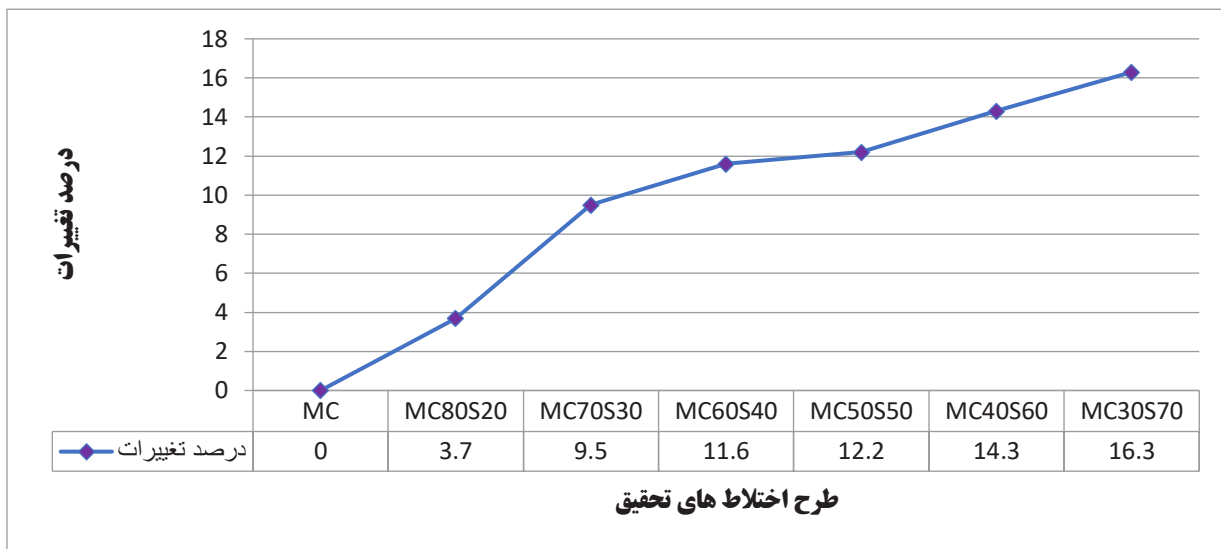
هدف از انجام آزمایش میز جریان، تعیین کارایی یا روانی ملات تازه است. برای انجام آزمایش میزان روانی ملات بر اساس استاندارد ASTM C230 از آزمون میز جریان برای اندازه‌گیری ویژگی‌های روانی این نوع ملات استفاده می‌شود. در زمان ساخت ملات با سرباره فولاد اهواز برای هر نسبت مخلوط ابتدا آزمایش میز جریان انجام شده و قطر پخش شدگی اندازه‌گیری شد، که نتایج حاصل در شکل ۳ ارائه شده‌اند.

نتایج آزمایش میز جریان نشان می‌دهند به دلیل وزن بیشتر سرباره



شکل ۴. نحوه انجام آزمایش میز جریان

Fig.4. How to perform a flow table test

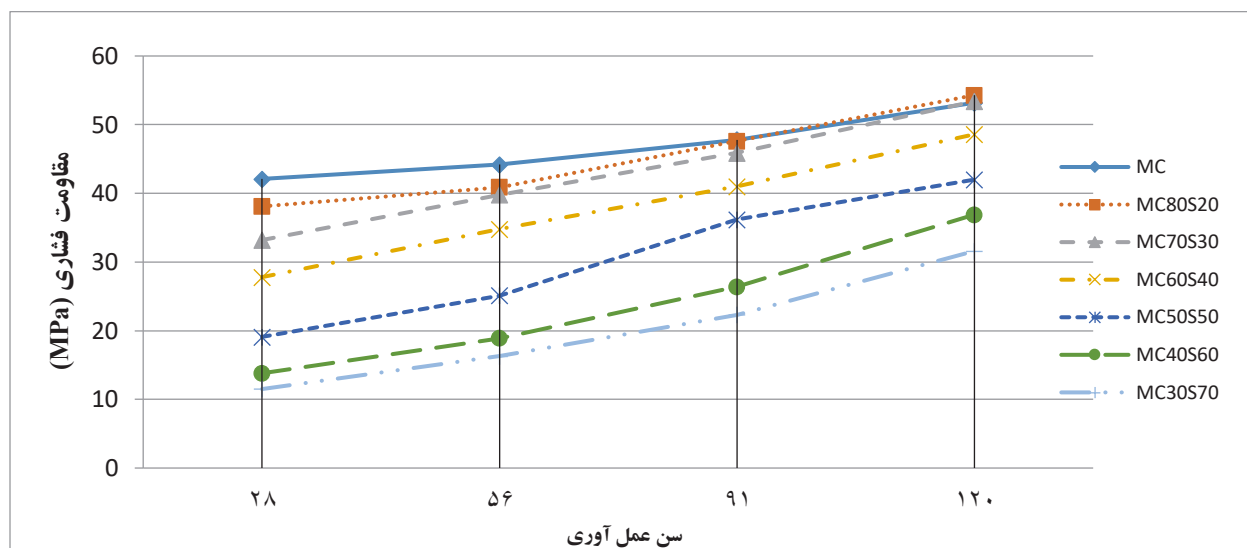


شکل ۵. مقایسه نتایج آزمایش میز جریان نمونه‌های حاوی سرباره نسبت به نمونه مرجع در آزمایش میز جریان

Fig. 5. Comparison of flow table test results of specimens containing slag compared to the reference specimen in flow table test

و ۷۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با کاهش ۳۳٪، ۵۴٪، ۶۷٪ و ۷۲٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۲۸/۸، ۱۹/۱، ۱۳/۸ و ۱۱/۵ مگاپاسکال رسیده است. با توجه بررسی نتایج نمونه‌های ۲۸ روزه می‌توان مشاهده نمود که تأثیر سرباره در سن ۲۸ روزه دارای کاهش مقابل ملاحظه‌ای است. مقاومت فشاری در سن ۵۶ روزه برای نمونه مرجع ۴۴/۲ مگاپاسکال است، در حالی که در نمونه ۲۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز با کاهش ۷٪ به ۴۰/۹ مگاپاسکال نشان می‌دهد. مقاومت فشاری نمونه ۳۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز با کاهش ۱۰٪ نسبت به نمونه مرجع به ۳۳/۲ مگاپاسکال رسیده است.

R_C مقاومت فشاری برحسب مگاپاسکال، F_C پیشینه بار در هنگام شکست برحسب نیوتن و عدد ۱۶۰۰ مقدار سطح فک بارگذاری یا سطح صفحات کمکی (۴۰×۴۰ میلی‌متر مربع) برحسب میلی‌متر مربع هستند. طبق شکل ۶ مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه برای نمونه مرجع ۴۲/۱ مگاپاسکال است، در حالی که در نمونه حاوی ۲۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز با کاهش ۹/۵٪ به ۳۸/۱ مگاپاسکال نشان می‌دهد. مقاومت فشاری نمونه حاوی ۳۰٪ سرباره آهن‌گذاری با کاهش ۲۱٪ نسبت به نمونه مرجع ۳۳/۲ مگاپاسکال رسیده است. مقاومت فشاری نمونه‌های ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪



شکل ۶. تغییرات مقاومت فشاری نمونه های حاوی پودر سرباره کارخانه فولاد اهواز در سنین مختلف عمل آوری

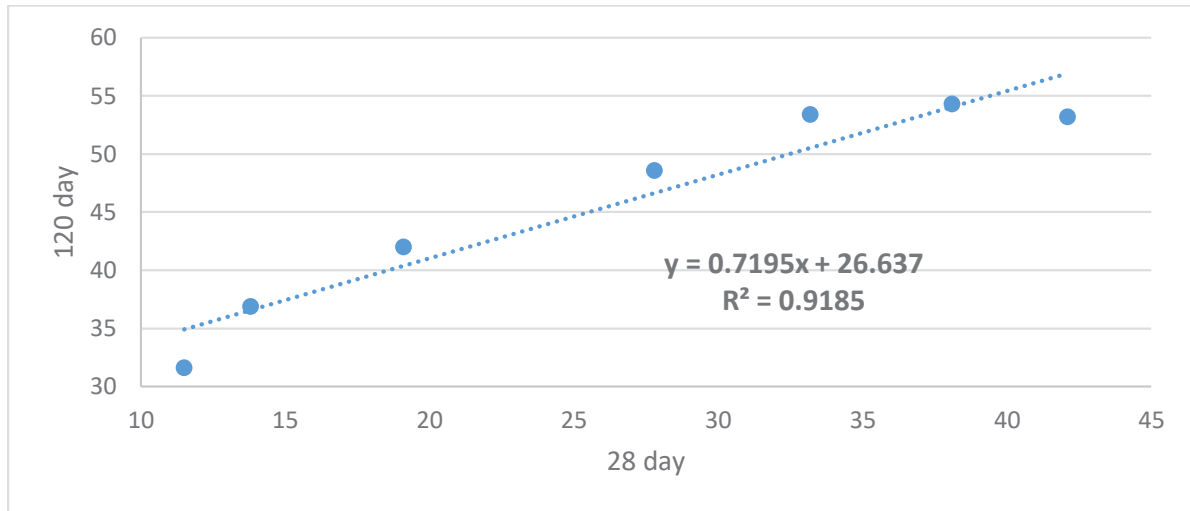
Fig. 6. Compressive strength changes of specimens containing slag powder of Ahvaz Steel Plant at different curing ages

با مقایسه مقاومت فشاری در سنین ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روزه نمونه‌ها که در شکل ۶ نشان داده شده‌اند، قابل پیش‌بینی بود که کاربرد سرباره کارخانه فولاد اهواز به عنوان جایگزین بخشی از سیمان باعث کاهش خواص مکانیکی شود. نکته‌ای که در خصوص همه نمونه‌ها وجود دارد، این است که تاثیر عمده سرباره در سنین بالا خود را نشان داده است. در بررسی نتایج مشهود است که استفاده از ۲۰٪ و ۳۰٪ در سن ۱۲۰ روزه نسبت به نمونه مرجع دارای افزایش مقاومت می‌باشد، علت احتمالی آن پیشرفت بیشتر واکنش‌های هیدراسیون سیمان و سرباره در طول زمان می‌باشد. یکی از دلایل تاثیر دیر هنگام سرباره می‌تواند میزان اکسید آهن زیاد موجود در جسم سرباره باشد که بیش از ۴۳٪ است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۶ در خصوص استفاده از میزان درصد سرباره به جای بخشی از سیمان در ساخت ملات، از دو منظر می‌توان نگرینست. یک نگاه این است که نباید در سن درازمدت ۱۲۰ روزه هم مقاومت فشاری ملات سیمان- سرباره‌ای از مقاومت مشابه ملات مرجع کمتر شود. در این نگاه ۳۰٪ جایگزینی سرباره با سیمان می‌تواند بهینه تلقی شود. نگاه دوم این است که در سن دراز مدت ۱۲۰ روزه هدف این باشد که ملات سیمان- سرباره‌ای با حداقل مقاومت ۳۰ مگاپاسکال در دسترس باشد، و اینکه مقاومت این نوع ملات با مقاومت ملات مرجع مقایسه نشود، زیرا که پایین‌تر بودن آن نسبت به مقاومت ملات

مقاومت فشاری نمونه‌های ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره آهن‌گذاری به ترتیب با کاهش ۲۱٪، ۴۳٪، ۵۷٪ و ۶۳٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۳۴/۸، ۲۵/۱، ۱۸/۹ و ۱۶/۳ مگاپاسکال رسیده است.

مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه برای نمونه مرجع ۴۷/۸ مگاپاسکال است، در حالی که در نمونه‌های حاوی ۲۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز با کاهش ۵/۰٪ به ۴۷/۶ مگاپاسکال رسید. مقاومت فشاری نمونه ۳۰٪ سرباره با کاهش ۴٪ نسبت به نمونه مرجع به ۴۵/۹ مگاپاسکال کاهش یافت. مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره به ترتیب با کاهش ۱۴٪، ۲۴٪، ۴۴٪ و ۵۳٪ نسبت به نمونه مرجع به مقادیر ۴۱، ۳۶/۲، ۲۶/۴ و ۲۲/۳ مگاپاسکال رسیدند.

مقاومت فشاری در سن ۱۲۰ روزه برای نمونه مرجع ۵۳/۲ مگاپاسکال است، در حالی که در نمونه ۲۰٪ و ۳۰٪ سرباره با افزایش ۰/۳٪ و ۰/۴٪ به ۵۴/۳ و ۵۳/۴ مگاپاسکال نشان می‌دهد. مقاومت فشاری نمونه‌های ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با ۰/۸٪، ۲۱٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۴۸/۶، ۴۲، ۳۶/۹ و ۳۱/۶ مگاپاسکال کاهش نشان می‌دهد. هر چند مقدار افزایش ۰/۴٪ ناچیز به نظر می‌رسد، اما از آنجایی که نشانگر این است که تا سن ۱۲۰ روز سرباره دارای اثر مثبت بر مقاومت فشاری می‌باشد، قابل ذکر است.



شکل ۷. رابطه بین مقاومت فشاری ملات های سیمان- سرباره ای تحقیق در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه

Fig. 7. Relationship between compressive strength of cement-slag mortars in the research, at the ages of 28 and 120 days

$$R_f = 1.5F_f \times L/b^3 \quad (2)$$

R_f مقاومت خمشی برحسب مگاپاسکال، b ابعاد مقطع مربعی منشور برحسب میلی متر، F_f بار اعمال شده بر روی منشور در زمان شکست برحسب نیوتن، L فاصله مرکز تا مرکز غلتک های تکیه گاه یا دهانه بارگذاری برحسب میلی متر.

نتایج مربوطه در شکل ۸ ارائه شده اند. مقاومت خمشی در سن ۲۸ روزه برای نمونه مرجع ۱۱/۴ مگاپاسکال است، در حالی که در نمونه حاوی ۲۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز با کاهش ۱۱٪ به ۹/۹ مگاپاسکال نشان می دهد. مقاومت خمشی نمونه حاوی ۳۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز با کاهش ۲۲٪ نسبت به نمونه مرجع به ۸/۸ مگاپاسکال رسیده است. مقاومت خمشی نمونه های ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با کاهش ۴۲٪، ۶۴٪، ۷۳٪ و ۸۲٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۶/۵، ۴/۱، ۳/۴ و ۲/۸ مگاپاسکال رسیده است.

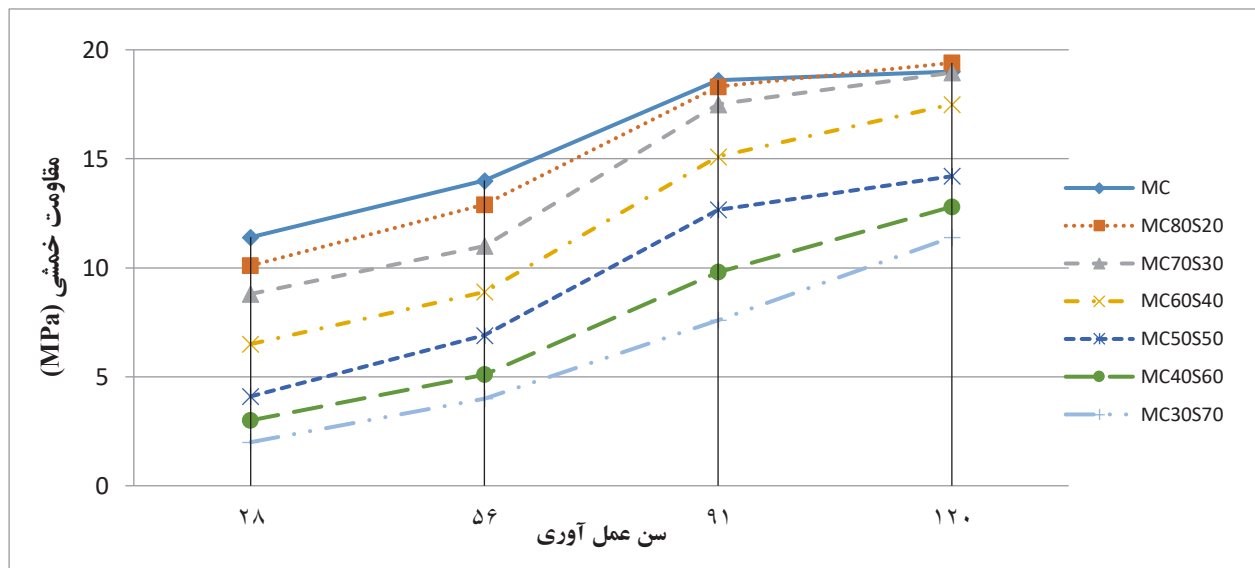
مقاومت خمشی در سن ۵۶ روزه برای نمونه مرجع ۱۴ مگاپاسکال است، در حالی که در نمونه حاوی ۲۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز با کاهش ۸٪ به ۱۲/۹ مگاپاسکال نشان می دهد. مقاومت خمشی نمونه حاوی ۳۰٪ سرباره با کاهش ۲۱٪ نسبت به نمونه مرجع به ۱۱ مگاپاسکال رسیده است. مقاومت خمشی نمونه های ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به

مرجع در سن مشابه، مشکلی را در اجرای سازه ها ایجاد نخواهد نمود، و این میزان مقاومت در ساخت سازه ها قابل قبول می باشد. از این منظر و با لحاظ نگاه اقتصادی در کنار آن به موضوع، ۷۰٪ جایگزینی سرباره با سیمان می تواند به عنوان درصد بهینه تلقی گردد.

شکل ۷ رابطه بین مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه ملات های سیمان- سرباره ای را نشان می دهد؛ می توان با دقت قابل قبولی مقاومت فشاری در سن ۱۲۰ روزه را برحسب مقاومت در سن ۲۸ روزه پیش بینی نمود.

۳-۳- تفسیر نتایج مقاومت خمشی

آزمایش لازم جهت تعیین مقاومت خمشی در سنین ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روزه نمونه های منشوری به ابعاد $160 \times 40 \times 40$ میلی مترمکعب ساخته شده بر اساس استاندارد ASTM C348 انجام شده است. چک مقاومت خمشی با قابلیت بارگذاری ۱۰ کیلونیوتن با دقت ± 1 درصد نیروی ثبت شده و همچنین سرعت بارگذاری معادل 10 ± 5 نیوتن بر ثانیه را می باشد. این دستگاه مجهز به ابزار خمش، مشتمل بر دو غلتک تکیه گاهی فولادی با قطر 10 ± 5 میلی متر که دهانه محور تا محور دو غلتک 100 ± 5 میلی متر و همچنین غلتک سوم بارگذاری فولادی با همان ابعاد که در وسط دو غلتک دیگر تعبیه شده است. این دستگاه نیرو را به صورت قائم و بدون خروج از مرکزیت به نمونه اعمال می کند. مقاومت خمشی از رابطه ۲ محاسبه می شود.



شکل ۸. تغییرات مقاومت خمشی نمونه های حاوی پودر سرباره کارخانه فولاد اهواز در سنین مختلف عمل آوری

Fig. 8. Changes in flexural strength of specimens containing slag powder of Ahvaz Steel Plant at different curing ages

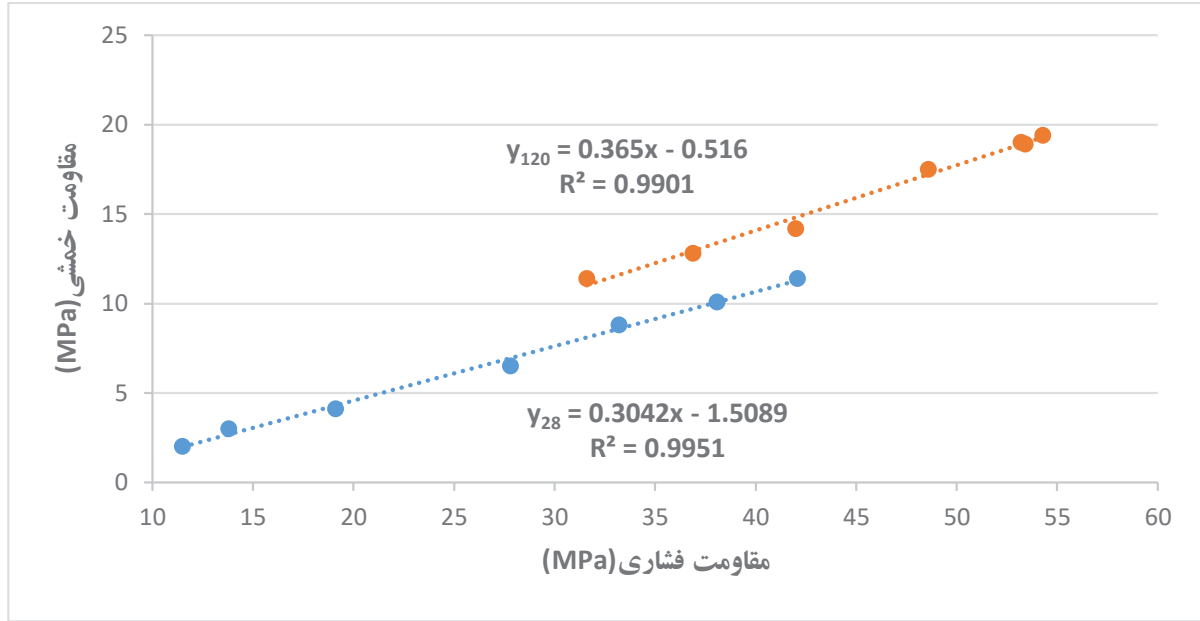
با مقایسه مقاومت خمشی در سنین ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روزه نمونه‌ها که در شکل ۸ نشان داده شده است، قابل پیش‌بینی بود که وجود سرباره جایگزین سیمان در سنین پایین باعث کاهش خواص مکانیکی شود. در بررسی نمونه‌ها مشهود است که وجود ۲۰٪ و ۳۰٪ سرباره در سن ۱۲۰ روزه نسبت به نمونه مرجع دارای افزایش مقاومت خمشی می‌باشد؛ علت آن می‌تواند به پیشرفت بیش‌تر واکنش‌های هیدراسیون بین سیمان و سرباره در طول زمان، مرتبط باشد. نتایج نشان داد که در مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی سرباره کارخانه فولاد اهواز همانند نتایج مربوط به مقاومت فشاری آن‌ها در سنین ۲۸ و ۵۶ روزه اثر چشم‌گیری مشاهده نشده است.

نمودارهای خطی و روابط مبین آن‌ها میان مقاومت‌های فشاری و خمشی در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه در شکل ۹ ارائه گردیده است. ضرایب تعیین (R^2) مشخص شده در روابط مذکور نشان می‌دهند که در هر دو سن مذکور روابط قابل‌اعتمادی بین این دو نوع مقاومت وجود دارد و بنابراین، می‌توان با دقت بالایی مقدار مقاومت خمشی را برحسب مقدار مقاومت فشاری تخمین زد. عموماً مرسوم است که خواص مکانیکی ملات و بتن را می‌توان به مقاومت فشاری آن‌ها مرتبط نمود. رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی طبق یک رابطه خطی از ضریب تعیین ۰/۹۹۵۱ و ۰/۹۹۰۱ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه برقرار می‌باشد. با توجه به اینکه ضریب رگرسیون حاصله

ترتیب با کاهش ۳۶٪، ۵۰٪، ۶۳٪ و ۷۱٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۸/۹، ۶/۹، ۴۵/۱ مگاپاسکال رسیده است.

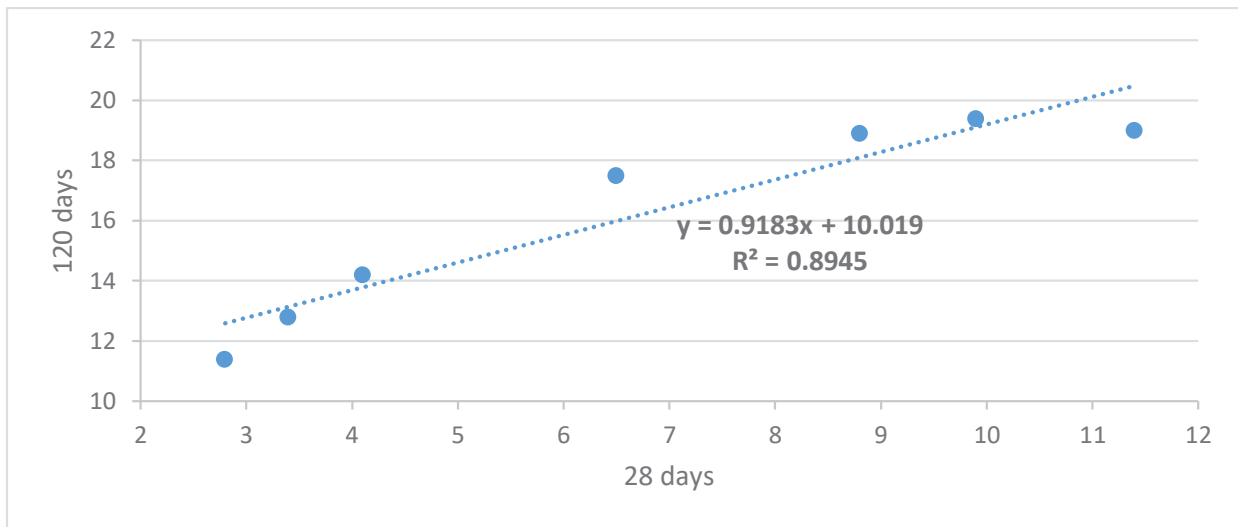
مقاومت خمشی در سن ۹۱ روزه برای نمونه مرجع ۱۸/۶ مگاپاسکال است، در حالی که در نمونه حاوی ۲۰٪ سرباره با کاهش ۱/۵٪ به ۱۸/۳ مگاپاسکال رسید. مقاومت خمشی نمونه‌های ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره به ترتیب با کاهش ۶٪، ۱۹٪، ۳۲٪، ۴۷٪ و ۵۹٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۱۷/۵٪، ۱۵/۱٪، ۱۲/۶٪، ۹/۸٪ و ۷/۶ مگاپاسکال رسیدند.

مقاومت خمشی در سن ۱۲۰ روزه برای نمونه مرجع ۱۹ مگاپاسکال است، در حالی که در نمونه حاوی ۲۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز با افزایش ۲٪ به ۱۹/۴ مگاپاسکال رسید. مقاومت خمشی نمونه‌های ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره با کاهش ۲٪، ۰/۸٪، ۲۵٪، ۳۲٪ و ۴۰٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب به ۱۸/۹، ۱۷/۵، ۱۴/۲، ۱۲/۸ و ۱۱/۴ مگاپاسکال رسیدند. با توجه به نتایج آزمایش ۱۲۰ روزه و اختلاف درصد رشد مقاومت نمونه حاوی سرباره نسبت به نمونه مرجع، می‌توان گفت که علت آن پیشرفت بیش‌تر واکنش‌های هیدراسیون سیمان و واکنش سرباره در طول زمان می‌باشد که همین مسئله باعث ایجاد اختلاف زیاد بین نمونه‌های حاوی سرباره نسبت به نمونه مرجع در سنین پایین می‌باشد.



شکل ۹. رابطه بین مقاومت های فشاری و خمشی ملات های سیمان- سرباره ای در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه

Fig. 9. Relationship between compressive and flexural strengths of cement-slag mortars at 28 and 120 days of age



شکل ۱۰. رابطه بین مقاومت خمشی ملات های سیمان- سرباره ای تحقیق در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه

Fig. 10. Relationship between flexural strength of cement-slag mortars in research, at 28 and 120 days of age

نشان داده شده است. از ضریب تعیین این رابطه مشهود است که با دقت قابل قبولی می توان مقاومت خمشی را در سن ۱۲۰ روزه برحسب مقدار آن در سن ۲۸ روزه تخمین زد.

بسیار به یک نزدیک می باشد، می توان با دقت قابل قبولی مقدار مقاومت خمشی نسبت به مقاومت فشاری را به دست آورد. در شکل ۱۰ رابطه بین مقاومت های خمشی در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه ملات های سیمان- سرباره ای



شکل ۱۱. نمایی از نحوه انجام آزمایش مقاومت الکتریکی

Fig. 11. An overview of how the electrical resistance test is performed

۳-۴- تفسیر نتایج مقاومت الکتریکی

دوام بالای هر مخلوط سیمانی نشان از کیفیت بالاتر آن در برابر شرایط محیطی مختلف دارد. لذا با بالا بردن دوام مخلوط‌های سیمانی می‌توان انتظار طول عمر بالاتر سازه بتنی را داشت. مقاومت الکتریکی یک ماده به عنوان پارامتری از مقاومت در برابر خوردگی فلز مدفون در آن مطرح می‌باشد [۹]. برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی طبق استاندارد ACI 222 مورد آزمایش قرار می‌گیرد. مقاومت الکتریکی بتن معیاری جهت ارزیابی میزان مقاومت نمونه بتنی مسلح در برابر حمله یون‌های کلراید می‌باشد. هر چه مقدار مقاومت الکتریکی نمونه‌ای بیشتر باشد، مقاومت آن نمونه در برابر حمله کلرایدی بیشتر است. به منظور تعیین مقاومت الکتریکی به روش امپدانس که یک آزمون غیرمخرب است، اقدام می‌شود [۹].

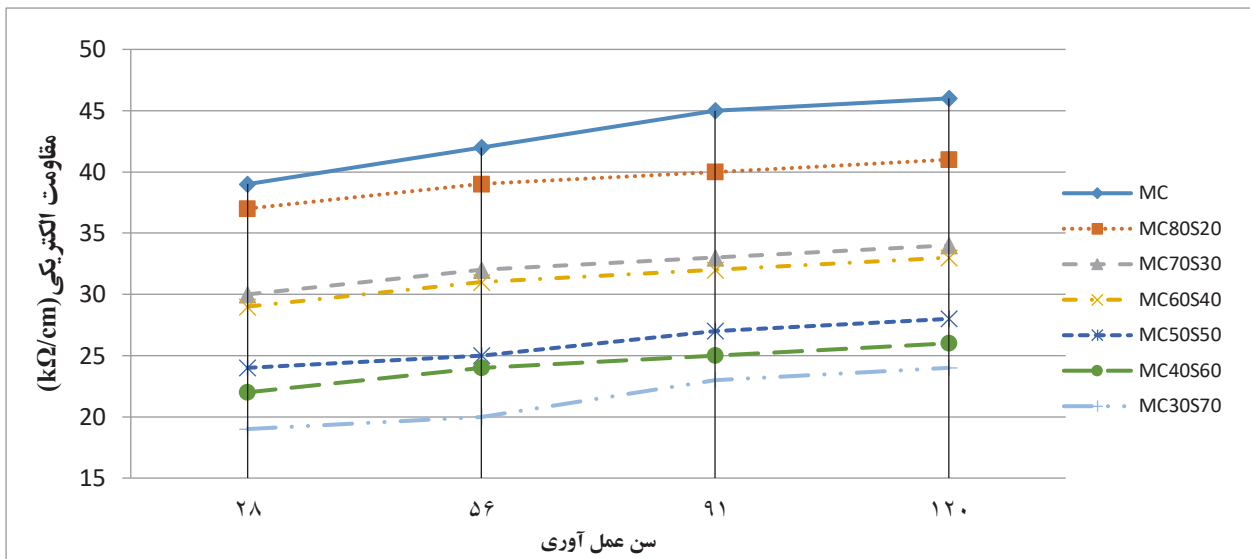
آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های $4 \times 4 \times 16$ انجام می‌گیرد؛ ابتدا سطوح بالا و پایین نمونه مکعبی، آغشته به یک لایه نازک از خمیر سیمان غلیظ می‌گردند، سپس نمونه را میان الکترودهای مسی دستگاه قرار داده و در خاتمه پس از گذشت ۱۰ ثانیه زمان، عدد مقاومت کل (R) از دستگاه قرائت می‌شود. حال با توجه به مشخص بودن طول نمونه میان دو الکتروده که قابل اندازه‌گیری است و نیز مساحت میانگین سطوح نمونه که بر روی الکترودها قرار گرفته (A)، از رابطه (۳) مقاومت الکتریکی ویژه (یا به اختصار مقاومت الکتریکی) ملات تعیین می‌شود.

$$\rho = \frac{R \times A}{L} \quad (3)$$

ρ مقاومت الکتریکی برحسب اهم بر متر، R مقاومت کل قرائت شده از دستگاه برحسب اهم، A مساحت نمونه مرتبط با الکترودهای مسی برحسب متر مربع، L طول نمونه میان دو الکترودهای مسی متر هستند. در شکل ۱۱ نمایی از نحوه انجام آزمایش مقاومت الکتریکی نشان داده شده است.

نتایج مربوطه در شکل ۱۲ ارائه شده‌اند. مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ روزه برای نمونه مرجع ۳۹ کیلو اهم بر سانتی‌متر است، در حالی که در نمونه حاوی ۲۰٪ سرباره با کاهش ۵٪ به ۳۷ کیلو اهم بر سانتی‌متر رسید. مقاومت خمشی نمونه حاوی ۳۰٪ سرباره با افت ۲۳٪ نسبت به نمونه مرجع به ۳۰ کیلو اهم بر سانتی‌متر رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره با افت ۲۵٪، ۳۸٪، ۴۳٪ و ۵۳٪ نسبت به نمونه مرجع، به ترتیب به مقادیر ۲۹، ۲۴، ۲۲ و ۱۹ کیلو اهم بر سانتی‌متر رسیدند. مقاومت الکتریکی در سن ۵۶ روزه برای نمونه مرجع ۴۲ کیلو اهم بر سانتی‌متر است، در حالی که در نمونه حاوی ۲۰٪ سرباره با کاهش ۷٪ به ۳۹ کیلو اهم بر سانتی‌متر رسید. مقاومت الکتریکی نمونه حاوی ۳۰٪ سرباره با کاهش ۲۴٪ نسبت به نمونه مرجع به ۳۲ کیلو اهم بر سانتی‌متر رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره به ترتیب با افت ۲۶٪، ۴۰٪، ۴۳٪ و ۵۲٪ نسبت به نمونه مرجع، به ترتیب به مقادیر ۳۱، ۲۵، ۲۴ و ۲۰ کیلو اهم بر سانتی‌متر کاهش یافتند.

مقاومت الکتریکی در سن ۹۱ روزه برای نمونه مرجع ۴۵ کیلو اهم بر سانتی‌متر است، در حالی که در نمونه حاوی ۲۰٪ سرباره با افت ۱۱٪ به ۴۰



شکل ۱۲. تغییرات مقاومت الکتریکی نمونه های حاوی پودر سرباره کارخانه فولاد اهواز در سنین مختلف عمل آوری

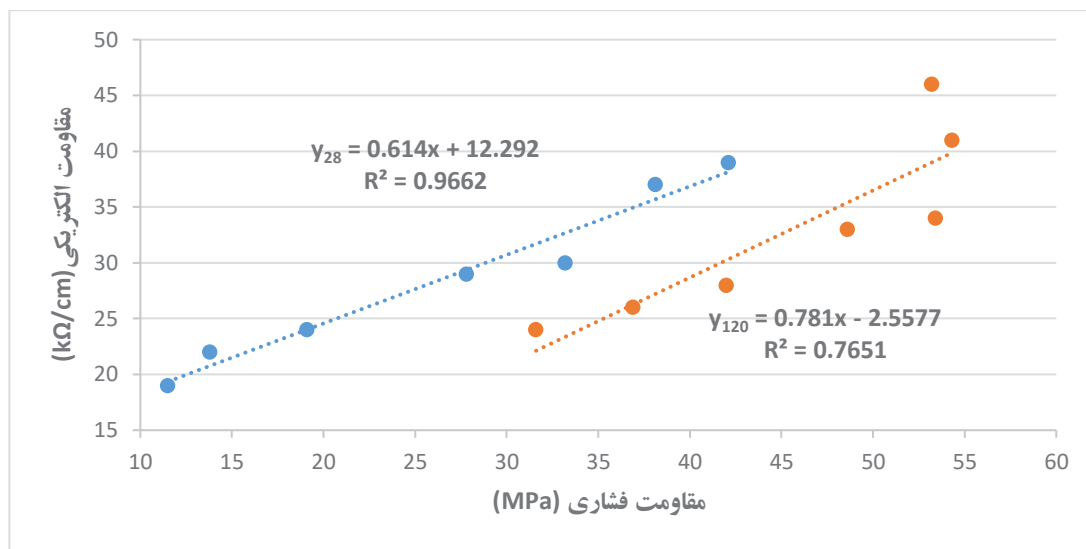
Fig. 12. Changes in electrical resistance of specimens containing slag powder of Ahvaz Steel Plant at different curing ages

ریزساختار این مصالح و نیز رسانایی محلول منفذی درون حفرات ماتریس (رطوبت موجود درون ساختار بتن طی گذشت زمان) بستگی دارد. از آنجا که سرباره به عنوان یک پوزولان در درون ماتریس ملات قرار می‌گیرد، لذا با مصرف بلورهای هیدروکسید کلسیم سبب کاهش غلظت یون‌های OH در محلول منفذی می‌گردد. این موضوع منجر به افت رسانایی الکتریکی محلول منفذی ملات سیمانی گردیده و در نهایت سبب افزایش مقاومت الکتریکی ماتریس خواهد شد و بر همین اساس به کاهش نرخ خوردگی میلگردهای فولادی قرار گرفته در زیر لایه ملات که به منظور تعمیر به کار گرفته شدند، خواهد انجامید. عملکرد پوزولانی در سنین اولیه ضعیف است و لذا این مواد تأثیر خاصی بر بهبود مقاومت الکتریکی در سنین ۲۸ روزه نداشته‌اند؛ حال آنکه با افزایش درصد جایگزینی سرباره با سیمان، از عامل اصلی مقاومت و چسبانندگی ماتریس که همان سیمان است، کاسته شد و در نتیجه، افزایش تخلخل با افزایش میزان سرباره می‌تواند منجر به افزایش رسانایی ماتریس شده و از مقاومت الکتریکی آن بکاهد. نکته دیگری که در بررسی نتایج مقاومت الکتریکی بر اساس شکل ۱۲ مشهود است، اینکه مقاومت الکتریکی در دوره سنی ۵۶ تا ۱۲۰ روزه خیلی نزدیک به هم بوده و این نشانگر این است که سرباره در زمان تأثیر زیادی بر روند کاهش مقاومت الکتریکی ندارد.

کیلو اهم بر سانتی‌متر رسید. مقاومت الکتریکی نمونه حاوی ۳۰٪ سرباره با افت ۲۶٪ نسبت به نمونه مرجع به ۳۳ کیلو اهم بر سانتی‌متر رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره به ترتیب با افت ۲۹٪، ۴۰٪، ۴۴٪ و ۴۹٪ نسبت به نمونه مرجع، به ترتیب به مقادیر ۳۲، ۲۷، ۲۵ و ۲۳ کیلو اهم بر سانتی‌متر کاهش یافته‌اند.

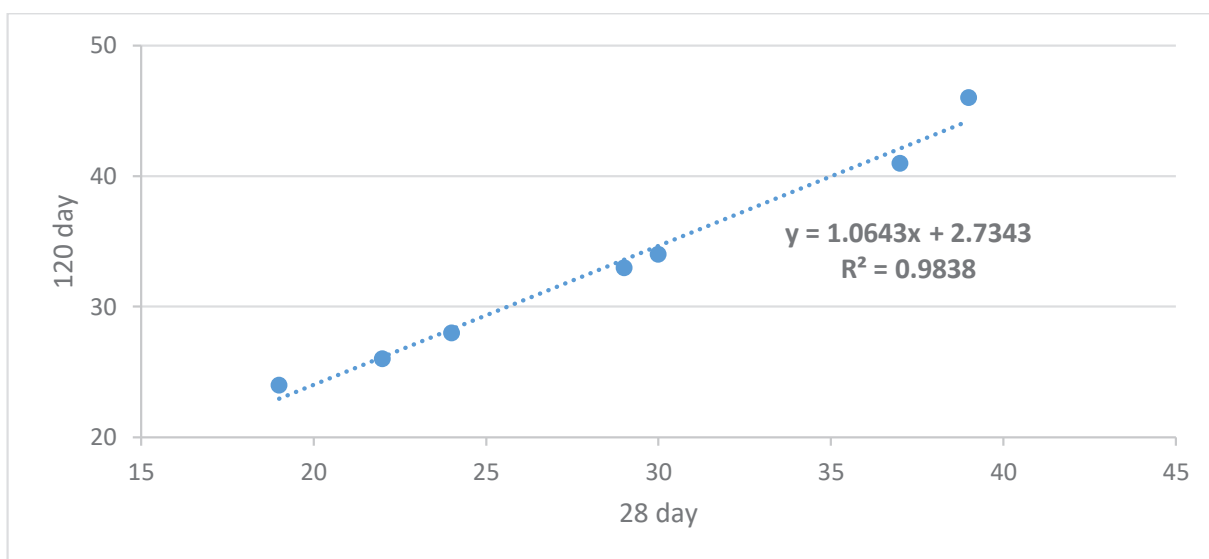
مقاومت الکتریکی در سن ۱۲۰ روزه برای نمونه مرجع ۴۶ کیلو اهم بر سانتی‌متر است، در حالی که در نمونه حاوی ۲۰٪ سرباره با افت ۱۱٪ به ۴۱ کیلو اهم بر سانتی‌متر رسید. مقاومت الکتریکی نمونه حاوی ۲۶٪ سرباره با افت ۲۳٪ نسبت به نمونه مرجع به ۳۴ کیلو اهم بر سانتی‌متر رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره با افت ۲۸٪، ۳۹٪، ۴۳٪ و ۴۸٪ نسبت به نمونه مرجع، به ترتیب به مقادیر ۲۸، ۲۶ و ۲۴ کیلو اهم بر سانتی‌متر تقلیل یافتند.

نتایج آزمایش سنجش مقاومت الکتریکی نمونه‌های ملات در شکل ۱۲ نشان داده شدند. مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی سرباره دچار کاهش مقاومت الکتریکی شدند؛ وجود سرباره باعث پر شدن فضای بین مصالح سنگی شده و این امر سبب کاهش مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی سرباره نسبت به نمونه مرجع شده است. در حالت کلی، مقاومت الکتریکی نمونه‌های سیمانی به ابعاد و نحوه توزیع تخلخل در درون



شکل ۱۳. روابط بین مقاومت الکتریکی و مقاومت فشاری نمونه های ملات های سیمان- سرباره ای تحقیق در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه

Fig. 13. Relationships between electrical resistance and compressive strength of cement-slag mortar specimens at 28 and 120 days of age



شکل ۱۴. رابطه بین مقاومت های الکتریکی در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه نمونه های ملات های سیمان- سرباره ای تحقیق

Fig. 14. Relationship between electrical resistances at 28 and 120 days of age of cement-slag mortar specimens

الکتریکی در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه ملات های مذکور نشان می دهد که این رابطه دارای ضریب تعیین بالایی است؛ این ضریب همبستگی بالا به این معنی است که با دقت بالایی می توان مقاومت الکتریکی در این ملات ها را در سن ۱۲۰ روزه برحسب سن ۲۸ روزه آن ها تخمین زد.

روابط بین مقاومت های فشاری و الکتریکی ملات های سیمان- سرباره ای در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه ارائه شده در شکل ۱۳، نشان می دهند که بین این دو نوع مقاومت روابطی خطی با ضرایب تعیین ۰/۹۶۶۲ و ۰/۷۶۵۱ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه وجود دارد. در شکل ۱۴ رابطه بین مقاومت های

۳-۵- تفسیر نتایج جذب آب حجمی

به منظور انجام آزمایش جذب آب بر نمونه‌های ملات سیمان، پس از انجام آزمایش مقاومت الکتریکی، نمونه‌های $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متر مکعب با آب شسته شده و مطابق استاندارد ASTM C642 در کوره با دمای 110°C درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت قرار می‌گیرند. پس از این مدت، به نمونه‌ها اجازه داده می‌شود تا به دمای محیط برسند. سپس نمونه‌ها توزین گردیده (W_1) و در ادامه به مدت ۲۴ ساعت در آب با دمای محیط قرار داده می‌شوند. پس از این مدت، نمونه‌ها از آب خارج و سطح خارجی آن‌ها با حوله بدون پرز خشک گردیده و توزین می‌گردند (W_2). درصد جذب آب (WA) هر نمونه مطابق رابطه (۴) تعیین می‌شود. نتایج در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در رابطه (۴)، W_1 و W_2 برحسب گرم می‌باشند.

نتایج مربوطه در شکل ۱۸ ارائه شده‌اند. جذب آب در سن ۲۸ روزه برای نمونه مرجع $0.6/6\%$ است، در حالی که در نمونه حاوی $0.2/20\%$ سرباره با افزایش $0.3/30\%$ به $0.8/4\%$ رسیده است. جذب آب نمونه حاوی $0.3/30\%$ سرباره با افزایش 0.43% نسبت به نمونه مرجع به $0.9/5\%$ رسیده است. هم‌چنین جذب آب نمونه‌های حاوی $0.4/40\%$ ، $0.5/50\%$ ، $0.6/60\%$ و $0.7/70\%$ سرباره با افزایش 0.54% ، $0.6/60\%$ ، 0.69% و 0.81% نسبت به نمونه مرجع به ترتیب به مقادیر $0.1/10\%$ ، $0.1/10\%$ ، $0.11/11\%$ و $0.12/12\%$ رسیدند.

جذب آب در سن ۵۶ روزه برای نمونه مرجع $0.6/3\%$ است، در حالی که در نمونه حاوی $0.2/20\%$ سرباره با افزایش 0.33% به $0.8/4\%$ رسیده است. جذب آب نمونه حاوی $0.3/30\%$ سرباره با افزایش 0.52% نسبت به نمونه مرجع به $0.9/6\%$ رسیده است. جذب آب نمونه‌های حاوی $0.4/40\%$ ، $0.5/50\%$ ، $0.6/60\%$ و $0.7/70\%$ سرباره با افزایش 0.59% ، 0.66% ، $0.8/80\%$ و 0.93% نسبت به نمونه مرجع به ترتیب به مقادیر $0.9/10\%$ ، $0.9/10\%$ ، $0.1/10\%$ و $0.11/11\%$ رسیده است.

جذب آب در سن ۹۱ روزه برای نمونه مرجع 0.6% است، در حالی که در نمونه حاوی $0.2/20\%$ سرباره با افزایش 0.36% به $0.8/12\%$ رسیده است. جذب آب نمونه حاوی $0.3/30\%$ سرباره با افزایش 0.61% نسبت به نمونه مرجع به $0.9/7\%$ رسیده است. جذب آب نمونه‌های حاوی $0.4/40\%$ ، $0.5/50\%$ ، $0.6/60\%$ و $0.7/70\%$ سرباره با افزایش $0.7/70\%$ ، $0.78/78\%$ ، $0.91/91\%$ و $0.106/106\%$ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب به مقادیر $0.1/10\%$ ، $0.107/107\%$ ، $0.11/11\%$ و $0.12/12\%$ رسیده است.

جذب آب در سن ۱۲۰ روزه برای نمونه مرجع 0.6% است، در حالی که در نمونه حاوی $0.2/20\%$ سرباره با افزایش 0.3% به $0.8/11\%$ رسیده است. جذب آب نمونه حاوی $0.3/30\%$ سرباره با افزایش 0.61% نسبت به نمونه مرجع به $0.9/7\%$

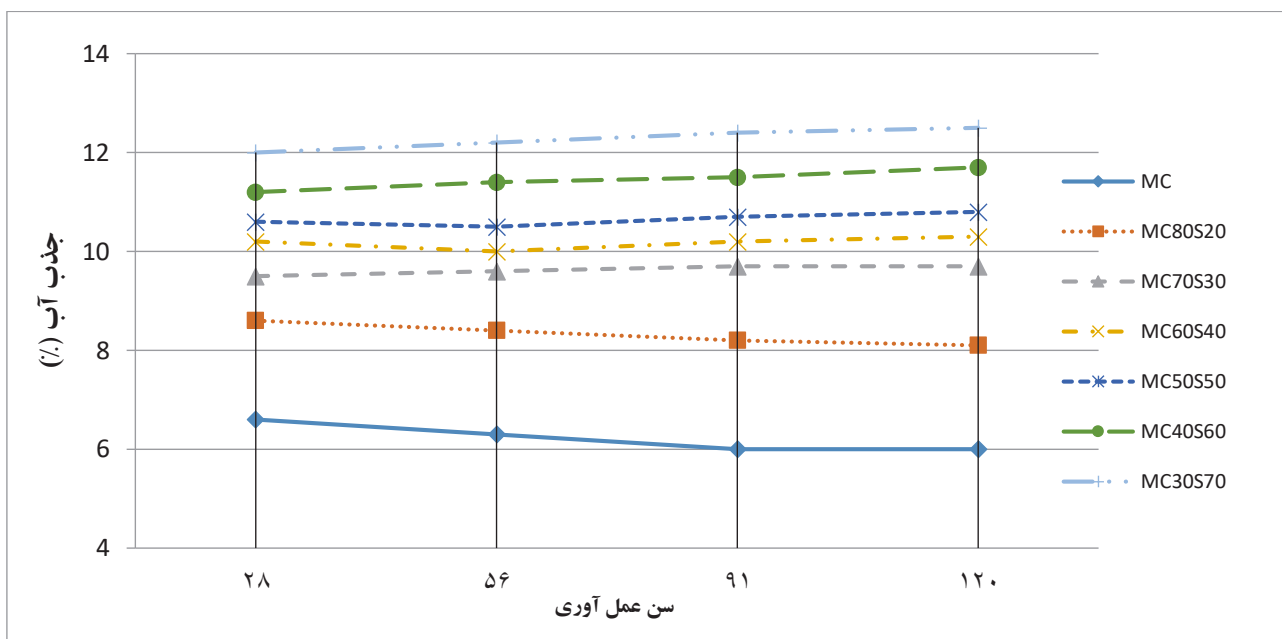
رسیده است. جذب آب نمونه‌های حاوی $0.4/40\%$ ، $0.5/50\%$ ، $0.6/60\%$ و $0.7/70\%$ سرباره با افزایش $0.71/71\%$ ، $0.8/80\%$ ، $0.95/95\%$ و $1.08/108\%$ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب به مقادیر $0.10/10\%$ ، $0.10/10\%$ ، $0.11/11\%$ و $0.12/12\%$ رسیده است.

آزمایش جذب آب نمونه‌های ملات سیمانی، قابلیت جلوگیری از نفوذ آب و سایر مایعات را برای این مصالح نشان می‌دهد. بر همین اساس افزایش میزان آب جذب شده طی انجام این آزمایش قابلیت ضعیف ماتریس در جلوگیری از نفوذ آب و سایر مایعات به آن و در نتیجه تخلخل بالای ماتریس ملات را مشخص می‌نماید. از مقایسه جذب آب در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که در نمونه‌های حاوی سرباره نسبت جذب آب در مقایسه با نمونه مرجع، جذب آب بیشتر دارد. نکته قابل توجه طبق شکل ۱۵ این است که در نتایج آزمایش جذب آب حجمی نمونه‌های حاوی سرباره در سنین ۹۱ و ۱۲۰ روزه، تغییر قابل ملاحظه‌ای مشهود نیست و نتایج جذب آب این نمونه‌ها در سنین مذکور خیلی به هم نزدیک هستند.

رابطه بین مقاومت فشاری و جذب آب ملات‌های سیمان- سرباره‌ای در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه در شکل ۱۶ ارائه شده است. مشهود است که ارتباط بین مقاومت فشاری و جذب آب طبق روابطی خطی با ضرایب تعیین 0.18883 و 0.709 به ترتیب در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه برقرار است. هم‌چنین، در شکل ۱۷ رابطه بین جذب آب در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه ملات‌های مذکور نشان داده شده است؛ طبق رابطه داده شده در این شکل می‌توان با دقت بالایی جذب آب در سن ۱۲۰ روزه را برحسب مقدار جذب در سن ۲۸ روزه تخمین زد.

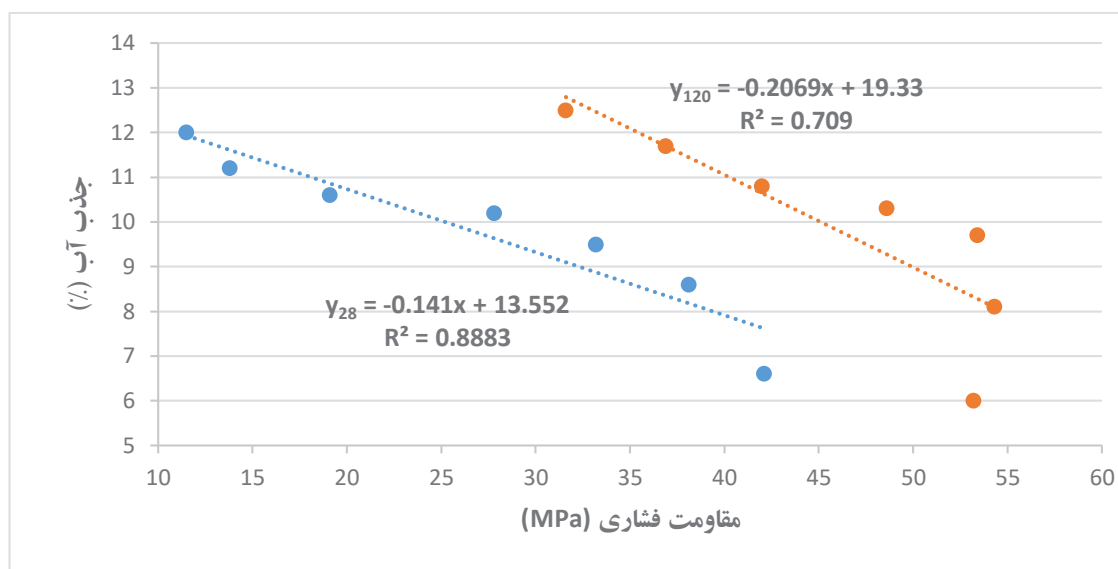
۳-۶- تفسیر نتایج نفوذپذیری آب

نفوذپذیری معمولاً از طریق محاسبه مقدار آب تحت فشار که برای نفوذ به درون یک نمونه بتنی منظور می‌شود، در یک دوره زمانی ۷۲ ساعته به صورت تحت فشار تعیین می‌شود. با اندازه‌گیری عمق نفوذ آب پس از شکستن نمونه‌ها می‌توان به معیاری برای نفوذپذیری بتن دست یافت. از جمله عواملی که می‌تواند منجر به خوردگی بتن و آرماتورهای فولادی شده و نیز در سرمایه‌های شدید سبب ترک خوردن بتن‌ها و ملات‌ها گردد، نفوذ آب به داخل آن‌ها می‌باشد، بنابراین نفوذ آب در بتن‌ها و ملات‌ها نقش مهمی را در سازه‌های بتنی و بنایی ایفاء می‌کند. به منظور بررسی تاثیر نسبت محلول قلیایی به سرباره بر عمق نفوذ آب، نتایج حاصل از آزمایش تعیین عمق نفوذ در سنین ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روزه در شکل ۱۸ ارائه شده است.



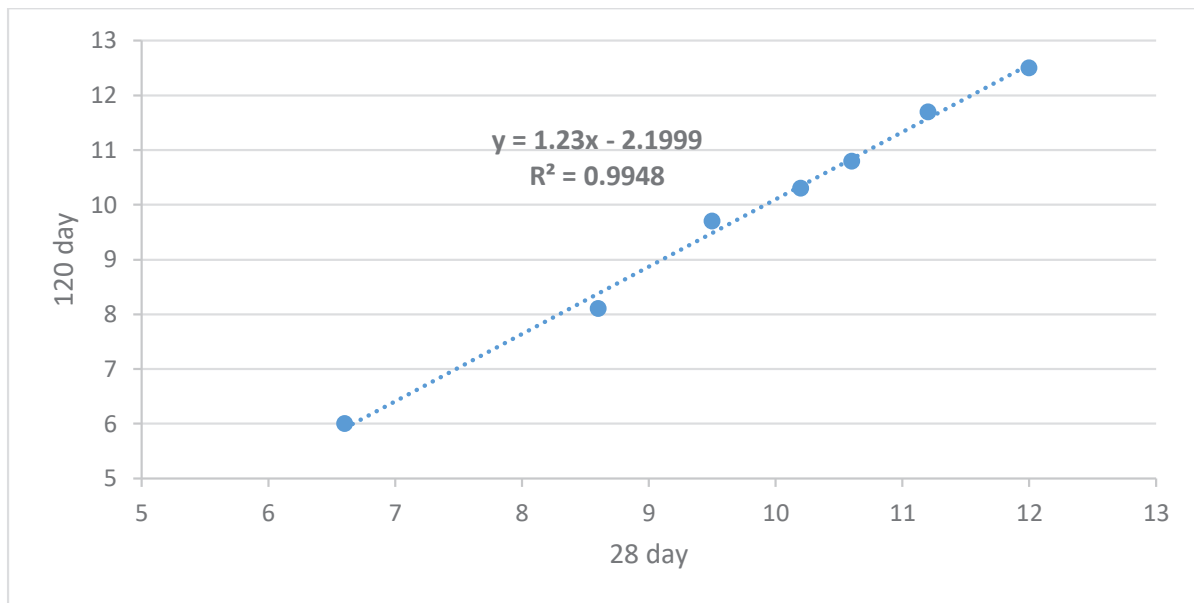
شکل ۱۵. تغییرات درصد جذب آب نمونه های ملات های سیمان- سرباره ای تحقیق در سنین مختلف عمل آوری

Fig. 15. Changes in water absorption percentage of cement mortar-slag specimens at different processing ages



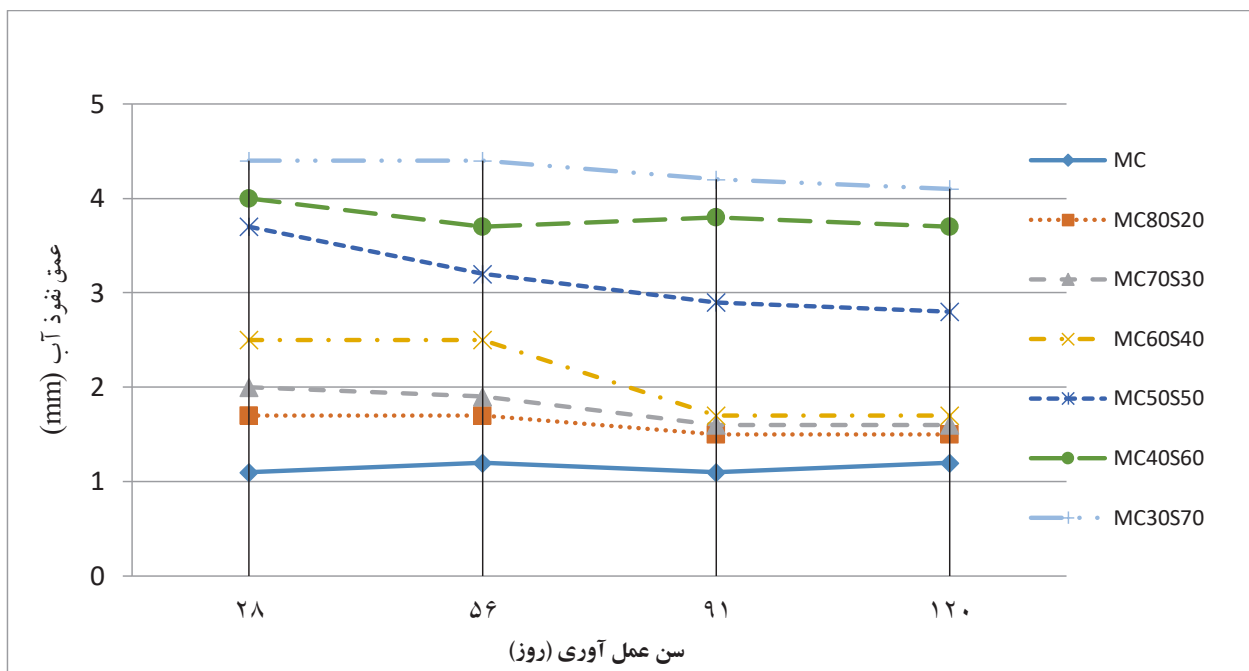
شکل ۱۶. تغییرات جذب آب برحسب مقاومت فشاری نمونه های ملات های سیمان- سرباره ای در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه

Fig. 16. Changes in water absorption in terms of compressive strength of cement-slag mortar specimens, at the ages of 28 and 120 days



شکل ۱۷. رابطه بین جذب آب ملات های سیمان- سرباره ای تحقیق در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه

Fig. 17. Relationship between water absorption of cement-slag mortars in the research, at the ages of 28 and 120 days



شکل ۱۸. تغییرات درصد عمق نفوذ آب در ملات های سیمان- سرباره ای تحقیق در سنین مختلف عمل آوری

Fig. 18. Changes in water penetration depth in cement-slag mortars at different curing ages

محل پروژه و در تمام سطوح افقی، عمودی، سقفی و مورب به سادگی، با کمترین آموزش، بدون نیاز به مغزه‌گیری و تخریب سازه اصلی قابل انجام است و نتایج را به صورت کمی بیان می‌کند. این روش قادر است ترک‌های مویی بر روی سطح بتن حتی در محیط آزمایشگاه را نیز بررسی نماید [۳۰]. نکته قابل ملاحظه در شکل ۱۸ این است که در نتایج آزمایش عمق نفوذ آب نمونه‌های حاوی ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ سرباره در سنین ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روزه تغییر قابل‌توجهی مشهود نیست و نتایج خیلی به هم نزدیک هستند؛ اما نمونه‌های حاوی ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره نسبت به نمونه‌های حاوی درصد‌های جایگزینی کمتر اختلاف بیشتری در عمق نفوذ آب دارند. نکته مهم دیگر کاهش عمق نفوذ در سنین بالا نسبت به سنین پایین و همین‌طور تشدید نرخ کاهش عمق نفوذ آب به مرور زمان در نمونه‌های حاوی سرباره نسبت به نمونه مرجع مشهود است.

روابط بین مقاومت فشاری و عمق نفوذ آب ملات‌های سیمان-سرباره‌ای در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه در شکل ۱۹ ارائه شده است. مشهود است که این روابط به صورت خطی و با ضرایب تعیین ۰/۹۹۱۵ و ۰/۹۶۵۳ به ترتیب در سن ۲۸ و ۱۲۰ روزه برقرار هستند. با توجه به ضرایب بالای تعیین این روابط، می‌توان با دقت قابل قبولی مقدار عمق نفوذ آب را برحسب مقاومت فشاری تخمین زد.

در شکل ۲۰ رابطه بین عمق نفوذ آب در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه برای نمونه‌های ملات‌های سیمان-سرباره‌ای ترسیم شده است. با توجه به ضریب تعیین بالای این رابطه، می‌توان با دقت زیادی میزان عمق نفوذ آب را در سن ۱۲۰ روزه برحسب میزان آن در سن ۲۸ روزه تخمین زد. دیده می‌شود که بین این دو میزان نفوذ یک رابطه خطی با شیب مثبت وجود دارد و این بیانگر این است که هر چه میزان نفوذ در سنین پایین کمتر باشد، این میزان در سنین بالاتر نیز کمتر است.

۴- نتایج

در این تحقیق برای توسعه ساخت ملات‌های سیمان-سرباره‌ای سازگار با محیط زیست با بهره‌گیری از سرباره تولیدی در کارخانه فولاد اهواز که به روش مکانیکی فعال گردیده، اقدام شده است. در همین راستا، آزمایش‌های مختلفی بر نمونه‌ها در سنین ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روزه انجام گرفت. نتایج کلیدی به شرح زیر می‌باشند:

- آزمایش روانی نشان داد که وجود سرباره در ملات‌ها باعث افزایش جریان آن‌ها شد؛ ملات‌های حاوی ۲۰٪، ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪

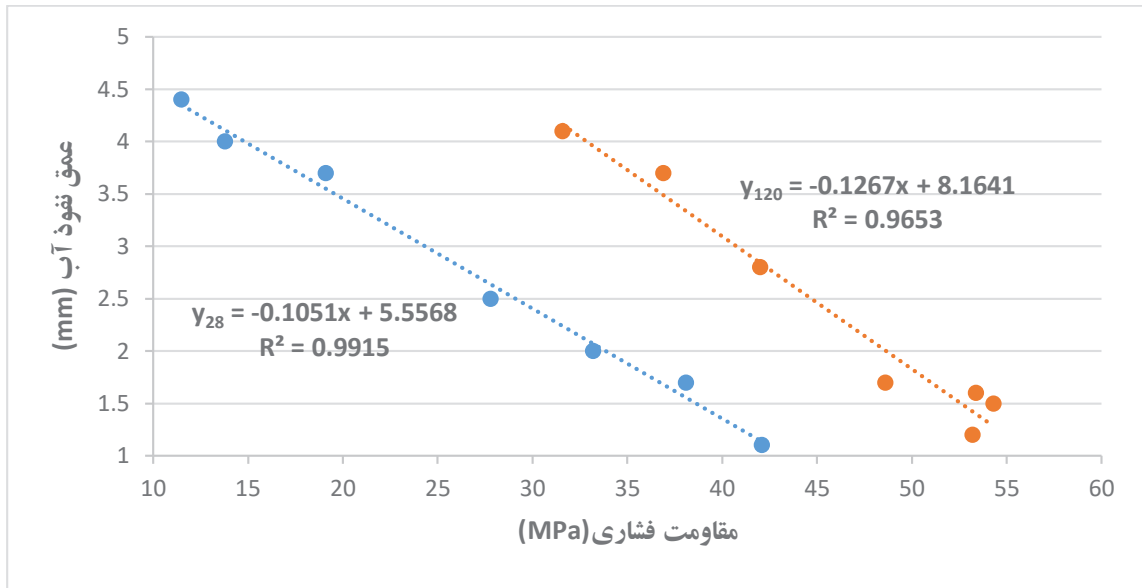
نتایج مربوطه در شکل ۱۸ ارائه شده‌اند. عمق نفوذ آب در سن ۲۸ روزه برای نمونه مرجع ۱/۱ میلی‌متر است، در حالی که در نمونه حاوی ۲۰٪ سرباره با افزایش ۵۴/۶٪ به ۱/۷ میلی‌متر رسیده است. عمق نفوذ آب نمونه حاوی ۳۰٪ سرباره با افزایش ۸۲٪ نسبت به نمونه مرجع به ۲ میلی‌متر رسیده است. همچنین عمق نفوذ آب نمونه‌های حاوی ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره با افزایش ۱۲۷٪، ۲۳۶٪، ۲۶۳٪ و ۳۰۰٪ نسبت به نمونه مرجع، به ترتیب به مقادیر ۲/۵، ۳/۷، ۴ و ۴/۴ میلی‌متر رسیدند.

عمق نفوذ آب در سن ۵۶ روزه برای نمونه مرجع ۱/۲ میلی‌متر است، در حالی که در نمونه حاوی ۲۰٪ سرباره با افزایش ۶/۴۱٪ به ۷/۱ میلی‌متر رسیده است. عمق نفوذ آب نمونه حاوی ۳۰٪ سرباره با افزایش ۵۸٪ نسبت به نمونه مرجع به ۹/۱ میلی‌متر رسیده است. همچنین عمق نفوذ آب نمونه‌های حاوی ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره با افزایش ۱۰۸٪، ۱۶۶٪، ۲۰۸٪ و ۲۶۶٪ نسبت به نمونه مرجع، به ترتیب به مقادیر ۲/۵، ۳/۲، ۳/۷ و ۴/۴ میلی‌متر رسیدند.

عمق نفوذ آب در سن ۹۱ روزه برای نمونه مرجع ۱/۱ میلی‌متر است، در حالی که در نمونه حاوی ۲۰٪ سرباره با افزایش ۳۶/۳٪ به ۱/۵ میلی‌متر رسیده است. عمق نفوذ آب نمونه حاوی ۳۰٪ سرباره با افزایش ۴۵٪ نسبت به نمونه مرجع به ۶/۱ میلی‌متر رسیده است. همچنین عمق نفوذ آب نمونه‌های حاوی ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره با افزایش ۵۴٪، ۱۶۳٪، ۲۴۵٪ و ۲۸۱٪ نسبت به نمونه مرجع، به ترتیب به مقادیر ۱/۷، ۲/۹، ۳/۸ و ۴/۲ میلی‌متر رسیدند.

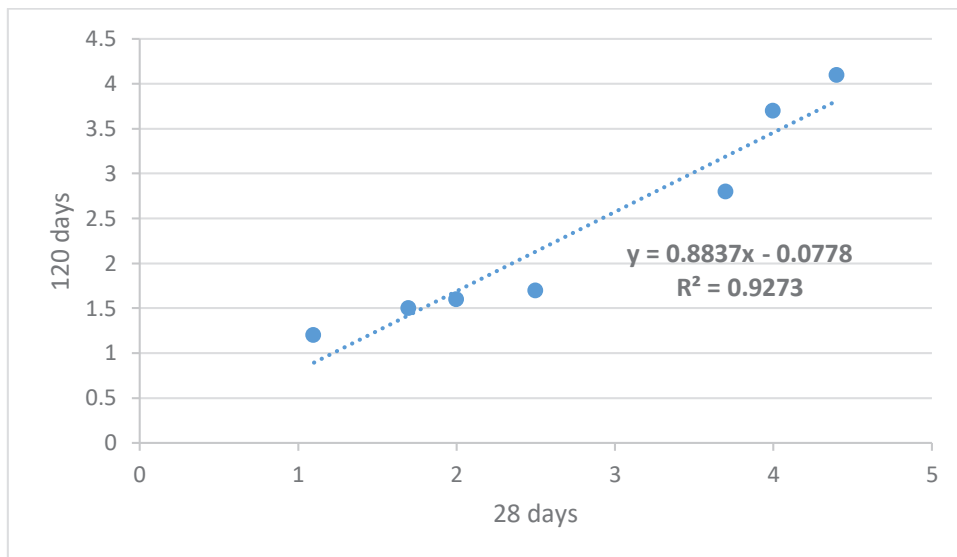
عمق نفوذ آب در سن ۱۲۰ روزه برای نمونه مرجع ۱/۲ میلی‌متر است، در حالی که در نمونه حاوی ۲۰٪ سرباره با افزایش ۲۵٪ به ۱/۵ میلی‌متر رسیده است. عمق نفوذ آب نمونه حاوی ۳۰٪ سرباره با افزایش ۳۳٪ نسبت به نمونه مرجع به ۱/۶ میلی‌متر رسیده است. همچنین عمق نفوذ آب نمونه‌های حاوی ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سرباره با افزایش ۴۱٪، ۱۳۳٪، ۲۰۸٪ و ۲۴۱٪ نسبت به نمونه مرجع، به ترتیب به مقادیر ۱/۷، ۲/۸، ۳/۷ و ۴/۱ میلی‌متر رسیدند.

به طور کلی، آزمایش‌های نفوذپذیری بتن استاندارد نشده‌اند [۲۹]، از طرف دیگر نتایج حاصل از روش‌های متداول تعیین نفوذپذیری بتن که در آزمایشگاه و روی نمونه‌های بتنی از قبل آماده شده انجام می‌پذیرد، عمدتاً کیفی و مقایسه‌ای هستند. از این رو در سال ۲۰۱۱ توسط نادری روشی با کاربردی گسترده و دقیق، برای تعیین مقدار نفوذپذیری بتن و دیگر مصالح ساختمانی ابداع گردید. این روش در تمام شرایط آزمایشگاهی، مخصوصاً در



شکل ۱۹. رابطه بین عمق نفوذ آب و مقاومت فشاری نمونه های ملات های سیمان- سرباره ای تحقیق در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه

Fig. 19. Relationship between water penetration depth and compressive strength of cement-slag mortar specimens at 28 and 120 days of age



شکل ۲۰. رابطه بین عمق نفوذ آب نمونه های ملات های سیمان- سرباره ای تحقیق در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه

Fig. 20. Relationship between water penetration depth of cement-slag mortar specimens at 28 and 120 days of age

ترتیب در سن ۲۸ و ۱۲۰ روزه به دست آمدند.

- ارتباط بین جذب آب و مقاومت فشاری ملات‌های سیمان-سرباره‌ای به صورت روابطی خطی با ضرایب تعیین ۰/۸۸۸۳ و ۰/۷۰۹ به ترتیب در سن ۲۸ و ۱۲۰ روزه تعیین شدند.
- ارتباط بین عمق نفوذ آب و مقاومت فشاری ملات‌های سیمان-سرباره‌ای به صورت روابطی خطی با ضرایب تعیین ۰/۹۹۱۵ و ۰/۹۶۵۳ به ترتیب در سن ۲۸ و ۱۲۰ روزه مشخص گردیدند.

مراجع

- [1] Flowcem R900 brand superplasticizer, Middle East Durochem factory, in.
- [2] R.-. ACI 222 R-01, Protection of Metals in Concrete against Corrosion, 2010.
- [3] B. Ahmadi, M. Shekarchi, Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, Cement and concrete composites, 32(2) (2010) 134-141.
- [4] C. Astm, 642, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, in: Annual book of ASTM standards, 2006.
- [5] C. Astm, 230, Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement, in: West Conshohocken, PA: ASTM International, 2008.
- [6] C. ASTM, Standard test method for materials finer than 75- μm (No. 200) sieve in mineral aggregates by washing, in: ASTM C117, West Conshohocken, PA, 2013.
- [7] A.C.-. ASTM International, Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars, in: West Conshohocken, PA: ASTM International, 2008.
- [8] A.S. C88, Test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulphate, in, ASTM International West Conshohocken, PA, 1999.
- [9] A. C109, standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars, in: West Conshohocken: ASTM International, 2008.
- [10] A. C109/C109M-16a, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars

و ۰/۷۰ سرباره به ترتیب دارای ۰/۴، ۰/۹، ۰/۱۱، ۰/۱۲، ۰/۱۴ و ۰/۱۶ روانی بیشتر نسبت به ملات مرجع شدند.

- وجود سرباره در سنین ۲۸ و ۵۶ روزه اثر قابل ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی ملات‌ها نداشته است، اما در سن ۹۱ روزه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۰/۲۰ سرباره نزدیک به مقاومت نمونه مرجع شده است.
- در سن ۱۲۰ روزه نمونه‌های حاوی ۰/۲۰ و ۰/۳۰ سرباره نسبت به نمونه مرجع افزایش مقاومت فشاری نشان دادند؛ این میزان افزایش به ترتیب به مقدار ۰/۳ و ۰/۴ بوده است. هر چند مقدار افزایش ۰/۴ ناچیز به نظر می‌رسد، اما از آنجایی که نشانگر این است که تا سن ۱۲۰ روز سرباره دارای اثر مثبت بر مقاومت می‌باشد، قابل ذکر است.
- مقاومت خمشی نمونه حاوی ۰/۲۰ سرباره در سن ۱۲۰ روزه نسبت به نمونه مرجع، افزایش ناچیزی داشته است.
- در مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی سرباره مثل نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۵۶ روزه، تاثیر زیادی رخ نداد.
- در نمونه‌های حاوی سرباره نسبت به نمونه مرجع، کاهش مقاومت الکتریکی رخ داد.
- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی در نمونه‌های حاوی سرباره، در سنین ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روزه خیلی به هم نزدیک بود، یعنی اینکه در سنین بالاتر سرباره تاثیر زیادی بر مقاومت الکتریکی ندارد.
- در مقادیر جذب آب حجمی نمونه‌های حاوی سرباره در سنین ۹۱ و ۱۲۰ روزه، تفاوت قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد.
- در نتایج آزمایش عمق نفوذ آب نمونه‌های حاوی ۰/۲۰، ۰/۳۰ و ۰/۴۰ سرباره در سنین ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روزه تغییر قابل توجهی مشهود نیست؛ اما نمونه‌های حاوی ۰/۵۰، ۰/۶۰ و ۰/۷۰ سرباره نسبت به نمونه‌های حاوی درصدهای جایگزینی کمتر اختلاف بیشتری در عمق نفوذ آب نشان دادند.
- نتایج آزمایش جذب آب در سن ۱۲۰ روزه برای نمونه حاوی ۰/۲۰ سرباره با افزایش ۰/۳۰ نمونه ۰/۳۰ سرباره با افزایش ۰/۶۱ و نمونه‌های حاوی ۰/۴۰، ۰/۵۰، ۰/۶۰ و ۰/۷۰ سرباره با افزایش ۰/۷۱، ۰/۸۰، ۰/۹۵ و ۰/۱۰۸ نسبت به نمونه مرجع افزایش نشان دادند.
- ارتباط بین مقاومت‌های خمشی و فشاری ملات‌های سیمان-سرباره‌ای به صورت روابطی خطی با ضرایب تعیین ۰/۹۸۶۹ و ۰/۹۹۰۱ به ترتیب در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روزه تعیین شدند.
- ارتباط بین مقاومت‌های الکتریکی و فشاری ملات‌های سیمان-سرباره‌ای به صورت روابطی خطی با ضرایب تعیین ۰/۹۶۶۲ و ۰/۷۶۵۱ به

- cylindrical chamber method, in: C.a.i.p. Office (Ed.), 2010.
- [21] A.M. Neville, Properties of concrete, Longman London, 1995.
- [22] M. Rahmani, Khodadadi, A. , Cemstar technology for recycling slag from steel mills and converting it into Portland cement, Tarbiat Modares University, (2000).
- [23] A. Ramezani pour, Kazemian, M, Sedighi, S, Bahmanzadeh, F, Study and comparison of mechanical properties and durability of cement mortars containing natural and artificial pozzolans, in: 3rd International Conference and 7th National Conference on Materials and New Structures in Civil Engineering 1397.
- [24] I.I.o.S.a.I. Research, National Standard No. 393 of Iran - Cement - Determination of compressive and flexural strength, in, 2004.
- [25] I.I.o.S.a.I. Research, National Standard No. 3040 of Iran, Reference sand used in determining the flexural and compressive strength of cement - characteristics and test methods in, 2004.
- [26] I.I.o.S.a.I. Research, National Standard No. 1923 of Iran- Preparation and use of masonry mortars- Part One: Cement sand mortars-Batard, in, 2007.
- [27] A. Sadr Mumtazi, Tahmoursi, B, Haj Jafari, H., Investigation of the effect of microsilica and composite slag on the physical and mechanical properties of cement mortars, in: the first national conference on new concrete technologies and the eighth national concrete competition 1394.
- [28] A. Sadr Mumtazi, Noorollahi, Z, The effect of cement replacement with zeolite on rheological and mechanical properties of self-compacting mortars, in: 7th Annual National Iranian Concrete Conference, Tehran 2015.
- [29] F. Sajedi, Mechanical activation of cement–slag mortars, Construction and Building Materials, 26(1) (2012) 41-48.
- [30] C. Shi, D. Roy, P. Krivenko, Alkali-activated cements and concretes, CRC press, 2003.
- (Using 2-in. or [50-mm] cube specimens), in: West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- [11] L. Chunlin, Z. Kunpeng, C. Depeng, Possibility of concrete prepared with steel slag as fine and coarse aggregates: A preliminary study, Procedia Engineering, 24 (2011) 412-416.
- [12] J. Dotto, A. De Abreu, D. Dal Molin, I. Müller, Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars, Cement and concrete composites, 26(1) (2004) 31-39.
- [13] K. Ezziane, T.-T. Ngo, A. Kaci, Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer, Construction and Building Materials, 70 (2014) 549-559.
- [14] R. Flynn, Grisinger, T, Mather, B, Slag Cement in Concrete and Mortar, American Concrete Institute, Detroit, USA. ACI Report, 2011.
- [15] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, E. Özbay, Effects of marble powder and slag on the properties of self-compacting mortars, Materials and Structures, 42(6) (2009) 813-826.
- [16] M. Hassanzadeh, Karami, A, Maleki, M, Hassanzadeh, F, A study of some properties of mortar containing Isfahan steel slag, in: the third national conference of Iranian concrete 2011.
- [17] A. Jarahi, Maghsoudi, V, Mostofinejad, D, The effect of blast furnace slag replacement on the compressive strength and electrical resistance of mortar, in: the third international conference on new approaches in science, engineering and technology 2015.
- [18] M. Mazloom, A. Ramezani pour, J. Brooks, Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, Cement and Concrete Composites, 26(4) (2004) 347-357.
- [19] Y. Mohammadi, S. Ezzati, Effect of Nanosilica on The permeability of Self Compacting Concrete in Sulfate Environment, Concrete Research, 8(2) (2016) 47-60.
- [20] M. Naderi, Determine of concrete, stone, mortar, brick and other construction materials permeability with

- [32] P. Wainwright, N. Rey, The influence of ground granulated blast furnace slag (GGBS) additions and time delay on the bleeding of concrete, *Cement and concrete composites*, 22(4) (2000) 253-257.
- [31] A.-. Standard, Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate, in: *Annual Book of ASTM (American Society of Testing Material) Standards*, 2012.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. F. Sajedi, S. H. Hashemi, Experimental study of the effect of slag of Ahvaz Steel Plant on the properties of cement-slag mortars, Amirkabir J. Civil Eng., 54(9) (2022) 3557-3580.

DOI: [10.22060/ceej.2022.20414.7416](https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20414.7416)



