

Evaluation of Properties of Self-Compacting Concrete Containing Slag from Ahvaz Steel Plant

Seyed Mohsen Kalvandi¹, Seyed Fathollah Sajedi^{2*}, Fereidoon Moghaddasnejad³ 

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: Nov. 21, 2022

Revised: Aug. 26, 2023

Accepted: Apr. 20, 2024

Available Online: Apr. 05, 2025

Keywords:

Self-Compacting Concrete

Ahvaz Steel Plant Slag

Rheology

Mechanical Properties

Durability

ABSTRACT: Self-compacting concrete (SCC) is concrete that simultaneously has three characteristics: the ability to flow under its own weight, fill the entire mold space, and create a dense and relatively homogeneous mixture without the need for compaction. Slag from the Ahvaz Steel Plant was used. This slag has a significant difference in its chemical composition from common slags in the world, and for this reason, it was used in the manufacture of SCC. In the manufacture of samples, 25%, 35%, 45%, 50%, and 60% of slag powder replaced part of the cement, and the samples were tested at ages of 28, 56, 91, and 120 days. Concrete rheology tests including slump flow, V-funnel, and L-box were performed. Compressive strength and static modulus of elasticity (EC) tests were performed, and durability tests including electrical resistance, water penetration depth, and volumetric water absorption were performed. According to the tests performed, the optimal percentage of powder used was determined to be 25%. The slump test of the sample containing the optimal percentage of slag powder showed an increase of 14% compared to the reference sample. In the compressive strength test, the samples containing the optimal percentage of slag powder showed an increase of 4% compared to the reference sample at the age of 120 days. The results showed an increase in the water penetration depth and the volumetric water absorption percentage by 4%. The EC of the samples containing the optimal percentage of slag powder increased by 4.8% compared to the reference sample at the age of 120 days. The results showed a decrease in the water penetration depth and the volumetric water absorption percentage in the samples containing the optimal percentage of slag powder by 12.5% and 16.6%, respectively, at the age of 120 days.

1- Introduction

The concept of self-compacting concrete was first proposed in 1986 regarding the problems related to durability in concrete structures and the main cause of the weakness of these structures is the poor quality of the concrete [1]. The first theory of self-compacting concrete was proposed by Okamura in Japan to overcome the limitations of conventional concrete, and a sample of this concrete was made in 1988 in Japan and at the University of Tokyo with a slump of more than 620 mm [2]. Research was conducted by Tikalsky et al. to investigate the properties of two-component and three-component concrete mixtures made of slag and fly ash. The test results of this research showed that the compressive strength of the three-component mixture increased compared to the mixture containing fly ash [3]. Noise reduction caused by vibration and the possibility of concreting at night in urban areas, the possibility of constructing concrete structures, especially concreting in water, are issues related to self-compacting concrete [4]. In this research, the Ahvaz Steel Slag Plant, which is very different from other existing

overheads in the world, was used. The main purpose of this research is to use this type of slag, which affects the type of slag on which research is required, on the rheological, mechanical, and durability properties of the mortar containing it. The slag powder used was replaced by cement at 25%, 35%, 45%, 50%, and 60%, and the rheological, mechanical, and durability properties of the samples were investigated at the ages of 7, 28, 91, and 120 days. The optimal percentage of slag replacement was also determined to be 25%.

2- Research Mixing Designs

To make the research samples, first designs were made in a trial and error manner, and concrete tests were performed on them in a fresh state and finally, the reference concrete mixing design was selected and then the rest of the designs were made and tested. In all the mixing designs, the water-to-cement ratio was kept constant at 0.45. Replacing slag with a part of the cement consumed with different percentages resulted in a significant decrease in some mechanical properties. Therefore, after making the reference design,

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

Table 1. Details of the self-compacting concrete mixing plans made in the research (Kg/m³)

SP (lit)	Steel slag	Powder stone	Cement	water (lit)	sand	Pea gravel	Almond gravel	Mix name
0.108	0.00	18	40.5	26.3	94.8	38.3	33.2	SCC
0.120	10.12	18	30.38	26.9	94.1	38.0	33.0	SCCS25
0.137	14.17	18	27.33	26.9	93.7	37.8	32.9	SCCS35
0.165	18.22	18	23.28	27.1	93.3	37.7	32.7	SCCS45
0.186	20.25	18	21.25	27.1	93.0	37.5	32.6	SCCS50
0.200	24.30	18	17.20	27.1	92.6	37.4	32.5	SCCS60

5 mixing designs containing slag powder with different percentages of cement were replaced and made. Table 1 presents the details of the final research mixing designs. In this table, SCC indicates the reference self-compacting concrete, S indicates slag and the number after S indicates the percentage of slag replaced with cement. For example, SCCS25 indicates self-compacting concrete containing 25% slag replaced with cement.

3- Methods and Experiments

Cubic specimens were used in the experiments. Rheology tests included slump flow, L-box test, and V-funnel test. Mechanical property tests included compressive strength and determination of the elastic modulus at ages 7, 28, 91, and 120 days. Durability tests included water absorption, electrical resistance, and water penetration depth at ages 7, 28, 91, and 120 days.

4- Analysis of Results

The analysis of the research results is presented in the main article in two sections including fresh concrete and hardened concrete. These results are presented in Table 2 for fresh concrete. Since several tests have been conducted for the mechanical properties and durability of hardened concrete and the volume of the results is large, it is not possible to present them in this abstract and it is recommended that readers refer to the main article.

5- Conclusions

- Slump flow test of samples containing 25% steel slag showed an increase of 14% compared to the reference sample. In the slump flow test of the sample containing 60% steel slag, an increase of 69% was observed compared to the reference sample.
- The results showed that the static elastic modulus of samples containing the optimal percentage of slag increased by 4.8% compared to the reference sample at the age of 120 days.
- With the increase in the amount of slag from the Ahvaz Steel Plant, the depth of water penetration decreased. The sample containing 60% steel slag showed the lowest depth of water penetration compared to the other samples containing used slag. The notable point is the decrease in

Table 2. Results of tests on SCC in the fresh state

Funnel test V (s)	L Box test (h ₂ /h ₁)	Slump flow test T50cm (s)	Slump Test (mm)	Mix name	row
6-12	0.8-1	0-3	650-800	Min - Max	
8.9	0.81	1.7	712	SCC	1
9.3	0.86	1.9	722	SCCS25	2
9.8	0.89	2.0	730	SCCS35	3
10.4	0.94	2.2	750	SCCS45	4
10.8	0.96	2.3	756	SCCS50	5
11	0.99	2.4	765	SCCS60	6

the penetration depth at older ages compared to younger ages and also the decrease in the samples containing used slag compared to the reference sample.

- Slump flow times (T50cm) and V funnel test showed an increase with the addition of used slag as a replacement for part of the cement. An acceptable blockage ratio was observed in all samples containing slag compared to the reference sample.
- The L-box test showed that the samples containing 25% steel slag had an h₂/h₁ of 86%, which is an increase over the reference sample, which is 0.81, and the sample containing 60% steel slag had an h₂/h₁ of 0.99 compared to the reference sample.
- The results of the water penetration depth and water absorption percentage in the samples containing the optimal percentage of slag showed a decrease of 10.6% and 25.2%, respectively, at the age of 120 days.

References

- [1] H. Okamura, Self-compacting high-performance concrete, Concrete international, 19(7) (1997) 50-54.
- [2] H. Okamura, M. Ouchi, Self-compacting concrete, Journal of advanced concrete technology, 1(1) (2003) 5-15.

- [3] F. Ghaffari-Moghaddam, Investigation of the effect of nanomaterials on the properties of self-compacting concrete, in: Second Nanotechnology Student Conference, Isfahan, 2007.
- [4] G. De Schutter, P.J. Bartos, P. Domone, J. Gibbs, Self-compacting concrete, Whittles Publishing Caithness, 2008.



ارزیابی خواص بتن‌های خودتراکم حاوی سرباره کارخانه فولاد اهواز

سیدمحسن کالوندی^۱، سیدفتح اله ساجدی^{۲*}، فریدون مقدس‌نژاد^۳ 

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

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

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

کلمات کلیدی:

بتن خودتراکم
سرباره کارخانه فولاد اهواز
رئولوژی
خواص مکانیکی
دوام

خلاصه: بتن خودتراکم، بتنی است که همزمان سه ویژگی، توانایی جریان تحت وزن خود، پر کردن فضای کامل قالب و ایجاد یک مخلوط چگال و نسبتاً همگن را بدون نیاز به عملیات تراکم را داشته باشد. سرباره کارخانه فولاد اهواز استفاده گردید. این سرباره در ترکیبات شیمیایی خود تفاوت قابل توجهی با سرباره‌های متداول در دنیا دارد و به همین دلیل، در ساخت بتن خودتراکم استفاده گردید. در ساخت نمونه‌ها ۲۵٪، ۳۵٪، ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ پودر سرباره، جایگزین بخشی از سیمان شد و نمونه‌ها در سنین ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روزه آزمایش شدند. آزمایش‌های مربوط به رئولوژی بتن شامل جریان اسلامپ، قیف V و جعبه L انجام شدند. مقاومت فشاری و آزمایش ضربه ارتجاعی استاتیکی از خواص مکانیکی و آزمایش‌های مرتبط با دوام شامل مقاومت الکتریکی، عمق نفوذ آب و جذب حجمی آب انجام گردیدند. طبق آزمایش‌های انجام‌شده، درصد بهینه پودر مصرفی به میزان ۲۵٪ تعیین شد. آزمایش اسلامپ نمونه حاوی درصد بهینه پودر سرباره، افزایش ۱۴٪ را نسبت به نمونه مرجع نشان داد. در آزمایش مقاومت فشاری، نمونه‌های حاوی درصد بهینه پودر سرباره در سن ۱۲۰ روزه، نسبت به نمونه مرجع افزایش داشتند. بررسی نتایج عمق نفوذ آب و همین‌طور درصد جذب حجمی آب ۴٪ افزایش را نشان دادند. ضربه ارتجاعی استاتیکی نمونه‌های حاوی درصد بهینه پودر سرباره به مقدار ۴/۸٪ نسبت به نمونه مرجع در سن ۱۲۰ روزه افزایش داشتند. بررسی نتایج عمق نفوذ آب و درصد جذب حجمی آب در نمونه‌های حاوی درصد بهینه پودر سرباره، به ترتیب به میزان ۱۲/۵٪ و ۱۶/۶٪ در سن ۱۲۰ روزه، کاهش نشان دادند.

۱- مقدمه

بتن خود تراکم برای رفع محدودیت‌های بتن معمولی توسط اوکامورا^۱ در ژاپن مطرح گردید که نمونه اولیه این بتن، در سال ۱۹۸۸ در ژاپن و در دانشگاه توکیو با اسلامپ بیشتر از ۶۲۰ میلی‌متر ساخته شد^[۳]. تحقیقاتی توسط تیکالسکای و همکاران^۲ برای بررسی خصوصیات مخلوط بتن دوجزئی و یا سه‌جزئی ساخته‌شده از سرباره و خاکستر بادی انجام گردید، نتایج آزمایش این تحقیق نشان می‌دهد که مقاومت فشاری مخلوط سه‌جزئی نسبت به مخلوط حاوی فقط خاکستر بادی افزایش می‌یابد^[۴]. کاهش آلودگی صوتی ناشی از لرزاندن و فراهم کردن امکان بتن‌ریزی در شب در مناطق شهری، امکان ساخت سازه‌های بتنی ویژه مانند بتن‌ریزی در زیرآب از خواص مربوط به بتن خودتراکم هستند^[۵]. آجوج و همکاران^۳ اثر پودر سنگ، سرباره آهنگدازی خیلی ریز و پوزولان‌های طبیعی و همچنین تأثیرات متقابل آنها را به همراه فوق روان‌کننده پلی کربوکسیلات را در

بتن خود تراکم یکی از انواع بتن با عملکرد بالا محسوب می‌شود که تقریباً سه دهه از عمر آن می‌گذرد و تحقیقات وسیعی در این سه دهه بر روی آن انجام گرفته است و در بسیاری از کشورها استفاده شده است. این بتن با استفاده از فوق روان‌کننده‌ها و مقدار پودر بیشتر و طرح اختلاط خاص، امکانات بدیهی را در اجرای سازه‌های بتنی به علت جریان پذیر بودن فراهم نموده است و مشکلات عدم تراکم مناسب در محل‌های با تراکم زیاد میلگردها از قبیل محل اتصال تیر و ستون را برطرف می‌نماید. این بتن بدون نیاز به هیچ لرزاننده‌ای تحت اثر وزن خود متراکم شده و از کارایی بالایی برخوردار است^[۱]. مفهوم بتن خودتراکم اولین بار در سال ۱۹۸۶ با مسئله دوام در سازه‌های بتنی و اینکه علت اصلی ضعف این سازه‌ها در عدم کیفیت بتن اجرایی است، پیشنهاد شد^[۲]. اولین بار نظریه

1. Okamura
2. Tikalsky et al.
3. Ajoj et al.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: fa.sajedi@iau.ac.ir



خواص رئولوژی ملات بررسی کردند. 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 می شود [۶]. تحقیقی توسط مستوفی نژاد و نظر منفرد در خصوص استفاده از ترکیب ۱۰٪ سرباره و ۱۵٪ پودر سنگ آهک جایگزین سیمان انجام شد و ضمن اقتصادی نمودن طرح اختلاط، سبب افزایش دوام بتن ها گردید. در این تحقیق به کارگیری جزییات چنین طرح اختلاطی برای ساخت بتن در مجاورت یون سولفات، عملکرد مناسبی از خود نشان داد [۷]. بریندا و همکاران^۱ در تحقیقی به بررسی مشخصات دوام و خوردگی بتن حاوی سرباره فولاد پرداختند، آنها مشاهده کردند که مقاومت فشاری و مقاومت دو نیم شدن بتن های حاوی سرباره نسبت به نمونه مرجع بیشتر شده است [۸]. تحقیقات انجام شده توسط راو و همکاران نشان می دهد، جایگزینی سرباره با بخشی از سیمان باعث افزایش سرعت امواج عبوری از نمونه های بتنی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه می شود. با توجه به نتایج تحقیق آنها جایگزینی ۴۰٪ سرباره به عنوان بخشی از سیمان بیشترین تأثیر مثبت را بر تراکم بتن دارد [۹]. فلین و همکاران در تحقیقی نشان دادند که در بتن های حاوی ۴۰٪ سرباره فولاد جایگزین سیمان، زمان گیرش در دمای ۲۷ درجه سانتی گراد حدود یک ساعت افزایش پیدا می کند. میزان مصرف سیمان پرتلند و نوع سیمان، عوامل مهمی در تنظیم زمان گیرش بتن های حاوی سرباره هستند. در صورتی که میزان جایگزینی سرباره بیشتر از ۲۵٪ وزنی سیمان باشد، باعث تأخیر در زمان گیرش بتن می شود [۱۰]. تحقیقات اوزیلدیریم^۲ نشان می دهد که افزودن ۵٪ تا ۱۰٪ میکروسیلیس به بتن های حاوی ۳۰٪ تا ۵۰٪ سرباره جایگزین سیمان باعث افزایش مقاومت ۷ روزه نمونه ها می شود. همچنین بیشترین فشاری ۷ و ۲۸ روزه در نمونه های ساخته شده در این تحقیق مربوط به طرح حاوی ۶۰٪ سیمان، ۳۳٪ سرباره و ۷٪ میکرو سیلیس بود [۱۱]. تحقیقاتی توسط تیکالسکی و همکاران^۳ برای بررسی خصوصیات مخلوط بتن دوجزئی و یا سه جزئی ساخته شده از سرباره و خاکستر بادی انجام گردید، نتایج آزمایش این تحقیق نشان می دهد که مقاومت فشاری مخلوط سه جزئی نسبت به مخلوط حاوی فقط خاکستر بادی افزایش می یابد [۱۲]. تحقیقاتی که توسط سیواسندرام و همکاران^۴ انجام شد نتایج آزمایش ها نشان می دهند که استفاده از سرباره در بتن باعث کاهش حرارت هیدراسیون می شود، در مواردی که مشکل

ترک خوردگی حرارتی در بتن وجود دارد استفاده از سرباره به دلیل اینکه سرعت هیدراسیون کمتری نسبت به سیمان پرتلند معمولی دارد و باعث می شود که دمای هیدراسیون آن کمتر شود، یک مزیت به حساب می آید برای اینکه دمای هیدراسیون مخلوط سیمان کاهش محسوسی داشته که لازم است که بیش از ۵۰٪ سرباره جایگزین سیمان شود [۱۳]. هوتن^۵ در تحقیقی درباره اثر سرباره کوره آهن گدازه جهت کنترل نفوذ سولفات ها در محیط های پر سولفات پرداخت، نتایج آزمایش های این تحقیق نشان می دهد که مقاومت بتن در برابر سولفات ها، با جایگزینی سرباره به جای بخشی از سیمان افزایش می یابد، که این مقدار بیش از نصف سرباره جایگزین سیمان است [۱۴]. همچنین هکال و همکاران^۶ در تحقیقی به بررسی مقاومت در برابر تهاجم سولفات ها به بتن حاوی ترکیب سرباره و پودر سنگ آهک در محلول ۱۰٪ سولفات منیزیم پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که خمیر حاوی ۴۰٪ سرباره دوام بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد. از طرفی افزودن فقط ۵٪ پودر سنگ آهک در این محیط باعث افزایش مقاومت در برابر تهاجم سولفات ها می شود [۱۵]. تحقیقات انجام شده توسط راو و همکاران^۷ نشان می دهد، جایگزینی سرباره به جای بخشی از سیمان باعث افزایش سرعت امواج عبوری از نمونه های بتنی در هر دو سن ۲۸ روز و ۹۰ روز می شود. با توجه به نتایج این تحقیق جایگزینی ۴۰٪ سرباره به عنوان بخشی از سیمان بیشترین تأثیر مثبت را بر تراکم بتن دارد [۱۶]. خانی و همکاران در تحقیقی نشان دادند که استفاده از میکروسیلیس و پوزولان خاش موجب کاهش هدایت الکتریکی در نمونه های بتن خودتراکم نسبت به نمونه های بتن شاهد گردیده است. همچنین افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس و پوزولان خاش به عنوان ماده جایگزین سیمان موجب بهبود رفتار مکانیکی، کاهش جریان عبوری در نمونه ها و افزایش دوام در بتن های خودتراکم گردیده است [۱۷]. حسینی پول و همکاران در تحقیقی جایگزینی ۴۵٪ پودر سرباره به لحاظ رئولوژی و خواص مکانیکی حالت بهینه می باشد. در گام بعدی با تثبیت مقدار بهینه پودر سرباره در جایگزینی ۴۵٪ سرباره به عنوان سنگدانه ریز (ماسه) در دو محدوده ۳-۰ میلی متر و ۶-۳ میلی متر با ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۵٪ جایگزین ماسه شدند. آزمایشات نشان دادند در جایگزینی ۳۰٪ خواص رئولوژی بتن خودتراکم بسیار مناسب و مقاومت فشاری و خمشی قابل قبولی دارد [۱۸]. همایون فر و قدوسیان در تحقیقی نشان دادند که مخلوط های حاوی میکروسیلیس و سرباره بیشترین چسبندگی و

1. Brindha et al.
2. Ozyildirim
3. Tikalsky et al.
4. Sivasundaram et al.

5. Hooton
6. Hekal et al.
7. Rao et al.

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

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

اکسیدها	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 تهران	۲۱/۵	۵	۰/۲۶۳	۴	۶۴/۱۲	۰/۶۵	۲/۴۷	۰/۴	۰/۶
پودر سرباره کارخانه فولاد اهواز	۲۱/۱	۵/۷	۰/۴۸	۴۳/۰	۱۹/۵	۱/۳	۸/۳	-	۰/۱۷

این تحقیق برای بررسی مقایسه خواص بتن خودتراکم با بتن معمولی، از پودر سرباره کارخانه فولاد اهواز به جای بخشی از سیمان استفاده شد. سرباره مصرفی پودر شده به میزان ۲۵٪، ۳۵٪، ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ جایگزین سیمان شدند و خواص رئولوژی، مکانیکی و دوام نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۲۰ روزه بررسی شدند. درصد بهینه سرباره جایگزین نیز تعیین شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سیمان مصرفی

سیمان مصرفی این تحقیق از کارخانه سیمان تهران، با وزن مخصوص $3/01 \text{ g/cm}^3$ و سطح ویژه 2912 g/cm^2 تهیه و در شرایط مطلوب دپو و نگهداری شد و الزامات استاندارد ۳۸۹ ایران [۱۶] و استاندارد ASTM C150 را تامین نموده است [۱۷]، ترکیبات شیمیایی این سیمان که حاصل آزمایش طیف‌نگاری فلوئورسانس اشعه ایکس می‌باشد، در جدول ۱ ارائه شده است.

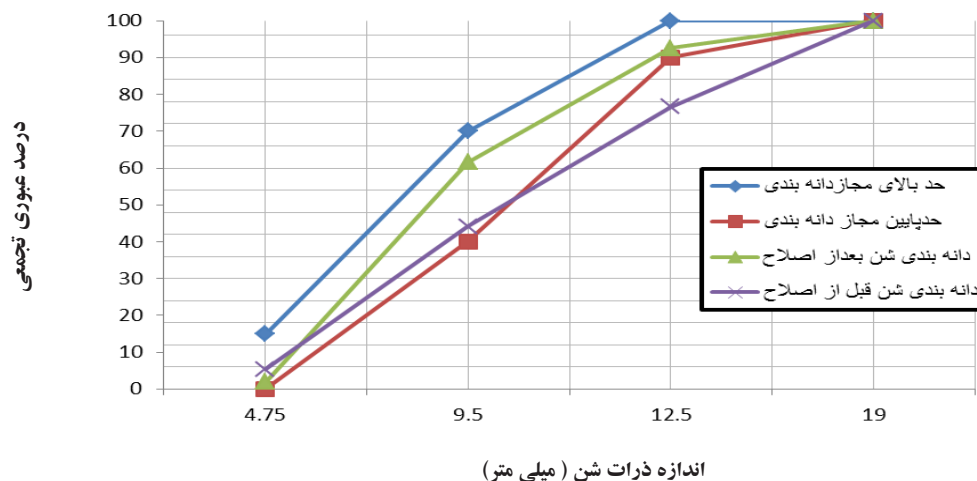
۲-۱-۲- سرباره کارخانه فولاد اهواز

سرباره فولادی مصرفی این تحقیق از کارخانه فولاد اهواز به صورت سنگدانه تهیه و سپس به روش گندله توسط کارخانه نرم‌کوبان ساوه تبدیل به پودر سرباره، با توده ویژه $2/56 \text{ g/cm}^3$ تهیه و در شرایط مطلوب دپو و نگهداری شد. ترکیبات شیمیایی این سرباره که حاصل آزمایش طیف‌نگاری فلوئورسانس اشعه ایکس می‌باشد، در جدول ۱ داده شده است.

۲-۱-۳- شن مصرفی در تحقیق (درشت‌دانه)

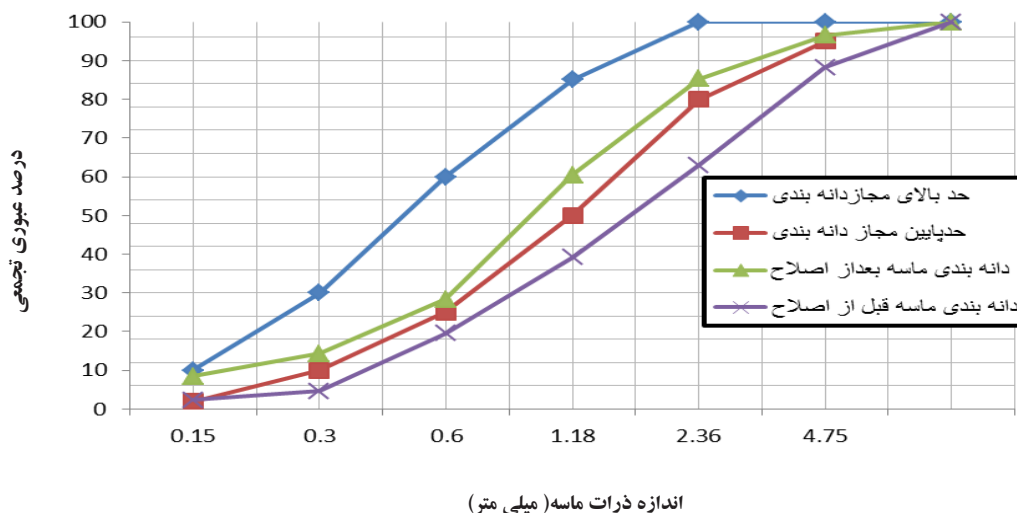
دانه‌بندی سنگدانه‌ها عامل تعیین‌کننده‌ای در میزان کارایی مخلوط بتن است. کارایی به‌نوبه خود به مقدار آب و سیمان و سنگدانه‌های در مخلوط بستگی دارد و جداشدگی و آب انداختن بتن را پایش می‌کند و بر نحوه

مخلوط‌های دارای ژئولیت کمترین مقدار چسبندگی به بستر را به دست داده‌اند. همچنین مشخص شد که تنها نمونه‌ای که چسبندگی کمتر از نمونه بدون پوزولان داشته است نمونه دارای ۱۵٪ ژئولیت می‌باشد [۲۷]. عبادی و همکاران در پژوهشی نشان دادن که ترکیب سرباره و میکروسیلیس به میزان ۴۵٪ سرباره و ۱۰٪ میکروسیلیس عملکرد بهتری را در رئولوژی، دوام و مقاومت داشت [۲۸]. رحمتی و همکاران در تحقیقی نشان دادن که کارایی بتن خودتراکم و آزمون‌های جریان اسلامپ، قیف وی شکل، بتن سخت شده و مقاومت مکانیکی و پارامترهای دوامی از جمله مقاومت الکتریکی، نفوذ تسریع شده یون کلر، جذب آب حجمی نیم و ۲۴ ساعته نشان می‌دهد که سرباره با ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ به همراه ۵٪ دوده سیلیسی از هر نظر بتن‌های موفق بوده‌اند [۲۹]. میرزایی و همکاران در تحقیقی نشان دادند که جایگزینی پودر سرباره خوزستان به مقدار ۱۰٪ ریزدانه‌ها حالت بهینه خصوصیات تازه و سخت شده بتن خودتراکم می‌باشد و جایگزینی بیش از این درصد سبب کاهش زیادی در خصوصیات تازه و سخت شده می‌گردد [۳۰]. حسینی و جمعه در تحقیقی نشان دادند که بهترین نمونه انتخاب شد که با توجه به مصالح این آزمایش هنگام جایگزینی سیمان با ۴۵٪ سرباره و ۱۰٪ میکروسیلیس بهترین نتایج بدست آمد [۳۱]. ساجدی و هاشمی تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی تاثیر سرباره کارخانه فولاد اهواز بر خواص ملات‌های سیمان-سرباره‌ای، که میزان ۳۰٪ سرباره فولاد کارخانه اهواز به عنوان طرح بهینه به دست آمده است [۳۲]، در خصوص نوآوری این تحقیق قابل ذکر است که طبق نتایج آزمایش XRF بر سرباره مصرفی (جدول ۱) مشهود است که درصد اکسید آهن موجود در سرباره کارخانه فولاد اهواز ۴۳٪ است، که بسیار بالا است و با سرباره‌های متداول دنیا تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. از همین منظر نیز می‌توان به درصد سیلیس 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 در روی آن انجام نشده، بر خواص رئولوژی، مکانیکی و دوام ملات‌های حاوی آن صورت پذیرد. در



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مخلوط شن‌های درشت‌دانه و ریزدانه مصرفی در تحقیق

Fig. 1. Granulation curve of coarse and fine gravel mixtures used in the research



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی در تحقیق

Fig. 2. Grain size distribution curve of sand used in the research

درشت مصرفی در تحقیق ارائه شده‌اند.

۲-۱-۴- ماسه مصرفی (ریزدانه)

ریزدانه‌های مصرفی در این تحقیق ماسه شکسته و شسته شده با وزن $2/64 \text{ g/cm}^3$ مطابق با استاندارد ASTM C128 بوده و میزان ضریب نرمی $3/21$ و جذب آب آنها $1/6$ مطابق با استاندارد ASTM C127 می‌باشد. این سنگدانه‌ها از محل تأمین ماسه مصرفی از معادن شهرستان اسلامشهر در استان تهران تهیه شدند. در شکل ۲، منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی در تحقیق ارائه شده است [۱۶].

بتن‌ریزی و پرداخت سطح بتن تأثیر دارد. بنابراین دانه‌بندی سنگدانه‌ها در تعیین نسبت مواد تشکیل‌دهنده مخلوط بتن اهمیت بسیار زیادی دارد [۱۸]. در این تحقیق شن مصرفی از نوع شکسته بوده که از معادن شهرستان اسلامشهر در استان تهران تهیه گردید و حداکثر اندازه‌های اسمی آن $19/5$ و $12/5$ میلی‌متر بوده است. آزمایش‌های وزن مخصوص و جذب آب مطابق استاندارد ASTM C127 شده است [۱۹]. وزن مخصوص اشباع با سطح خشک شن‌های بادامی و نخودی به ترتیب $2/65$ و $2/62$ و وزن مخصوص ظاهری $1/61$ و $1/62$ گرم بر سانتی‌مترمکعب و همچنین جذب آب آنها نیز $0/91$ و $0/71$ درصد تعیین گردید. در شکل ۱ منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های

جدول ۲. مشخصات فوق روان کننده مصرفی در تحقیق

Table 2. Characteristics of super-plasticizer used in the study

ظاهر	وزن مخصوص	کلرید محلول در آب	قلیائیت	pH	یون کلر
قهوه‌ای	۱/۰۶	۰/۰۰۳۵	۰/۰۳۲	۳/۹۶	ندارد

جدول ۳. مشخصات شیمیایی و فیزیکی آب شرب تهران (mg/lit)

Table 3. Chemical and physical characteristics of Tehran drinking water (mg/lit)

درجه حرارت (C)	pH	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	سختی کل محلول	کل املاح	سدیم نسبت جذب	سدیم محلول (%)
۲۲	۷/۳۲	۳۳۵/۵	۹۸۳/۶	۱۳۸۹/۶	۱۸۶۳/۷	۱۸۱/۰۳	۸۷۴	۱۲۰۷	۳۶۹۲	۱۰/۹	۶۱/۱

۲-۱-۵- فوق روان کننده

در این تحقیق فوق روان کننده بانام تجاری Flowcem R900 که یک فوق روان کننده اصلاح شده از نسل سوم و کاهش دهنده شدید آب می باشد، از شرکت دوروچم خاورمیانه تهیه و استفاده گردید. مشخصات فنی این فوق روان کننده در جدول ۲ ارائه شده است. ضمناً آب این فوق روان کننده به عنوان بخشی از آب اختلاط لحاظ شده است [۲۰].

۲-۱-۶- آب

از آب شرب شهر تهران به عنوان آب مصرفی در ساخت و عمل آوری نمونه های طرح اختلاط های تحقیق به صورت ثابت با نسبت آب به مواد سیمانی ٪ ۴۵ استفاده گردید. نمونه ها پس از ساخت و قالب گیری در آب عمل آوری شدند. مشخصات شیمیایی و فیزیکی آب شرب شهر تهران در جدول ۳ ارائه شده است.

۳- طرح اختلاط های تحقیق

برای ساخت نمونه های تحقیق ابتدا طرح هایی به صورت آزمون و خطا ساخته شد و آزمایش های بتن تازه بر روی آن ها انجام گرفت و نهایتاً با توجه به آزمایش های انجام شده، طرح اختلاط بتن مرجع انتخاب گردید و سپس

با توجه به طرح اختلاط مرجع، بقیه طرح ها ساخته و آزمایش شدند، در تمام طرح اختلاط ها نسبت آب به مواد سیمانی ٪ ۴۵ به صورت ثابت لحاظ گردید. جایگزینی سرباره با بخشی از سیمان مصرفی با درصد های متفاوت، کاهش قابل ملاحظه برخی خواص مکانیکی را در پی داشته است. بنابراین پس از ساخت طرح مرجع، ۵ طرح اختلاط حاوی پودر سرباره با نسبت از سیمان ساخته شدند. روش نام گذاری طرح ها به این صورت است که SCC بیانگر بتن مرجع خودتراکم، S بیانگر سرباره و عدد پس از S بیانگر درصد سرباره جایگزین سیمان می باشد. به طور مثال SCCS25، به این معنی است که بتن خودتراکم حاوی ٪ ۲۵ سرباره جایگزین سیمان است. در جدول ۴ جزئیات طرح اختلاط های نهایی تحقیق ارائه شده است.

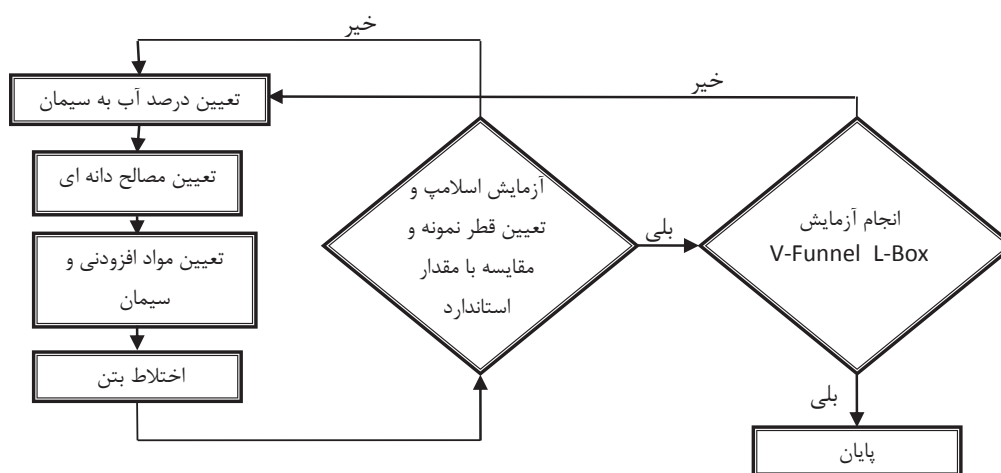
۴- روش ها و آزمایش ها

در انجام آزمایش ها نمونه های مکعبی استفاده شدند. آزمایش های رئولوژی شامل جریان اسلامپ، آزمایش جعبه L و آزمایش قیف V مطابق شکل ۴ هستند. آزمایش های خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری و تعیین ضریب ارتجاعی در سنین ۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۲۰ روزه بودند. آزمایش های دوام شامل جذب آب، مقاومت الکتریکی و عمق نفوذ آب در سنین ۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۲۰ روزه هستند. در شکل ۳ فرآیند ساخت طرح اختلاط های خودتراکم و

جدول ۴. جزئیات طرح‌های اختلاط بتن خودتراکم ساخته شده در تحقیق (Kg/m^3)

Table 4. Details of the design of self-compacting concrete mixtures made in the study (Kg/m^3)

نام طرح	شن بادامی	شن نخودی	ماسه	آب (Lit)	سیمان	پودر سنگ	سرباره فولاد	فوق روان کننده (Lit)
SCC	۳۳/۲	۳۸/۳	۹۴/۸	۲۶/۳	۴۰/۵	۱۸	۰	۰/۱۰۸
SCCS25	۳۳	۳۸	۹۴/۱	۲۶/۹	۳۰/۳۸	۱۸	۱۰/۱۲	۰/۱۲۰
SCCS35	۳۲/۹	۳۷/۸	۹۳/۷	۲۶/۹	۲۷/۳۳	۱۸	۱۴/۱۷	۰/۱۳۷
SCCS45	۳۲/۷	۳۷/۷	۹۳/۳	۲۷/۱	۲۳/۲۸	۱۸	۱۸/۲۲	۰/۱۶۵
SCCS50	۳۲/۶	۳۷/۵	۹۳	۲۷/۱	۲۱/۲۵	۱۸	۲۰/۲۵	۰/۱۸۶
SCCs60	۳۲/۵	۳۷/۴	۹۲/۶	۲۷/۱	۱۷/۲	۱۸	۲۴/۳	۰/۲۰۰



شکل ۳. فرآیند ساخت طرح اختلاط‌های بتن خودتراکم تحقیق

Fig. 3. Process of making the research self-compacting concrete mix design



شکل ۴. آزمایش‌های بتن خودتراکم؛ الف: جعبه L، ب: آزمایش قیف V، ج: میز جریان (اسلامپ)

Fig. 4. Self-compacting concrete tests; A: L-box, B: V-funnel test, C: Flow table test

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های بتن خودتراکم در حالت تازه

Table 5. Results of tests of self-compacting concrete in the fresh state

ردیف	نام طرح اختلاط	آزمایش اسلامپ (mm)	آزمایش جریان اسلامپ T50cm (ثانیه)	آزمایش جعبه L (h2/h1)	آزمایش قیف V (ثانیه)
	حداقل - حداکثر	۸۰۰-۶۵۰	۳-۰	۱-۰٫۸	۱۲-۶
۱	SCC	۷۱۲	۱/۷	۰/۸۱	۸/۹
۲	SCCS25	۷۲۲	۱/۹	۰/۸۶	۹/۳
۳	SCCS35	۷۳۰	۲	۰/۸۹	۹/۸
۴	SCCS45	۷۵۰	۲/۲۲	۰/۹۴	۱۰/۴
۵	SCCS50	۷۵۶	۲/۳	۰/۹۶	۱۰/۸
۳۶	SCCS60	۷۶۵	۲/۴	۰/۹۹	۱۱

در شکل ۵ آزمایش‌های رئولوژی شامل جریان اسلامپ، آزمایش جعبه L و آزمایش قیف V نشان داده شدند.

۵- ارائه نتایج آزمایش‌ها و تحلیل آنها

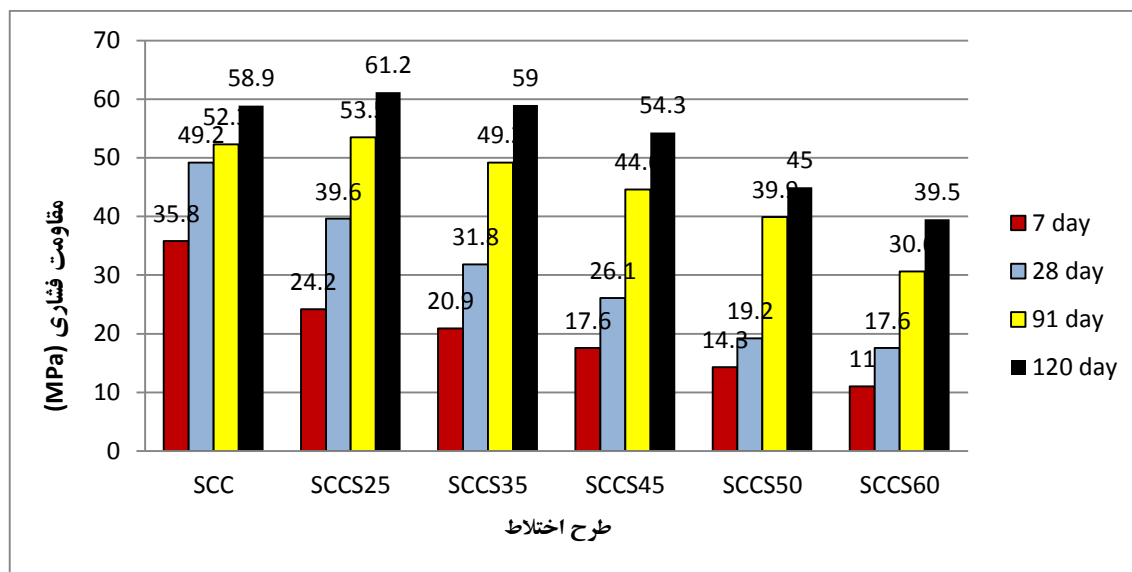
۵-۱- خواص رئولوژی بتن‌های خودتراکم

نتایج آزمایش‌های بتن تازه بیانگر اثر معکوس سرباره کارخانه فولاد اهواز بر روی خواص رئولوژی است. زیرا سرباره فولاد دارای سطح مخصوص بالا و اصطکاک ذره‌ای قابل توجهی با سنگدانه‌ها دارد. مقدار جریان اسلامپ برای طرح مرجع ۷۱۲ میلی متر است در حالی نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد با افزایش ۱۴٪ نسبت به نمونه مرجع ۷۲۲ میلی متر می‌باشد، درحالی‌که نمونه حاوی ۶۰٪ سرباره فولاد با افزایش ۶۹٪ نسبت به نمونه مرجع ۷۶۵ میلی متر بدست آمده است. بیشترین مقدار جریان اسلامپ را دارد. جریان اسلامپ در دستور کار EFNAPC برای بتن خود تراکم در محدوده ۶۵۰~۸۰۰ میلی متر ارائه شده است. زمان‌های جریان اسلامپ (T_{50}) و قیف V با افزودن سرباره فولاد جایگزین بخشی از سیمان افزایش دارد، نسبت انسداد قابل قبولی در تمام نمونه‌های حاوی سرباره نسبت به نمونه مرجع مشاهده شد. در آزمایش جعبه L برای ارزیابی رئولوژی بتن خودتراکم، ظرفیت حفظ پیوستگی جریان صورت می‌گیرد معمولاً، نتیجه این آمایش با نسبت h_2/h_1 که همان نسبت ارتفاعی بتن در انتهای جعبه به ابتدای آن است مشخص می‌گردد. مشاهده گردید، با افزایش درصد سرباره فولادمصرفی به نمونه‌ها، نسبت h_2/h_1 افزایش می‌یابد، نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد مصرفی با افزایش ۶٪ نسبت به نمونه مرجع h_2/h_1 ۰/۸۱ می‌باشد، درحالی‌که نمونه حاوی ۶۰٪ سرباره فولاد نسبت به نمونه مرجع h_2/h_1 ۰/۹۹ به دست آمده است.

۵-۲- تحلیل خواص مکانیکی بتن خودتراکم

۵-۲-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نمونه‌های مکعبی استاندارد پس از عمل‌آوری در آب، به مدت ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روز مطابق استاندارد ASTM C511، از حوضچه خارج و آزمایش تعیین مقاومت فشاری، با جک هیدرولیکی بتن شکن، با سرعت بارگذاری ۱۳۵۰ کیلوگرم بر ثانیه، بر اساس استاندارد BS1888 بر روی نمونه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک انجام پذیرفت [۲۱]، هر طرح اختلاط در هر سن دارای ۳ نمونه می‌باشد، نتایج نهایی میانگین سه 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 می‌شود. میانگین مقاومت فشاری بتن برای نمونه‌های مرجع در سن ۷ روز مقدار ۳۵/۸ مگا پاسکال گردید و این مقاومت در ۲۸ روز به ۴۹/۲ مگا پاسکال رسید، نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری در جدول شماره ۴ نشان داده شده است. میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها در ۹۱ روز به ۵۲/۳ رسید و مقاومت نمونه‌های شاهد در ۱۲۰ روز به مقدار ۵۸/۹ مگا پاسکال رسید. مقاومت فشاری بتن برای نمونه‌هایی حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد اهواز به‌عنوان جایگزین سیمان استفاده گردید، در مدت‌زمان ۷ روز مقدار ۲۴/۲ مگا پاسکال گردید و در ۲۸ روز به ۳۹/۶ مگاپاسکال رسید این مقاومت در ۹۱ روز به ۵۳/۵ مگاپاسکال و در ۱۲۰ روز به مقدار ۶۱/۲ مگا پاسکال رسید. مقاومت فشاری برای بتن‌های حاوی ۳۵٪ سرباره مصرفی جایگزین سیمان گردید به ترتیب به ۲۰/۹، ۳۱/۸، ۴۹/۲ مگاپاسکال و در ۱۲۰ روز به ۵۹ مگاپاسکال رسید. مقاومت



شکل ۵. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های طرح اختلاط‌های تحقیق در سنین مختلف

Fig. 5. Compressive strength results of samples taken from the research mix design at different ages

مقدار افزایش ۱/۶٪ ناچیز به نظر می‌رسد، اما از آنجایی که نشانگر این است که تا سن ۱۲۰ روز سرباره دارای اثر مثبت بر مقاومت فشاری می‌باشد، قابل‌ذکر است. بررسی نتایج بیانگر این است که بتن حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد مصرفی مقاومت فشاری بالاتر و اثر بهتری را نسبت به نمونه‌های دیگر نشان داد.

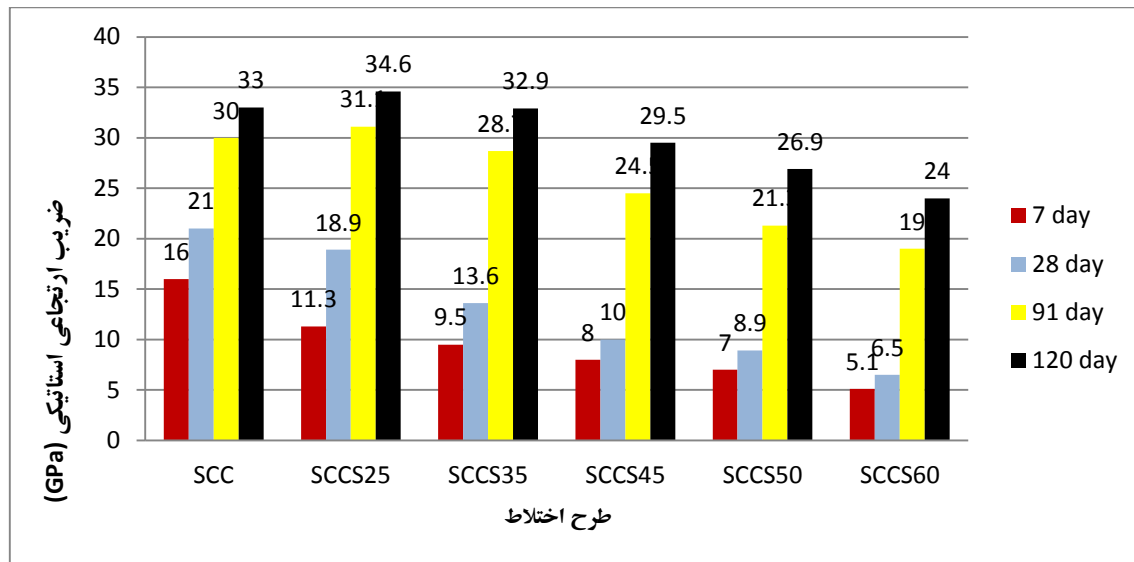
۵-۲-۲- تحلیل مقاومت فشاری

یکی از دلایل تاثیر دیر هنگام سرباره فولاد خورستان می‌تواند میزان آهن زیاد موجود در نمونه سرباره تهیه شده از کارخانه فولاد اهواز باشد. در جدول شماره ۱ اشاره شد سرباره مصرفی بیش از ۴۳ درصد اکسید آهن دارد و همچنین دی اکسید سیلیکون به میزان ۲۱ درصد باعث روند کند بهبود خواص مکانیکی شده است در این تحقیق در سن ۹۱ روزه مقاومت نمونه ۲۵٪ سرباره جایگزین سیمان به عنوان طرح بهینه بدست آمده است، که در تحقیق حیدری و همکاران مقدار ۲۰٪ سرباره فولاد به عنوان طرح بهینه می‌توان با این تحقیق مقایسه نمود [۳۳].

۵-۲-۳- تحلیل نتایج آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی

ضریب ارتجاعی بتن، در تحلیل و طراحی سازه‌های بتنی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. در اکثر پروژه‌های بزرگ و مهم ضریب ارتجاعی از جمله

فشاری نمونه‌های بتن حاوی ۴۵٪ سرباره فولاد جایگزین بخشی از سیمان در بتن، در مدت ۷ روز به ۱۷/۶ مگا پاسکال، در ۲۸ روز به ۲۶/۱ مگا پاسکال و در ۹۱ روز به ۴۴/۶ مگا پاسکال رسید و در ۱۲۰ روز به ۵۴/۳ مگا پاسکال رسید. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن حاوی ۵۰٪ سرباره فولاد جایگزین بخشی از سیمان در بتن، به ترتیب به اعداد ۱۴/۳، ۱۹/۲، ۳۹/۹ و ۴۵ مگا پاسکال رسید که نتایج قابل ملاحظه‌ای بودند. مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با ۶۰٪ سرباره جایگزین بخشی از سیمان در بتن، در مدت زمان ۷ روز ۱۱ مگا پاسکال و در ۲۸ روز به مقاومت ۱۷/۶ مگا پاسکال و در ۹۱ روز به ۳۰/۶ مگا پاسکال و در ۱۲۰ روز به مقاومت فشاری ۳۹/۵ مگا پاسکال رسید. نتایج مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۲۰ روزه در شکل ۵ ارائه شدند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد، تاثیر سرباره کوره آهن‌گدازی بر مقاومت فشاری 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 ۲۵٪ و ۳۵٪ حاوی سرباره فولاد اهواز بیشتر از نمونه مرجع شده است. مقدار بیش از ۴۵٪ سرباره در بتن باعث افت مقاومت فشاری شده است. اما تاثیر ۲۵٪ سرباره در سن ۹۱ روزه نسبت به نمونه مرجع موجب افزایش ۱۹٪ مقاومت فشاری گردیده است. همچنین در سن ۱۲۰ روزه مقاومت نمونه ۳۵٪ سرباره جایگزین سیمان به ۱/۶٪ رسیده و در ۲۵٪ سرباره جایگزین سیمان در سن ۱۲۰ روزه ۳/۹٪ افزایش را نشان می‌دهد. هرچند



شکل ۶. نتایج ضریب ارتجاعی استاتیکی نمونه‌های طرح اختلاط‌های تحقیق در سنین مختلف

Fig. 6. Static modulus of elasticity results of samples taken from the research mix design at different ages

نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار می‌باشند، که ذرات سرباره به شکل کامل‌تری هیدراته شده و خواص مکانیکی از جمله ضریب ارتجاعی بهبود یافته است [۳۵].

۵-۳- تحلیل آزمایش‌های دوام بتن خودتراکم

۵-۳-۱- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی طبق استاندارد ACI222 انجام گردید. این آزمایش با استفاده از دو صفحه مسی یا برنجی که بر سطح آزمون بتنی اشباع از آب به کمک خمیر سیمان تازه می‌چسبد و مقاومت الکتریکی به کمک یک جریان متناوب با فرکانس مشخص به دست می‌آید، انجام شده است. با داشتن سطح بتن و فاصله بین دو صفحه فلزی، مقاومت ویژه الکتریکی آزمایش‌ها برحسب $k\Omega.cm$ تعیین می‌شود [۲۲]. مقاومت الکتریکی با نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر ارتباط مستقیم دارد. به همین دلیل مدتی است که آزمایش سنجش مقاومت ویژه الکتریکی بتن به دلیل سرعت بالا و غیر مخرب بودن مورد توجه قرار گرفته است. مقاومت الکتریکی در سن ۷ روزه برای نمونه مرجع، $12 k\Omega.cm$ است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ حاوی سرباره شرکت فولاد خوزستان با کاهش ۱۵٪ به $10.2 k\Omega.cm$ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با کاهش ۲۵٪ نسبت به نمونه مرجع به $9 k\Omega.cm$ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با کاهش ۳۱٪، ۳۷٪ و ۵۰٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۷/۵، ۸/۲ و $6 k\Omega.cm$ رسیده

پارامترهای مهمی است که همیشه به عنوان اولین پارامتر طراحی مطرح است. ضریب ارتجاعی همانند مقاومت با توجه به نرخ بار وارده می‌تواند از نوع استاتیکی یا دینامیکی باشد. ضریب ارتجاعی دینامیکی بزرگ‌تر از نوع استاتیکی است ولی هرچه مقاومت بیشتر باشد این دو مقدار به هم نزدیک‌تر می‌باشند. نتایج ضریب ارتجاعی نشان می‌دهد در سن ۷ و ۲۸ روزه ضریب ارتجاعی استاتیکی نمونه‌های دارای سرباره فولاد نسبت به نمونه مرجع کاهش نشان می‌دهد. در شکل ۵ نشان داده شده است. نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد اهواز در سن ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۲۹٪ و ۱۰٪ کاهش نسبت به نمونه مرجع نشان می‌دهد که در سنین فوق نمونه حاوی ۶۰٪ سرباره فولاد اهواز به ترتیب ۶۸٪ و ۷۳٪ نسبت به نمونه مرجع کاهش دارد. اما با گذشت زمان در سنین ۹۱ و ۱۲۰ روزه نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد اهواز نسبت به نمونه مرجع ۳٪ و ۵٪ افزایش نشان دارد اما نمونه‌های ۳۵٪، ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ نسبت به نمونه مرجع کاهش دارد. بررسی‌ها بیانگر این موضوع است که نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سرباره مصرفی در سن ۱۲۰ روز بیشترین مقدار ضریب ارتجاعی استاتیکی را به میزان ۳۴/۶٪ نشان داد. که در مقایسه با نمونه‌های حاوی ۶۰٪ سرباره مصرفی، عدد قابل ملاحظه‌ای است.

۵-۲-۴- تحلیل آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی

نتیجه تحقیقات میرزایی و همکاران نشان داد که سرباره در شرایط عمل‌آوری شده در محیط آزمایشگاهی از افت ضریب ارتجاعی کمتری

است کاسته شده و در نتیجه این موضوع، افزایش تخلخل با افزایش میزان سرباره آهنگدازی می‌تواند منجر به افزایش رسانایی ماتریس شده و مقاومت الکتریکی آن را کاهش داد. اما نکته دیگری که در بررسی نتایج مقاومت الکتریکی از سنین ۹۱ و ۱۲۰ روزه خیلی نزدیک به هم می‌باشد. همچنین با گذشت زمان وجود سرباره آهنگدازی تأثیر زیادی در روند کاهش مقاومت الکتریکی ندارد. با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش با تحقیق عابدی و زندی نتایج نشان داد که مقاومت الکتریکی در آزمون‌های دارای سرباره در محدوده خوب قرار گرفته شده است، به عبارتی بهتر می‌توان گفت که احتمال خوردگی در نمونه‌های ساخته شده با سرباره در محیط آب مغناطیسی کاهش می‌یابد [۳۶].

۵-۳-۳- تحلیل نتایج آزمایش عمق نفوذ آب

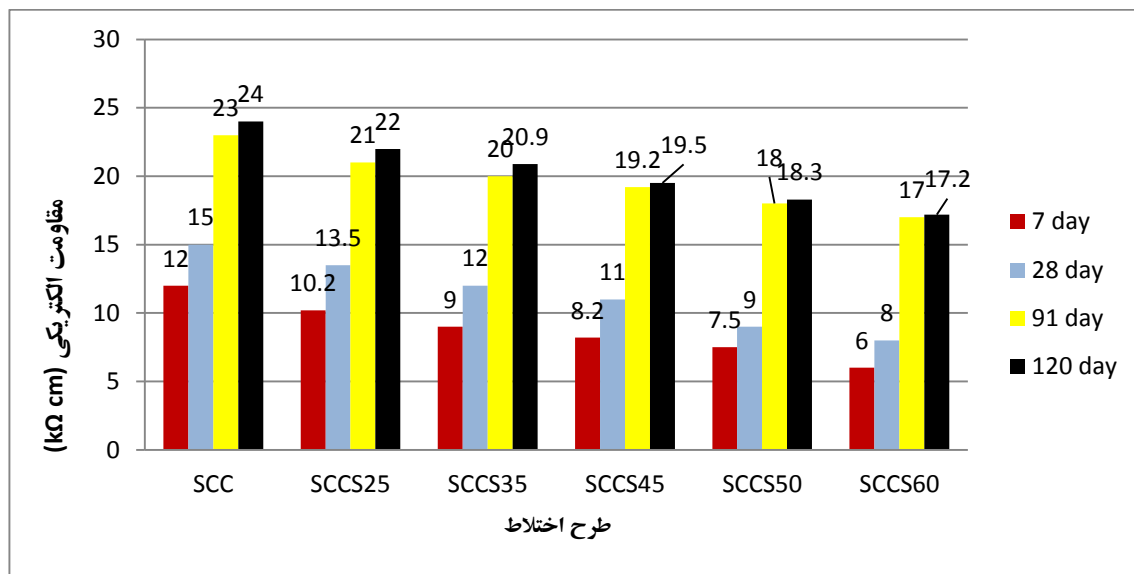
نفوذپذیری بتن معمولاً از طریق محاسبه مقدار آب تحت فشار که برای جریان یافتن به درون یک نمونه بتنی داخل می‌شود، در یک فاصله زمانی مشخص تعیین می‌شود. با اندازه‌گیری عمق نفوذ آب پس از شکستن نمونه‌ها می‌توان به معیاری برای نفوذپذیری بتن دست یافت. در روش مذکور بر اساس آزمایش DIN1048 نمونه‌های مکعبی به بعد ۱۵ سانتیمتری 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 دو نیم تقسیم شده و مقدار نفوذ آب با کولیس اندازه‌گیری می‌شود [۲۴]. عمق نفوذ آب در سن ۷ روزه برای نمونه مرجع ۱۷/۹ میلی‌متر است، در حالی که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۱۰٪ به ۱۶ میلی‌متر رسیده است. عمق نفوذ آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۲۰٪ نسبت به نمونه مرجع به ۱۴/۳ میلی‌متر رسیده است. همچنین عمق نفوذ آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۳۰٪، ۳۶٪ و ۴۴٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۱۲/۵، ۱۱/۳ و ۱۰ میلی‌متر شده است.

عمق نفوذ آب در سن ۲۸ روزه برای نمونه مرجع ۱۴/۴ میلی‌متر است، در حالی که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۱۶٪ به ۱۲ میلی‌متر رسیده است. عمق نفوذ آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۲۸٪ نسبت به نمونه مرجع به ۱۰/۳ میلی‌متر رسیده است. همچنین عمق نفوذ آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۳۷٪، ۴۳٪ و ۵۲٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۹/۲، ۸/۸ و ۶/۸ میلی‌متر شده است. عمق نفوذ آب در سن ۹۱ روزه برای نمونه مرجع ۱۰ میلی‌متر است،

است. نتایج مربوطه در شکل ۶ ارائه شده است. مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ روزه برای نمونه مرجع، $15 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ است، در حالی که در نمونه ۲۵٪ سرباره شرکت فولاد خوزستان با کاهش ۱۰٪ به $13/5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه ۳۵٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز با کاهش ۳۴٪ نسبت به نمونه مرجع به $12 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره آهنگدازی به ترتیب با کاهش ۲۶٪، ۴۰٪ و ۴۶٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۱۱، ۹ و $8 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ رسیده است. مقاومت الکتریکی در سن ۹۱ روزه برای نمونه مرجع، $23 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ است، در حالی که در نمونه ۲۵٪ سرباره شرکت فولاد خوزستان با کاهش ۸٪ به $21 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه ۳۵٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز با کاهش ۱۳٪ نسبت به نمونه مرجع به $20 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره آهنگدازی به ترتیب با کاهش ۱۶٪، ۲۱٪ و ۲۶٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۱۹/۲، ۱۸ و $17 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ رسیده است. نمونه مرجع، $24 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ است، در حالی که در نمونه ۲۵٪ سرباره شرکت فولاد خوزستان با کاهش ۸٪ به $22 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه ۳۵٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز با کاهش ۱۳٪ نسبت به نمونه مرجع به $20/9 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره آهنگدازی به ترتیب با کاهش ۱۸٪، ۲۳٪ و ۲۸٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۱۹/۵، ۱۸/۳ و $17/2 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ رسیده است.

۵-۳-۲- تحلیل آزمایش مقاومت الکتریکی

با بررسی نتایج مقاومت الکتریکی مشاهده می‌شود، تأثیر سرباره کوره آهنگدازی موجب کاهش مقاومت الکتریکی گردیده است. همچنین وجود سرباره باعث پر شدن فضای بین مصالح سنگی شده و این امر کاهش مقاومت الکتریکی نمونه‌های دارای سرباره نسبت به نمونه مرجع را در پی داشته است. از آنجاکه سرباره به عنوان یک پوزولان در درون ماتریس بتن قرار می‌گیرد، لذا با مصرف کریستال‌های کلسیم هیدروکسید سبب کاهش غلظت یون‌های OH در محلول منفذی می‌شود. همچنین این موضوع منجر به افت رسانایی الکتریکی محلول منفذی بتن می‌گردد [۲۳]. همان گونه که در شکل ۶ مشاهده شد، عملکرد پوزولانی در سنین اولیه ضعیف می‌باشد و بر همین اساس سرباره شرکت فولاد اهواز تأثیر خاصی بر بهبود مقاومت الکتریکی در سن ۷ روزه ندارد. حال آنکه با افزایش درصد جایگزینی سیمان با سرباره یکی از عوامل اصلی مقاومت و چسبانندگی ماتریس که همان سیمان



شکل ۷. نتایج مقاومت الکتریکی نمونه‌های طرح اختلاط‌های تحقیق در سنین مختلف

Fig. 7. Electrical resistance results of samples taken from the research mix design at different ages

و ... قابل انجام می‌باشد و نتایج را به صورت کمی بیان می‌کند. همچنین این روش قادر است ترک‌های ریز و مویین بر روی سطح بتن حتی در محیط آزمایشگاه را نیز بررسی نماید [۳۷].

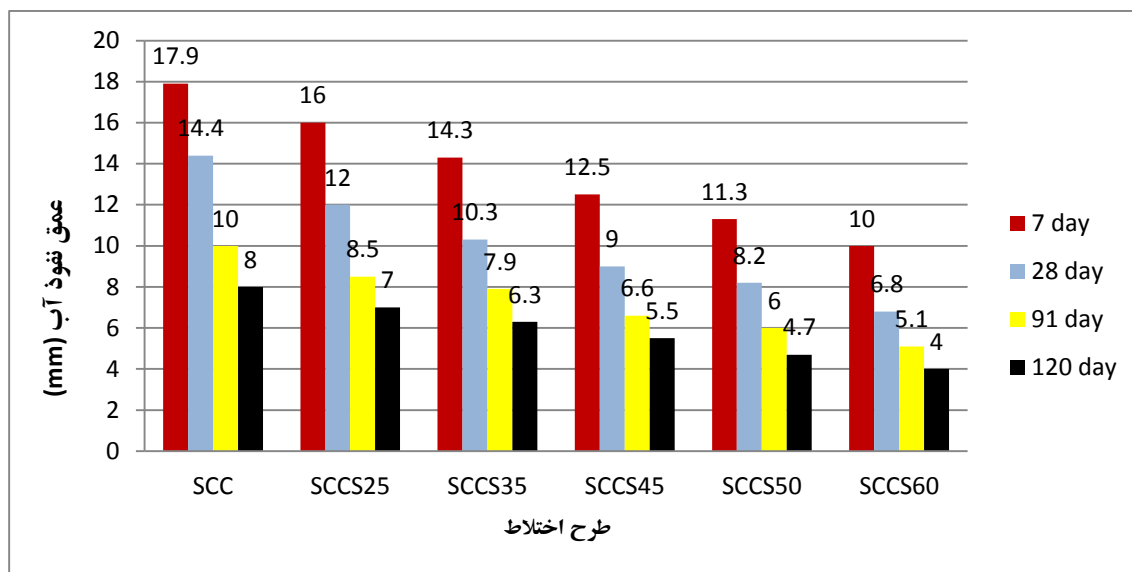
۵-۳-۴- تحلیل نتایج آزمایش عمق نفوذ آب

نتایج عمق نفوذ در شکل ۷ نشان داد که با افزایش میزان سرباره کارخانه فولاد اهواز، عمق نفوذپذیری آب کاهش داشته است. نمونه ۶۰٪ حاوی سرباره کارخانه فولاد اهواز نسبت به بقیه نمونه‌های حاوی سرباره فولاد اهواز کمترین عمق نفوذ آب را نشان می‌دهد. اما نکته قابل توجه کاهش عمق نفوذ در سنین بالا نسبت به سنین پایین و همچنین کاهش نمونه‌های حاوی سرباره مصرفی نسبت به نمونه مرجع می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده و مقایسه با نتایج تحقیق زندگی و عابدی نشان داد که نمونه ساخته شده با سرباره ذوب آهن به جای سیمان در محیط مغناطیسی باعث کاهش ۸۳٪ عمق نفوذ گردیده است [۳۶].

۵-۳-۵- نتایج آزمایش جذب حجمی آب

اندازه‌گیری جذب آب نمونه‌ها به دو روش انجام می‌شود. در روش استاندارد آزمایش BS1881 نمونه‌های $\Phi 7/5 \times 7/5$ پس از قرارگیری در کوره به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و پس از خشک‌سازی،

درحالی که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۱۵٪ به ۸/۵ میلی‌متر رسیده است. عمق نفوذ آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۲۱٪ نسبت به نمونه مرجع به ۷/۹ میلی‌متر رسیده است. همچنین عمق نفوذ آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۳۴٪، ۴٪ و ۴۹٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۶/۶، ۶ و ۵/۱ میلی‌متر شده است. عمق نفوذ آب در سن ۱۲۰ روزه برای نمونه مرجع ۸ میلی‌متر است، درحالی که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۱۲٪ به ۷ میلی‌متر رسیده است. عمق نفوذ آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۲۱٪ نسبت به نمونه مرجع به ۶/۳ میلی‌متر رسیده است. همچنین عمق نفوذ آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۳۱٪، ۴۱٪ و ۵۰٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۵/۵، ۴/۷ و ۴ میلی‌متر شده است. به طور کلی آزمایش عمق نفوذپذیری آب بتن یک آزمایش استاندارد نیست، از طرف دیگر نتایج حاصل از روش‌های متداول تعیین نفوذپذیری آب در بتن که در آزمایشگاه و روی نمونه‌های بتنی از قبل آماده شده انجام می‌پذیرد، عمدتاً کیفی و مقایسه‌ای می‌باشد. از این رو در سال ۲۰۱۱ توسط نادری، روشی با کاربردی گسترده و دقیق، جهت تعیین مقدار نفوذپذیری آب در بتن و دیگر مصالح ساختمانی ابداع گردید. این روش در تمامی شرایط کاملاً آزمایشگاهی، مخصوصاً در محل پروژه و در تمامی سطوح افقی، عمودی، سقفی و مورب به سادگی، با کمترین آموزش، بدون نیاز به مغزه‌گیری و تخریب سازه اصلی



شکل ۸. نتایج عمق نفوذ آب نمونه‌های طرح اختلاط‌های تحقیق در سنین مختلف

Fig. 8. Water penetration depth results of samples taken from the research mix design at different ages

رسیده است. جذب آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۲۰٪ نسبت به نمونه مرجع به ۷٪ رسیده است. همچنین جذب آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۳۲٪، ۴۳٪ و ۴۷٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۵٪، ۵/۹٪ و ۴/۶٪ شده است. جذب آب در سن ۹۱ روزه برای نمونه مرجع ۷/۲٪ است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۷٪ به ۵٪ رسیده است. جذب آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۱۶٪ نسبت به نمونه مرجع به ۶٪ رسیده است. همچنین جذب آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۲۹٪، ۴۰٪ و ۵۱٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۵/۱٪، ۴/۳٪ و ۳/۵٪ شده است. جذب آب در سن ۱۲۰ روزه برای نمونه مرجع ۶٪ است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۱۶٪ به ۵٪ رسیده است. جذب آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۱۵٪ نسبت به نمونه مرجع به ۵/۱٪ رسیده است. همچنین جذب آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۲۸٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۴/۳٪، ۳/۶٪ و ۳٪ شده است.

۵-۳-۶- تحلیل آزمایش جذب آب

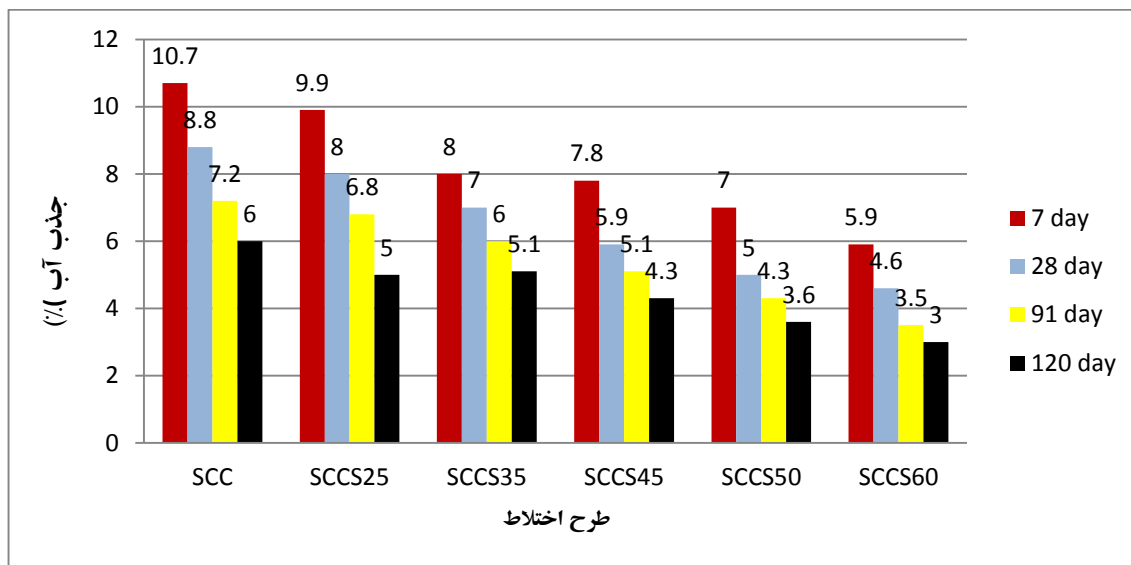
آزمون جذب آب نمونه‌های بتن سیمانی، قابلیت جلوگیری از نفوذ آب و سایر مایعات را برای این مصالح نشان می‌دهد. بر همین اساس افزایش

به مدت ۳۰ دقیقه در داخل آب قرار داده می‌شوند. پس از خروج نمونه‌ها و خشک کردن سطح آنها، جذب آب نمونه‌ها در این مدت‌زمان تعیین می‌شود. در روش استاندارد ASTM C642 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 [۳۸]. درصد جذب آب (WA) هر نمونه مطابق رابطه (۱) تعیین می‌گردد.

$$WA = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، W_1 و W_2 برحسب گرم است.

جذب آب در سن ۷ روزه برای نمونه مرجع ۱۰/۷٪ است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۷٪ به ۹/۹٪ رسیده است. جذب آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۲۵٪ نسبت به نمونه مرجع به ۸٪ رسیده است. همچنین جذب آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۲۷٪، ۳۴٪ و ۴۴٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۷/۸٪، ۷٪ و ۵/۹٪ شده است. جذب آب در سن ۲۸ روزه برای نمونه مرجع ۸/۸٪ است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۹٪ به ۸٪



شکل ۹. نتایج جذب آب نمونه‌های طرح اختلاط‌های تحقیق در سنین مختلف

Fig. 9. Water absorption results of samples taken from the research mix design at different ages

۱۴٪ را نسبت به نمونه مرجع نشان داد. در آزمایش جریان اسلامپ نمونه حاوی ۶۰٪ سرباره فولاد، افزایش ۶۹٪ نسبت به نمونه مرجع مشاهده گردید.

- زمان‌های جریان اسلامپ (T50cm) و قیف V با افزودن سرباره مصرفی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، افزایش را نشان داد. نسبت انسداد قابل قبولی در تمام نمونه‌های حاوی سرباره نسبت به نمونه مرجع مشاهده شد.

- آزمایش جعبه L نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد، h_2/h_1 عدد ۸۶٪ را نشان داد، که نسبت به نمونه مرجع، که h_2/h_1 عدد ۸۱٪ می‌باشد، میزان افزایشی است، به علاوه نمونه حاوی ۶۰٪ سرباره فولاد نسبت به نمونه مرجع h_2/h_1 ۹۹٪ بدست آمده است.

- نتایج نشان داد که ضریب ارتجاعی استاتیکی نمونه‌های حاوی درصد بهینه سرباره به مقدار ۴/۸ درصد نسبت به نمونه مرجع در سن ۱۲۰ روز افزایش داشته است.

- بررسی نتایج عمق نفوذ آب و همین‌طور درصد جذب آب در نمونه‌های حاوی درصد بهینه سرباره، به ترتیب به میزان ۱۰/۶ درصد و ۲۵/۲ درصد در سن ۱۲۰ روزه کاهش نشان دادند.

- وجود سرباره در سنین ۷ و ۲۸ روزه اثر قابل ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی نمونه نداشته است، اما در سن ۹۱ روزه مقاومت فشاری نمونه‌های

میزان آب جذب‌شده طی انجام این آزمون قابلیت ضعیف ماتریس در جلوگیری از نفوذ آب و سایر مایعات به آن و در نتیجه تخلخل بالای ماتریس بتن را مشخص می‌نماید. در مقایسه نمونه‌های جذب آب مشاهده می‌شود در نمونه‌های دارای سرباره کارخانه فولاد اهواز نسبت جذب آب با نمونه مرجع بیشتر می‌باشد. از تأثیر سرباره بر میزان نفوذپذیری نمونه‌های بتن سیمان می‌توان به عملکرد پوزولانی این مواد اشاره نمود که در نتیجه آن باعث تراکم بیشتر ماتریس و در نتیجه بهبود ساختار تخلخل می‌گردد، اما سرباره خود جذب آب بالایی دارد و به همین خاطر نمونه‌های دارای درصد سرباره فولاد، جذب آب بیشتری داشتند. با توجه به تحقیق عافیتی سلیم و همکاران مانند نتیجه گرفت که کاهش عیار سیمان و جایگزینی آن با درصدهای مختلفی از سرباره باعث افزایش درصد جذب آب در بتن می‌گردد [۳۴].

۶- نتایج

در این تحقیق برای توسعه ساخت بتن‌های خودتراکم حاوی سرباره دوست‌دار محیط‌زیست، پوزولان سرباره مصرفی که به روش مکانیکی فعال گردیده است، استفاده شده است و آزمایش‌های تعیین خواص رئولوژی، مکانیکی و دوام، در سنین مختلف ۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۲۰ روزه انجام شده است. نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

- آزمایش جریان اسلامپ نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد، افزایش

باعث پر شدن فضای بین مصالح سنگی شده و این امر کاهش مقاومت الکتریکی نمونه‌های دارای سرباره نسبت به نمونه مرجع را در پی داشته است.

- با افزایش میزان سرباره کارخانه فولاد اهواز، عمق نفوذپذیری آب کاهش داشته است. نمونه حاوی ۶۰٪ سرباره فولاد نسبت به بقیه نمونه‌های حاوی سرباره مصرفی کمترین عمق نفوذ آب را نشان دادند. نکته قابل توجه کاهش عمق نفوذ در سنین بالا نسبت به سنین پایین و همچنین کاهش در نمونه‌های حاوی سرباره مصرفی نسبت به نمونه مرجع می‌باشد.

منابع

- [1] E.P. Koehler, Aggregates in self-consolidating concrete, The University of Texas at Austin, 2007.
- [2] H. Okamura, Self-compacting high-performance concrete, Concrete international, 19(7) (1997) 50-54.
- [3] H. Okamura, M. Ouchi, Self-compacting concrete, Journal of advanced concrete technology, 1(1) (2003) 5-15.
- [4] F. Ghaffari-Moghaddam, Investigation of the effect of nanomaterials on the properties of self-compacting concrete, in: Second Nanotechnology Student Conference, Isfahan, 2007.
- [5] G. De Schutter, P.J. Bartos, P. Domone, J. Gibbs, Self-compacting concrete, Whittles Publishing Caithness, 2008.
- [6] A.K. Shirzadi Javid, B. Rahmati, A New Method of Mix Design for Self-Consolidating Concrete Based on Compressive Strength, Concrete Research, 6(1) (2013) 87-102.
- [7] D. Mostofinejad, D. of Civil Engineering, Adding Slag and Limestone Powder to Concrete to Increase the Durability of Concrete in Sulfate Environment, Journal of Transportation Research, 3(2) (2006).
- [8] D. Brindha, T. Baskaran, S. Nagan, Assessment of corrosion and durability characteristics of copper slag admixed concrete, International journal of civil and structural engineering, 1(2) (2010) 192.
- [9] S.K. Rao, P. Sravana, T.C. Rao, Experimental studies in

حاوی ۲۵٪ سرباره نزدیک به نمونه مرجع شده است و در سن ۱۲۰ روز افزایش یافته است.

- نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سرباره در سن ۱۲۰ روز، نسبت به نمونه مرجع افزایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. این میزان افزایش به مقدار ۳/۹٪ بوده است. هرچند مقدار افزایش، کم 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.
- به صورت کلی در سنین ۷ و ۲۸ روز، ضریب ارتجاعی استاتیکی نمونه‌های حاوی سرباره فولاد نسبت به نمونه مرجع کاهش نشان دادند. نتایج ضریب ارتجاعی استاتیکی نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد اهواز در سنین ۹۱ و ۱۲۰ روز به نمونه مرجع ۳٪ و ۵٪ افزایش نشان داد، اما نمونه‌های ۳۵٪، ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ نسبت به نمونه مرجع، کاهش داشتند.
- مقاومت الکتریکی در نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سرباره مصرفی و در سن ۱۲۰ روز، کاهش ۸٪ نشان داد. نمونه‌های ۳۵٪، ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره آهنگدازی به ترتیب با کاهش ۱۳٪، ۱۸٪، ۲۳٪ و ۲۸٪ نسبت به نمونه مرجع رسیده است. نتایج مقاومت الکتریکی از سنین ۹۱ و ۱۲۰ روزه خیلی نزدیک به هم می‌باشد. همچنین با گذشت زمان وجود سرباره آهنگدازی تاثیر زیادی در روند کاهش مقاومت الکتریکی ندارد.
- با افزایش میزان سرباره، عمق نفوذپذیری آب کاهش داشته است. نمونه حاوی ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز نسبت به بقیه نمونه‌های حاوی سرباره فولاد اهواز کمترین عمق نفوذ آب را نشان داد.
- آزمایش عمق نفوذ آب در سن ۱۲۰ روز، برای نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره ۱۲/۵٪ افزایش دارد. عمق نفوذ آب نمونه‌های ۳۵٪، ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۲۱٪، ۳۱٪، ۴۱٪ و ۵۰٪ نسبت به نمونه مرجع نشان داد.
- آزمایش جذب آب در سن ۱۲۰ روز، نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره ۱۶/۶٪ افزایش دارد. جذب آب نمونه‌های حاوی ۳۵٪، ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب ۱۵٪، ۲۸٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ افزایش دارد و نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۴/۳٪، ۳/۶٪ و ۳٪ را نشان داد.
- با جایگزینی ۲۵٪ و ۳۵٪ پودر شده سرباره کارخانه فولاد اهواز به جای بخشی از سیمان مصرفی در بتن بهبود خواص مکانیکی در سنین ۱۲۰ روزه حاصل گردید.
- با بررسی نتایج مقاومت الکتریکی مشاهده شد که تاثیر سرباره کوره آهنگدازی موجب کاهش مقاومت الکتریکی گردیده است. وجود سرباره

- [19] A.S. C127, Test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate, in, ASTM International West Conshohocken, PA, 2001.
- [20] B. Ahmadi, M. Shekarchi, Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cement and Concrete Composites*, 32(2) (2010) 134-141.
- [21] B.S.I. . "Methods of testing fresh concrete.", (1970).
- [22] C.o.M.i.C. ACI Committee 222, Protection of metals in concrete against corrosion, in, American Concrete Institute, 2001.
- [23] 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.
- [24] A. Standard, ASTM C172/C172M-17: Standard practice for sampling freshly mixed concrete, in, 2017.
- [25] A. Khani, Shafaei, J, Tadayin, M, Sajjadi Attar, S, M, Investigation of self-compacting concretes containing microsilica and slag pozzolan with durability approach by electrical conductivity test, in: 9th National Conference on Modern Materials and Structures in Engineering, 2022.
- [26] S.A. Hosseini-Pool, Ghasemzadeh Mousavinejad, S. H, Combined effects of three types of granulation of blast furnace slag and electric arc furnace slag on mechanical strength and durability of self-compacting concrete, in: 10th National Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Urban Development of Iran, 2022.
- [27] S.M. Homayounfar, Ghodousian, A, Study of adhesion of repair fibrous self-compacting concrete containing microsilica, zeolite and slag pozzolans to old concrete using slant-shear method, in: 2nd International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Development, Environment and Horizons of Islamic Art in the Second Step of the Revolution Declaration, Tabriz, 2022.
- [28] P. Ebadi, Khaki, V., Badrloo, S., Hosseini Mianposhte, M., High durability and strength in lightweight self-compacting concrete with slag, microsilica and light Ultrasonic Pulse Velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and M-sand, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(4) (2016) 289-301.
- [10] R.T. Flynn, T.J. Grisinger, B. Mather, R. Hooton, G. Dewey, M. Luther, M. Thomas, *Slag Cement in Concrete and Mortar*, American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, (2003).
- [11] C. Ozyildirim, Laboratory investigation of low-permeability concretes containing slag and silica fume, *Materials Journal*, 91(2) (1994) 197-202.
- [12] P. Tikalsky, V. Schafer, K. Wang, B. Scheetz, T. Rupnow, A. St Clair, M. Siddiqi, S. Marquez, *Development of Performance Properties of Ternary Mixtures: Phase I Final Report*, United States. Federal Highway Administration, 2007.
- [13] V. Sivasundaram, V. Malhotra, Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag, *Materials Journal*, 89(6) (1992) 554-563.
- [14] R.D. Hooton, J.J. Emery, Sulfate resistance of a Canadian slag cement, *Materials Journal*, 87(6) (1990) 547-555.
- [15] E.E. Hekal, E. Kishar, H. Mostafa, Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances, *Cement and Concrete Research*, 32(9) (2002) 1421-1427.
- [16] I.N.S. Organization, *Cement - Determination of Compressive and Flexural Strength*, in: Iranian National Standard No. 393, Iranian Standards and Industrial Research Institute, 2009.
- [17] S. Sajedi, F. Darash, 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*, 50(6) (2019) 1155-1176.
- [18] M. Pattengil, T. Shutt, Use of ground glass as a pozzolan; Albuquerque symposiums on Utilization of Waste Glass in Secondary Products, Albuquerque, New Mexico, USA, (1973).

- of cement-slag mortars, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(9) (2022) 3557-3580.
- [33] A. Heydari, Taheri Sarteshnezi, M., Investigation of the effect of blast furnace and converter slag from Isfahan Iron and Steel Works on the compressive strength of high-strength self-compacting concrete, in: 8th National Civil Engineering Congress, Babol, 2014.
- [34] J. Afiti Salim, Razm Ara, P., Saeedi Jam, S., Effect of slag replacement on the properties of self-compacting concrete containing recycled coarse aggregates, *Concrete Research*, (Issue 11(2)) (2018) pp. 105-116.
- [35] y. zandi, m. abedi, Evaluation of the effect of magnetic water on the durability of Concrete made of cast iron slag, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(7) (2021) 195-213.
- [36] A. Standard, ASTM A511, Standard Specification for Seamless Stainless Steel Mechanical Tubing, in, ASTM International, 2018.
- [37] A. Standard, C128-12, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).
- pozzolanic sand, in: 2nd International Congress of Civil Engineering, Architecture, Building Materials and Environment, 2022.
- [29] A. Rahmati, Saki, V., Lak, M., Shayesteh Nam, H., Investigation and study on blended cements containing slag and its activation with silica fume with different percentages in self-compacting concrete and its effect on mechanical properties, durability and performance of fresh and hardened concrete, in: 20th Concrete Day Conference and 14th National Concrete Conference, Tehran, 2022.
- [30] M. Mirzaie Aliabadi, m. hamednezhad, a. dadpour, Experimental study of Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing coarse and fine electric arc furnace slag aggregate, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(Special Issue 1) (2021) 86-110.
- [31] M. Hosseini, Juma, N., Design and investigation of rheology and durability of self-compacting lightweight concrete containing two or more mixtures of slag, fly ash and microsilica, in: Second National Conference on Concrete Durability, Tehran, 2021.
- [32] S.F. Sajedi, S.H. Hashemi, Experimental study of the effect of slag of Ahvaz Steel Plant on the properties

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. M. Kalvandi, S.F.Sajedi, F. Moghaddasnejad, *Evaluation of Properties of Self-Compacting Concrete Containing Slag from Ahvaz Steel Plant*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(3) (2025) 469-488.

DOI: [10.22060/ceej.2025.21931.7863](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.21931.7863)



