



## Performance of alkali-activated slag and pumice mortars against chloride ions penetration in the Persian Gulf

M. Jafari Nadoushan<sup>1\*</sup>, A. A. Ramezani pour<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Concrete Technology and Durability Research Center (CTDRc), Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

### Review History:

Received: Dec. 09, 2021

Revised: Sep. 20, 2022

Accepted: Sep. 23, 2022

Available Online: Jan. 28, 2023

### Keywords:

Alkali-activated

Slag

Pumice

Chloride Ions

Porosity

**ABSTRACT:** Considering the successful usage of alkali-activated mortars in several countries and limited research on the durability of these materials, in this paper, the permeability and durability of alkali-activated slag and pumice mortar in chloride environments have been studied. To investigate the mechanical properties and permeability of alkali-activated slag and pumice mortars tests such as workability, compressive strength, capillary water absorption, water absorption, chloride ion penetration in the Persian Gulf environment and mercury intrusion porosimetry have been conducted. The results show that the compressive strength of alkali-activated slag mortar containing potassium hydroxide was slightly higher than the compressive strength of samples containing sodium hydroxide. In addition, the use of 10% pumice instead of slag has increased the compressive strength of alkali-activated slag mortar. Also, the 91-day compressive strength of alkali-activated mortars cured in the water was 48.4% higher than those cured in the air. In general, the diffusion coefficient of chloride ions in alkali-activated slag mortars was lower than the diffusion coefficient of chloride ions in Portland cement mortar, which was due to less porosity in alkali-activated slag mortars and the denser structure. Also, alkali-activated mortars containing 90% of slag and 10% of pumice had the lowest diffusion coefficient of chloride ions and Portland cement mortar showed the highest one, which was well matched with the result of capillary water absorption coefficient.

### 1- Introduction

Reinforced concrete has higher durability when compared to steel, but this material is severely exposed to damage in corrosive and harsh environments such as marine environments. The penetration of chloride ions in concrete is the most important factor in reducing the alkalinity of concrete and destroying the passive layer on the rebar [1].

Shi [2] has reported that water penetration in alkali-activated slag concrete containing sodium silicate is 1000 times lower than Portland cement concrete. While Wongpa et al showed that in the same compressive strength range, activated alkali slag is 100 to 10,000 times more permeable than Portland cement concrete.

Adam [3] has performed salt pond and rapid chloride ions penetration test (RCPT) on slag and fly ash-based alkali-activated concretes. The results of RCPT show more penetration of chloride ions in alkali-activated fly ash compared to Portland cement, slag cement and alkali-activated slag, while the salt pond test shows less penetration of chloride ions in alkali-activated fly ash. Hu et al. showed that the results of the rapid chloride ion migration test (RCMT) in alkali-activated mortars containing slag and fly ash are affected by the pores' structure, but the results

of RCPT are affected by the chemical properties of pore solution [4]. These differences and errors in the RCPT results are due to the presence of very high alkali ions in the pore solution of alkali-activated samples. Therefore, it can be said that the RCPT is not an appropriate method for evaluating the permeability of alkali-activated materials against chloride ions.

The main objective of this paper is the investigation of chloride ions penetration in alkali-activated mortars containing slag and pumice together with the comparison to cement-based mortars. Also, mercury injection porosimetry (MIP) was used to investigate pores' structures.

### 2- Methodology

#### 2- 1- Material

Alkali-activated mortars were made with ground granulated blast furnace (GGBF) slag and natural Pozzolan throughout this work. The ordinary type I Portland cement was used to prepare reference mortar.

Potassium hydroxide (KOH) and sodium hydroxide (NaOH) pellets were dissolved in deionized water to produce the 6 molar alkaline solutions for alkali activation of raw materials. Sodium silicate (water glass) was provided by Iran

\*Corresponding author's email: m\_jafarin@aut.ac.ir



**Table 1. Alkali-activated mortar mixture proportion**

Mix	Alkali Solution	Based Material (kg/m <sup>3</sup> )	Pumice (%)	Activator to Based Material	Aggregate to Based Material
Na6-Pu0	NaOH	463.8	0	0.9	2.75
Na6-Pu10	NaOH	463.8	10	0.9	2.75
K6-Pu0	KOH	463.8	0	0.9	2.75
K6-Pu10	KOH	463.8	10	0.9	2.75

**Table 2. OPC mortar mixture proportion**

Mix	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Water to Cement	Aggregate to Cement	Superplasticizer Dosage (Cement Weight Percent)
OPC	592.60	0.487	2.75	0.3

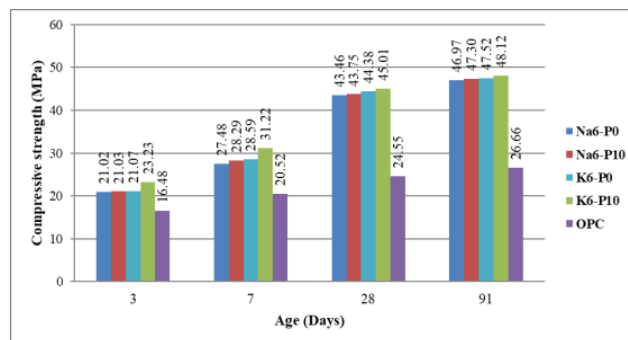
Silicate Company in the form of a solution with a silicate modulus of 2.33.

**2- 2- Mixture Preparation and Test Procedure**

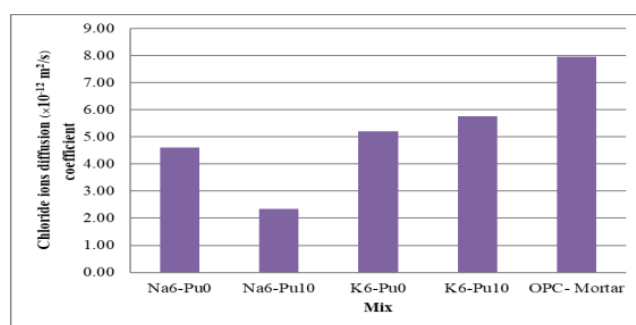
Alkali-activated and OPC mortars mixture proportions are presented in Tables 1 and 2, respectively. The optimum values of sodium silicate to alkaline solution, modulus of sodium silicate and alkaline solution concentration were taken from our previous study [5] are 0.4, 2.33 and 6 respectively.

Alkali-activated slag and OPC mortar cubes of 50×50×50 mm<sup>3</sup> dimensions were casted for the compressive strength test.

Alkali-activated slag and OPC mortar cubes of 100×100×100 mm<sup>3</sup> dimensions were cast for chloride penetration test to determine the apparent chloride diffusion coefficient of the specimens by bulk diffusion. The specimens were submerged in the Persian Gulf in Bandar Abbas. The chloride penetration profiles of specimens were measured after 12 months of exposure. The error function solution of Fick’s second law was then fitted to the data, and a diffusion coefficient was determined by iteration. The Mercury injection (MIP) porosimetry test was used to investigate the condition of the cavities in mortar samples.



**Fig. 1. Compressive strength results of alkali-activated slag/pumice and OPC mortars**



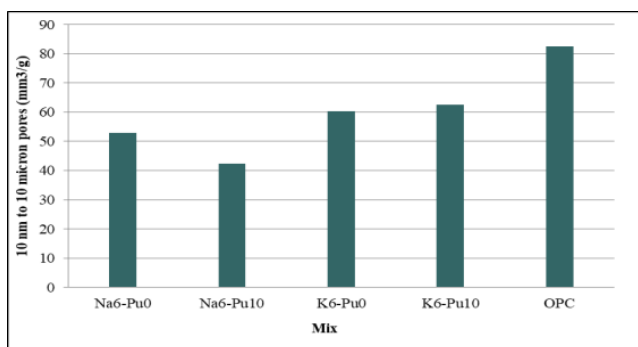
**Fig. 2. Chloride ions diffusion coefficient (Ds) of submerged specimens in the Persian Gulf**

**3- Results and Discussion**

The compressive strength of alkali-activated slag and OPC mortars are presented in Figure 1. As can be seen in Figure 1, the alkali-activated slag mortar specimens containing potassium hydroxide had higher compressive strength at various ages up to 28 days when compared to the specimens containing sodium hydroxide. It can be concluded that 10% slag replacement with pumice increases the compressive strength of the alkali-activated slag mortars.

Figure 2 shows the chloride ions diffusion coefficient (Ds) of mortar specimens submerged in the Persian Gulf after 12 months. As can be seen, the chloride ions diffusion coefficient of alkali-activated slag mortar specimens is lower than the OPC mortar specimens and the best performance was exhibited by the Na6-Pu10 mix that contains sodium hydroxide solution and 10% pumice. It can be related to the lower pores in alkali-activated slag mortar specimens when compared to OPC mortar specimens.

Figure 3 shows the total amount of 10 nm to 10-micron pores in alkali-activated and Portland cement mortars. As can be seen, Na6-Pu10 mix has the lowest amount of pores and OPC mix has the highest. According to the results, it can be said that pumice particles reduce the micron pores. Also,



**Fig. 3. 10 nm to 10 µm pores of mortars**

nano-pores in the alkali-activated mortar containing pumice are less than those without pumice. It can also be said that samples activated with sodium hydroxide have fewer nano pores when compared to samples containing potassium hydroxide.

#### 4- Conclusions

The following general conclusions can be drawn:

- 1- The compressive strength of alkali-activated slag mortars is greater than OPC mortars. Slag replacement with pumice increases the compressive strength of the alkali-activated slag mortar.
- 2- Because of lower pores, the chloride ions diffusion

coefficient of alkali-activated mortars is lower than Portland cement mortar.

3- The best performance in the chloride diffusion was exhibited by the Na6-Pu10 mix which is in accordance with capillary absorption coefficient results.

#### References

- [1] A.A. Ramezaniapour, T. Parhizkar, A.R. Pourkhorshidi, A.M. Raisghasemi, The effect of environmental conditions on the southern coast of Iran on the long-term durability of concrete with different cements and pozzolans, Building and Housing Research Center, 434 (1996). (In Persian)
- [2] C. Shi, Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars, *Cement and Concrete Research*, 26 (1996) 1789–1799.
- [3] A.A. Adam, Strength and durability properties of alkali activated slag and fly ash-based geopolymer concrete, PhD thesis, RMIT University, 2009.
- [4] X. Hu, C. Shi, Zh. Shi, L. Zhang, Compressive strength, pore structure and chloride transport properties of alkali-activated slag/fly ash mortars, *Cement and Concrete Composites*, 104 (2019) 92-119.
- [5] M. Jafari Nadoushan, P. Dashti, S. Ranjbar, A.A Ramezaniapour, A.M. Ramezaniapour, R. Banar, RSM-based Optimized Mix Design of Alkali-activated Slag Pastes Based on the Fresh and Hardened Properties and Unit Cost, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 20 (4) (2022) 300-312.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Jafari Nadoushan, A. A. Ramezaniapour, *Performance of alkali-activated slag and pumice mortars against chloride ions penetration in the Persian Gulf*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(3) (2023) 111-114.

DOI: 10.22060/ceej.2023.20867.7552







## بررسی عملکرد ملات‌های سرباره و پومیس قلیافعال در برابر نفوذ یون‌های کلراید در محیط خلیج فارس

محسن جعفری ندوشن<sup>۱\*</sup>، علی اکبر رمضانیان پور<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران  
۲- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۸  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۹  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۱  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۱/۰۸

### کلمات کلیدی:

قلیافعال  
سرباره  
پومیس  
نفوذ یون‌های کلراید  
تخلخل سنجی

**خلاصه:** با توجه به سابقه موفق به کارگیری ملات‌های قلیافعال در برخی کشورها در سال‌های اخیر و تحقیقات محدود صورت گرفته بر روی دوام این مصالح، در این مقاله به بررسی خصوصیات نفوذپذیری و دوام در برابر نفوذ یون‌های کلراید پرداخته شده است. به منظور بررسی خواص مکانیکی و نفوذپذیری ملات‌های قلیافعال حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و پوزولان طبیعی پومیس در مطالعات آزمایشگاهی از آزمایش‌هایی مانند کارایی، مقاومت فشاری، جذب آب موئینه، جذب آب حجمی، نفوذ یون‌های کلراید در محیط واقعی خلیج فارس و تخلخل سنجی به روش تزریق جیوه بهره گرفته شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقاومت فشاری آزمون‌های ملات قلیافعال حاوی هیدروکسیدپتاسیم در مقایسه با مقاومت فشاری آزمون‌های حاوی هیدروکسیدسدیم کمی بیشتر بوده است. ضمناً استفاده از ۱۰ درصد پومیس به جای سرباره باعث افزایش مقاومت فشاری ملات قلیافعال شده است. همچنین مقاومت فشاری ۹۱ روزه آزمون‌های ملات سرباره قلیافعال عمل آوری شده در آب، ۴۸/۴ درصد بیشتر از آزمون‌های عمل آوری شده در هوا بوده است. به طور کلی ضریب انتشار یون‌های کلراید در ملات‌های قلیافعال کمتر از ضریب انتشار یون‌های کلراید در ملات سیمان پرتلندی شاهد بوده که این موضوع به دلیل وجود حفرات کمتر در ملات‌های قلیافعال و ساختار متراکم‌تر ملات‌های قلیافعال در مقایسه با ملات سیمان پرتلندی شاهد بوده است. همچنین ملات قلیافعال حاوی ۹۰ درصد سرباره و ۱۰ درصد پومیس کمترین و ملات سیمان پرتلندی بیشترین ضریب انتشار یون‌های کلراید را از خود نشان داده‌اند که نتایج ضریب جذب آب موئینی نیز موید این موضوع بوده است.

### ۱- مقدمه

و خوردگی آرماتور مدفون در سازه‌های بتنی حاشیه خلیج فارس می‌باشد. مکانیزم‌های نفوذ یون‌های کلراید در بتن شامل انتشار یونی (حرکت تحت تأثیر اختلاف غلظت)، موئینی (به دلیل کشش سطحی منافذ موئینه)، نفوذ (انتقال تحت عمل تغییر فشار)، مهاجرت تحت تأثیر اختلاف پتانسیل الکتریکی) و جذب (حرکت تحت تأثیر گرادیان رطوبت) می‌باشد. نفوذ یون‌های کلراید در بتن‌های مستقر در ناحیه جزر و مدی و منطقه پاشش، بسیار سریع‌تر از بتن‌های ناحیه مغروق (انتشار خالص) می‌باشد [۲]. محققین نفوذپذیری بتن را یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین کننده دوام بتن در برابر انواع خرابی‌ها مانند خرابی‌های سولفاتی، کلرایدی و کربناتی می‌دانند و معتقدند در صورتی که بتوان بتن با نفوذپذیری کمتری ساخت که املاح به راحتی در آن نفوذ نکند، آن بتن دوام بیشتری خواهد داشت. حفرات موئین در انتقال عوامل مهاجم به داخل بتن نقش بسزایی ایفا می‌نماید و احتمالاً ویژگی‌های این حفرات دلیل اصلی تفاوت نفوذ عوامل

بتن مسلح در مقایسه با فولاد از دوام بالاتری برخوردار بوده، ولی این مصالح در محیط‌های خورنده و سخت مانند سواحل جنوبی ایران به شدت در معرض خرابی قرار گرفته و عمر مفید آن کاهش می‌یابد. دوام کم و به تبع آن تعمیرات و نگهداری زیاد سازه‌های بتنی، انرژی و مصالح طبیعی بسیار زیادی مصرف نموده و از طریق ایجاد مقادیر زیاد پسماند، بار سنگینی را به محیط زیست تحمیل می‌نماید. یکی از علل عمده خرابی سازه‌های بتن مسلح، خوردگی فولاد مدفون در بتن است. نفوذ یون‌های کلراید در بتن مهم‌ترین عوامل کاهش قلیابیت بتن و از بین رفتن لایه غیرفعال اکسید آهن موجود روی آرماتور می‌باشد [۱]. همچنین حضور یون‌های کلراید در بتن باعث افزایش میزان حلالیت آهن شده و در نتیجه سرعت خوردگی را افزایش می‌دهد. بنابراین نفوذ یون‌های کلراید مهم‌ترین عامل زنگ زدگی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m\_jafarin@aut.ac.ir



حداقل ۵۰ درصد سرباره برای دستیابی به مقاومت قابل قبول در برابر نفوذ یون‌های کلراید ضروری است [۱۷].

در خصوص نحوه انجام آزمایش نفوذ یون‌های کلراید در ملات‌های قلیافعال رامیرز و همکاران [۱۵] روش تسریع شده نفوذ یون‌های کلراید (RCPT) استفاده نموده و ادعا کرده‌اند این روش جوابگو بوده و شار عبوری نمونه‌های ملات سرباره قلیافعال بسیار کمتر از ملات سیمان پرتلندی شاهد می‌باشد. داگلاس و همکاران [۱۹] نیز از روش RCPT برای اندازه‌گیری شار عبوری از بتن سرباره قلیافعال حاوی سیلیکات سدیم استفاده کردند. شار عبوری آزمونه‌های ۲۸ روزه در بازه  $C$  ۱۳۰۰ تا  $C$  ۲۶۰۰ و آزمونه‌های ۹۱ روزه  $C$  ۶۵۰ تا  $C$  ۱۸۵۰ بوده است. شار عبوری با افزایش نسبت فعال‌ساز به سرباره افزایش یافته که با غلظت مواد قلیایی در محلول منفذی مرتبط است. استفاده از مقدار بیشتر فعال‌ساز باعث تشکیل ساختار متراکم‌تر و حفرات کمتر گردید ولی نتایج RCPT خلاف این موضوع را نشان می‌دهد. در یک مطالعه مقایسه‌ای بین ملات‌های سرباره فعال شده با  $Na_2SiO_3$ ،  $Na_2CO_3$  یا  $NaOH$  و سیمان پرتلند تیپ سه، مصالح فعال شده با سیلیکات سدیم بیشترین مقاومت فشاری، کمترین تخلخل و ریزترین حفرات را داشتند. اما نمونه‌های فعال شده با  $NaOH$  و  $Na_2CO_3$  کمترین شار عبوری را از خود نشان داده‌اند [۲۰]. همچنین ویمپنی و همکاران [۲۱] نشان دادند که تخلخل مصالح الیافی قلیافعال با مصالح سیمان پرتلندی برابر بوده است، در حالی که کلراید کمتری در آزمایش حوضچه نمک از آن عبور کرده است. بررسی بتن‌های سرباره قلیافعال حاوی سیلیکات قلیایی با استفاده از روش RCPT، در کنار روش مهاجرت یون‌های کلراید (NT Build 355) نشان داده است که ترکیبات شیمیایی محلول منفذی روی خروجی روش RCPT تأثیر بسیاری دارد و نتایج روش مهاجرت یون‌های کلراید به هندسه حفرات حساس‌تر می‌باشد و نتایج واقعی‌تری را به دنبال خواهد داشت. برنال و همکاران [۹] نشان دادند که اثر حجم خمیر قلیافعال در بتن، روی شار عبوری در آزمایش RCPT بسیار کم است، در حالی که سایر خواص نفوذپذیری بتن در حجم خمیر ۳۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بسیار متفاوت می‌باشد. آدام [۷] آزمایش حوضچه نمک و RCPT را روی بتن‌های قلیافعال با پایه سرباره و خاکستر بادی فعال شده با سیلیکات قلیایی انجام داده است. نتایج RCPT، نفوذ بیشتر یون‌های کلراید در نمونه‌های قلیافعال با پایه خاکستر بادی نسبت به نمونه‌های سیمان پرتلندی، نمونه‌های سیمان سرباره‌ای و نمونه‌های

مهاجم در مصالح قلیافعال و سیمان پرتلندی است. شی [۳] نفوذ آب در نمونه بتن سرباره قلیافعال حاوی سیلیکات سدیم را ۱۰۰۰ برابر کمتر از نمونه بتن سیمان پرتلندی گزارش نموده است. در حالی که وانگپا و همکاران نشان دادند که در یک رده مقاومتی، بتن سرباره قلیافعال، ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر نفوذپذیرتر از بتن سیمان پرتلندی می‌باشد. با این حال بسیاری از تحقیقات نشان داده است که نفوذپذیری نمونه‌های قلیافعال با پایه سرباره، خاکستر بادی و غیره در حد نمونه‌های سیمان پرتلندی می‌باشند و اختلاف این دو مصالح در حدود ۱۰۰۰ برابری نمی‌باشد. به عنوان نمونه کا و همکاران [۴] نشان دادند که ملات سرباره قلیافعال و ملات سیمان پرتلندی با رده مقاومتی یکسان، دارای مقادیر حفرات نزدیک بهم و به تبع آن جذب موئینه یکسانی هستند. همچنین در تحقیقات رامیز و همکاران [۵] مقاومت ملات سرباره قلیافعال در برابر نفوذ آب کمی بیشتر از ملات سیمان پرتلندی با رده مقاومتی یکسان بوده به طوری که ضریب موئینگی آن ۵۰ درصد کمتر بوده است. ژانگ و همکاران با مطالعه مصالح قلیافعال حاوی سرباره و خاکستر بادی به این نتیجه رسیدند که افزایش جایگزینی سرباره به جای خاکستر بادی و کاهش مقدار آب به ذرات جامد باعث کاهش نفوذپذیری می‌گردد [۶].

نتایج جذب موئینه آب نشان داده است که شبکه حفرات بتن سرباره قلیافعال به اندازه‌ای پیچیدگی و انحناء دارد که میزان جذب موئینه آب در این مصالح از بتن سیمان پرتلندی کمتر است، اگر چه کل حفرات برای دو نمونه یکسان باشد [۱۲-۷]. نوع محلول قلیایی نیز روی میزان جذب آب ملات‌های سرباره قلیافعال تأثیرگذار است [۱۳]. مدول سیلیکاتی بالاتر [۱۴]، مقدار آب کمتر و افزایش زمان عمل آوری مرطوب [۱۵] باعث کاهش جذب آب نمونه‌های سرباره قلیافعال می‌گردد. رونچی و سردار [۱۶] نشان دادند که فقط ۷ روز عمل آوری ملات سرباره قلیافعال باعث دستیابی به ریزساختار متراکم و مقاومت بالا در برابر نفوذ یون‌های کلراید می‌گردد و ارتباط خطی بین ضریب انتشار یون‌های کلراید در ملات سرباره قلیافعال و حفرات موئینه با ضریب همبستگی نزدیک به یک وجود دارد. از طرف دیگر نوشینی و کاستل [۱۷] نشان دادند که مقاومت فشاری، حجم حفرات نفوذپذیر و ضریب موئینگی شاخص‌های مناسبی از عملکرد بتن‌های قلیافعال در محیط‌های کلرایدی نیست و این پارامترها با همبستگی مناسبی ندارد. فن و همکاران گزارش کردند که مقاومت ملات قلیافعال حاوی سرباره و خاکستر بادی در برابر نفوذ یون‌های کلراید کمی بهتر از ملات سیمان پرتلندی بوده است [۱۸]. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که در مصالح قلیافعال وجود

فارس در ناحیه مغروق و جزر و مدی شده است. همچنین به منظور بررسی دقیق تر حفرات آزمون‌های ملات از تخلخل‌سنجی به روش تزریق جیوه (MIP) استفاده شده است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مواد مصرفی

ملات‌های قلیافعال به طور کلی شامل مواد پایه (معمولاً پوزولان‌ها)، محلول‌های فعال‌ساز و ماسه می‌باشد. در این مطالعه از سرباره کوره آهن‌گدازی و پوزولان طبیعی پومیس جهت فعال‌سازی قلیایی به منظور تولید ملات استفاده شده است. تشکیل مواد قلیافعال نیازمند مواد فعال‌ساز مناسب با غلظت‌های بهینه می‌باشد. در این پروژه تحقیقاتی از سه نوع ماده فعال‌ساز جهت فعال کردن پوزولان‌ها استفاده شده که شامل محلول‌های قلیایی هیدروکسیدسدیم (NaOH)، هیدروکسیدپتاسیم (KOH) و سیلیکات‌سدیم ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) است.

### ۲-۱-۱- مشخصات مواد پایه

سرباره محصول جانبی کارخانجات ذوب آهن است که در فرآیند تولید آهن خام از کوره بلند به دست می‌آید و ترکیبی از ناخالصی‌های سنگ آهن و سنگ آهک (کمک ذوب) می‌باشد. اگر سرباره مذاب از طریق غوطه‌ور کردن در آب به سرعت سرد شود، دانه‌های کوچک حاوی سیلیکات کلسیم-آلومینیوم-منیزیم آمورف با خاصیت هیدرولیکی حاصل می‌گردد. پومیس از سرد شدن مواد مذاب خارج شده از دهانه‌های آتشفشانی به وجود می‌آید که دارای ساختار آلومینوسیلیکاتی تغییر نیافته و بافت متخلخل بوده و در زمره پوزولان‌های طبیعی می‌باشد. در این پروژه پومیس تفتان از کوه‌های منطقه جنوب شرق ایران به دست آمده است.

خواص شیمیایی و فیزیکی مواد پایه به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ برای سرباره کوره آهن‌گدازی دانه‌ای، پوزولان طبیعی پومیس و سیمان پرتلند نشان داده شده است. سیمان پرتلند مورد استفاده در این تحقیق از نوع ۴۲۵-۱ بوده که فقط جهت ساخت ملات سیمان پرتلند شاهد استفاده شده است و در ساخت آزمون‌های قلیافعال هیچگونه سیمانی استفاده نشده است. نتایج آزمایش XRD مواد پایه در شکل ۱ نشان داده شده است. نمودار XRD نشان می‌دهد که پومیس حاوی مقادیری از ذرات کریستالی می‌باشد. در حالی که دو نقطه اوج ضعیف در نمودار XRD سرباره مشاهده می‌گردد که نشان می‌دهد سرباره حاوی مقادیر کمتری از ذرات کریستالی می‌باشد. شکل ۲ نیز توزیع اندازه ذرات سرباره، پومیس و سیمان پرتلند را نشان

سرباره قلیافعال را نشان می‌دهد در حالی که آزمایش حوضچه نمک نفوذ کمتر یون‌های کلراید در نمونه‌های قلیافعال با پایه خاکستر بادی را نشان می‌دهد. هو و همکاران نشان دادند که نتایج آزمایش مهاجرت یون‌های کلراید (RCMT) در ملات‌های قلیافعال حاوی سرباره و خاکستر بادی تحت تأثیر ساختار حفرات آن است ولی نتایج آزمایش نفوذ تسریع شده یون‌های کلراید (RCPT) در آن‌ها تحت تأثیر خواص شیمیایی محلول منفذی می‌باشد [۲۲]. همانگونه که ملاحظه گردید در بسیاری از موارد مقاومت مصالح ژئوپلمری در برابر نفوذ یون‌های کلراید با روش RCPT خیلی خوب یا خیلی ضعیف نشان داده شده است، در حالی که سایر پارامترهای نفوذ با این نتیجه‌گیری مطابقت نداشته است. این تفاوت‌ها و خطاها در آزمایش RCPT، به دلیل وجود یون‌های قلیایی بسیار زیاد در محلول منفذی نمونه‌های قلیافعال می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت RCPT روش مناسبی برای ارزیابی دوام مصالح قلیافعال در برابر نفوذ یون‌های کلراید نبوده و در آینده روش‌های مناسب‌تری برای این مصالح پیشنهاد خواهد شد.

در کنار بحث دوام مصالح سیمانی و قلیافعال که در بالا به آن اشاره شد، ملاحظات اقتصادی نیز یکی از پارامترهای مهم در انتخاب مصالح تعمیراتی می‌باشد. هاردیجیتو و همکاران [۲۳] گزارش دادند که قیمت تمام شده بتن قلیافعال بازاری هر متر مکعب تقریباً برابر با بتن حاوی سیمان پرتلند می‌باشد. نظری و همکاران [۲۴] در یک مطالعه موردی، با مقایسه هزینه‌های مواد اولیه و حمل و نقل، نشان دادند که بتن‌های قلیافعال از ۱۰ درصد ارزان‌تر تا ۴۰ درصد گران‌تر از بتن‌های سیمان پرتلندی می‌باشند. با توجه به موارد مطرح شده می‌توان نتیجه گرفت که محصولات قلیافعال از نظر هزینه، قابل رقابت با محصولات پایه سیمان پرتلندی می‌باشند.

هدف اصلی این مقاله، مطالعه نفوذپذیری یون‌های کلراید در ملات‌های قلیافعال حاوی سرباره و پومیس و مقایسه آن با ملات‌های پایه سیمان پرتلندی می‌باشد. با توجه به عدم همخوانی نتایج روش RCPT با سایر روش‌ها در مطالعات پیشین در این مقاله برای بررسی نفوذ یون‌های کلراید در ملات‌های مذکور از روش‌های تسریع شده استفاده نشده و نفوذپذیری یون‌های کلراید در ملات قلیافعال به مدت یک سال و در محیط واقعی خلیج فارس مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا اقدام به ساخت آزمون‌های ملات قلیافعال سرباره‌ای و ملات سیمان پرتلندی و انجام آزمایش‌های کارایی، مقاومت فشاری، جذب آب مؤئینه، جذب آب حجمی و نفوذ یون‌های کلراید در محیط واقعی خلیج

جدول ۱. مشخصات شیمیایی مواد اولیه

Table 1. Chemical characteristics of raw materials

ترکیبات شیمیایی	روباره	پومیس تفتان	سیمان پرتلند
اکسید کلسیم (%)	۳۶/۷۵	۷/۴	۶۳/۷۸
دی اکسید سیلیسیوم (%)	۳۷/۲۱	۶۴/۹	۲۱/۵۵
اکسید منیزیم (%)	۸/۵۲	۱/۹۸	۱/۳۵
اکسید آلومینیوم (%)	۱۱/۵۶	۱۲/۱	۵/۸۹
اکسید آهن (%)	۱/۰۱	۵/۲	۳/۷۲
تری اکسید گوگرد (%)	۰/۹۷	۰/۲۲	۱/۸۹
اکسید سدیم (%)	۰/۶۱	۲/۴۹	۰/۵۳
اکسید پتاسیم (%)	۰/۷۰	۱/۸۸	۰/۳
دی اکسید تیتانیوم (%)	۱/۲۳	۰/۷۹	-
اکسید منگنز (%)	۰/۹۹	۰/۱۲	-
پنتاکسید فسفر (%)	۰/۰۳	۰/۲	-
افت وزن در اثر سرخ شدن (%)	۰/۰۲	۲/۵	۰/۹۴

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مواد اولیه

Table 2. Physical characteristics of raw materials

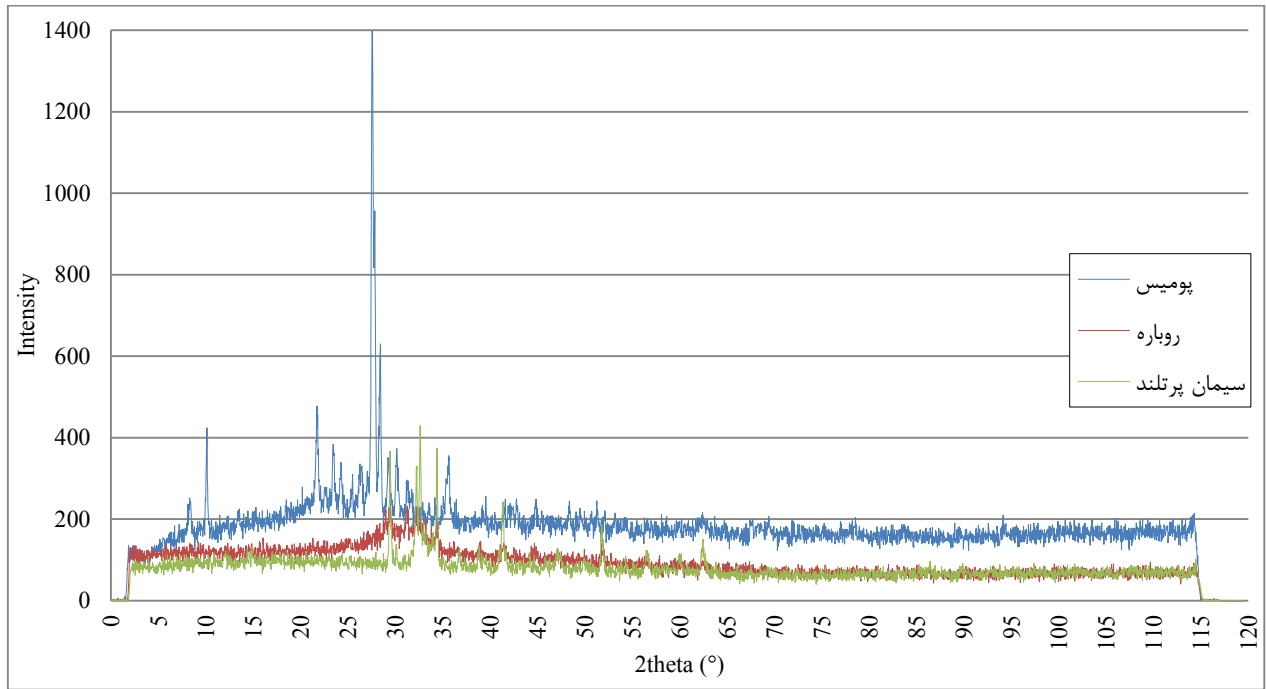
مشخصات فیزیکی	روباره	پومیس تفتان	سیمان پرتلند
بلین (cm <sup>2</sup> /g)	۳۳۸۳	۵۰۴۷	۳۰۳۵
وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )	۲/۷۹	۲/۵۴	۳/۰۲

۲-۱-۲- فعال ساز

در این مطالعه به منظور فعال سازی قلیایی مواد پایه از هیدروکسید سدیم، هیدروکسید پتاسیم و سیلیکات سدیم استفاده شده است. مقادیر بهینه غلظت، مدول سیلیکاتی و مقدار مصرف مواد فعال ساز بر اساس مقادیر بهینه مطالعات پیشین [۲۵] انتخاب شده است. بدین منظور هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم به صورت پرک تهیه و جهت دستیابی به محلول ۶ مولار در آب مقطر حل شده است. سیلیکات سدیم که محلولی از SiO<sub>2</sub>،

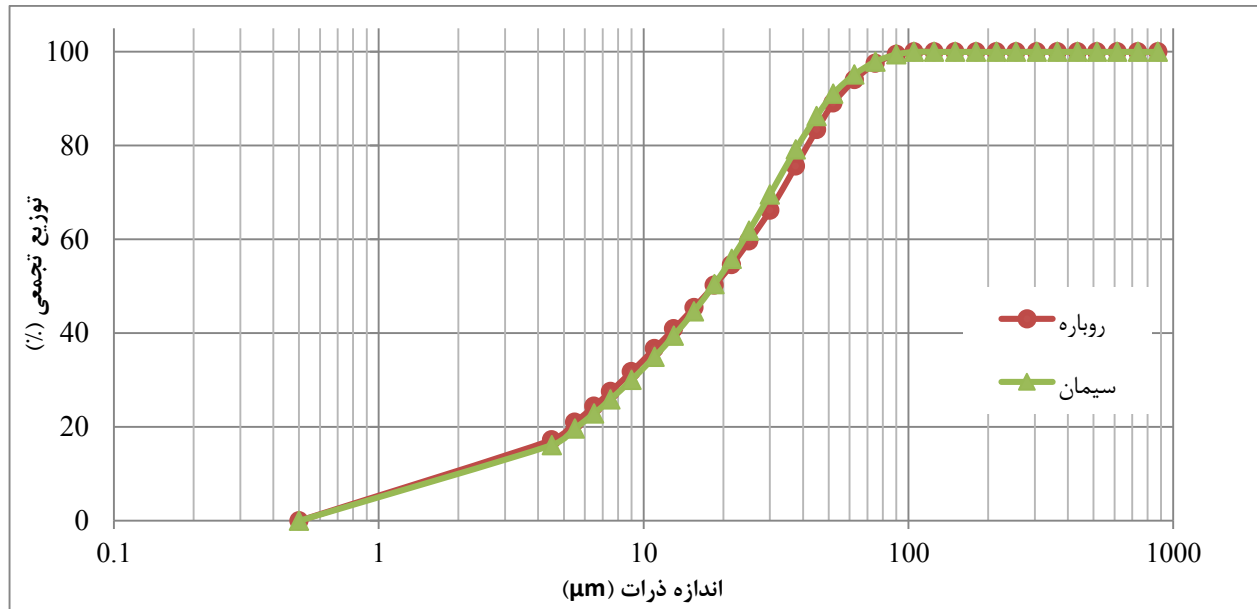
می دهد. سطح مخصوص سرباره ۳۳۸۳ cm<sup>2</sup>/gr و میانگین اندازه ذرات آن ۲۵/۷۹ μm می باشد که از کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه شده است. پومیس تفتان با سطح مخصوص ۵۰۷۴ cm<sup>2</sup>/gr و میانگین اندازه ذرات ۲۲/۲۴ μm، از کارخانه سیمان خاش تهیه گردیده است. سیمان پرتلند با سطح مخصوص ۳۰۳۵ cm<sup>2</sup>/gr و میانگین اندازه ذرات ۲۴/۷۷ μm نیز از کارخانه سیمان کردستان تهیه گردیده است. همچنین در شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی سرباره، پومیس و سیمان پرتلند نشان داده شده است.





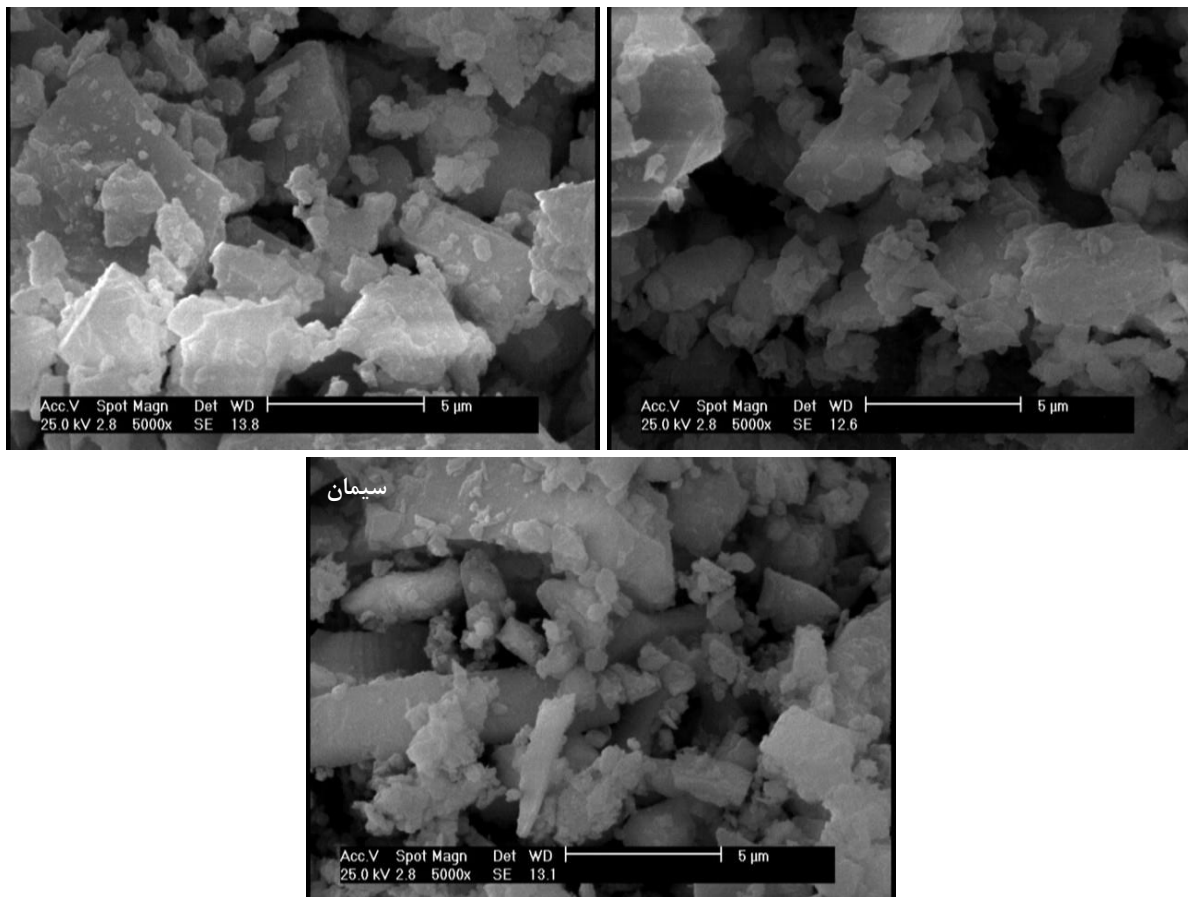
شکل ۱. نتایج آنالیز XRD مواد خام اولیه

Fig. 1. XRD patterns of raw materials



شکل ۲. توزیع اندازه ذرات مواد خام اولیه

Fig. 2. Particle size distribution of raw materials



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مواد خام اولیه

Fig. 3. SEM images of raw materials

گردیدند. پس از آن به منظور دستیابی به دانه‌بندی استاندارد ASTM C778 [۲۶] مقدار ۷۲ درصد و ۲۸ وزنی از دو رده دانه‌بندی با یکدیگر مخلوط گردیده که نمودار دانه‌بندی مخلوط حاصل، در شکل ۴ نشان داده شده و با محدوده‌های استاندارد مقایسه شده است. مشخصات فیزیکی سنگدانه مصرفی نیز در جدول ۳ ارائه شده است.

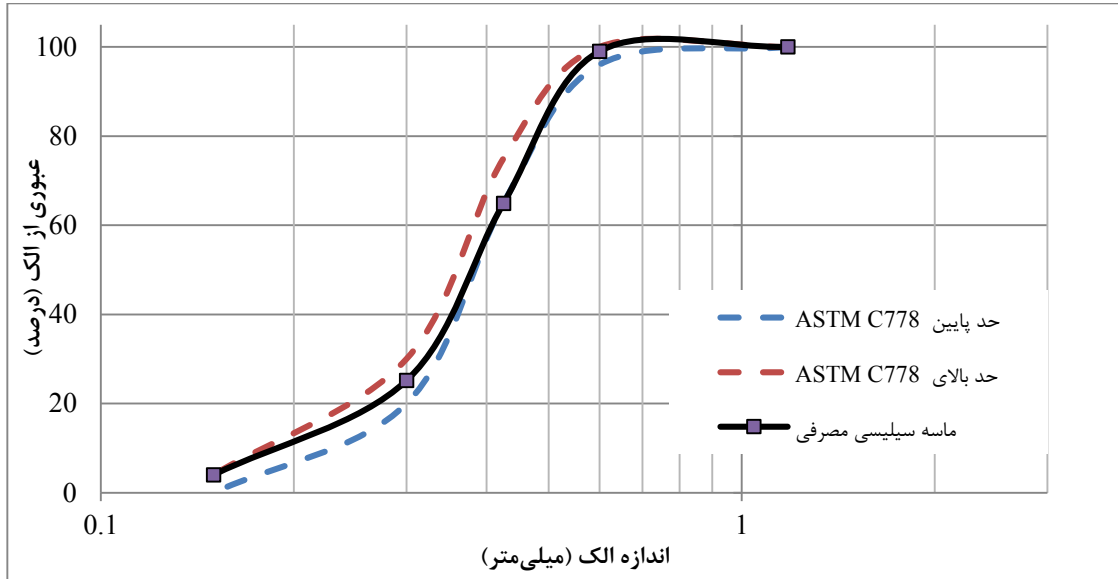
#### ۲-۱-۴- فوق روان کننده

در این تحقیق برای دستیابی به روانی مناسب، در ساخت ملات سیمان پرتلندی شاهد از فوق روان کننده استفاده شد. فوق روان کننده مورد استفاده از نسل سوم با پایه کربوکسیلات‌های اصلاح شده و با نام تجاری P10-3R بوده است. این ماده به رنگ سبز تیره بوده و چگالی آن در دمای ۲۰

$\text{Na}_2\text{O}$  و آب می‌باشد با مدول  $3/33$  و درصد وزنی جامد ۴۸ درصد به منظور تولید ملات قلیافعال استفاده شده است. مدول سیلیکات سدیم نسبت  $\text{Na}_2\text{O}$  به  $\text{SiO}_2$  موجود در این محلول می‌باشد. از آب مقطر جهت ساخت محلول‌های قلیایی در این مطالعه استفاده شده است. همچنین از آب شرب شهر تهران به منظور ساخت آزمون‌های ملات سیمان پرتلندی شاهد استفاده شده است.

#### ۲-۱-۳- ماسه

سنگدانه مورد استفاده برای ساخت آزمون‌های ملات در این تحقیق، ماسه سیلیسی بوده است. از طریق قرار دادن در آب، ماسه‌ها شسته شده تا ناخالصی‌های آن جدا گردد و سپس توسط آفتاب و جریان هوا خشک



شکل ۴. نمودار دانه‌بندی ماسه سیلیسی مصرفی

Fig. 4. Particle Size Distribution of Silica Sand

جدول ۳. مشخصات فیزیکی ماسه سیلیسی مصرفی

Table 3. Physical characteristics of silica sand

درصد جذب آب SSD	وزن مخصوص ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
۱/۰۱	۲/۵۹

نشان دهنده غلظت محلول قلیایی و حرف و عدد پس از آن نیز نشان دهنده درصد وزنی جایگزینی پومیس به جای سرباره می‌باشد. همان گونه که در جدول ۴ ملاحظه می‌گردد، از دو نوع محلول قلیایی شامل؛ هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم و دو مقدار جایگزینی پومیس به جای سرباره شامل؛ ۰ و ۱۰ درصد وزنی برای ساخت آزمون‌های ملات قلیا فعال استفاده شده است. غلظت محلول قلیایی در تمامی طرح‌ها برابر با ۶ مولار بوده و مدول سیلیکاتی آب شیشه و نسبت سیلیکات سدیم به محلول قلیایی به ترتیب برابر با ۲/۳۳ و ۰/۴ می‌باشد. برای تعیین مقدار مناسب نسبت محلول به پوزولان طرح‌هایی با نسبت محلول به پوزولان ۱، ۰/۹ و ۰/۸ ساخته شد. ملات قلیا فعال با نسبت محلول به پوزولان ۰/۸ بسیار سفت بوده و کارایی

درجه سانتی‌گراد برابر ۱/۱ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد و مقدار یون کلرید موجود در آن کمتر از ۵۰۰ ppm است. علاوه بر این، محدوده مصرف P10-3R برابر ۰/۲ تا ۱/۶ درصد وزن سیمان، توسط سازنده پیشنهاد شده است.

#### ۲-۲- طرح مخلوط و نحوه ساخت ملات قلیا فعال

مشخصات طرح مخلوط ملات‌های قلیا فعال با پایه سرباره و پومیس، نحوه نام‌گذاری طرح‌های مختلف و مقادیر مختلف هر یک از فاکتورهای مورد مطالعه در این مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است. نحوه نام‌گذاری این طرح‌ها به این صورت بوده است که؛ حروف ابتدایی نشان دهنده نوع محلول قلیایی (Na: هیدروکسید سدیم و K: هیدروکسید پتاسیم)، عدد بعدی

جدول ۴. طرح مخلوط ملات‌های قلیافعال حاوی سرباره و پومیس

Table 4. Alkali- activated mortar mixture proportion

ردیف	نام طرح	نوع محلول	غلظت محلول (Mol)	وزن ماده پایه (kg/m <sup>3</sup> )	درصد جایگزینی سرباره با پومیس	مدول سیلیکاتی	نسبت سیلیکات به محلول	نسبت فعال ساز به مواد پایه	نسبت سنگدانه به مواد پایه	نسبت آب به ذرات جامد
۱	Na6-Pu0	هیدروکسید سدیم	۶	۴۶۳/۸۰	۰	۲/۳۳	۰/۴	۰/۹	۲/۷۵	۰/۴۸۷
۲	Na6-Pu10	هیدروکسید سدیم	۶	۴۶۳/۸۰	۱۰	۲/۳۳	۰/۴	۰/۹	۲/۷۵	۰/۴۸۷
۳	K6-Pu0	هیدروکسید پتاسیم	۶	۴۶۳/۸۰	۰	۲/۳۳	۰/۴	۰/۹	۲/۷۵	۰/۴۸۷
۴	K6-Pu10	هیدروکسید پتاسیم	۶	۴۶۳/۸۰	۱۰	۲/۳۳	۰/۴	۰/۹	۲/۷۵	۰/۴۸۷

جدول ۵. طرح مخلوط ملات سیمان پرتلندی شاهد

Table 5. OPC mortar mixture proportion

ردیف	نام طرح	وزن سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	نسبت آب به سیمان	نسبت سنگدانه به سیمان	مقدار فوق روان کننده (درصد وزنی سیمان)
۱	OPC-Mortar	۵۹۲/۶	۰/۴۸۷	۲/۷۵	۰/۳

این برای دستیابی به کارایی مناسب از فوق روان کننده به میزان ۰/۳ درصد وزنی سیمان استفاده شده است.

جهت ساخت ملات قلیافعال ابتدا محلول‌های قلیایی ۶ مولار از طریق حل کردن ذرات هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم در آب مقطر تهیه و سرد شده است. برای ساخت ملات‌های قلیافعال از مخلوط کن ۸ لیتری استفاده گردیده است. ابتدا مواد پایه (سرباره و پومیس) در جام ریخته شده و به صورت خشک مخلوط شدند. پس از آن محلول قلیایی و سیلیکات سدیم به مواد پایه اضافه شده و به مدت ۳۰ ثانیه با دور کند با هم مخلوط شدند. پس از آن به مدت ۱۵ ثانیه اختلاط متوقف شده و دیواره جام تمیز گردید. سپس ماسه به آرامی به مخلوط اضافه شده و به مدت ۳۰ ثانیه اختلاط با دور کند و ۳۰ ثانیه با دور تند صورت گرفته است. پس از آن به مدت ۱۵ ثانیه اختلاط متوقف شده و دیواره جام تمیز گردیده و در انتها اختلاط نهایی با دور تند به مدت ۶۰ ثانیه انجام گردیده است. پس از اختلاط کامل، کارایی ملات

مناسبی نداشت. ملات قلیافعال با نسبت محلول به پوزولان برابر با ۱ نیز پس از قالب‌گیری آب انداختگی زیادی داشته که این موضوع می‌تواند باعث خروج مواد فعال ساز از ملات‌های قلیافعال و کاهش مقاومت فشاری گردد. بنابراین طرح‌های ملات قلیافعال با نسبت محلول به پوزولان برابر با ۰/۹ ساخته شده است.

به منظور ارزیابی خواص مکانیکی و دوام ملات‌های قلیافعال با پایه سرباره و پومیس، نمونه‌های ملات سیمان پرتلند شاهد ساخته شده است. مشخصات طرح مخلوط ملات سیمان پرتلندی (OPC) در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به اینکه مقدار مواد جامد به جز ماسه، در ملات سیمان قلیافعال برابر با ۵۹۲/۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است، مقدار سیمان در ملات سیمان پرتلندی شاهد برابر همین مقدار در نظر گرفته شد. نسبت آب به سیمان در ملات سیمان پرتلندی شاهد، با توجه به نسبت آب به ذرات جامد در ملات سیمان پرتلندی برابر با ۰/۴۸۷ در نظر گرفته شد. علاوه بر

ملات قلیافعال به ابعاد ۵۰ میلی‌متر تا سن آزمایش در آب و آزمون‌های ملات سیمان پرتلند شاهد در آب آهک عمل آوری شده و با توجه به استاندارد ASTM C39 [۲۹] و با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری با ظرفیت ۲۰ تن مورد آزمایش قرار گرفتند. انتخاب روش عمل آوری با توجه به مقایسه مقاومت فشاری طرح شماره ۳ ملات، در معرض سه نوع عمل آوری خشک، عمل آوری در آب و عمل آوری در محلول نمک بوده است. از هر طرح در هر سن ۳ آزمون مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته و میانگین اعداد قرائت شده گزارش گردیده است.

برای انجام آزمایش جذب آب موئینه مطابق با استاندارد EN 480-5 [۳۰]، آزمون‌های منشوری ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی با ابعاد ۱۶۰×۴۰×۴۰ میلی‌متر مکعب ساخته شده و تا سن آزمایش در محفظه‌ای با رطوبت نسبی  $65 \pm 5$  درصد و با دمای  $20 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد عمل آوری شده‌اند. آزمون‌ها پس از توزین درون ظرف آبی قرار داده شدند، به گونه‌ای که سطح آب به اندازه  $3 \pm 1$  میلی‌متر از تراز کف آزمون‌ها بالاتر باشد. به بیان دیگر، آزمون‌ها از سطح  $40 \times 40$  میلی‌متر مربع، به اندازه  $3 \pm 1$  میلی‌متر در آب فرو می‌روند، ضمن آن که آب با کف آزمون کاملاً تماس دارد. وزن آزمون‌ها پس از ۳، ۶، ۲۴ و ۷۲ ساعت قرارگیری در آب، قرائت شده است. این آزمایش در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز بر روی آزمون‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد انجام شده است. لازم به ذکر است برای جلوگیری از جذب رطوبت آزمون‌ها از سایر سطوح، تمامی سطوح به جز سطح در معرض آب با چسب آب‌بندی شده است.

جذب آب حجمی آزمون‌های ملات نیز می‌تواند به عنوان یکی از پارامترهای معرف دوام مورد مطالعه قرار گیرد. بر اساس استاندارد BS 1881-122 [۳۱] برای این آزمایش می‌بایست از مغزه  $7/5$  سانتی‌متری با استفاده از آزمون‌های مکعبی  $15 \times 15 \times 15$  سانتی‌متر استفاده می‌گردید، ولی به دلیل انجام آزمایش روی ملات از آزمون‌های مکعبی  $50 \times 50 \times 50$  میلی‌متر ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد استفاده شده است. آزمون‌های ملات قلیافعال تا فرا رسیدن زمان آزمایش، در آب عمل آوری شده‌اند. جهت انجام آزمایش ابتدا آزمون‌های ملات به مدت ۷۲ ساعت در دمای  $10.5$  درجه سانتی‌گراد خشک شده و توزین شدند. سپس آزمون‌ها به مدت ۳۰ دقیقه به صورت کامل در آب مغروق شده و پس از خروج از آب، درصد جذب آب آزمون‌ها محاسبه و گزارش شده است. این آزمایش در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز بر روی آزمون‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد انجام شده است. به منظور بررسی میزان نفوذ یون‌های کلراید در آزمون‌های ملات

قلیافعال اندازه‌گیری و سپس ملات قلیافعال حاصل قالب‌گیری شده است. به منظور خارج شدن حباب‌های هوا، آزمون‌های ملات قلیافعال با استفاده از میز ویبره (به مدت ۱۰ تا ۳۰ ثانیه) متراکم گردیده و به مدت ۲۴ ساعت در محفظه رطوبت نگهداری شده‌اند.

به منظور بررسی اثر روش‌های مختلف عمل آوری، پس از باز کردن قالب‌ها، آزمون‌های ملات قلیافعال طرح ۳ (K6-P0) تا سن آزمایش مقاومت فشاری به سه روش عمل آوری شده و مناسب‌ترین روش عمل آوری که باعث دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری شده، برای سایر آزمون‌ها و آزمایش‌ها به کار گرفته شده است. سه روش عمل آوری مورد نظر به شرح ذیل می‌باشد:

۱- عمل آوری خشک: در این روش آزمون‌های ملات قلیافعال طرح ۳ در کیف‌های پلاستیکی مخصوصی جهت جلوگیری از افت رطوبت، نگهداری شده‌اند. دمای محیط نگهداری آزمون‌ها  $23 \pm 2$  °C بوده است.

۲- عمل آوری در آب: در این روش آزمون‌های ملات قلیافعال طرح ۳ پس از قالب برداری، در حوضچه آب قرار داده شده و تا سن آزمایش در آن نگهداری شده‌اند. دمای آب و دمای محیط نگهداری آزمون‌ها  $23 \pm 2$  °C بوده است.

۳- عمل آوری در محلول نمک: برای بررسی اثر آب دریا روی مقاومت فشاری آزمون‌های ملات قلیافعال طرح ۳ پس از قالب برداری، در محلول  $3/6$  درصد وزنی نمک طعام (NaCl) قرار داده شده و تا سن آزمایش در آن نگهداری شده‌اند. دمای محلول و دمای محیط نگهداری آزمون‌ها  $23 \pm 2$  °C بوده است.

پس از تعیین مناسب‌ترین روش عمل آوری، تمامی آزمون‌های ملات قلیافعال پس از قالب برداری تا سن آزمایش در حوضچه آب نگهداری شده‌اند. دمای آب و دمای محیط نگهداری آزمون‌ها  $23 \pm 2$  °C بوده است. ملات سیمان پرتلندی شاهد با استفاده از روش استاندارد ASTM C305 [۲۷] ساخته شده است.

### ۲-۳- روش آزمایش

کارایی ملات قلیافعال با استفاده از روش استاندارد ASTM C1437 که شامل اندازه‌گیری درصد افزایش قطر ملات سیمان نسبت به قطر اولیه مخروط ناقص روی میز روانی است، اندازه‌گیری شده است [۲۸]. آزمایش مقاومت فشاری ملات در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز بر روی آزمون‌های ملات قلیافعال و ملات سیمان پرتلند شاهد انجام شده است. آزمون‌های مکعبی

$$efr(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\beta^2} d\beta \quad (3)$$

در پایان با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، منحنی به دست آمده از معادله ۲ با نتایج آزمایش برآزش غیرخطی داده شده و پارامترهای Cs و Dc برای هر طرح محاسبه گردید.

در این مقاله به منظور بررسی وضعیت حفرات آزمون‌های ملات قلیافعال و مقایسه آن با ملات سیمان پرتلندی، از آزمایش تخلخل‌سنجی به روش تزریق جیوه (MIP) بهره گرفته شده است. به منظور تعیین توزیع حفرات از دستگاه Porosimeter PASCAL 440 و Porosim- 140 eter PASCAL 140 به ترتیب برای اندازه‌گیری حفرات ۶ نانومتر تا ۲ میکرون و ۲ میکرون تا ۲۰۰ میکرون استفاده شده است. فشار جیوه در دستگاه Porosimeter PASCAL 140 برابر با ۴۰۰ kPa و در دستگاه Porosimeter PASCAL 440 برابر با ۴۰۰ MPa بوده است. نتایج به دست آمده از این آزمایش شامل قطر متوسط حفرات، توزیع اندازه حفرات، پرسیامدترین اندازه حفرات می‌باشد.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

#### ۳-۱- آزمایش کارایی ملات قلیافعال

نتایج کارایی ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد برحسب درصد، در شکل ۵ ارائه شده است. کارایی ملات‌های قلیافعال حاوی محلول هیدروکسیدپتاسیم بیشتر از ملات‌های قلیافعال حاوی محلول هیدروکسیدسدیم بوده که این موضوع به دلیل بیشتر بودن قدرت انحلال هیدروکسیدپتاسیم است. همچنین نتایج نشان می‌دهد جایگزینی ۱۰ درصد از سرباره با پومیس باعث کاهش پخش شدگی ملات قلیافعال تازه می‌گردد. بیشتر بودن سطح مخصوص پومیس نسبت به سرباره (۵۰۷۴ cm<sup>2</sup>/gr) در مقابل (۳۳۸۳ cm<sup>2</sup>/gr) باعث افزایش تقاضای آب و کاهش کارایی ملات قلیافعال گردیده است. همچنین مشاهدات نشان می‌دهد که پخش شدگی ۵۰ درصد (معادل قطر پخش شدگی ۱۵۰ میلی‌متر) را می‌توان به عنوان حداقل پخش شدگی ملات‌های قلیافعال جهت قالب‌گیری مناسب، مد نظر قرار داد.

#### ۳-۲- مقاومت فشاری ملات قلیافعال

به منظور تعیین بهترین شرایط عمل آوری ملات‌های قلیافعال،

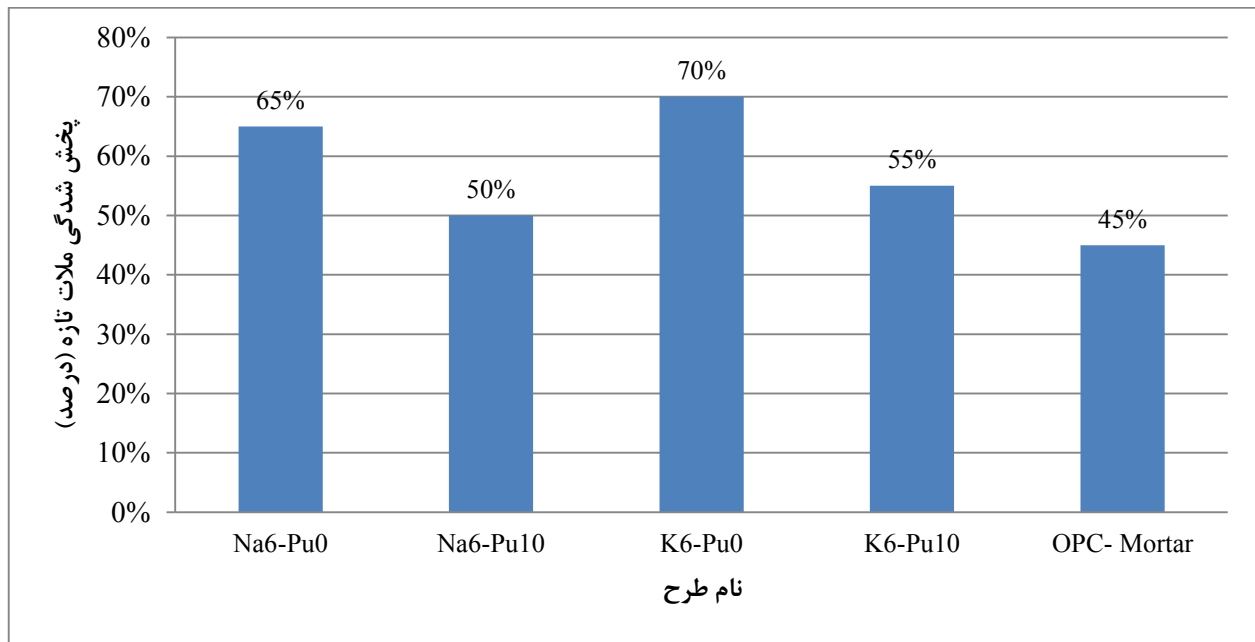
قلیافعال و مقایسه با ملات سیمان پرتلندی شاهد و ترسیم پروفیل نفوذ، از روش استاندارد ASTM C1152 [۳۲] استفاده شده است. بدین منظور ابتدا آزمون‌های مکعبی ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متری ساخته شد. پس از ۲۸ روز عمل آوری آزمون‌های ملات قلیافعال در آب و ملات سیمان پرتلندی در آب آهک اشباع، سطوح آزمون‌ها خشک گردیده و سپس پنج وجه کناری آزمون‌ها به وسیله رنگ اپوکسی پوشش داده شد. یک گروه از آزمون‌ها در شرایط مغروق محیط واقعی خلیج فارس و گروه دیگر در شرایط تر و خشک محیط واقعی خلیج فارس به مدت یک سال نگهداری شده‌اند. به منظور اندازه‌گیری پروفیل نفوذ یون‌های کلراید، حداقل ۱۰ گرم پودر آزمون‌ها از عمق‌های مختلف آزمون‌ها تهیه گردید. پودرهای ملات تهیه شده از الک نم‌۵۰ (۳۰۰ میکرومتر) عبور داده شده و با استفاده از آزمایش تیتراسیون جامد آنالیز گردیده و در نهایت میزان کلراید موجود به درصد وزنی سیمان محاسبه گردید. در انتها پروفیلی که نشان دهنده مقدار غلظت یون‌های کلراید نفوذ کرده در عمق‌های مختلف بتن می‌باشد، برای هر طرح رسم گردید. با نتایج به دست آمده برای هر طرح، ضریب انتشار برای هر یک از طرح‌ها بر اساس قانون دوم انتشارپذیری فیک محاسبه گردید. در شرایط اشباع، نفوذ یون‌های کلراید در بتن در زمان مشخص تابع قانون دوم انتشارپذیری فیک می‌باشد روابط ۱ تا ۳:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial t^2} \quad (1)$$

که پس از حل آن برای شرایط آزمایش، به صورت رابطه ۲ در می‌آید:

$$C(x, t) = C_s [1 - \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}})] \quad (2)$$

که در آن  $x$  فاصله از سطح بتن،  $t$  زمان نفوذ، Dc ضریب انتشار، Cs میزان یون‌های کلراید در سطح بتن و  $C(x, t)$  میزان یون‌های کلراید در عمق  $x$  نسبت به سطح در زمان  $t$  و erf تابع خطا می‌باشد که تعریف آن به صورت رابطه ۳ است:



شکل ۵. نتایج کارایی ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد

Fig. 5. The workability of alkali- activated slag/pumice and OPC mortars

ملات‌های قلیافعال اقدام به عمل آوری آزمون‌های طرح K6-Pu0 در محلول ۳/۶ درصد وزنی محلول نمک طعام شد. همان گونه که در جدول ۶ نشان داده شده است، عمل آوری در محلول نمک نه تنها باعث کاهش مقاومت فشاری ملات قلیافعال نشده است، بلکه مقاومت فشاری را در سنین بالا افزایش داده است. قیاس الدین<sup>۱</sup> و همکاران [۳۳] قبلاً این موضوع را برای مصالح قلیافعال حاوی خاکستر بادی و سرباره نشان داده‌اند. دلیل این پدیده پر شدن برخی از حفرات آزمون ملات قلیافعال با ته نشینی نمک و همچنین کاهش آب شستگی آزمون‌های قلیافعال در معرض محلول نمک عنوان شده است.

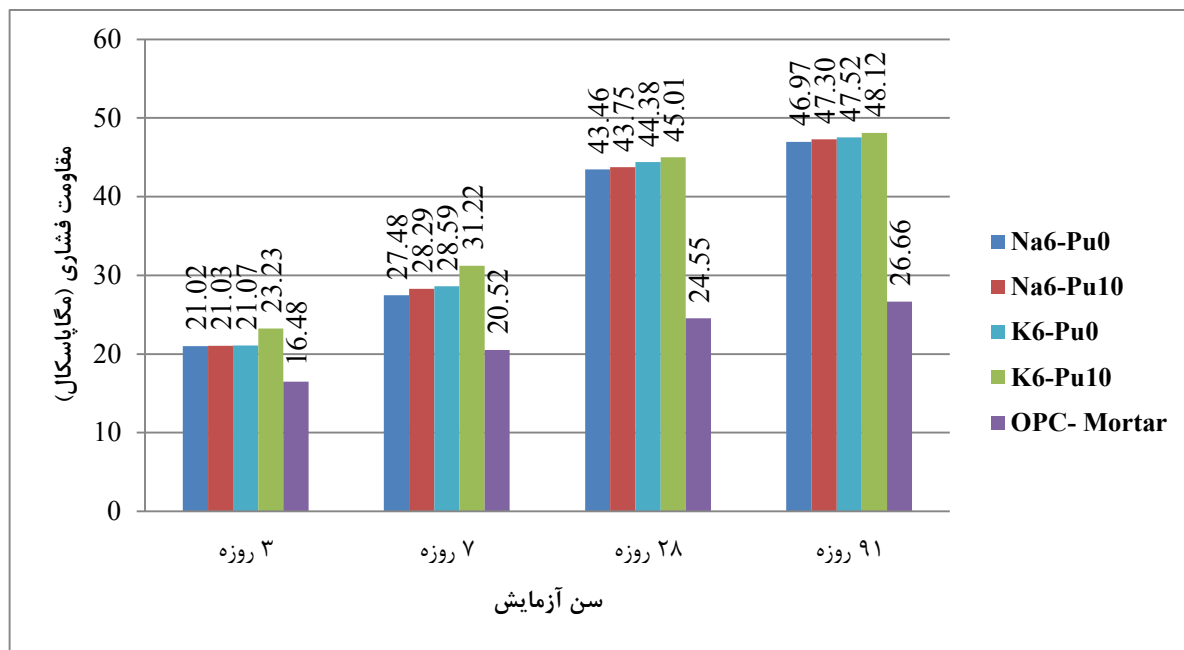
نتایج مقاومت فشاری طرح‌های مختلف ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد در سنین مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌گردد با افزایش زمان عمل آوری (سن آزمون) مقاومت فشاری ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد به دلیل تکمیل واکنش‌های ژئوپلیمره شدن و هیدراتاسیون افزایش می‌یابد. همچنین در تمامی سنین مقاومت فشاری تمامی طرح‌های ملات قلیافعال بیش از ملات سیمان پرتلندی شاهد بوده، به طوری که مقاومت فشاری ۹۱ روزه ملات‌های

آزمون‌های ملات قلیافعال طرح K6-Pu0 تا سن آزمایش به سه روش شامل؛ عمل آوری خشک، عمل آوری در آب و عمل آوری در محلول ۳/۶ درصد وزنی نمک طعام نگهداری شده و سپس تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای روش‌های مختلف عمل آوری در جدول ۶ ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود مقاومت فشاری حاصل از روش‌های مختلف عمل آوری در سنین اولیه تفاوت چندانی ندارد، در حالی که با گذشت زمان و در سنین بالاتر، مقاومت فشاری آزمون‌های عمل آوری شده در آب به مقدار قابل توجهی از مقاومت فشاری آزمون‌های عمل آوری خشک بیشتر بوده و این به دلیل انجام فرآیند هیدراتاسیون در ملات‌های قلیافعال با پایه سرباره می‌باشد که در عمل آوری مرطوب هیدراتاسیون افزایش یافته و واکنش‌ها کامل‌تر شده است. به عنوان مثال مقاومت فشاری ۹۱ روزه آزمون‌های عمل آوری شده در آب ۴۸/۴ درصد بیشتر از آزمون‌های عمل آوری شده در هوا (ظرف درب بسته) بوده است. بنابراین با تعیین مناسب‌ترین روش عمل آوری، تمامی آزمون‌های ملات قلیافعال پس از قالب برداری تا سن آزمایش در حوضچه آب نگهداری شده‌اند. دمای آب و دمای محیط نگهداری آزمون‌ها  $23 \pm 2^\circ C$  بوده است. علاوه بر این به منظور بررسی اثر آب دریا بر روی خواص مکانیکی

جدول ۶. مقاومت فشاری طرح Pu0-K6 در شرایط مختلف عمل آوری

Table 6. Compressive strength of K6-P0 by different curing methods

روزه ۹۱	روزه ۲۸	روزه ۷	روزه ۳	روش عمل آوری
۳۵/۵۷	۳۲/۲۱	۲۸/۴۶	۲۰/۲۴	عمل آوری در ظرف درب بسته
۴۹/۸۰	۴۰/۱۶	۳۳/۲۰	۲۳/۰۸	عمل آوری در آب
۵۲/۸۰	۴۲/۱۳	۳۰/۰۲	۲۱/۴۲	عمل آوری در محلول ۳/۶٪ وزنی نمک طعام



شکل ۶. نتایج مقاومت فشاری ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد

Fig. 6. Compressive strength results of alkali- activated slag/pumice and OPC mortars

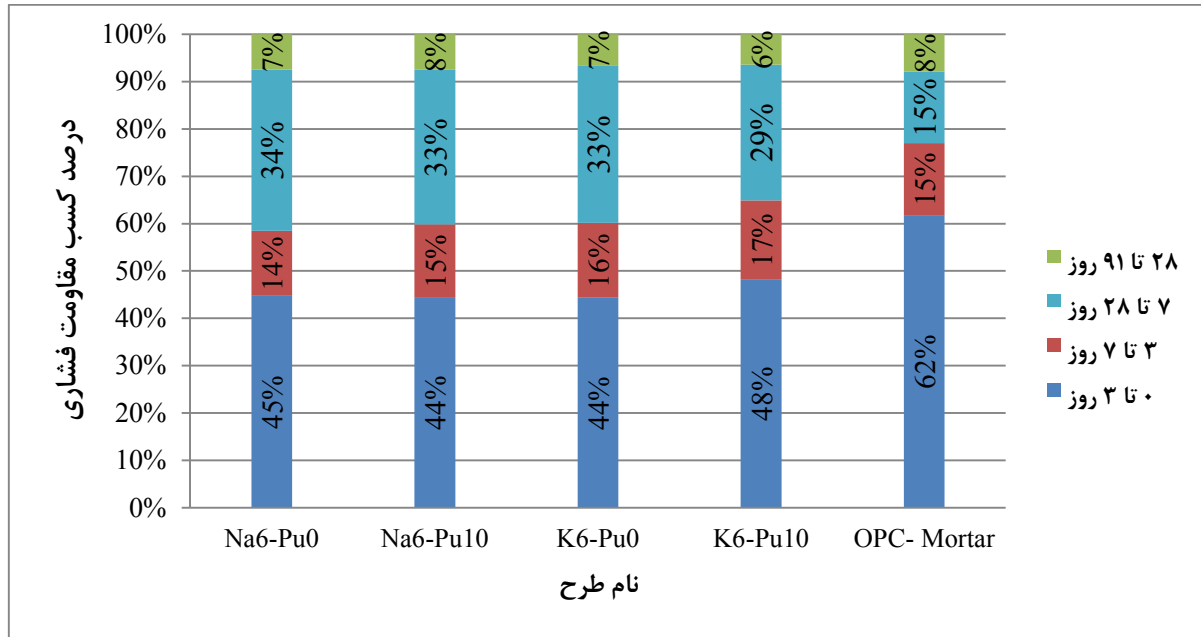
می‌گردد. ضمناً استفاده از ۱۰ درصد پومیس به جای سرباره باعث افزایش مقاومت فشاری ملات قلیافعال شده که می‌تواند به دلیل ریزی بالاتر پومیس در مقایسه با سرباره باشد. روند کسب مقاومت در سنین مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است.

### ۳-۳- آزمایش جذب موئینگی آب

یکی از راه‌های نفوذ آب و عوامل مخرب به داخل بتن جذب توسط خاصیت موئینگی می‌باشد. آزمایش جذب موئینه آب، می‌تواند تصویری از

قلیافعال تقریباً دو برابر ملات سیمان پرتلندی شاهد می‌باشد. مقاومت فشاری آزمون‌های ملات قلیافعال در یک محدوده و نزدیک به هم می‌باشد. با این وجود مقاومت فشاری آزمون‌های ملات قلیافعال حاوی هیدروکسیدپتاسیم در مقایسه با مقاومت فشاری آزمون‌های حاوی هیدروکسیدسدیم کمی بیشتر بوده است. اندازه یون‌های  $Na^+$  برابر با pm و اندازه یون‌های  $K^+$  برابر با ۱۵۲ pm می‌باشد. بزرگ‌تر بودن یون‌های  $K^+$  باعث شکل‌گیری الیگومرهای بزرگ‌تری از  $Al(OH)^-$  می‌گردد [۳۴]. بنابراین محلول هیدروکسیدپتاسیم باعث کسب مقاومت بیشتری



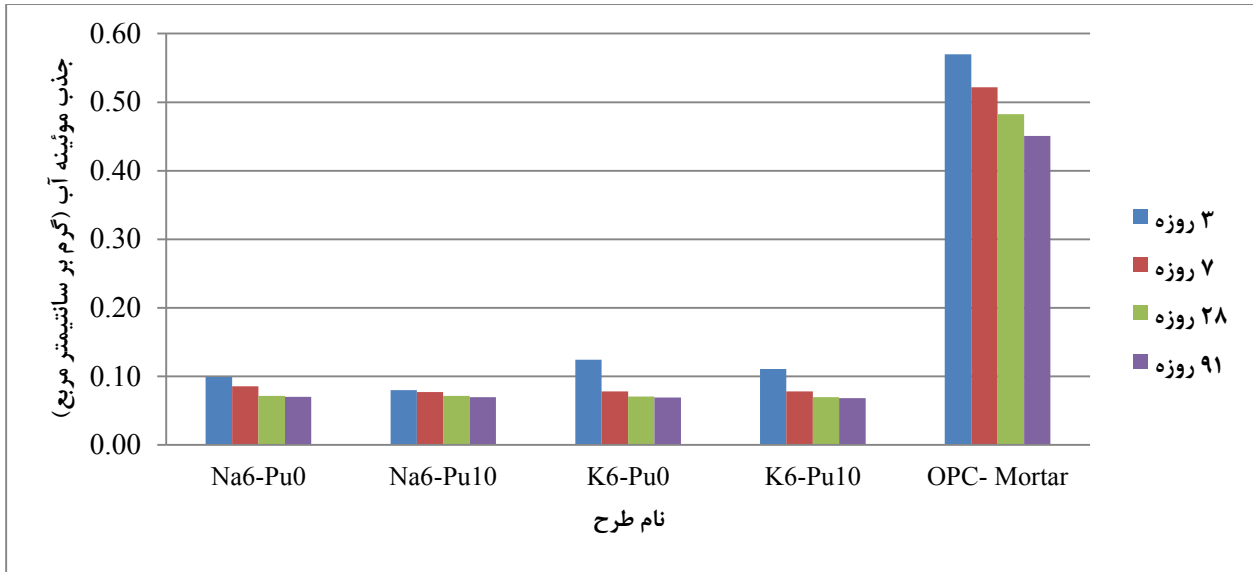


شکل ۷. روند کسب مقاومت فشاری ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد در سنین مختلف

Fig. 7. Compressive strength gain of alkali- activated slag/pumice and OPC mortars at different ages

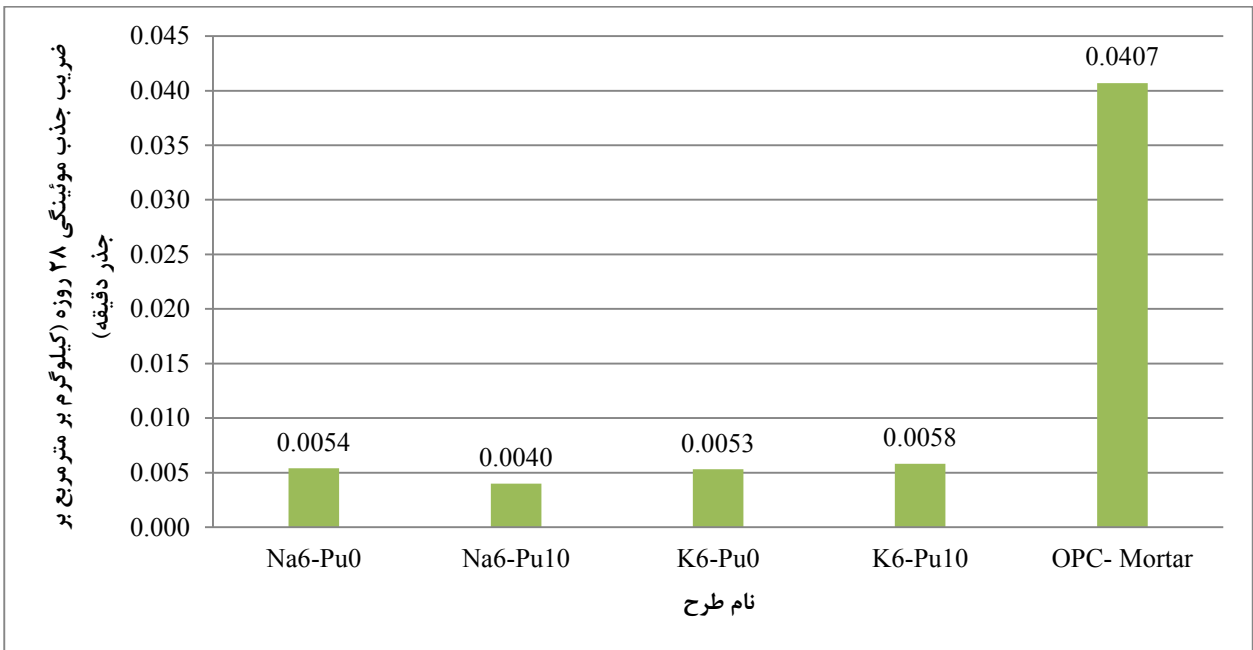
روش تزریق جیوه بیشتر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین ملاحظه می‌گردد که در سنین اولیه جذب آب آزمون‌های ملات قلیافعال حاوی هیدروکسیدسدیم کمتر از آزمون‌های حاوی هیدروکسیدپتاسیم بوده است ولی در سنین بالاتر نتایج آزمون‌های حاوی هیدروکسیدپتاسیم مناسب‌تر به نظر می‌رسد. این در حالی است که در برخی از تحقیقات پیشین مقدار آب جذب شده توسط نمونه فعال شده با هیدروکسیدسدیم به مراتب کمتر از نمونه فعال شده با هیدروکسیدپتاسیم بوده است [۱۴]. اگر چه نتایج جذب آب موئینه آزمون‌های ملات قلیافعال بسیار به هم نزدیک می‌باشد ولی می‌توان گفت آزمون‌های حاوی ۱۰ درصد پومیس و ۹۰ درصد سرباره نسبت به آزمون‌های حاوی ۱۰۰ درصد سرباره تا حدی جذب آب موئینه کمتری داشته‌اند. عملکرد مناسب‌تر طرح‌های حاوی سرباره و پومیس در نتایج مقاومت فشاری نیز مشاهده شده است. نتایج ضریب جذب موئینی آزمون‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی در سنین مختلف در شکل ۹ ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می‌گردد طرح Na6-Pu10 کمترین ضریب جذب موئینی و طرح OPC- Mortar بیشترین ضریب

مقدار فضاهای موئینه آزمون‌های گوناگون و شکل و پیوستگی آن‌ها ارائه نماید. زیاد بودن جذب آب موئینه در آزمون‌های ملات می‌تواند نشانگر ضعف ساختار ماتریس سیمانی ملات و نفوذپذیری بالای آن باشد. با توجه به نتایج این آزمایش می‌توان در مورد عملکرد ملات‌های قلیافعال در مقایسه با ملات‌های سیمان پرتلندی شاهد، از نظر دوام طولانی مدت اظهار نظر نمود. شکل ۸ نتایج آزمایش جذب موئینه آب (برحسب گرم بر سانتی‌متر مربع) آزمون‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی را در سنین مختلف به صورت نمودار میله‌ای نشان می‌دهد. همان گونه که ملاحظه می‌گردد میزان جذب موئینه آزمون‌های ملات قلیافعال بسیار کمتر از آزمون‌های ملات سیمان پرتلندی شاهد می‌باشد. این نتایج با مطالعات پیشین نیز مطابقت داشته است جایی که مقدار آب جذب شده توسط نمونه فعال شده با هیدروکسیدسدیم به مراتب کمتر از نمونه شاهد بوده است [۱۴]. این موضوع به دلیل متراکم‌تر بودن آزمون‌های ملات قلیافعال، وجود فضاهای موئینه کمتر و پیچیدگی بیشتر فضاهای موئینه در این ملات‌ها در مقایسه با ملات سیمان پرتلندی شاهد می‌باشد. این موضوع در ادامه و در بررسی نتایج تخلخل‌سنجی به



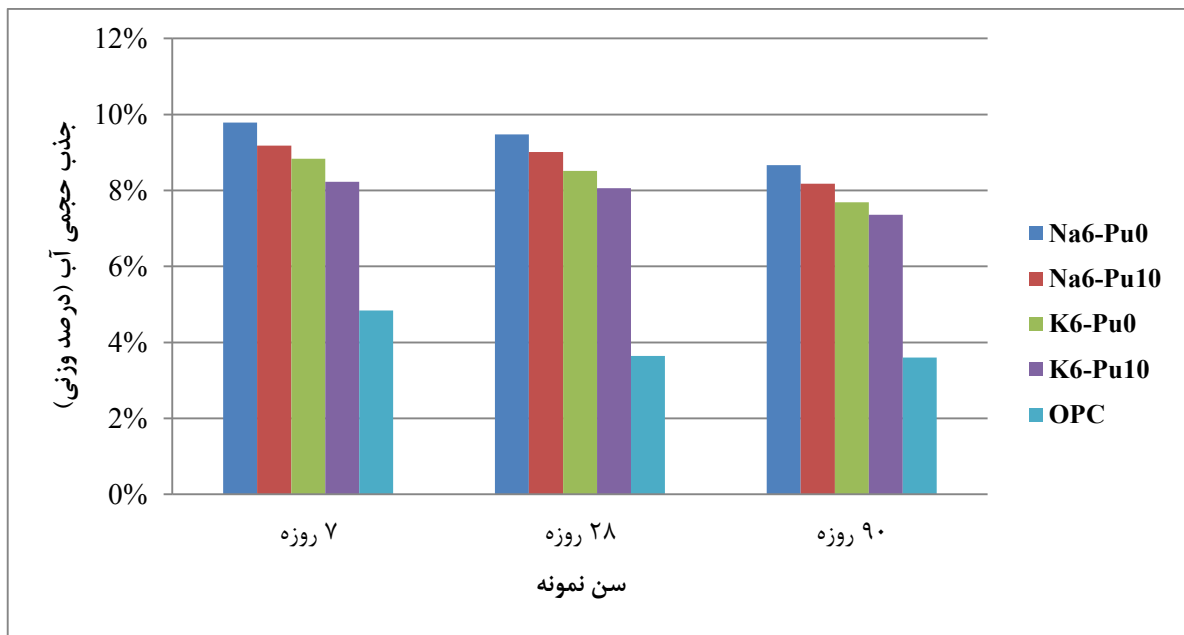
شکل ۸. نتایج آزمایش جذب موئینه آب آزمونه‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی

Fig. 8. Capillary water absorption results of alkali- activated slag/pumice and OPC mortars



شکل ۹. ضریب جذب موئینی آزمونه‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی در سنین مختلف

Fig. 9. Capillary absorption coefficient of alkali- activated slag/pumice and OPC mortars



شکل ۱۰. جذب حجمی آب ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی در سنین مختلف

Fig. 10. Bulk water absorption of alkali- activated slag/pumice and OPC mortars at different ages

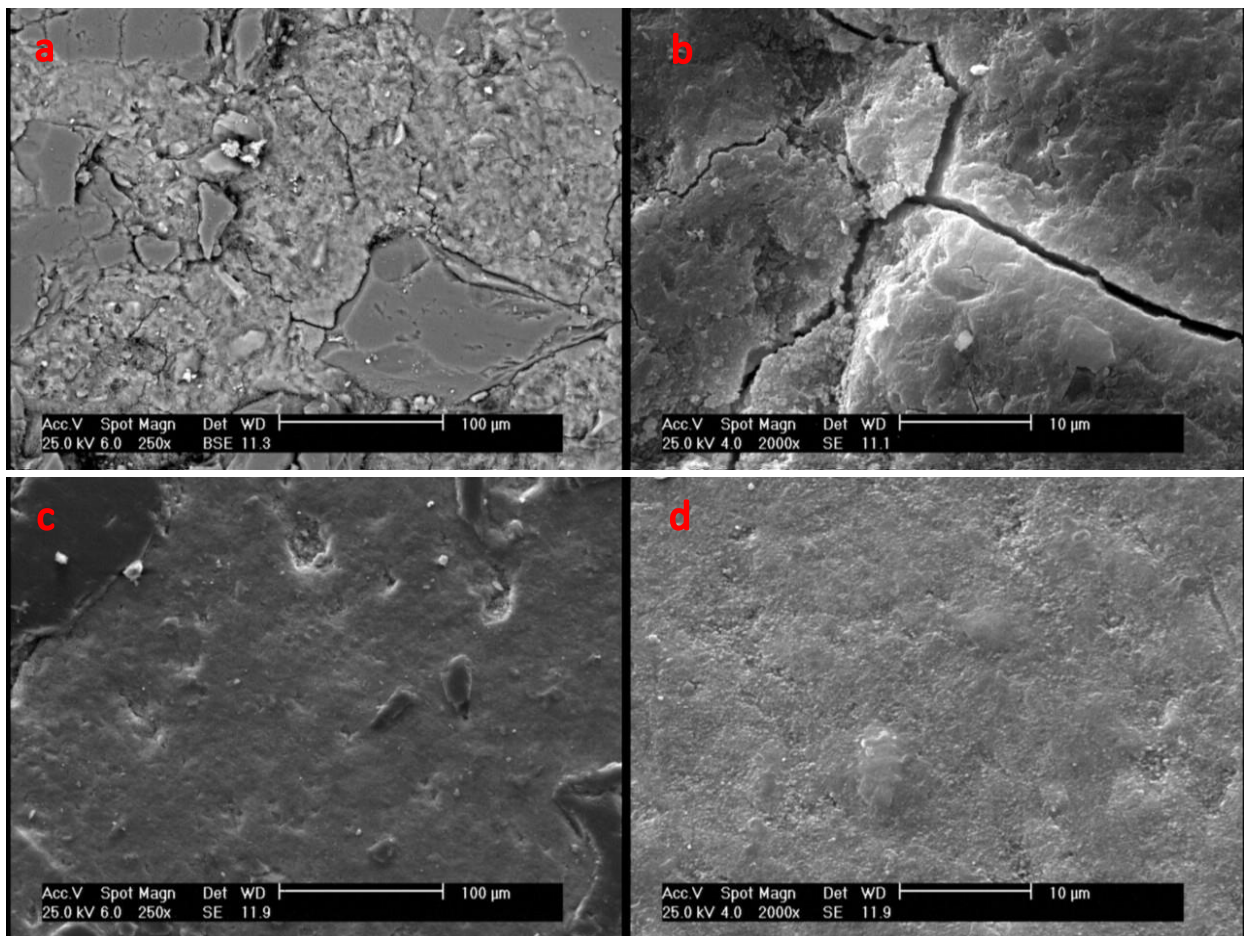
ابتدا آزمون‌های ملات به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه دمای بالا می‌تواند باعث ایجاد ریزترک‌هایی در آزمون‌های ملات گردد، در ادامه و برای تجزیه و تحلیل صحیح نتایج به دست آمده از این آزمایش و بررسی نحوه تأثیر دمای بالا روی آزمون‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی شاهد، آزمون‌های طرح‌های ۱ و ۵ پس از قرارگیری به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد، برش داده شده و سپس به وسیله پولیش مینرالوگرافی سطح آزمون‌ها صیقلی گردید. پس از آماده‌سازی، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با بزرگنمایی ۲۵۰ و ۲۰۰۰ برابر، وضعیت ترک خوردگی آزمون‌ها بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است. تصاویر به دست آمده با بزرگنمایی ۲۵۰ و ۲۰۰۰ برابر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد در ملات قلیافعال موجود در آزمون طرح ۱ پس از قرارگیری در معرض دمای بالا ریزترک‌هایی به وجود آمده است در حالی که هیچ گونه ترک خوردگی در آزمون‌های ملات سیمان پرتلندی آزمون طرح ۵ مشاهده نمی‌شود. به وجود آمدن ریزترک‌ها پس

جذب موئینگی را دارا می‌باشد. نتایج ضریب جذب موئینگی در ادامه با ضریب انتشار یون‌های کلراید مقایسه خواهد شد.

### ۳-۴- آزمایش جذب آب حجمی

نتایج آزمایش جذب آب حجمی آزمون‌های ملات قلیافعال و سیمان پرتلندی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌گردد با افزایش سن آزمون‌های ملات، جذب حجمی آب به دلیل کاهش حفرات و پر شدن آن‌ها توسط محصولات ژئوپلیمریزاسیون و هیدراتاسیون کاهش می‌یابد. همان گونه که در نتایج مقاومت فشاری نیز نشان داده شد، به دلیل پر شدن حفرات ملات قلیافعال، استفاده از ۱۰ درصد پومیس به جای سرباره باعث کاهش جذب آب حجمی آزمون‌های ملات قلیافعال می‌گردد. علاوه بر این آزمون‌های ملات قلیافعال حاوی هیدروکسیدپتاسیم نسبت به آزمون حاوی هیدروکسیدسدیم در سنین مختلف، جذب آب حجمی کمتری داشته‌اند. علاوه بر این برخلاف نتایج جذب موئینه، درصد جذب آب حجمی آزمون‌های ملات‌های قلیافعال بیشتر از ملات سیمان پرتلندی شاهد بوده است.

همان گونه که قبلاً گفته شد جهت انجام آزمایش جذب آب حجمی



شکل ۱۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) پس از قرارگیری آزمون‌های ملات در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت، (a و b): آزمون ملات قلیا فعال طرح ۱، (c و d): آزمون ملات سیمان پرتلندی شاهد طرح ۵

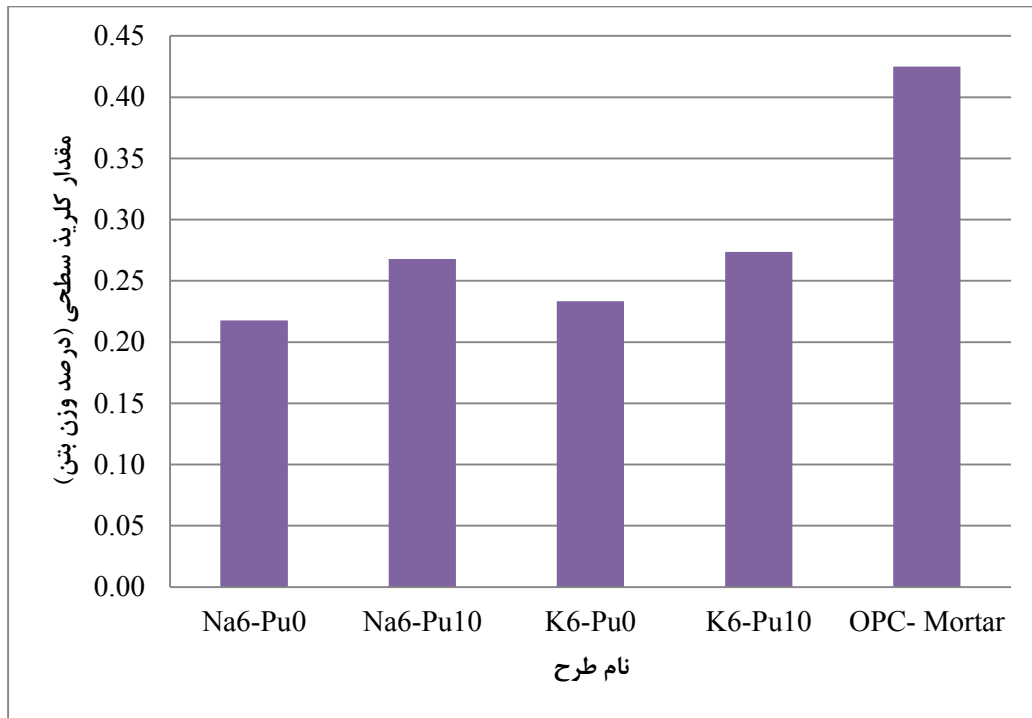
**Fig. 11. Scanning electron microscope (SEM) images after placing mortar specimens at 105 °C for 72 hours, (b and a): alkali- activated mortar specimen Na6-P0, (d and c): OPC mortar specimen**

کردن آزمون‌های قلیا فعال از راه‌های جایگزین مانند قرار دادن آزمون‌ها به مدت طولانی‌تر در دماهای کمتر یا قرار دادن آزمون‌ها به مدت دو هفته در دمای محیط استفاده نمود.

### ۳-۵- آزمایش نفوذ کلراید با پروفیل‌گیری

به منظور بررسی نفوذ یون‌های کلراید در ملات‌های قلیا فعال و مقایسه آن با ملات سیمان پرتلندی شاهد و مقایسه ضریب انتشار یون‌های کلراید در این ملات‌ها، آزمون‌های طرح‌های ۱ تا ۵ پس از آماده‌سازی، به مدت یک سال در شرایط مغروق و جزر و مدی خلیج فارس قرار داده شده‌اند. پس از اتمام زمان آزمایش، آزمون‌ها به مدت یک هفته در محیط خشک شده و

از اعمال دمای بالا روی آزمون‌های ملات قلیا فعال، باعث افزایش جذب آب حجمی این آزمون‌های در مقایسه با آزمون‌های ملات سیمان پرتلندی شاهد شده و افزایش جذب آب حجمی طرح‌های ملات قلیا فعال ارتباطی با ریزساختار آن ندارد. در این زمینه برخی از مطالعات [۳۵] نشان داده است که تغییر ساختار قلیا فعال و تخریب بخشی از ساختار ژل C-A-S-H در دمای بالا باعث افزایش جذب آب شده است. در این مطالعه پیشنهاد شده است که به جای دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد آزمون‌های قلیا فعال را می‌توان در دمای حدود ۶۵ درجه سانتی‌گراد خشک نمود. بنابراین می‌توان گفت انجام پیش گرمایش در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آزمایش جذب آب حجمی، برای محصولات قلیا فعال با پایه سرباره مناسب نبوده و بهتر است به منظور خشک



شکل ۱۲. مقدار کلراید سطحی (Cs) در آزمون‌های مغروق در محیط واقعی خلیج فارس

Fig. 12. Amount of surface chloride (Cs) of submerged specimens in Persian Gulf

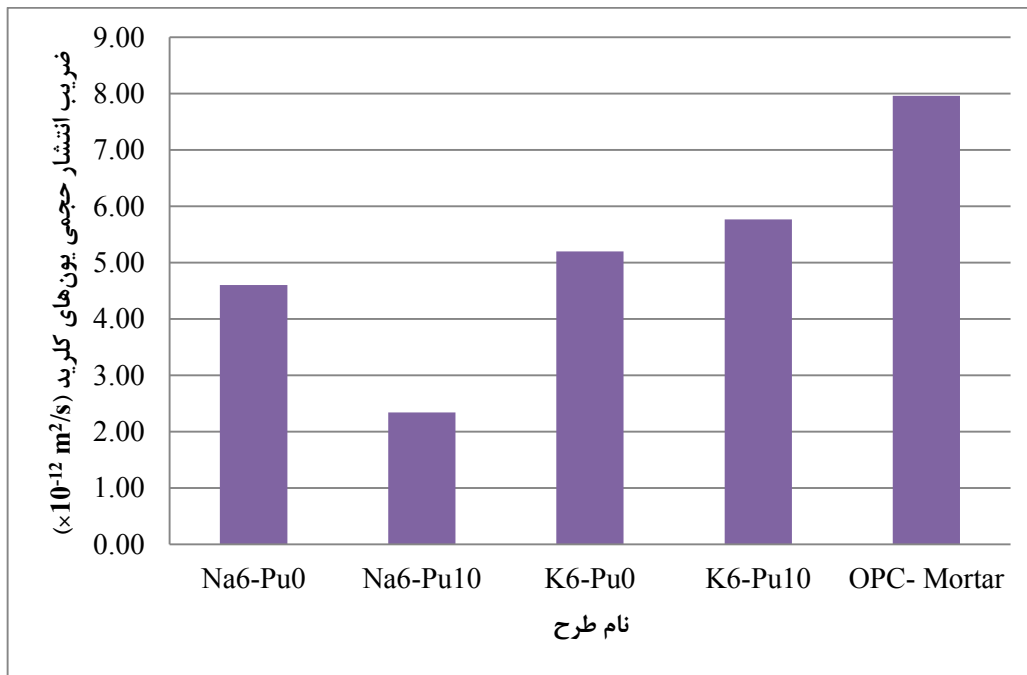
ملات سیمان پرتلندی شاهد می‌باشد که در بخش ارائه نتایج تخلخل‌سنجی مشاهده خواهد شد. در مطالعات یانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۳۵] و اسمعیل<sup>۲</sup> و همکاران [۳۶] نیز آزمون‌های ملات قلیافعال حاوی بیش از ۵۰ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی نسبت به آزمون‌های ملات سیمان پرتلندی، مقاومت مناسب‌تری در مقابل نفوذ یون‌های کلراید از خود نشان داده‌اند. علاوه بر این ضریب انتشار یون‌های کلراید در ملات‌های قلیافعال حاوی هیدروکسید سدیم کمتر از آزمون‌های حاوی هیدروکسید پتاسیم می‌باشد. همچنین طرح Na6-Pu10 کمترین ضریب انتشار یون‌های کلراید ( $2/34 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) و طرح OPC- Mortar بیشترین انتشار یون‌های کلراید ( $7/96 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) را دارا می‌باشد که این موضوع با نتایج ضریب جذب آب مویینگی مطابقت دارد. در تحقیقات پیشین [۱۷] ضریب انتشار یون‌های کلراید در ملات سرباره قلیافعال از  $1/48 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  تا  $12/45 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  بوده است. همچنین

پس از پودرگیری و تعیین غلظت یون‌های کلراید، در انتها پروفیلی که نشان دهنده مقدار غلظت یون‌های کلراید نفوذ کرده در عمق‌های مختلف ملات می‌باشد، برای هر طرح رسم گردید.

با توجه به روش انجام آزمایش انتشار یون‌های کلراید در این مطالعه، برخلاف روش‌های تسریع یافته الکتریکی، مکانیزم نفوذ بر اساس پدیده انتشار می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد، اصولاً نتایج این روش برای سنجش ضریب انتشار بتن در مقابل یون‌های کلراید بسیار مناسب و واقعی است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب، مقدار کلراید سطحی و ضریب انتشار ظاهری یون‌های کلراید برای آزمون‌های مغروق در محیط واقعی خلیج فارس را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد به طور کلی ضریب انتشار یون‌های کلراید در ملات‌های قلیافعال کمتر از ضریب انتشار یون‌های کلراید در ملات سیمان پرتلندی شاهد می‌باشد. این موضوع به دلیل وجود حفرات کمتر در ملات‌های قلیافعال و ساختار متراکم‌تر ملات‌های قلیافعال در مقایسه با

1 Yang  
2 Ismail



شکل ۱۳. ضریب انتشار یون‌های کلراید (D) در آزمون‌های مغروق در محیط واقعی خلیج فارس

Fig. 13. Chloride ions diffusion coefficient (Ds) of submerged specimens in Persian Gulf

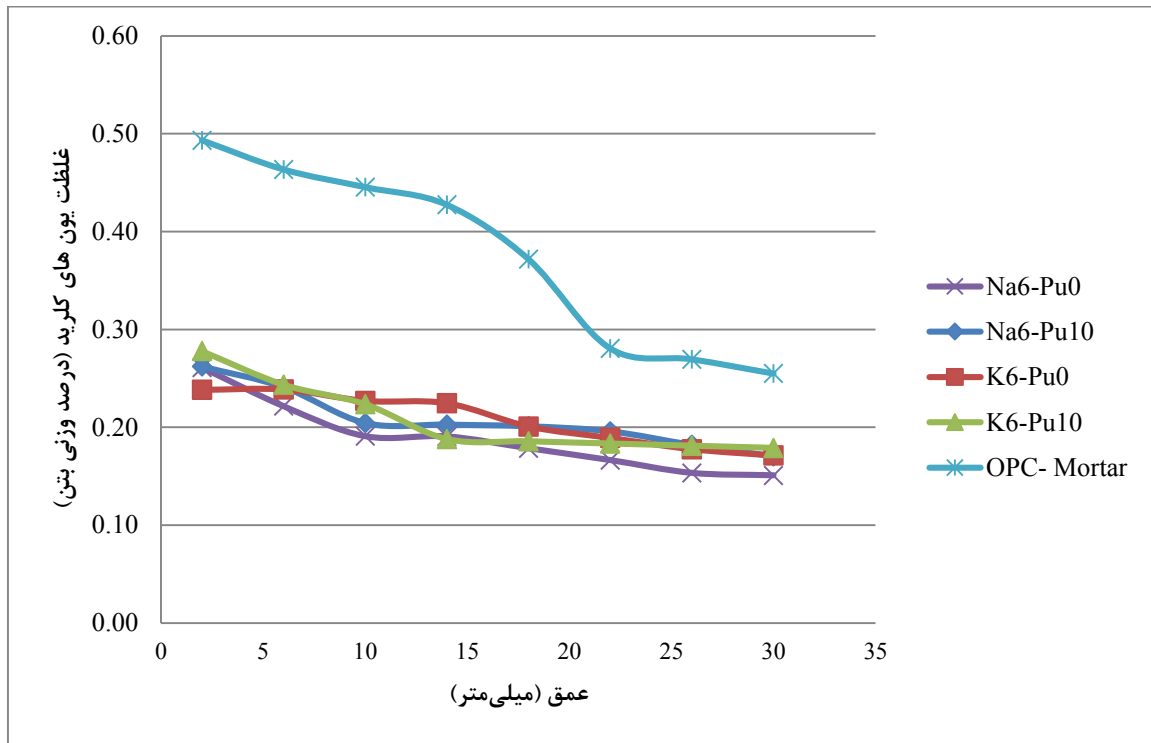
حفرات ۵ نانومتر تا ۲ میکرون و ۲ میکرون تا ۲۰۰ میکرون استفاده شد. جدول ۷ مجموع حفرات میکرونی و نانویی و مقادیر اندازه‌های مختلف حفرات موجود در آزمون‌های ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد طرح Na6-Pu10 کمترین مقدار و ملات سیمان پرتلندی شاهد بیشترین مقدار حفرات نانویی و میکرونی را دارا بوده و در مجموع مقادیر حفرات ملات‌های قلیافعال بسیار کمتر از ملات سیمان پرتلندی شاهد می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت ذرات پومیس باعث کاهش حفرات میکرونی و قطع ارتباط بین آن‌ها می‌شود. علاوه بر این با توجه به اینکه آزمایش تخلخل‌سنجی در سنین بالا انجام شده است، حفرات نانویی موجود در نمونه‌های ملات قلیافعال حاوی پومیس از نمونه‌های بدون پومیس کمتر می‌باشد. همچنین می‌توان گفت حفرات ۱۰ نانو تا ۱۰ میکرون در نمونه‌های فعال شده با هیدروکسیدسدیم در مقایسه با نمونه‌های حاوی هیدروکسیدپتاسیم کمتر است. این موضوع نشان دهنده این است که در سنین بالاتر عملکرد هیدروکسیدسدیم مناسب‌تر از هیدروکسیدپتاسیم بوده، که در نتایج آزمایش‌های دوام نیز مشاهده شده است. همچنین مجموع حفرات ۱۰ نانومتر تا ۱۰ میکرون برای طرح‌های ۱ تا

توماس<sup>۱</sup> و همکاران [۳۷] ضریب انتشار یون‌های کلراید در ملات سرباره قلیافعال از  $6/97 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  تا  $9/31 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  اندازه‌گیری کرده‌اند. همان گونه که مشاهده می‌گردد ضرایب انتشار به دست آمده در این مقاله برای ملات سرباره قلیافعال در محدوده نتایج تحقیقات پیشین بوده است. پروفیل نفوذ یون‌های کلراید در آزمون‌های واقع در ناحیه جزر و مدی محیط واقعی خلیج فارس در شکل ۱۴ شان داده شده است. نتایج ارائه شده در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که مقادیر نفوذ یون‌های کلراید در آزمون‌های ملات سیمان پرتلندی بسیار بیشتر از آزمون‌های ملات قلیافعال بوده و در ناحیه جزر و مدی علاوه بر پدیده انتشار، پدیده مکش هم در نفوذ یون‌های کلراید مؤثر می‌باشد.

### ۳-۶- آزمایش تخلخل‌سنجی به روش تزریق جیوه (MIP)

به منظور تعیین توزیع حفرات آزمون‌های ملات قلیافعال و مقایسه آن با ملات سیمان پرتلندی شاهد از دستگاه Porosimeter PASCAL 140 و 440 به ترتیب برای اندازه‌گیری

1 Thomas



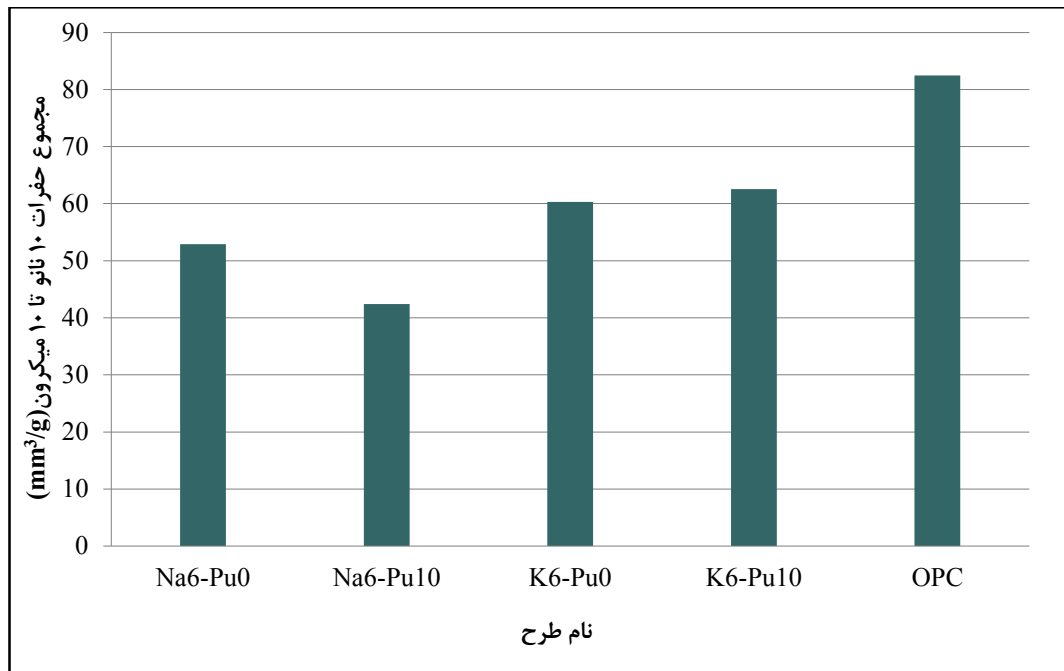
شکل ۱۴. پروفیل نفوذ یون‌های کلراید در آزمون‌های واقع در ناحیه جزر و مدی محیط واقعی خلیج فارس

Fig. 14. Chloride ion diffusion profile in specimens located in tidal zone of Persian Gulf

جدول ۷. حفرات تجمعی ۶ نانومتر تا ۴ میکرون ملات‌های قلیافعال و سیمان پرتلندی

Table 7. 6 nm to 4 μm pore distribution of alkali- activated slag/pumice and OPC mortars

نام طرح	مجموع حفرات (mm <sup>3</sup> /g)	مجموع حفرات ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون (mm <sup>3</sup> /g)	مجموع حفرات ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر (mm <sup>3</sup> /g)	مجموع حفرات ۵ تا ۱۰ نانومتر (mm <sup>3</sup> /g)
Na6-Pu0	۶۱/۱۷	۸/۸۳	۴۰/۱۳	۱۲/۲۱
Na6-Pu10	۴۷/۷۸	۸/۳۸	۳۰/۹۰	۸/۵۰
K6-Pu0	۶۴/۵۰	۹/۳۱	۴۶/۸۷	۸/۳۲
K6-Pu10	۶۵/۵۲	۸/۵۹	۴۹/۸۲	۷/۱۱
OPC- Mortar	۸۸/۷۰	۴/۸۲	۷۴/۱۴	۹/۷۴



شکل ۱۵. نتایج توزیع اندازه حفرات ۱۰ نانومتر تا ۱۰ میکرون

Fig. 15. 10 nm to 10 μm pores of mortars

انجام پیش گرمایش در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آزمایش جذب آب حجمی، باعث به وجود آمدن ریزترک‌هایی در ملات قلیافعال می‌گردد و این دلیلی برای افزایش غیرواقعی جذب آب حجمی این آزمونه‌های ملات قلیافعال در مقایسه با آزمونه‌های ملات سیمان پرتلندی شاهد می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت انجام پیش گرمایش در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد برای محصولات قلیافعال با پایه سرباره مناسب نبوده و بهتر است به منظور خشک کردن آزمونه‌های قلیافعال از راه‌های جایگزین مانند قرار دادن آزمونه‌ها به مدت طولانی‌تر در دماهای کمتر یا قرار دادن آزمونه‌ها به مدت دو هفته در دمای محیط استفاده نمود.

به طور کلی ضریب جذب موئینه و ضریب انتشار یون‌های کلراید در ملات‌های قلیافعال کمتر از ملات سیمان پرتلندی شاهد می‌باشد. این موضوع به دلیل وجود حفرات کمتر در ملات‌های قلیافعال و ساختار متراکم‌تر ملات‌های قلیافعال در مقایسه با ملات سیمان پرتلندی شاهد می‌باشد.

ضریب انتشار یون‌های کلراید در ملات‌های قلیافعال حاوی هیدروکسیدسدیم کمتر از آزمونه‌های حاوی هیدروکسیدپتاسیم می‌باشد. همچنین طرح Na6-Pu10 کمترین ضریب انتشار یون‌های کلراید و طرح OPC- Mortar بیشترین انتشار یون‌های کلراید را دارا می‌باشد که این

در شکل ۱۵ با هم مقایسه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد روند نتایج با نتایج آزمایش جذب موئینه آب و نفوذ یون‌های کلراید منطبق است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به تحقیقات محدود صورت گرفته بر روی دوام مصالح قلیافعال، در این مقاله به بررسی خصوصیات نفوذپذیری و دوام ملات‌های قلیافعال حاوی سرباره و پومیس در برابر نفوذ یون‌های کلراید پرداخته شده است. در این راستا اقدام به ساخت آزمونه‌های ملات قلیافعال حاوی سرباره و پومیس فعال شده با هیدروکسیدسدیم، هیدروکسیدپتاسیم و سیلیکات سدیم و ملات سیمان پرتلندی و انجام آزمایش‌های کارایی، مقاومت فشاری، جذب آب موئینه، جذب آب حجمی و نفوذ یون‌های کلراید در محیط واقعی خلیج فارس و تخلخل‌سنجی به روش تزریق جیوه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در این مقاله می‌توان گفت؛

مقاومت فشاری ملات‌های قلیافعال با پایه سرباره و پومیس از مقاومت ملات سیمان پرتلندی شاهد بیشتر بوده است. عمل آوری در آب و محلول نمک نیز نسبت به عمل آوری در هوا باعث افزایش مقاومت فشاری ملات‌های قلیافعال شده است.



(2022) 1-15.

- [5] D.E.A. Ramirez, W.G. Valencia-Saavedra, R.M. Gutierrez, Alkali-activated concretes based on fly ash and blast furnace slag: Compressive strength, water absorption and chloride permeability, *Ingenieriae Investigacion*, 40 (2) (2020) 72-80.
- [6] Z. Zhang, X. Yao, H. Zhu, Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete: I. Basic properties, *Applied Clay Science*, 49 (2010) 1-6.
- [7] A.A. Adam, Strength and durability properties of alkali activated slag and fly ash-based geopolymer concrete, PhD thesis, RMIT University, 2009.
- [8] E. Rodriguez, S. Bernal, R. Mejia de Gutierrez, F. Puertas, Alternative concrete based on alkali-activated slag, *Journal of Materiales de Construcción*, 58 (291) (2008) 53-67.
- [9] S.A. Bernal, R. Mejia de Gutierrez, A.L. Pedraza, J.L. Provis, E.D. Rodriguez, S. Delvasto, Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes, *Cement and Concrete Research*, 41 (1) (2011) 1-8.
- [10] T. Häkkinen, The permeability of high strength blast furnace slag concrete, *Nordic Concrete Research*, 11 (1) (1992) 55-66.
- [11] S. Bernal, R. De Gutierrez, S. Delvasto, E. Rodriguez, Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers, *Construction and Building Materials*, 24 (2) (2010) 208-214.
- [12] A.A. Adam, T.C.K. Molyneaux, I. Patnaikuni, D.W. Law, Strength, sorptivity and carbonation of geopolymer concrete, In: Ghafouri, N. (ed.) *Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction*, CRC Press, Boca Raton (2009) 563-568.
- [13] F. Alapour, A.A. Ramezani-pour, Feasibility study of production of geopolymer mortars from several supplementary cement materials, Master Thesis, Amirkabir

موضوع با نتایج ضریب جذب آب موبینگی مطابقت دارد.

نتایج نشان می‌دهد که در نواحی جزر و مدی نیز مقادیر نفوذ یون‌های کلراید در آزمون‌های ملات سیمان پرتلندی بسیار بیشتر از آزمون‌های ملات قلیافعال می‌باشد.

حفرات نانویی موجود در آزمون‌های ملات‌های قلیافعال به میزان قابل ملاحظه‌ای از آزمون سیمان پرتلندی کمتر می‌باشد. همچنین آزمون‌های ملات قلیافعال که با هیدروکسید سدیم فعال شده‌اند نسبت به آزمون‌های حاوی هیدروکسید پتاسیم حفرات نانویی کمتری دارند. این موضوع نشان دهنده این است که در سنین بالاتر عملکرد هیدروکسید سدیم مناسب‌تر از هیدروکسید پتاسیم بوده که این موضوع در نتایج آزمایش‌های دوام نیز مشاهده شده است.

حفرات میکرونی موجود در آزمون‌های ملات قلیافعال حاوی پومیس از آزمون‌های بدون پومیس کمتر می‌باشد. این موضوع نشان دهنده آن است که ذرات پومیس باعث کاهش حفرات میکرونی و قطع ارتباط بین آن‌ها می‌شود.

به طور کلی می‌توان گفت طرح‌های فعال شده با هیدروکسید سدیم و حاوی ۱۰ درصد پومیس بهترین عملکرد را در پارامترهای دوام از خود نشان داده‌اند.

## منابع

- [1] A.A. Ramezani-pour, T. Parhizkar, A.R. Pourkhorshidi, A.M. Raisghasemi, The effect of environmental conditions on the southern coast of Iran on the long-term durability of concrete with different cements and pozzolans, *Building and Housing Research Center*, 434 (1996). (In Persian)
- [2] K. Audenaert, Q. Yuan, G. De Schutter, On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete, *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 396-402.
- [3] C. Shi, Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars, *Cement and Concrete Research*, 26 (1996) 1789-1799.
- [4] M. Ka, D. Hoffmann, L. Molez, Ch. Lanos, Alkali-activated mortars: porosity and capillary absorption, *European Journal Of Environmental And Civil Engineering*,

- On the Development of Fly Ash- Based Geopolymer Concrete, *ACI Material Journal*, 101 (6) (2004) 467-472.
- [24] A. Nazari, Gh. Khalaj, Sh. Riahi, ANFIS-based prediction of the compressive strength of geopolymers with seeded fly ash and rice husk-bark ash, *Neural Computing and Applications*, 22 (2013) 689-701.
- [25] M. Jafari Nadoushan, P. Dashti, S. Ranjbar, A.A Ramezani-pour, A.M. Ramezani-pour, R. Banar, RSM-based Optimized Mix Design of Alkali-activated Slag Pastes Based on the Fresh and Hardened Properties and Unit Cost, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 20 (4) (2022) 300-312.
- [26] ASTM, 2012. C778, Standard Specification for Standard Sand, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).
- [27] ASTM C305, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).
- [28] ASTM C1437, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).
- [29] ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).
- [30] BS EN 1881-122, Testing concrete. Method for determination of water absorption, British Standard, (2011).
- [31] BS EN 480-5, Admixtures for concrete, mortar, and grout test methods- Part 5: Determination of capillary absorption, British Standard, (2005).
- [32] ASTM C1152, Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).
- [33] H.M. Giasuddin, J.G. Sanjayan, P.G. Ranjith, Strength of geopolymer cured in saline water in ambient conditions, University of Technology, 2012. (In Persian)
- [14] S.A. Bernal, R. Mejia de Gutierrez, V. Rose, J.L. Provis, Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags, *Cement and Concrete Research*, 40 (6) (2010) 898-908.
- [15] F. Collins, J. Sanjayan, Unsaturated capillary flow within alkali activated slag concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20 (9) (2008) 565-570.
- [16] A. Runci, M. Serdar, Effect of curing time on the chloride diffusion of alkali-activated slag, *Case Studies in Construction Materials*, 16 (2022) e00927.
- [17] A. Noushini, A. Castel, Performance-based criteria to assess the suitability of geopolymer concrete in marine environments using modified ASTM C1202 and ASTM C1556 methods, *Materials and Structures*, (2018) 51:146.
- [18] J. Fan, H. Zhu, J. Shi, Z. Li, S. Yang, Influence of slag content on the bond strength, chloride penetration resistance, and interface phase evolution of concrete repaired with alkali activated slag/fly ash, *Construction and Building Materials*, (263) (2020) 208-214.
- [19] E. Douglas, A. Bilodeau, V.M. Malhotra, Properties and durability of alkali-activated slag concrete, *ACI Mater. J.*, (89) (5) (1992) 509-516.
- [20] G. Fagerlund, On the capillarity of concrete, *Nordic Concrete Research*, 1 (1982) 1-20.
- [21] D. Wimpenny, P. Duxson, T. Cooper, J.L.J. Provis, R., Zeuschner, Fibre reinforced geopolymer concrete products for underground infrastructure, In: *Concrete 2011*, Perth, Australia. CD-ROM proceedings, Concrete Institute of Australia (2011).
- [22] X. Hu, C. Shi, Zh. Shi, L. Zhang, Compressive strength, pore structure and chloride transport properties of alkali-activated slag/fly ash mortars, *Cement and Concrete Composites*, 104 (2019) 92-119.
- [23] D. Hardjito, S.E. Wallah, M.J. Sumajouw, B.V. Rangan,

- D.G. Brice, A.R. Kilcullen, S. Hamdan, J.S.J. Van Deventer, Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes, *Construction and Building Materials*, 48 (2013) 1187-1201.
- [37] R.J. Thomas, E. Ariyachandra, D. Lezama, S. Peethamparan, Comparison of chloride permeability methods for Alkali-Activated concrete, *Construction and Building Materials*, 165 (2018) 104–111.
- Journal of Fuel, 107 (2013) 34–39.
- [34] H. Xu, J.S.J. Van Deventer, The geopolymerisation of aluminosilicate minerals, *International Journal of Mineral Processing*, (2000) 59-66.
- [35] T. Yang, X. Yao, Z. Zhang, Quantification of chloride diffusion in fly ash–slag-based geopolymers by X-ray fluorescence (XRF), *Construction and Building Materials*, 69 (2014) 109–115.
- [36] I. Ismail, S.A. Bernal, J.L. Provis, R.S. Nicolas,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Jafari Nadoushan, , A. A. Ramezani pour, Performance of alkali-activated slag and pumice mortars against chloride ions penetration in the Persian Gulf, Amirkabir J. Civil Eng., 55(3) (2023) 531-554.*

DOI: 10.22060/ceej.2023.20867.7552



