

# Mechanical Properties and Durability of Geopolymer Mixes Produced with Hybrid Utilization of Slag, Natural Pozzolan and Waste Soil

*Javid Hoseinbor\**, Hesam Madani

*Faculty of civil engineering and geodesy, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.*

## **ABSTRACT**

*The present study investigates the mechanical properties and durability of geopolymer mixtures produced based on pumice natural pozzolan, ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and waste soil of aggregate production plants. The aforementioned materials were used in the hybrid form to produce geopolymer. For this purpose, waste soil and pozzolans have been replaced with slag at the levels of 25%, 50% and 75%. The characteristics studied were, compressive strength, flexural strength, sorptivity, rapid chloride ion migration (RCM) coefficient and water absorption content. In addition, different curing conditions were investigated for different mixtures and the results have been compared with each other. The present results indicate that due to the lower reactivity of the natural pozzolan and the waste soil compared to GGBFS, partial replacement of these materials with slag enhanced the mechanical and durability properties, so that the best mixture in terms of durability properties was P25S75. This mix outperformed the S100 mixture in several characteristics. The combined use of GGBFS and the waste soil has also improved the characteristics compared to the mixture with 100% waste soil, which was significantly higher than the promoting effect of GGBFS on the natural pozzolan.*

**Keywords:** *Geopolymer, Ground granulated blast furnace slag (GGBFS), Pozzolan, Waste soil, Durability, Mechanical strength*

# خواص مکانیکی و دوام نمونه های ژئوپلیمری ساخته شده با ترکیب سرباره، پوزولان طبیعی و خاک پسماند

دریافت مقاله: ۱۸-۱۱-۱۳۹۹

پذیرش مقاله: ۲۵-۱۲-۱۳۹۹

جاوید حسین بر\*

کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

سید حسام مدنی

دانشیار دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

## چکیده

مطالعه حاضر به بررسی مشخصات مکانیکی و دوام مخلوط‌های ژئوپلیمری ساخته شده بر پایه پوزولان طبیعی خاش، سرباره کوره آهن گدازی اصفهان و خاک پسماند کارخانه‌های تولید سنگ‌دانه می‌پردازد. مواد پایه مذکور به صورت تنها یا به صورت ترکیب با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بدین منظور خاک پسماند و پوزولان در درصد‌های ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ با سرباره جایگزین شده‌اند که با احتساب مخلوط‌های غیر ترکیبی در مجموع ۹ طرح مخلوط ساخته شده است. خصوصیات مورد بررسی شامل: مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، درصد جذب موئینه آب، ضریب تسریع شده نفوذ یون کلراید و آزمایش جذب حجمی آب بوده است. همچنین شرایط عمل‌آوری نیز برای مخلوط‌های مختلف تغییر کرده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج حاضر حاکی از آن می‌باشد که به دلیل فعالیت پایین‌تر مواد پایه پوزولان طبیعی و خاک پسماند نسبت به سرباره، جایگزینی بخشی از مواد با سرباره سبب بهبود خواص مکانیکی و دوام می‌گردد به گونه‌ای که بهترین مخلوط از لحاظ خصوصیات دوام مخلوط P25S75 است که حتی از مخلوط S100 بهتر عمل کرده است. تاثیر جایگزینی با سرباره در خاک پسماند بهبود بسیار قابل توجهی را نسبت مخلوط تنها حاوی پسماند ایجاد کرده است و می‌توان اثر بهبود بخش آن را بیشتر از مخلوط حاوی پوزولان دانست.

کلمات کلیدی: ژئوپلیمر، دوام، خصوصیات مکانیکی، سرباره، پوزولان، خاک پسماند

واژه ژئوپلیمر، در سال ۱۹۷۹ میلادی توسط دانشمند فرانسوی، پروفیسور جوزف داویدویتس مطرح گردید [۱]. در ساختار ژئوپلیمرها همچون پلیمرهای ارگانیک، زنجیره‌های طویل و شبکه‌های به هم پیوسته از مولکول‌ها قرار دارد، با این تفاوت که مولکول‌های قرار گرفته در آن از نوع مولکول‌های معدنی هستند و به واسطه پیوندهای کئووالانسی به یکدیگر متصل شده‌اند. شایان ذکر است که ژئوپلیمرها بر خلاف سرامیک‌های متداول ساختار پلیمری دارند و در دماهای پایین و زیر ۱۰۰ درجه سانتیگراد شکل می‌گیرند [۲]. از جمله پتانسیل‌های کاربردی ژئوپلیمرها می‌توان به استفاده آنها در اجزاء سازه‌ای و غیر سازه‌ای پیش ساخته، سنگ فرش‌های بتنی، محصولات نگهدارنده مواد سمی، زباله‌های رادیو اکتیو و مضر، سرامیک‌های دیر گداز، کامپوزیت‌های مقاوم در برابر آتش بکار رفته در ساختمان‌سازی، کشتی‌سازی و اتومبیل‌سازی و صنایع نیروگاهی اشاره نمود [۳، ۴].

معمول‌ترین واکنش‌هایی که برای ژئوپلیمریزاسیون شناخته شده‌اند، شامل چهار مرحله ذیل می‌باشند که البته این مراحل به طور همزمان پیش می‌روند [۱، ۵]: (۱) انحلال Si و Al موجود در مواد آلومینوسیلیکات جامد در محلول قلیایی قوی. (۲) تشکیل پیوندهای از نوع Si-O-Si و Si-O-Al. (۳) تشکیل ساختار آلومینوسیلیکات سه بعدی (ساختار ژئوپلیمری). (۴) اتصال ذرات جامد واکنش ندهاده و مصالح پرکننده به ساختار ژئوپلیمری و سخت شدن کل سیستم برای تشکیل ساختار پلیمری نهایی.

ژئوپلیمرها می‌توانند عملکردهای قابل مقایسه‌ای با مواد سیمانی معمول در دامنه کاربردشان فراهم آورند. علاوه بر این، برخی مزایا مثل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از مزایای این مصالح است [۶]. تفاوت عمده بین ژئوپلیمرها و سیمان پرتلند، در این است که مکانیسم سخت‌شدگی آن از طریق هیدراسیون صورت نمی‌گیرد، بلکه با واکنش پلیمریزاسیون در یک زمان معمولاً کوتاه اتفاق می‌افتد. در حالیکه هیدراسیون سیمان اصولاً تا دراز مدت و حتی تا سال‌ها ادامه می‌یابد [۷].

الله‌وردی و همکاران [۸] در بررسی زمان گیرش و مقاومت سیمان‌های ژئوپلیمری بر پایه پوزولان طبیعی پومیس ترکیب شده با سرباره کوره آهن‌گدازی اصفهان، دریافتند که استفاده از سرباره به اندازه ۵ تا ۲۵ درصد در نمونه‌های با پوزولان، در سن ۲۸ روز عمل‌آوری در دمای اتاق، سبب کاهش مقاومت نمونه‌ها می‌شود. همچنین با افزایش درصد سرباره در نمونه‌های با پوزولان زمان گیرش اولیه نمونه‌ها کمتر و زمان گیرش نهایی بیشتر می‌شود. ندوشن و همکاران [۹] در بررسی تاثیر نوع و غلظت محلول‌های فعال ساز بر روی مقاومت فشاری و میزان روانی ملات‌های ژئوپلیمری با سرباره اصفهان و پوزولان خاش دریافتند که با افزایش جایگزینی بخشی از سرباره کوره آهن‌گدازی با پوزولان از صفر تا ۱۰۰ درصد، در سن ۳ روز، مقاومت نمونه‌ها تا ۱۵ درصد جایگزینی افزایش و تا ۱۰۰ درصد جایگزینی کاهش می‌یابد و در سن ۲۸ روز مقاومت نمونه‌ها تا ۱۰ درصد جایگزینی افزایش و تا ۱۰۰ درصد جایگزینی کاهش می‌یابد. در سن ۹۱ روز نیز مقاومت نمونه‌ها تا ۱۰ درصد جایگزینی افزایش و تا ۱۰۰ درصد جایگزینی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد پوزولان در نمونه‌ها روانی خمیر کاهش می‌یابد. شایان ذکر است در این مطالعه بر خلاف مطالعه حاضر از عمل‌آوری حرارتی استفاده نشده است.

دب و همکاران [۱۰] در بررسی مقاومت و نفوذپذیری نمونه‌های ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی ترکیب شده با سرباره نشان دادند که با جایگزین کردن ۱۰٪ و ۲۰٪ وزن خاکستر بادی با سرباره در سن ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز در دمای اتاق، افزایش مشخصات مقاومتی و کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها اتفاق می‌افتد. بلوم و همکاران [۱۱] در بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های ژئوپلیمری ترکیبی با خاکستر بادی و سرباره دریافتند که با افزایش جایگزینی سرباره از ۳۰٪ تا ۷۰٪ در نمونه‌های با خاکستر بادی شاهد افزایش مقاومت نمونه‌ها هستیم به طوری که با افزایش هر چه بیشتر درصد سرباره، میزان مقاومت فشاری، خمشی و کششی نمونه‌ها هم بیشتر می‌شود.

رضانیانپور و همکاران [۱۲] به بررسی تاثیر مقدار ماده پایه و نسبت آب به مواد سیمانی در نفوذ یون کلراید در بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی پرداختند. آنها مشاهده کردند که هر چه نسبت آب به مواد سیمانی افزایش پیدا می‌کند مقاومت فشاری کمتر می‌شود. آنها همچنین مشاهده کردند که در دراز مدت میزان جذب مؤئینه نمونه‌های ژئوپلیمری نسبت به نمونه‌های بتن معمولی کمتر است. نمونه‌های با درصد بالای آب به مواد

سیمانی دارای مقاومت پایینی در مقابل یون کلراید در دراز مدت هستند و نمونه ژئوپلیمری نسبت به نمونه با بتن معمولی دارای نفوذ یون کلراید به مراتب کمتری است.

در مقاله حاضر، تاثیر ترکیب سرباره کوره آهن‌گدازی با پوزولان طبیعی خاش و خاک پسماند کارخانه‌های تولید شن و ماسه شرق تهران مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، سه طرح شاهد با ۱۰۰ درصد سرباره، ۱۰۰ درصد پوزولان و ۱۰۰ درصد خاک ساخته شده است و ۶ طرح دیگر که با نسبت‌های ۲۵/۷۵ و ۵۰/۵۰ و ۷۵/۲۵ سرباره/خاک پسماند، و سرباره/پوزولان خاش ساخته شده و مشخصات مکانیکی و دوام آنها مطالعه شده است.

## ۲- مواد و مصالح

مواد اولیه ژئوپلیمریزاسیون در این تحقیق خاک پسماند کارخانه‌های تولید شن و ماسه، سرباره کوره آهن‌گدازی ذوب آهن اصفهان و پوزولان طبیعی خاش است.

خاک پسماند با نسبت  $\text{SiO}_2$  به  $\text{Al}_2\text{O}_3$  برابر با ۴/۳۲ از کارخانه‌های تولید سنگ‌دانه تهیه شده است، پوزولان مورد استفاده دارای نسبت  $\text{SiO}_2$  به  $\text{Al}_2\text{O}_3$  برابر با ۳/۳۴ است و سرباره مورد استفاده دارای نسبت  $\text{SiO}_2$  به  $\text{Al}_2\text{O}_3$  برابر با ۳/۷ است.

آنالیز XRF مواد پایه شامل سرباره، پوزولان و خاک معمولی در جدول ۱ ارائه شده است. مشخصات آهک هیدراته مصرفی تهیه شده از کارخانجات اسپندار واقع در استان تهران، در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۱ توزیع اندازه ذرات سرباره کوره آهن‌گدازی، پوزولان خاش، ماده پسماند و آهک هیدراته نشان داده شده است.

مخلول‌های فعال‌کننده قلیایی در این پژوهش سیلیکات سدیم مایع با نسبت  $\text{SiO}_2$  به  $\text{Na}_2\text{O}$  برابر با ۲/۵ تهیه شده از شرکت نفیس سیلیکات سپاهان واقع در استان اصفهان است، و هیدروکسید سدیم پودری با درجه خلوص بالای ۹۹ درصد تهیه شده از شرکت کیان کاوه آزما واقع در استان تهران است. آنالیز شیمیایی این دو ماده قلیایی در جدول ۳ ارائه شده است. ماسه استفاده شده در ساخت طرح مخلوط‌ها از دو سایز مختلف متوسط (۰/۶ میلی‌متر) و سایز کوچکتر رد شده از الک ۴۰ استفاده شده است که مشخصات فیزیکی آنها در جدول ۴ نشان داده شده است.

شایان ذکر است که مواد ژئوپلیمری برای کاربردهای خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند. لذا به لحاظ قیمت بالاتر، ساخت مصالحی همچون ملات‌ها برای کاربردهایی مانند پوشش توجیه بیشتری دارد. به همین دلیل در تحقیق حاضر خصوصیات ملات‌های تولید شده از این مصالح مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۳- ساخت نمونه‌ها

طرح مخلوط‌هایی که در این پژوهش انتخاب شده‌اند شامل ۹ طرح مخلوط است. ۳ طرح مخلوط به عنوان طرح شاهد که منبع ژئوپلیمری در آنها ۱۰۰٪ سرباره، پوزولان و خاک می‌باشد. ۶ طرح مخلوط دیگر به صورت ترکیبی از منابع ژئوپلیمری است. از این طرح مخلوط‌ها نمونه‌های مکعبی ۵ سانتی‌متر و نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری و نمونه‌های منشوری با ابعاد  $4 \times 4 \times 16$  سانتی‌متر تهیه گردید و آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، جذب موئینه، جذب حجمی و نفوذ یون کلراید بر روی آنها انجام شد.

طرح مخلوط‌های مورد استفاده در این مقاله در جدول ۵ ارائه شده‌اند. همانطور که در جدول قابل مشاهده است ۳ طرح مخلوط تنها با یکی از مواد پایه (شامل سرباره کوره آهن‌گدازی، پوزولان خاش و پسماند کارخانه‌های تولید شن و ماسه) تهیه شده‌اند و ۶ مخلوط دیگر از ترکیب درصد‌های مختلف سرباره با دو ماده دیگر طراحی شده‌اند.

جدول ۱- آنالیز XRF سرباره، پوزولان، خاک معمولی

L.O.I	SO <sub>3</sub>	Cl	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Chemical analysis	
0.3	2.5	0.025	6.8	1	44	8.8	32.5	Result (%)	Slag
2.5	0.3	0.03	2.2	5	7.8	18.4	60.5	Result (%)	Pozzolan
—	0.24	—	2.38	5.61	16.96	12.11	52.3	Result (%)	Waste Soil

جدول ۲- مشخصات آهک هیدراته

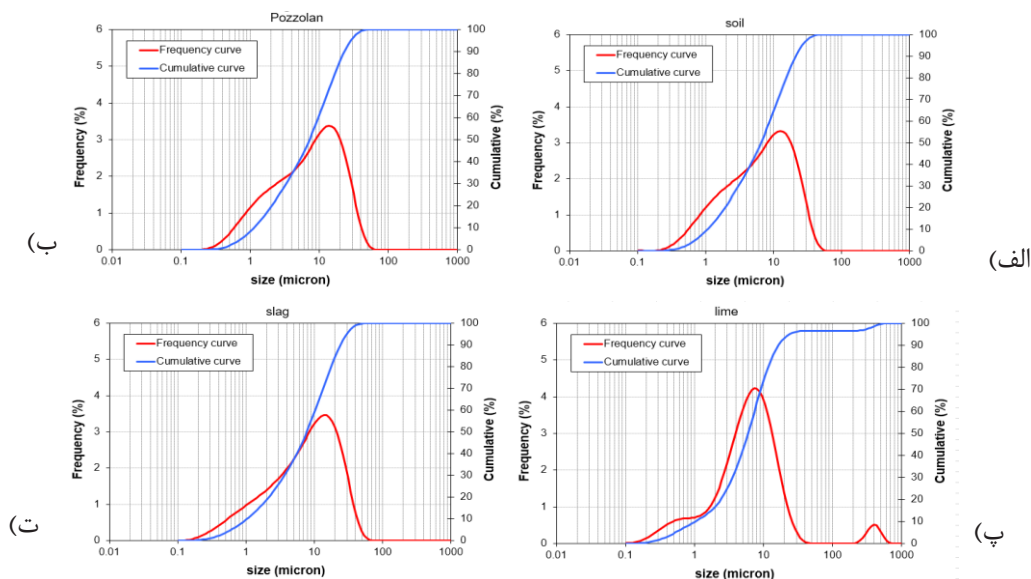
وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	درجه خلوص (CaO)
۲۲۰۰	۹۸%

جدول ۳- آنالیز شیمیایی محلول سیلیکات سدیم و هیدروکسید سدیم

NaOH			Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> solution		
Chemical analysis	Result	Unit	Chemical analysis	Result	Unit
NaOH	> 99	%			
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	< 1	%	SiO <sub>2</sub>	20.95	%
Pb	< 0.05	%	Na <sub>2</sub> O	8.38	%
Cl	< 0.05	%	Water	70.67	%
SO <sub>4</sub>	< 0.05	%			
density	2.13 g/cm <sup>3</sup>		Density	1.230 g/cm <sup>3</sup>	

جدول ۴- مشخصات فیزیکی سنگ دانه مورد استفاده

اندازه (mm)	رطوبت SSD (%)	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )	ماسه ریز
کوچکتر از ۰/۴۲۵	۰/۸	۲/۶	
۰/۱۵-۱/۱۸	۰/۸	۲/۶	ماسه درشت



شکل ۱- توزیع تجمعی و فراوانی اندازه ذرات مواد خام مورد استفاده در تحقیق، الف) خاک پسماند، ب) پوزولان خاش، پ) سرباره کوره آهن‌گدازی و ت) آهک هیدراته

در بررسی به عمل آمده در کارهایی ابتدایی آزمایشگاهی مشخص گردید که غلظت ۴ مولار سود تاثیر چندانی در بهبود خواص نسبت به غلظت ۸ مولار ندارد. از سوی دیگر غلظت ۱۲ مولار نیز سبب گیرش سریع مخلوط ژئوپلیمری می‌شد که عملاً کارپذیری آن را مخدوش میکرد، لذا از غلظت ۸ مولار سود در تحقیق حاضر استفاده گردید. روش ساخت به این صورت بود که یک روز قبل از ساخت هر طرح مخلوط، محلول NaOH با غلظت ۸ مولار ساخته می‌شود تا در روز بعد به دمای تعادل رسیده باشد. مواد خشک شامل ماده پایه، آهک هیدراته و ماسه در روز آزمایش به مدت یک دقیقه در میکسر مخلوط می‌شوند و سپس محلول فعال کننده قلیایی شامل دو محلول NaOH و آب شیشه، مطابق با طرح مخلوط با

هم ترکیب و به مخلوط اضافه می‌شوند. بتن به مدت ۴ دقیقه مخلوط و جهت قالب گیری آماده می‌شوند. نمونه‌های قالب‌گیری شده به مدت ۱۵ ثانیه روی میز ویبره قرار می‌گیرند.

#### ۴- شرایط عمل‌آوری

نمونه‌ها تحت شرایط خاصی عمل‌آوری شده‌اند که در ذیل به تفصیل شرح داده شده‌اند: عمل‌آوری شماره ۱ ((C.24H)): نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون اون ۷۰ درجه قرار می‌گیرند که در این حالت نمونه‌ها با پارچه خیس احاطه شده‌اند و درون پلاستیک قرار گرفته‌اند و برای جلوگیری از چسبیدن پلاستیک نمونه‌ها به سطح زیرین سینی اون، از کاغذ استفاده شده است. عمل‌آوری شماره ۲ ((C.72H)): نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون اون ۷۰ درجه قرار می‌گیرند که در این حالت نمونه‌ها با پارچه خیس احاطه شده‌اند و درون پلاستیک قرار گرفته‌اند و سپس نمونه‌ها بعد از گذشت مدت زمان مورد نظر از اون ۷۰ درجه خارج و به اون ۱۰۰ درجه به مدت ۴۸ ساعت منتقل می‌شوند. در این حالت نمونه‌ها بدون پارچه خیس هستند ولی همچنان درون پلاستیک قرار گرفته‌اند که در مجموع به مدت ۷۲ ساعت عمل‌آوری می‌شوند. همانند قبل برای جلوگیری از چسبیدن پلاستیک نمونه‌ها به سطح زیرین سینی اون، از کاغذ استفاده شده است.

عمل‌آوری شماره ۳ ((C.24H+7d)): همانند عمل‌آوری شماره (۱) انجام می‌شود و تمام شرایط یکسان است. با این تفاوت که نمونه‌ها بعد از خروج از اون به مدت ۷ روز در دمای اتاق عمل‌آوری می‌شوند. عمل‌آوری شماره ۴ ((C.72H+7d)): همانند عمل‌آوری شماره (۲) انجام می‌شود و تمام شرایط یکسان است. با این تفاوت که نمونه‌ها بعد از خروج از اون به مدت ۷ روز در دمای اتاق عمل‌آوری می‌شوند. نمونه‌های مکعبی در دو دسته قرار می‌گیرند: یک دسته تحت عمل‌آوری (C.24H) و (C.72H) بوده‌اند، که برای تست مقاومت فشاری استفاده گردیده‌اند. و دسته دوم تحت عمل‌آوری (C.24H+7d) و (C.72H+7d) بوده‌اند، که تحت آزمون جذب حجمی آب قرار گرفته‌اند.

نمونه‌های استوانه‌ای تحت عمل‌آوری (C.24H+7d) قرار گرفته‌اند، که برای آزمون نفوذ یون کلراید و موئینه استفاده شده‌اند. نمونه‌های منشوری تحت عمل‌آوری (C.24H) و (C.24H+7d) قرار گرفته‌اند، و در آزمون خمش از آنها استفاده شده است.

استفاده از این شرایط خاص عمل‌آوری باعث می‌شود تا در درجه اول نمونه‌ها دچار ترک خوردگی نشوند و همچنین آب موجود در نمونه‌های ژئوپلیمری جهت انجام فرآیندهای ژئوپلیمریزاسیون حفظ شود و پس از گذشت ۲۴ ساعت عمل‌آوری و در ۴۸ ساعت بعدی عمل‌آوری چون نمونه‌ها دیگر دچار ترک خوردگی نمی‌شوند پارچه خیس حذف می‌شود و همچنان داخل پلاستیک برای رسیدن به حداکثر مقاومت عمل‌آوری می‌شوند.

در شکل شماره ۷ چند نمونه ژئوپلیمری با شرایط متفاوت عمل‌آوری در سن ۲۴ ساعت پس از باز کردن از قالب نشان داده شده است که نشان می‌دهد فقط نمونه با پارچه خیس و پلاستیک دچار ترک خوردگی نشده است.

از نمونه‌ها آزمون مقاومت فشاری، خمشی، جذب موئینه، جذب حجمی و نفوذ یون کلراید گرفته شد تا خواص مکانیکی و دوام آنها را با هم مقایسه کنیم. در مطالعه حاضر بعد از اتمام زمان عمل‌آوری، نمونه‌های استوانه‌ای با دستگاه برش به سه قسمت با ارتفاع پنج سانتی متر تقسیم شدند، که نمونه‌های اخذ شده از وسط قالب برای نفوذ یون کلراید و نمونه‌های اخذ شده از بالای قالب برای نفوذ موئینه استفاده گردیده‌اند.

#### ۵- آزمون مقاومت فشاری

به منظور انجام آزمایش مقاومت فشاری از یک نیروی فشاری تک محوره با سرعت ۵۳۰ کیلوگرم بر ثانیه که بر سطح نمونه مکعبی اعمال می‌گردد و مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C109 [۱۳] به دست می‌آید. مقدار مقاومت فشاری مخلوط S100 که تنها حاوی سرباره است در روش عمل‌آوری C.24H و C.72H به ترتیب برابر با حدود ۷۰ و ۷۸ مگاپاسکال است. این مقادیر برای مخلوط حاوی پوزولان ۲۳ و ۳۰ مگاپاسکال و برای مخلوط حاوی پسماند برابر ۵ و ۱۰ مگاپاسکال است که نشان دهنده فعال بودن سرباره نسبت به دو ماده دیگر می‌باشد.

افزودن سرباره به خاک پسماند و پوزولان در درصد‌های مختلف جایگزینی موجب افزایش قابل ملاحظه مقاومت فشاری بتن می‌شود به طوری که مقاومت فشاری طرح‌های با ۲۵٪ سرباره در پوزولان و خاک پسماند به ترتیب افزایش ۴۹ درصدی و ۱۶۰ درصدی در نمونه‌های با عمل‌آوری C.72H داشته‌اند. این موضوع نشان دهنده تاثیر بالای سرباره شرکت کننده در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون است که این موضوع مطابق با نتایج ارائه شده در مقاله دب و همکاران [۱۰] و بلوم و همکاران [۱۱] در استفاده از سرباره است. به منظور بررسی این پارامتر نمودار شکل ۲ تنظیم شده است.

جدول ۵- نسبت‌های استفاده شده در طرح مخلوط‌های مطالعه حاضر (مقادیر نسبی بر اساس وزن ماده پایه (مجموع وزن پوزولان، سرباره و پسماند)) ۱، ۲، ۳، ۴

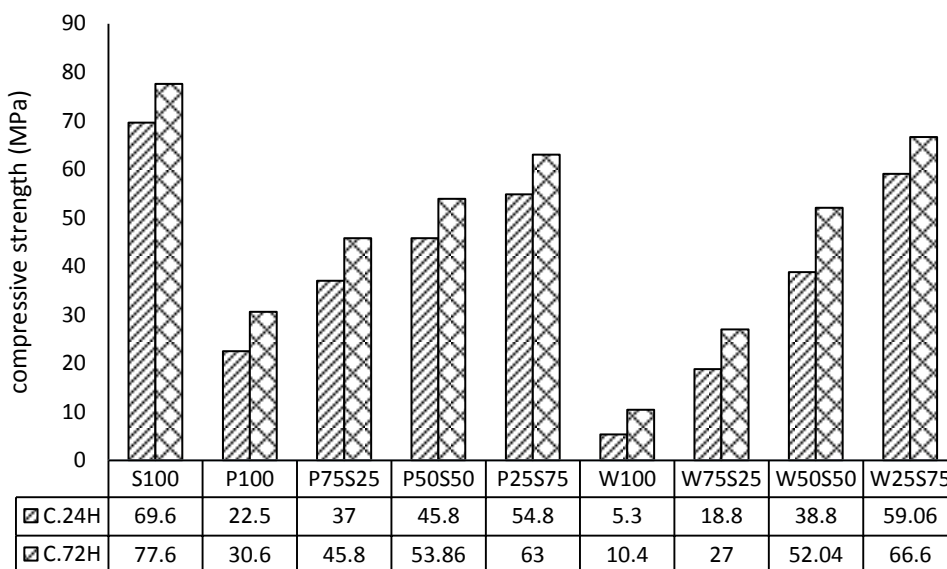
طرح	ماده پایه		هیدروکسید کلسیم	محلول هیدروکسید سدیم	محلول سیلیکات سدیم	سنگ‌دانه
	سرباره	پوزولان				
S100	۱	-	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۳۵	۱/۲
P100	-	۱	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۳۵	۱/۲
W100	-	-	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۳۵	۱/۲
P75S25	۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۳۵	۱/۲
P50S50	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۳۵	۱/۲
P25S75	۰/۷۵	۰/۲۵	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۳۵	۱/۲
W75S25	۰/۲۵	-	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۳۵	۱/۲
W50S50	۰/۵۰	-	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۳۵	۱/۲
W25S75	۰/۷۵	-	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۳۵	۱/۲

[۱] طرح‌های S100, P100 و W100 نمونه‌های شاهد هستند که در بقیه طرح‌ها با جایگزین کردن درصدی این سه طرح با هم، خواص مکانیکی و دوام نمونه‌های ژئوپلیمری با هم مقایسه شده است.  
 [۲] غلظت محلول NaOH ۸ مولار در نظر گرفته شده است. نسبت وزنی آب شیشه (سیلیکات سدیم) به محلول NaOH در تمامی طرح‌ها برابر با ۲/۵ و نسبت وزنی ماده پایه به محلول قلیا برابر ۲ است.  
 [۳] در این طرح مخلوط‌ها ماسه ریز و ماسه درشت با نسبت وزنی ماسه ریز به ماسه درشت برابر ۱ و نسبت وزنی سنگدانه ریز (درشت) به ماده پایه ۰/۶ (۰/۶) لحاظ شده است، که در مجموع نسبت وزنی کل سنگدانه‌ها به ماده پایه ۱/۲ می‌باشد.

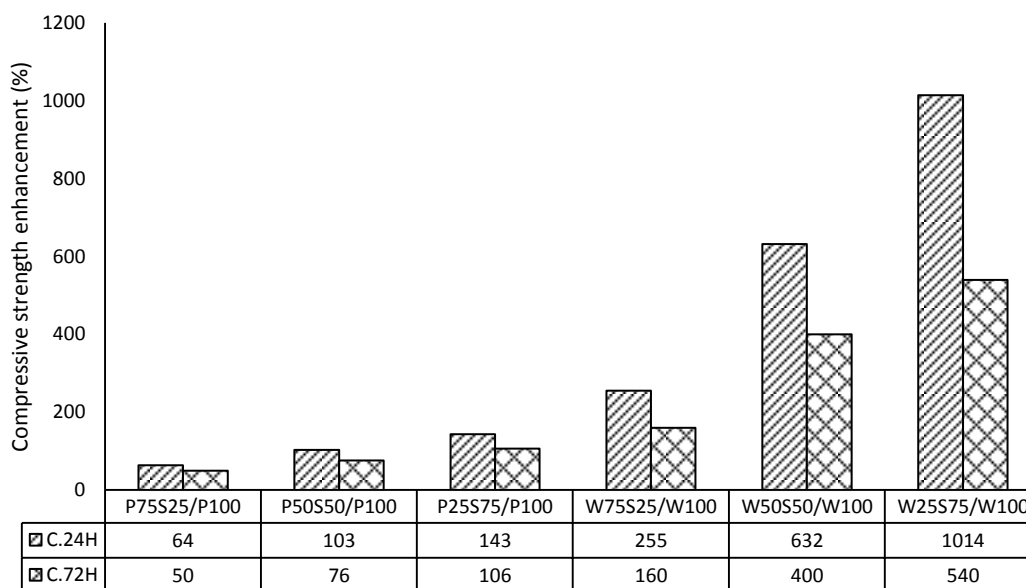


شکل ۶- ترک خوردگی نمونه‌ها در شرایط مختلف عمل‌آوری، الف) با پلاستیک و پارچه خیس درون اون، ب) دمای اتاق بدون پلاستیک، ب) بدون پلاستیک درون اون، ت) با پلاستیک درون اون

برای ساخت نمونه های ژئوپلیمری چون آب به صورت مستقیم وارد طرح مخلوط ها نمی شود و مواد محلولی (سود و آب شیشه) که در فرآیند تشکیل پیوندهای ژئوپلیمریزاسیون استفاده می شود، محلول هایی با نسبت آب به ماده خشک ثابت هستند پس نمی توان روی نسبت آب به ماده خشک ژئوپلیمری مانور داد به همین دلیل مقدار مواد محلول قلیایی در طرح مخلوط ها طوری طراحی شده اند که ملات های ژئوپلیمری علاوه بر روانی و کارایی مناسب، دارای نسبت آب کمتری باشند و تاثیر منفی بر روی مقاومت و دوام نمونه ها به حداقل برسد.



شکل ۲ - تاثیر سرباره بر روی مقاومت فشاری پسماند و پوزولان



شکل ۳ - درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه های ترکیبی با سرباره نسبت به نمونه شاهد

در نمودار شکل ۲، در روش عمل آوری C.24H کمترین مقاومت مربوط به طرح W100 و بیشترین مقاومت مربوط به طرح S100 است. با جایگزین کردن سرباره به نسبت های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد با خاک پسماند (W75S25، W50S50 و W25S75) به ترتیب شاهد افزایش مقاومت ۲۵٪، ۶۳٪ و ۱۰۰٪ در نمونه ها هستیم و با جایگزین کردن سرباره با پوزولان (P75S25، P50S50 و P25S75) به ترتیب شاهد افزایش مقاومت ۶۵٪، ۱۰۰٪ و ۱۴۰٪



هستیم که افزایش مقاومتی که در خاک پسماند روی داده است به مراتب بیشتر از افزایش مقاومتی بوده است که در پوزولان روی داده است. با تغییر شرایط عمل‌آوری از C.24H به C.72H در تمامی حالات مقاومت فشاری افزایش می‌یابد که نشان دهنده بهبود ساختاری نمونه‌ها با افزایش پیوندهای آلومینوسیلیکاتی است. در شکل ۳ درصد بهبود مقاومت برای شرایط عمل‌آوری مختلف ارائه شده است.

بهبود ساختاری و افزایش مقاومت قابل ملاحظه‌ای که در عمل‌آوری C.24H ایجاد شده نشان دهنده تاثیر بالای سرباره در نمونه‌های با خاک پسماند حتی در سنین کم است. در واقع سرباره با بهبود ساختاری نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت قابل ملاحظه‌ای در نمونه‌ها حتی در همان سنین اولیه شده است.

#### ۶- آزمون مقاومت خمشی

به منظور انجام آزمون مقاومت خمشی مطابق آیین‌نامه EN 196 [۱۴] عمل شده است. نمونه‌ها تحت آزمایش چهار نقطه‌ای خمشی قرار گرفته‌اند. سرعت بارگذاری بر روی نمونه‌ها برابر با  $0.04 \text{ in/min}$  است.

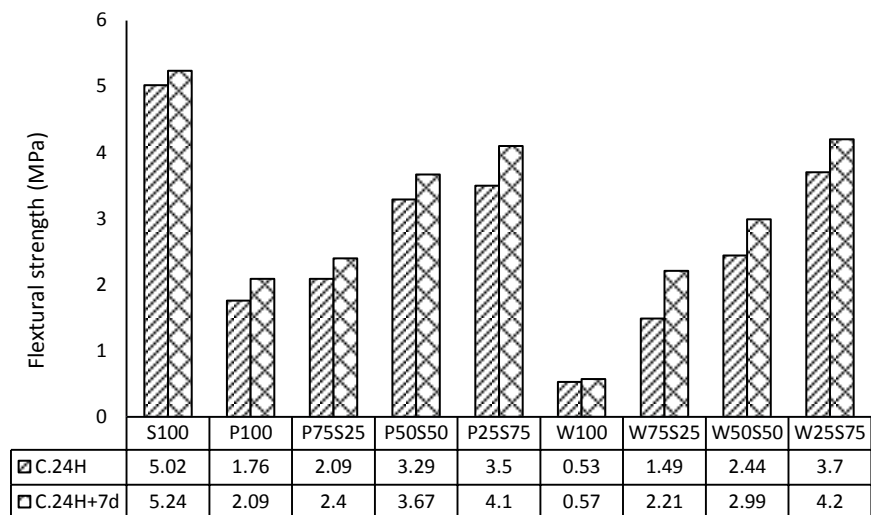
با توجه به نمودار شکل ۴ و بررسی مقاومت خمشی نمونه‌ها مشاهده می‌شود که مقاومت خمشی طرح S100 با  $5.02 \text{ MPa}$  دارای بیشترین مقاومت و طرح W100 با  $0.53 \text{ MPa}$  دارای کمترین مقاومت در عمل‌آوری C.24H داشته است. همانطور که ملاحظه می‌کنید افزایش مقاومت خمشی خاک پسماند با  $25\%$  سرباره (W75S25) بسیار بیشتر از افزایش مقاومت خمشی پوزولان با  $25\%$  سرباره (P75S25) است و این نتیجه را می‌توان گرفت که سرباره در خاک پسماند بسیار بهتر از حالت سرباره در پوزولان عمل کرده است. در عمل‌آوری C.24H+7d نمونه‌ها اندکی افزایش مقاومت پیدا کرده‌اند که نشان می‌دهد پس از طی یک عمل‌آوری تسریع شده عمل‌آوری در دمای اتاق نیز به بهبود ریز ساختار کمک کرده است.

در شکل شماره ۵، در نمونه‌های با خاک پسماند اصلاح شده، درصد افزایش مدول گسیختگی با عمل‌آوری C.24H+7d بیشتر از درصد افزایش مدول گسیختگی با عمل‌آوری C.24H بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که نمونه با خاک پسماند  $100\%$  (W100)، با اضافه کردن سرباره دچار بهبود مقاومت خمشی قابل توجهی با افزایش زمان عمل‌آوری شده است، لیکن در نمونه‌های با پوزولان اصلاح شده با افزایش زمان عمل‌آوری بهبود مقاومت خمشی پایینی در مقایسه با نمونه P100 رخ داده است. علت این موضوع را می‌توان به تداوم واکنش‌های انجام شده در ترکیبات ژئوپلیمری حاوی پسماند پس از طی عمل‌آوری تسریع شده دانست. به نظر می‌رسد اثر فعالیت اولیه مواد پایه بر عملکرد نهایی آنها اثر بزرگتری داشته است و اثر سینرژی سرباره روی ماده با فعالیت کمتر (خاک پسماند) قابل توجه‌تر بوده است.

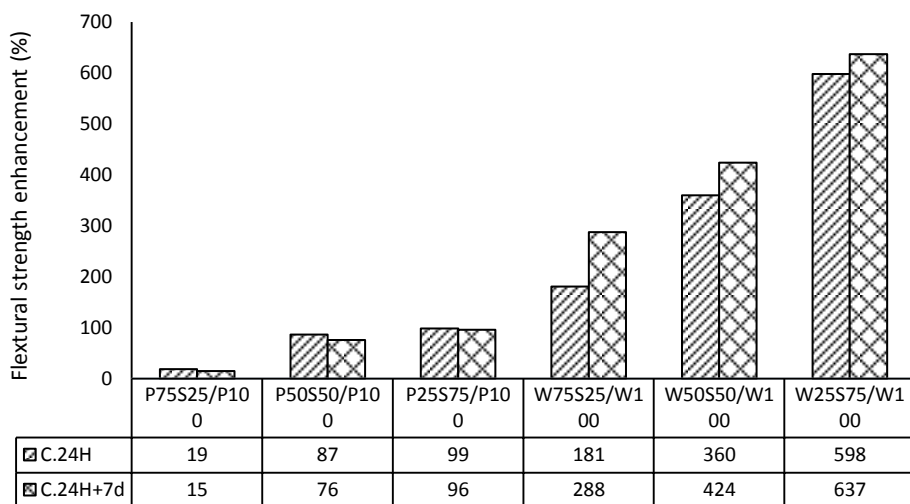
#### ۷- آزمون جذب حجمی

آزمون جذب حجمی بر روی نمونه‌های مکعبی  $5 \text{ سانتی‌متری}$  با توجه به آیین‌نامه ASTM C 642-06 [۱۵] انجام شده است. نمونه‌های مکعبی پس از گذراندن دوره ۷ روزه به درون اون  $100^\circ \text{C}$  درجه منتقل شده و هر ۲۴ ساعت وزن نمونه‌ها را کنترل نموده تا اختلاف وزن آنها با متوسط وزن نمونه خشک به کمتر از  $4/7\%$  درصد برسد. سپس نمونه‌ها را از اون خارج کرده و وزن آنها را به عنوان وزن نمونه خشک یادداشت می‌کنیم. این بار نمونه‌ها را درون آب و همانند حالت قبل هر ۲۴ ساعت نمونه را وزن کرده تا اختلاف وزن آنها نسبت به وزن روز قبل به کمتر از  $0.1\%$  درصد برسد در این حالت می‌توانیم وزن نمونه‌ها را به عنوان وزن حالت اشباع یادداشت کنیم.

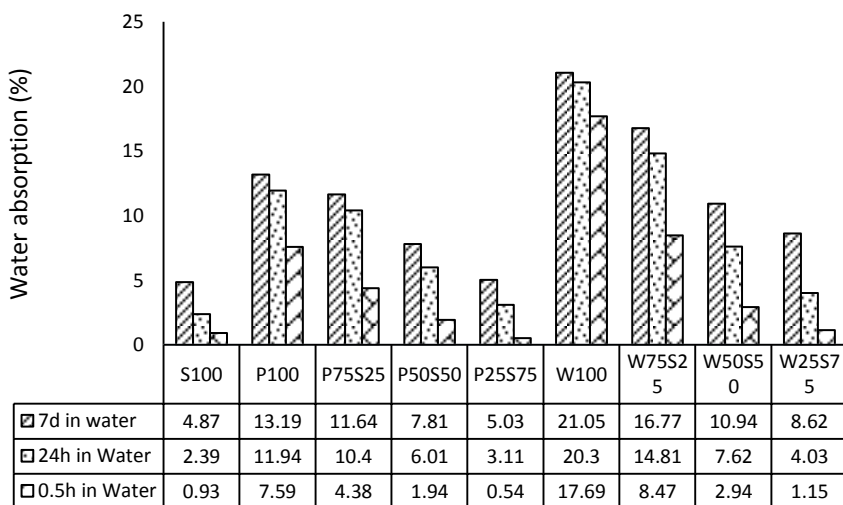
میزان جذب آب نیم ساعت، ۲۴ ساعت و نهایی (۷ روز) مخلوط‌های بتنی تحت شرایط عمل‌آوری C.24H و C.72H به ترتیب در اشکال ۶ و ۷ ارائه شده است. برای تسهیل در مقایسه مقادیر جذب آب در شرایط مختلف عمل‌آوری، جذب نهایی آب در شکل ۸ ارائه شده است.



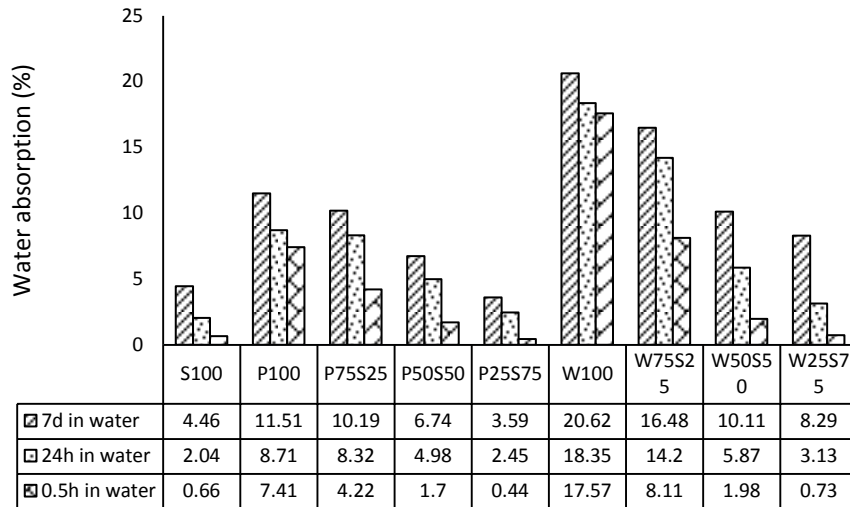
شکل ۴ - تاثیر سرباره بر روی مقاومت خمشی نمونه‌های با خاک معمولی و پوزولان



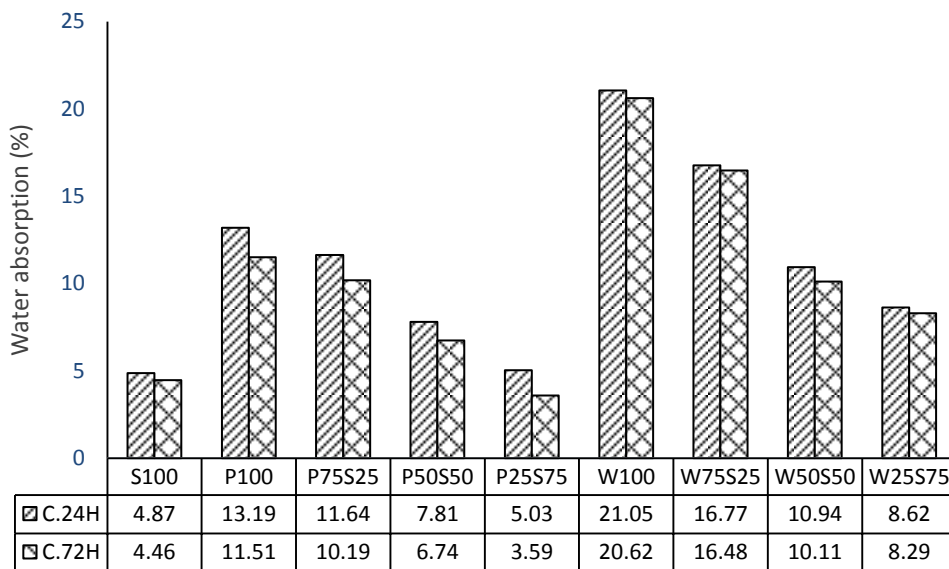
شکل ۵ - درصد افزایش مقاومت خمشی نمونه‌های ترکیبی با سرباره نسبت به نمونه شاهد



شکل ۶ - جذب آب نیم ساعته، ۲۴ ساعته و نهایی نمونه‌های تحت عمل آوری C.24H



شکل ۷ - جذب آب نیم ساعته، ۲۴ ساعته و نهایی نمونه‌های تحت عمل‌آوری C.72H



شکل ۸ - تاثیر سرباره بر روی درصد جذب آب نهایی نمونه‌های ساخته شده با خاک پسماند و پوزولان

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در روش عمل‌آوری C.24H، نمونه‌های پوزولانی جذب حجمی آب کمتری نسبت به نمونه‌های با خاک پسماند دارند و هر چه درصد جایگزینی سرباره نسبت به دو ماده پایه دیگر بیشتر می‌شود نفوذپذیری کاهش می‌یابد. نمونه بارز آن را می‌توان در طرح‌های با ۲۵٪ و ۵۰٪ سرباره مشاهده نمود که کاهش قابل توجه جذب آب را نشان می‌دهند. به عنوان مثال در طرح W75S25 نسبت به W100 جذب آب‌های ۳۰ دقیقه، ۲۴ ساعت و نهایی به ترتیب ۵۲٪، ۲۷٪ و ۲۰٪ کاهش یافته است. به طور مشابه در طرح مخلوط P75S25 نسبت به P100 این نسبت‌ها به ترتیب برابر با ۴۲٪، ۱۳٪ و ۱۲٪ بدست آمده است. همانطور که مشاهده می‌گردد تاثیر جایگزینی سرباره در بهبود جذب آب نیم ساعته به مراتب بهتر از این تاثیر در جذب آب‌های ۲۴ ساعته و نهایی می‌باشد که نشان دهنده بهبود قابل توجه ریز ساختاری به لحاظ ریز شدن و مسدود شدن منافذ در این مخلوط‌ها است. کاهش جذب آب‌های ۲۴ ساعته و نهایی نیز حاکی از کاهش حجم کلی تخلخل در این

مخلوط‌ها می‌باشد. همانطور که در شکل ۷ مشهود است، نتایج مشابه با روش عمل‌آوری C.24H در روش عمل‌آوری C.72H نیز حاصل آمده است.

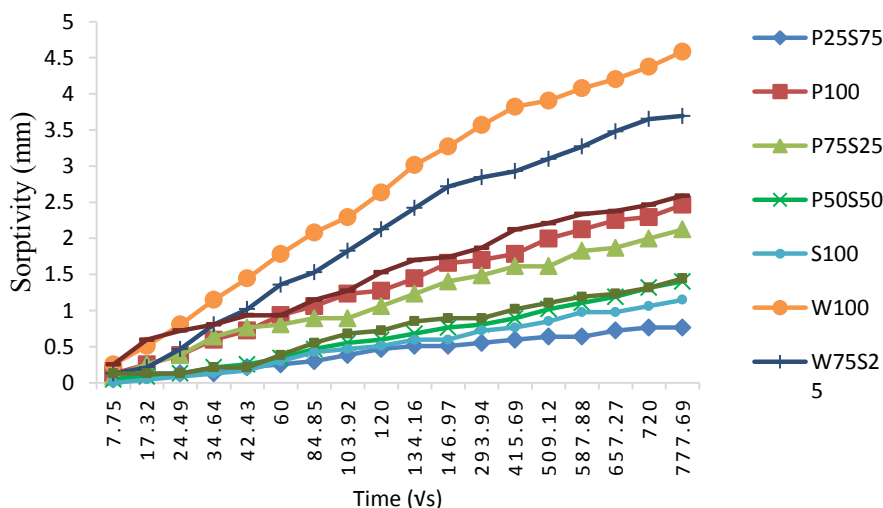
در شکل ۸ مقایسه بین جذب آب نهایی مخلوط‌ها در روش عمل‌آوری ۷۲ ساعت (C.72H) و ۲۴ ساعت (C.24H) انجام شده است. در روش عمل‌آوری ۷۲ ساعت مقداری کاهش نسبت به عمل‌آوری دیگر مشاهده می‌گردد. همچنین هر چه درصد سرباره نسبت به خاک پسماند و پوزولان بیشتر می‌شود جذب آب نمونه‌ها کمتر می‌شود. در مقایسه بین پسماند و پوزولان، در درصد‌های جایگزینی یکسان، مخلوط‌های حاوی پوزولان درصد جذب آب کمتری نسبت به خاک پسماند داشته‌اند، لیکن با افزایش مدت عمل‌آوری شاهد کاهش جذب حجمی بیشتری در نمونه‌های حاوی پسماند نسبت به پوزولان هستیم. نتایج حاضر نشانگر آن است که به دلیل فعال‌تر بودن پوزولان نسبت به خاک پسماند نتایج بهتری برای تمام درصد‌های جایگزینی این ماده بدست آمده است. به لحاظ همین واکنش‌زایی ضعیف‌تر، سرباره تاثیر مثبت‌تری روی مخلوط‌های حاوی خاک پسماند داشته است.

#### ۸- آزمون جذب مؤئینه آب

مطابق آیین‌نامه ASTM C1585-04 [۱۶] و با توجه به نمونه‌های استوانه‌ای مقدار نفوذ مؤئینه انجام می‌شود. نمونه‌ها برای خشک شدن به مدت یک هفته در اون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند تا تمامی حفرات موجود در ساختار بتن از آب خالی شوند.

آزمون جذب مؤئینه آب با عمل‌آوری C.24H+7d بر روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام شده است. نتایج در شکل ۹ نشان می‌دهد که استفاده از سرباره، حتی در ۲۵٪ جایگزینی، باعث بهبود ساختار نمونه‌ها می‌گردد. نمونه W100 دارای بیشترین مقدار جذب مؤئینه نسبت به سایر نمونه‌ها بوده است و مخلوط W75S25 نیز عملکرد مناسبی نداشته است. میزان تغییرات با جایگزینی سرباره در مخلوط‌های حاوی خاک پسماند به مراتب بیشتر از تغییرات در مخلوط‌های حاوی پوزولان خاش می‌باشد. این نتیجه می‌تواند به نحوی موید فعال‌تر بودن پوزولان خاش نسبت به خاک پسماند باشد. البته مخلوط با ۲۵٪ پسماند و ۷۵٪ سرباره عملکرد خوبی از خود نشان داده است.

بر اساس شکل ۹ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد سرباره در نمونه‌ها شاهد کاهش شیب خط جذب مؤئینه نمونه‌ها هستیم که نشان دهنده کاهش سرعت نفوذ آب در منافذ و خلل و فرج بتن می‌باشد. به نحوی که جایگزینی ۲۵٪ سرباره در مخلوط‌های حاوی پوزولان و خاک پسماند به ترتیب باعث کاهش ۱۸٪ و ۱۹٪ در نمونه‌ها شده است. همچنین نمونه‌های با ۷۵٪ سرباره (P25S75 و W25S75) نسبت به نمونه شاهد (P100 و W100) به ترتیب باعث کاهش نفوذ نهایی ۵۳٪ و ۶۸٪ در نمونه‌ها شده‌اند.



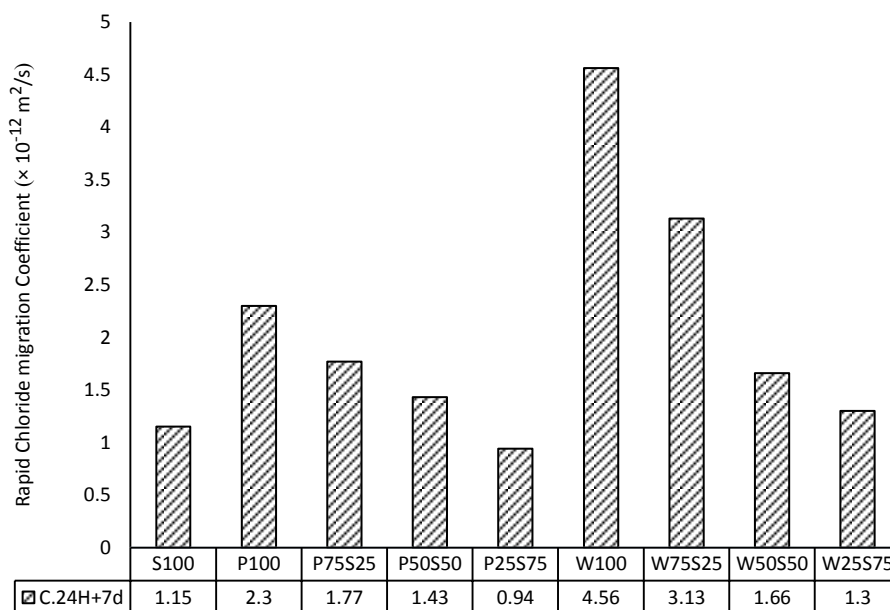
شکل ۹ - میزان جذب مؤئینه نمونه‌های اصلاح شده با سرباره تحت عمل‌آوری C.24H

## ۹- آزمون مهاجرت تسریع شده یون کلراید (RCMT)

یکی از معتبرترین آزمون‌ها برای تست دوام بتن، آزمون ضریب مهاجرت تسریع شده یون کلراید می‌باشد. این آزمون با بهره‌گیری از استاندارد NT BUILD 492 [۱۷] انجام شده است. نمونه‌ها بعد از مدت زمان مشخصی از غلاف پلاستیکی در آورده می‌شوند و بعد از تقسیم نمونه به دو تکه و با پاشیدن محلول نیترات نقره بر روی نمونه میزان نفوذ یون کلراید و ضریب مربوطه تعیین می‌گردد.

آزمون مهاجرت تسریع شده یون کلراید برای مخلوط‌های این تحقیق در شکل ۱۰ ارائه شده است. این آزمون روی نمونه‌های استوانه‌ای تحت عمل‌آوری C.24H+7d انجام گردیده است. با مقایسه مخلوط‌های شاهد P100 و W100 با نمونه‌های اصلاح شده در می‌یابیم که استفاده از سرپاره برای اصلاح ماده پایه مخلوط ژئوپلیمری سبب کاهش ضریب مهاجرت یون کلراید می‌شود. مقدار بهبود در نفوذ یون کلراید با جایگزینی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد پوزولان با سرپاره نسبت به مخلوط P100 حدوداً برابر با ۲۰٪، ۳۵٪ و ۶۰٪ می‌باشد. این مقدار ارتقاء در کاهش نفوذپذیری کلراید نسبت به مخلوط W100 در درصدهای جایگزینی مذکور به ترتیب برابر با ۳۰٪، ۶۳٪ و ۷۲٪ حاصل آمده است.

نکته مهمی که می‌توان از نمودار نتیجه گرفت تاثیر پوزولان بر روی سرپاره در نمونه P25S75 است که سبب بهبود ساختاری سرپاره شده و باعث کاهش نفوذ یون کلراید حدوداً برابر با ۲۰٪ نسبت به S100 شده است. شایان ذکر است که این نتیجه کاملاً در تطابق با نتایج بدست آمده از آزمون جذب موئینه و جذب حجمی نیم ساعت می‌باشد، این موضوع نیز در تطابق با نتایج ارائه شده در مقاله ندوشن و همکاران [۹] است که افزودن اندک پوزولان به سرپاره سبب بهبود خواص دوام نمونه‌های ژئوپلیمری می‌شود. لذا استفاده از ترکیب ۲۵٪ پوزولان خاش و ۷۵٪ سرپاره کوره آهن‌گدازی اصفهان از لحاظ خصوصیات نفوذپذیری در مباحث دوام یک ترکیب بهینه محسوب می‌گردد. بیشترین تاثیر در کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها مربوط به ۲ نمونه W50S50 و W25S75 است که با ۵۰٪ و ۷۵٪ سرپاره در نمونه‌های با ماده پسماند، کاهش قابل توجهی در نفوذپذیری نمونه‌ها مشاهده شده است.



شکل ۱۰ - ضریب مهاجرت یون کلراید در نمونه‌های اصلاح شده با سرپاره تحت عمل‌آوری C.24H+7d

## ۱۰- جمع‌بندی و نتایج

\* جایگزینی خاک پسماند و پوزولان طبیعی خاش با سربراره کوره آهن گدازی در درصد‌های مختلف جایگزینی از ۲۵ تا ۷۵ درصد سبب ارتقاء قابل ملاحظه مشخصات مکانیکی شامل مقاومت فشاری و خمشی شده است، به‌گونه‌ای که برخی از مخلوط‌های حاوی ۷۵ درصد سربراره حتی مقاومت‌هایی بالاتر از مخلوط با ۱۰۰ درصد سربراره داشته‌اند.

\* با تغییر شرایط عمل‌آوری از C.24H به C.72H در تمامی حالات مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها افزایش یافته است که می‌تواند نشان دهنده بهبود ریز ساختاری نمونه‌ها به واسطه توسعه پیوندهای آلومینوسیلیکاتی به لحاظ افزایش مدت زمان عمل‌آوری تسریع شده باشد.

\* در مقایسه با نمونه‌های حاوی خاک پسماند، مخلوط‌های پوزولانی در درصد‌های جایگزینی برابر، خصوصیات مکانیکی و دوام بهتری داشته‌اند. با توجه به فعالیت اولیه پایین‌تر خاک پسماند در مقایسه با پوزولان طبیعی خاش، جایگزینی با سربراره در این مخلوط‌ها تاثیر مثبت بیشتری در بهبود خواص به ارمغان آورده است و اکیداً توصیه می‌شود.

\* بهترین عملکرد از لحاظ مشخصه‌های دوام مربوط به طرح P25S75 می‌باشد. این مخلوط نفوذ یون کلراید، جذب حجمی و جذب مویینه کمتری در مقایسه با تمامی مخلوط‌ها داشته است. این مقادیر حتی کمتر از مخلوط حاوی سربراره بوده‌اند. از لحاظ خصوصیات مقاومتی نیز این مخلوط نتایج بسیار مطلوبی را به همراه داشته است لذا در مجموع به نظر می‌رسد این مخلوط، مخلوط بهینه طرح حاضر محسوب گردد.

\* در تحقیق حاضر تاثیر تغییر مدت زمان عمل‌آوری بر مشخصه‌های دوام تنها در جذب حجمی آب انجام شده است و سایر خصوصیات دوام شامل جذب مویینه و نفوذ یون کلراید تنها تحت تاثیر عمل‌آوری تسریع شده ۲۴ ساعته بوده‌اند. در آزمون جذب حجمی، با افزایش زمان تسریع شده عمل‌آوری از ۲۴ ساعت به ۴۸ ساعت مقادیر کمتری از جذب حجمی آب نیم ساعت، ۲۴ ساعت و نهایی (۷روز) مشاهده گردیده است. به طور مثال، در شرایط عمل‌آوری C.24H نمی‌توان تغییر محسوسی بین نمونه S100 و P25S75 احساس کرد ولی با افزایش زمان عمل‌آوری و در شرایط C.48H شاهد کاهش جذب حجمی نمونه P25S75 نسبت به S100 هستیم که نشان دهنده فعال‌تر شدن پوزولان در این نسبت خاص با افزایش زمان عمل‌آوری هستیم.

## ۱۱- تشکر و قدردانی

تمام مراحل ساخت نمونه‌ها، عمل‌آوری و حصول نتایج با استفاده از تجهیزات و امکانات دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری‌های پیشرفته کرمان صورت گرفته است.

## ۱۲- منابع

- [۱] Davidovits, J., "The need to create a new technical language for the transfer of basic scientific information. Transfer and Exploitation of Scientific and Technical Information", Commission of the European Communities, 1982a.
- [۲] Davidovits, J., "Geopolymers Inorganic polymeric new materials", *Journal of Thermal Analysis*, Vol.37, 1991, pp:1633-1656.
- [۳] Davidovits, J., "Geopolymer Chemistry and Applications", Institut Géopolymère, 2008.
- [۴] Davidovits, J., "Environmentally Driven Geopolymer Cement Application", *Geopolymer Conference, Melbourne, Australia*, 2002.
- [۵] Thakur R.N. and Ghosh S., "Effect of Mix Composition on Compressive Strength and Microstructure of Fly-Ash Based Geopolymer Composites", *ARPN J. of Engineering and Applied Sciences*, Vol.4, 2009, pp:68-74.
- [۶] Duxson P. and Fernandez-Jimenez A. and Provis J.L., "Geopolymer Technology: The Current State of the Art", *J. of Material Science*, Vol.42, 2007, pp: 2917-2933.

- [۷] Neville A.M., "Properties of Concrete", Fourth Edition, Pearson Education Limited, UK, 2004.
- [۸] Allahverdi A. and Yazdanipour M. and hashemi M., "Investigation the set and strength behaviors of Blast-furnace slag Blended Geopolymer Cement Based on Natural Pozzolan", The 11<sup>th</sup> Iranian Chemical Engineering Congress (ICHEC11), November 28-30, 2006, Tehran, Iran.
- [۹] Jafari Nadoushan M. and RamezaniPour A., "The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers", Construction and Building Materials, Vol. 111, 2016, pp:337-347.
- [۱۰] Sarathi D. and Piradip N. and Kumar S., "Strength and Permeation Properties of slag Blended Fly Ash Based Geopolymer Concrete", Advanced Materials Research, Vol. 651, 2013, pp:168-173.
- [۱۱] Ramamohana RB. and Ruben N. and Sri Rama Chand M. and Chandra Sekhar Reddy I., "Mix Design and Mechanical Properties of Fly Ash and GGBFS-Synthesized Alkali-Activated Concrete (AAC)", journal of infrastructures, 2019.
- [۱۲] رمضانپور ع، بهمن زاده ف، ذوالفقار نسب آ، رمضانپور ا، "بررسی تاثیر مقدار ماده پایه و نسبت آب به مواد سیمانی در نفوذ یون های کلراید در بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره کوره آهن گدازی"، نشریه مهندسی عمران امیر کبیر، دوره ۵۰، شماره ۴، ۶۷۳-۶۸۴، ۱۳۹۷
- [۱۳] ASTM C109, "standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars". ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.
- [۱۴] BS EN 196-3:2016, "Methods of testing cement— Determination of setting times and soundness", BS EN, 2005.: p. 193-196.
- [۱۵] ASTM, C642-06., "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete", ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2006.
- [۱۶] Astm, C1585-04., "Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes". ASTM International, 2004.
- [۱۷] Build, N 492, "Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments". Nordtest method, 1999. 492(10).