تحقیقات بتن
سال شانزدهم، شمارهٔ دوم
تابستان ۱۴۰۲
ص ۲۵– ۱۵
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵

بررسی خواص مکانیکی و تخلخل خمیر ژئوپلیمری با استفاده از پلیمرهای معدنی خاش

میلاد کیالی
گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.
محمد مهدی جباری *
گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

چکیده

با توجه به اهمیت استفاده از پوزولان‌ها، در این پژوهش تلاش شده‌است تا به بررسی کامل‌تر خصوصیات پوزولان‌های موجود در منطقه خاش پرداخته شود. در این راستا جهت بررسی دقیق‌تر، دو نمونه متفاوت از منطقه خاش مورد بررسی قرار گرفت که این دو سنگ از نوع داسیت و بازالتیک بوده و پس از آسیاب به نام خاکستر داسیت و خاکستر بازالتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش ابتدا خواص مکانیکی دو نوع خاکستر مقایسه شد که نتایج بدست آمده به طور قابل توجهی نشان داد که خاکستر بازالتیک از مقاومت فشاری بالاتری برخوردار است. طبق نتیجه به‌دست آمده، بیشترین مقاومت فشاری از نمونه‌های ساخته شده با خاکستر بازالتیک به مقدار ۷۲ مگاپاسکال به‌دست آمد. این نتایج درحالی است که بیشترین مقاومت فشاری به‌دست آمده از نمونه‌های ساخته شده با خاکستر داسیت، ٤٩ مگاپاسکال بود که مربوط به نمونه ساخته شده با خاکستر بازالتیک با نسبت ۲ به ۱ سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ۸ مولار است که در درمای محیط و نسبت ۵۰ درصد از خاکستر به محلول قلیایی می باشد. همچنین تحلیل تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که در نمونه‌های ساخته شده با خاکستر داسیت، تعداد بسیاری از ذرات در واکنش شرکت نکرده‌اند. همچنین آزمایش تخلخل به روش تزریق جیوه نشان داد که نمونه‌های ساخته شده با خاکستر داسیت، مجموع حجم تجمعی برابر با ٦٧/٥ میلی‌متر مکعب بر گرم داشته در حالی‌که نمونه ساخته شده با خاکستر بازالتیک، دارای مجموع حجم تجمعی برابر با ۱/۵۹ میلی‌متر مکعب بر گرم بوده است.

واژه‌های کلیدی: **پلیمر معدنی، داسیت، بازالتیک، منطقه خاش، مقاومت فشاری، تخلخل.**

* نویسنده مسئول: mmjabbari@yahoo.com

۱- مقدمه

سیمان‌های پلیمر معدنی برای اولین بار در سال ۱۹۹۴، توسط J.Davidovits مورد مطالعه قرار گرفته‌است. برای ساخت این نوع سیمان از ترکیب یک منبع پوزولانی حاوی سیلیس و همچنین یک مایع فعال‌کننده قلیایی استفاده می‌شود. بر خلاف سیمان پرتلند، نیازی به کلینکر سنگ آهک نمی باشد و حتی بر خلاف روند تولید سیمان پرتلند که گاز کربن دی اکسید فراونی تولید می‌کند، این سیمان قلیایی نیاز به صرف انرژی بسیار کمتری دارد. سیمان پلیمر معدنی کاربردهای گوناگونی داشته و توانایی جایگزینی با سیمان پرتلند را نیز دارد. سیمان‌های پلیمر معدنی می تواند مشابه سیمان پرتلند، با سنگ‌دانه-های ریز و درشت و دیگر مصالح ترکیب شود و بصورت ملات یا بتن یا خمیر بکار رود. این بتن در مقایسه با بتن سیمان پرتلند، مقاومت کششی و فشاری بیشتر، سرعت سخت‌شوندگی بالا، تخلخل و نفوذپذیری کمتر، مقاومت فوق العاده در برابر حریق و حملات شیمیایی دارد. سیمان‌های پلیمر معدنی، فرآورده‌های ضایعاتی از جمله باطله‌های معدنکاری را به محصولی مفید تبدیل می‌کند. این‌گونه بتن‌ها جهت کاهش مصرف سیمان پرتلند و کاهش آلودگی محیط زیست در سازه‌ها به‌کار می روند. لازم به ذکر است که با وجود عدم استفاده از سیمان پرتلند در این بتن، مقاومتی برابر و حتی بیشتر از بتن سیمانی دارد [۱].

علی الله‌وردی و نجفی، به بررسی اثر زمان و دمای عمل‌آوری و تأثیر آن بر مقاومت فشاری پلیمر معدنی پرداخته‌اند. در این تحقیق از پوزولان طبیعی استفاده شده از سنگ پامیس که ازکوه تفتان منطقه خاش تهیه شده است، در ساخت خمیر ژئوپلیمر استفاده گردیده‌است. محققین نمونه‌ها را در دما های ۴۵، ۶۵ و ۸۵ سلسیوس به مدت ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ ساعت با نسبت‌های ترکیباتی مختلف از سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات ساخته و در نهایت مقاومت فشاری را از چند ساعت تا ۷ روز بررسی کرد که مقاومت ۷ روزه به مقدار ۵۷ مگاپاسکال رسید[2]. همچنین محمد ابراهیم و همکاران، در تحقیقی دیگر، تأثیر نانو سیلیس بر نمونه‌های خمیر ژئوپلیمری ساخته شده با پوزولان معدنی (اسکوریا) را در دمای محیط مورد بررسی قرار دادند [3] .

D. Stephan و همکاران نیز در تحقیق خود، ریز ساختار و دوام خمیرهای پلیمری ساخته شده با پوزولان‌های طبیعی را بررسی کردند. در این تحقیق آن‌ها به بررسی اثر فعال‌کننده قلیایی بر خواص مکانیکی پرداختند. همچنین نمونه‌هایی را که با میزان غلظت های ۲/۵، ۵، ۷ و ۱۰ مولار، از سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید که در دما های ۴۰، ۶۰ و حالت اتوکلاو در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس به مدت سه ساعت عمل‌آوری شده بود را مقایسه کردند[4]. در تحقیقی دیگر E. Ghorbel و همکاران در مقاله-ای به بهینه‌سازی روباره آهن برای ساخت ملات قلیایی بر پایه متاکائولن پرداختند [5]. Junjie Wang نیز به همراه همکاران خود با توجه به نتایج تحقیقی که انجام دادند، تأثیر این بهینه‌سازی را تأیید می‌کند.[6]

John L. Provis و همکاران در پژوهشی، هفت منبع حاوی کلسیم سیلیکات از جمله متاکائولن، سرباره کوره، سیمان و چهار نوع پوزولان طبیعی موجود در استرالیا را به‌عنوان فاز جامد با محلول قلیایی در سه نسبت ۲ به ۱، ۱/۵ به ۱ و ۱/۲ به ۱ سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید مورد بررسی قرارداده و دریافتند مقاومت در نمونه‌هایی که با نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ۱/۵ به ۱ ساخته شده دارای مقاومت فشاری بیشتری نسبت به سایر نسبت‌ها است[7]. در تحقیقی دیگر W. Chalee و همکاران، اثر تغییر مولاریته سدیم هیدروکسید در ساخت ملات قلیایی ساخته شده با خاکستر ذغال سنگ را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها سدیم هیدروکسید با مولاریته ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶و ۱۸ را با نسبت ثابت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ۲/۵ به ۱ ترکیب و سپس برای ساخت ژئوپلیمر با ضریب ۶۰ درصد از مواد خاکستر ذغال‌سنگ به محلول قلیایی اقدام کردند و دریافتند که با افزایش مولاریته سدیم هیدروکسید، مقاومت فشاری افزایش می-یابد.[8]

رنجبر و همکاران نیز به وسیله تکنولوژی پرس‌گرم توانستد یک خمیر با مقاومت بالا با ژئوپلیمر بر پایه خاکستر آتشفشان موجود در منطقه خاش بسازند. آن‌ها در این تحقیق اثر زمان و دمای عمل-آوری را بر روی نمونه‌های مورد نظر بررسی نموده و از سدیم-هیدروکسید ۸ مولار و سدیم‌سیلیکات مایع استفاده کردند و با نسبت ۲/۵ به ۱ با خاکستر آتشفشان ترکیب و در قالب مخصوص قرار داده و همزمان با فشار و حرارت بالا، عمل‌آوری خمیر را در زمان کوتاه انجام دادند. پس از گذشت حدود نیم ساعت، خمیر سخت شده آماده و به مقاومت فشاری ۱۸۰ مگاپاسکال رسید[9].

همچنین آن‌ها در تحقیقی دیگر، اثر دما و فشار را در این تکنولوژی بررسی کردند که در نهایت دریافتند پارامترهای دما، زمان و فشار در کیفیت و مقاومت این ملات که بر پایه خاکستر داسیت ساخته شده، تأثیرگذار است.[10]

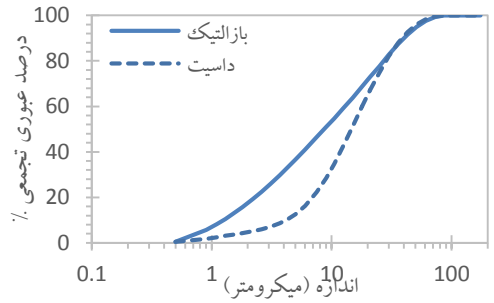
در ایران، منطقه خاش یکی از بهترین و فراوان‌ترین منابع سنگ‌های پوزولانی را در اختیار دارد. از این رو بررسی تأثیر سنگ‌های مختلف پوزولانی بر کیفت این نوع سیمان بسیار مفید به نظر رسید. در این تحقیق تأثیر دو نوع از سنگ‌های اشاره شده بر خواص مکانیکی بتن‌های پلیمری قلیایی، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. همچنین، پارامترهایی ازجمله نسبت استفاده از مواد فعال‌کننده قلیایی و نیز دمای مورد نیاز جهت عمل‌آوری بهتر این ژئوپلیمر مورد بررسی قرارگرفت. به منظور تحلیل دقیق‌تر، مقاومت فشاری، تأثیر اندازه ذرات و نتایج آزمایش‌های میکروسکوب الکترونی روبشی و اندازه گیری تخلخل به روش MIP[1] نیزمورد بحث و بررسی قرار گرفته شد.

۲- مصالح و روش کار

در این تحقیق برای بررسی نمونه‌های خمیر ژئوپلیمر، دو نمونه متفاوت از خاکستر آتشفشان با نام‌های داسیت و بازالتیک از کوه‌های تفتان در منطقه خاش به صورت آسیاب شده تهیه شد که در شکل ۱، اندازه ذرات دو نمونه که با آزمایش PSA[2] بدست آمده، قابل مشاهده است. در این آزمایش توزیع ذرات با استفاده از دستگاه پراش‌سنجی لیزری شرکت آلمانی Sympatec Helos ارزیابی شد. متوسط اندازه ذرات در خاکستر بازالتیک و داسیت به ترتیب برابر با ۸/۶۸ و ۱۴/۶۵ میکرومتر بوده و کوچکترین اندازه بدست آمده ۱/۲۶ و ۴/۱۹ میکرومتر و بزرگترین اندازه دانه به‌دست آمده ۷۱/۱۲ و ۶۸/۹۸ میکرومتر ثبت شد. همچنین آنالیز شیمیایی مربوط به هر کدام از خاکسترها در جدول ۱، بدست آمده از آزمایش XRF[3] و نتایج ترکیبات اکسید هر یک از خاکسترها نیز توسط دستگاه فلوئورسانس اشعه ایکس شرکت PANalytical Axios آنالیز شده است.

جدول۱- آنالیز شیمیایی خاکستر داسیت و بازالتیک

ترکیب	SiO2	Al2O3	CaO	Fe2O3	Na2O	MgO	K2O	TiO2	LO.I
داسیت	٤٦/٨	١٣/٥	١٩/١	٨/٥	٤/١	١/٧	٤/٣	٠/٩	٢/٩
بازالتیک	٥٥/٣	١٣/٥	١٥/٥	٣/٨	٢/٨	٢/٧	٢	٠/٧٥	١/٧



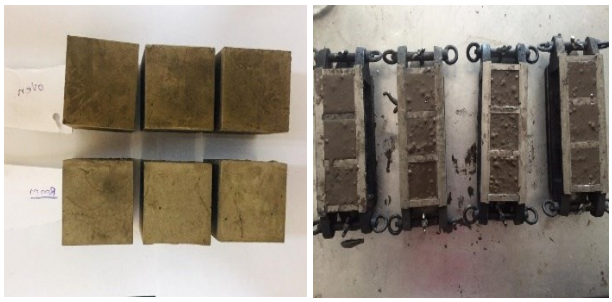
شکل۱- آزمایش اندازه ذرات خاکسترهای داسیت و بازالتیک

برای ساخت ژئوپلیمر علاوه بر فاز جامد که خاکستر می باشد، نیاز به مایع قلیایی است که در این تحقیق از سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات استفاده شد. سدیم سیلیکات به صورت مایع با جرم مولی ۲/۴ گرم بر مول از شرکت صنایع سیلیکات ایران تهیه شد و سدیم هیدروکسید استفاده شده در این آزمایش نیز از نوع آزمایشگاهی با خلوص ۹۹ درصد بوده که از شرکت کاوه‌آزما تهیه گردید. در ساخت این محلول لازم است تا سدیم هیدروکسید که به صورت ذرات فعال نشده می‌باشد در آب حل شود تا به یون های سازنده خود Na^+ و OH^- تبدیل گردد. این میزان در این آزمایش ۸ مولار ثابت در نظر گرفته شده‌است. برای ساخت محلول سدیم هیدروکسید ۸ مولار نیز جرم مولی سدیم هیدروکسید که برابر ۳۹/۹۹ گرم بر مول است را در تعداد مول مورد نیاز ضرب نموده، سپس به مقدار به دست آمده، یک لیتر آب مقطر اضافه شد. این مواد پس از ترکیب به خوبی با یکدیگر ترکیب شده و از آنجا که ترکیب آب با سدیم‌هیدروکسید، واکنشی گرمازا است، اجازه داده می شود تا محلول به طور کامل سرد شود. پس از مدت زمان ۲۴ ساعت، سدیم سیلیکات را به محلول سدیم هیدروکسید ۸ مولار با دو نسبت ۲/۵ به ۱ و ۲ به ۱ از سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ترکیب نموده و هر کدام در یک بطری دردار

[1]-Mercury Intrusion Porosimetry
[2] Particle Size Analysis
[3]-X-ray fluorescence

نگهداری شد تا از تبخیر آب موجود در محلول جلوگیری شود. پس از آماده شدن محلول، با نسبت های ۲/۵ به ۱ و ۲ به ۱ از سدیم‌سیلیکات به سدیم‌هیدروکسید که با نسبت ۵۰ و ۶۰ درصد با خاکستر داسیت و بازالتیک در مخلوط‌کن به مدت سه دقیقه ترکیب شده و سپس خمیر بدست آمده را در قالب های مکعبی با ابعاد ۵ سانتی متر ریخته و با ضربه به قالب، هوای موجود در ملات خارج شد(شکل۲-الف).

سپس قالب‌هارا در دمای محیط و ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده و پس از آن تا روز آزمایش، در دمای محیط که در بازه ۲۵ تا ۲۸ درجه سلسیوس متغیر بود نگهداری شد و در نهایت پس از گذشت ۷ و ۲۸ روز، سه نمونه از هر ترکیب، مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفت(شکل۲-ب). در شکل ۳، مراحل انجام کار به‌طور مرحله به مرحله نمایش داده شده است. انجام آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه های مکعبی ملات با ابعاد ۵ سانتی‌متر و با استفاده از استانداردهای،ASTM C109، ASTM C39 وASTM C170 انجام گرفت. در این آزمایش از یک جک فشاری اتوماتیک ۲۰۰تن شرکت اینفراتست استفاده شد. با توجه به استاندارد ها، پس از قرار دادن نمونه مکعبی زیر فک دستگاه، بارگذاری با سرعت ۰/۱۵ مگاپاسکال بر ثانیه انجام گرفت که این سرعت بارگذاری برای تمامی نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شد و میانگین نتایج حاصل از هر سه نمونه محاسبه شد.



شکل۲- الف: تصویر سمت راست پر کردن قالب ها با خمیر ساخته شده با خاکستر داسیت. ب: تصویر سمت چپ نمونه‌های ساخته شده با خاکستر داسیت بعد از ۲۸ روز(ردیف بالا عمل آوری در دمای ۶۰ و ردیف پایین عمل آوری در دمای محیط)

آنالیز SEM[1] یا میکروسکوپ اتمی برای دیدن نحوه تشکیل پیوند بین ذرات و ترک‌ها می باشد که نمونه ها با توجه به استانداردهای ASTM E766، ASTM E986 مورد آزمایش قرارگرفت. نمونه‌های دارای کمترین و بیشترین مقاومت فشاری از هر خاکستر برای انجام آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی در ابتدا توسط دستگاهی با طلا پوشش داده شدند تا رسانا شوند و کیفیت تصاویر

[1]- Scanning Electron Microscope

مطلوب شوند سپس در شرایط خلاء درون دستگاه قرار داده شدند و آزمایش انجام شد.

آزمایش تخلخل‌سنجی به روش تزریق جیوه به منظور بررسی وضعیت حفره‌های نمونه های خمیر ژئوپلیمر ساخته شده با خاکستر داسیت و بازالتیک استفاده شد. اندازه‌گیری تخلخل در این روش به این صورت است که جیوه با فشار بالا وارد حفرات نمونه شده و با اندازه گیری میزان فشار لازم برای مقابله با کشش سطحی مایع و ورود آن به حفرات می‌توان اندازه حفرات و توزیع خلل و فرج را تعیین نمود. به منظور تعیین توزیع حفرات از دستگاه Porosimeter PASCAL برای اندازه‌گیری حفره‌های ۶ نانومتر تا ۲ میکرون و ۲ میکرون تا ۲۰۰ میکرون استفاده شد.

۳- بحث و بررسی نتایج

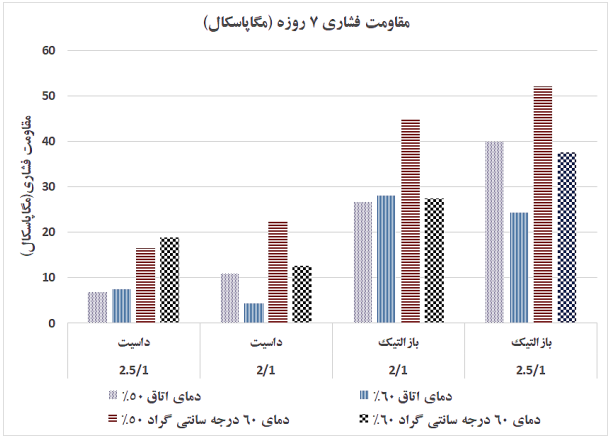
۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

در شکل ۴ که مربوط به مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌ها می‌باشد، مشاهده می شود که نمونه‌های بازالتیک از مقاومت بیشتری برخوردار می باشند. همچنین نمونه های با نسبت ۲/۵ به ۱ و نمونه هایی که در دمای ۶۰ درجه سلسیوس با نسبت ٪۵۰ از خاکستر به محلول عمل‌آوری شده‌اند، در سن ۷ روز از مقاومت بیشتری نسبت به سایر برخوردار بوده است. لذا می توان نتیجه گرفت دمای عمل‌آوری تأثیر محسوسی بر مقاومت فشاری این خمیرهای ژئوپلیمر داشته است که صحت این موضوع در بسیاری از مقالات تأیید شده که دمای عمل‌آوری یکی از مهم‌ترین پارامترها در بهبود خواص مکانیکی در سنین اولیه می باشد، چراکه باعث افزایش سرعت فرایند سخت شدن ژل ژئوپلیمر می شود[11].

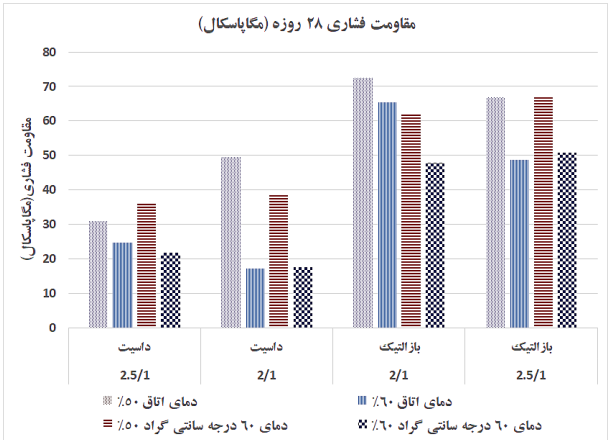
همچنین نمونه‌های بازالتیک به‌دلیل میزان سیلیس بیشتر دارای مقاومت فشاری به مراتب بالاتری بوده است به طوری که این تفاوت باعث شده در سن ۷ روزه مقاومت فشاری نمونه‌های بازالتیک بتواند تا ۵۲ مگاپاسکال مقاومت فشاری برای نمونه ساخته شده در دمای ۶۰ درجه سلسیوس را کسب کند. با افزایش میزان سیلیس موجود در سیستم سرعت جذب آب موجود در فعال‌کننده قلیایی افزایش یافته و باعث می شود روند ژئوپلیمریزاسیون با سرعت بیشتری رخ دهد.

در شکل ۵ که مربوط به مقاومت فشاری ۲۸ روزه است، مجدد مشاهده می شود که نمونه‌های بازالتیک داری بیشترین مقاومت می باشد.

با توجه به شکل۵ مشخص است با گذشت ۲۸روز مقاومت نمونه-های ٪۵۰ بیشتر از سایر نمونه‌ها می باشد، همچنین تفاوت مقاومت نمونه‌ها که در دمای محیط و دمای ۶۰ درجه سلسیوس عمل‌آوری شده‌اند در سن ۲۸ روز ناچیز می باشد. در سن ۲۸ روزه تأثیر دمای عمل‌آوری به ناچیز بوده و این به‌دلیل تبخیر آب موجود در تمامی خمیرها ژئوپلیمر طی ۲۸ روز بوده است لذا تأثیر دمای عمل‌آوری در سنین اولیه بیشتر می‌باشد[12]. اما همچنان تأثیر میزان سیلیس موجود در خاکستر بازالتیک بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز محسوس بوده و نشان می دهد پس از گذشت ۲۸ روز همچنان فرآیند ژئوپلیمریزاسون با سرعت کمتری نسبت به گذشته در حال انجام است.



شکل۴- مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه ها بر حسب مگاپاسکال



شکل۵- مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه ها بر حسب مگاپاسکال

جدول ۲- مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با خاکستر داسیت و بازالتیک در شرایط مختلف

نسبت ترکیب	خاکستر	مقاومت فشاری ۷ روزه (مگاپاسکال)				مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگاپاسکال)			
		دمای اتاق		دمای ۶۰ درجه سانتی گراد		دمای اتاق		دمای ۶۰ درجه سانتی گراد	
		50%	60%	50%	60%	50%	60%	50%	60%
2.5/1	داسیت	۶/۹۱	۷/۴۵	۱۶/۵۱	۱۸/۸۵	۳۰/۹۶	۲۴/۶۸	۳۶/۳۳	۲۱/۶۹
2/1	داسیت	۱۰/۹۱	۴/۳۶	۲۲/۶۷	۱۲/۵۷	۴۹/۴۴	۱۷/۰۹	۳۸/۶۱	۱۷/۵۲
2/1	بازالتیک	۲۶/۷۳	۲۸/۰۳	۴۵/۰۰	۲۷/۴۸	۷۲/۴۱	۶۵/۴۱	۶۱/۷۶	۴۷/۹۲
2.5/1	بازالتیک	۳۹/۹۲	۲۴/۲۸	۶۰/۰۰	۳۷/۵۲	۶۶/۸۱	۴۸/۷۶	۶۷/۱۵	۵۰/۸۰

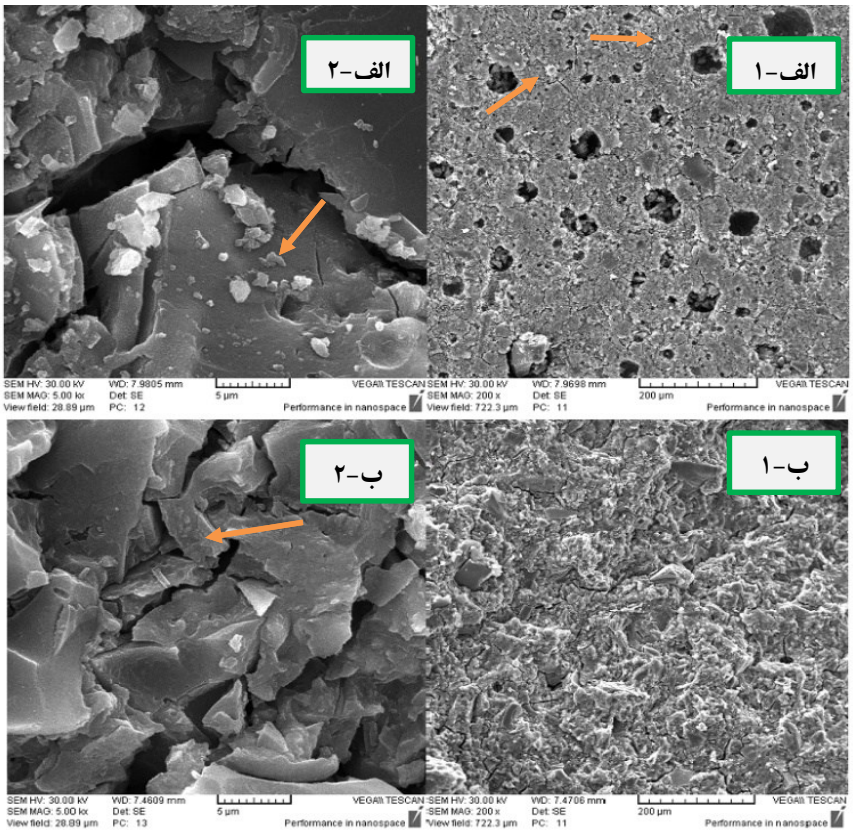
۳-۲-آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM)

شکل ۶-الف- تصویر SEM نمونه ۲۸ روزه ساخته شده با خاکستر داسیت که با نسبت ۲/۵ به ۱ سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید با ضریب ۵۰٪ محلول قلیایی به خاکستر در دمای ۶۰ درجه عمل آوری شده است.

همان طور که در تصویر الف-۱ که با مقیاس ۲۰۰ میکرون گرفته شده، نشان می‌دهد حفره‌های بوجود آمده در این نمونه به دلیل عمل‌آوری آن در دمای ۶۰ درجه سلسیوس اتفاق افتاده که این دما باعث شده آب موجود در فعال کننده قلیایی به سرعت تبخیر شده و هم‌زمان ژل ژئوپلیمر سخت شود و در نهایت این حفره‌ها در نمونه باقی بماند. در تصویر الف-۲ که با مقیاس ۵ میکرون است، مقداری از ذرات را که در واکنش شرکت نکرده‌اند مشخص شده است. این تصویر نشان می‌دهد با توجه به آنالیز تعیین اندازه ذرات، خاکستر داسیت از ذرات بزرگتر برخوردار بوده و همین امر موجب شده تا ذرات کمتری در واکنش ژئوپلیمریزاسیون شرکت کند و یا به کندی این اتفاق رخ دهد. شکل ۶-ب، مربوط به SEM نمونه ۲۸ روزه خاکستر داسیت عمل‌آوری شده در دمای محیط با نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ۲ به ۱ و ضریب محلول قلیایی به خاکستر ۵۰ درصد می باشد. در تصویر ب-۱ که با مقیاس ۲۰۰ میکرون می‌باشد، بخوبی مشخص است که نمونه از حفره‌های بسیار کمتری برخوردار بوده و دلیل آن می‌توان به شرایط عمل آوری نمونه و دمای آن می باشد که در این نمونه تبخیر ناگهانی رخ نداده است و همین امر موجب شده که فرصت تشکیل ژل به صورت بهتری فراهم گردد. در تصویر ب-۲ با زوم بیشتر و مقیاس ۵ میکرون به خوبی این سطح به نمایش درآمده است که می توان ترک‌های بسیار را مشاهده نمود که می توان به دلیل درصد پایین سیلیس و همچنین احتمال کریستالی بودن فازهای ماده اشاره نمود، چراکه در صورت کریستالی بودن ماده باعث می شود تا ژل به درستی تشکی نگردد و در نهایت موجب کاهش خواص مکانیکی گردد [۱۳].

در شکل ۷-الف، از نمونه ۲۸ روزه ساخته شده با خاکستر بازالتیک که با نسبت ۲/۵ به ۱ سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید و ضریب ۵۰ درصد محلول قلیایی به خاکستر که در دمای ۶۰ درجه عمل‌آوری شده، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی در دو مقیاس تصویربرداری شده است. در تصویر الف-۱ که با مقیاس ۲۰۰ میکرون گرفته شده است، سطحی نمایش داده شده است که دارای حفره‌های با قطرهای مختلفی است که از ۶۳ تا ۱۸۳ میکرون می باشند و دلیل ایجاد این حفره تبخیر شدن آب موجود در نمونه هنگام عمل‌آوری بوده و یا می‌تواند هوایی باشد که هنگام عمل-آوری در نمونه باقی مانده است باشد.

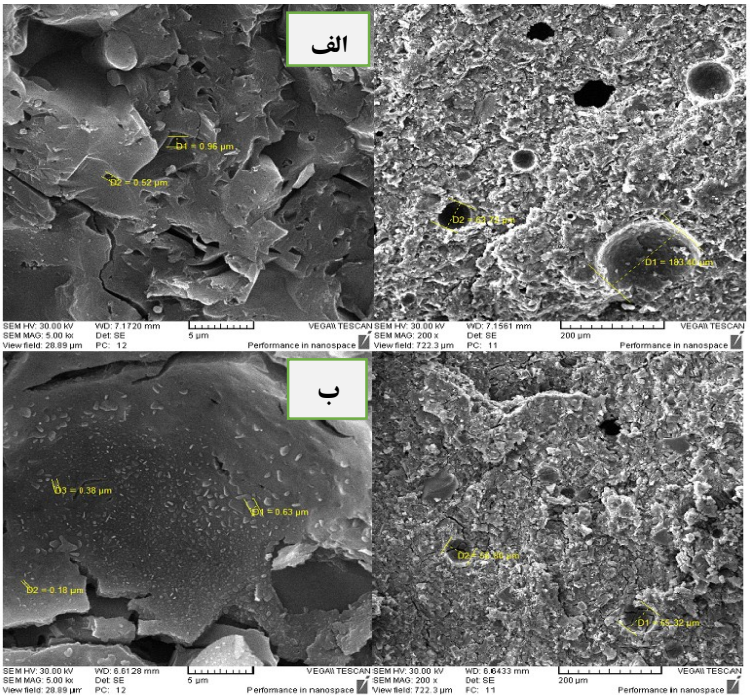
در تصویر الف-۲ مشخص است که ذرات به خوبی در واکنش شرکت کرده اند و فقط ترک های بسیار کوچک و تعدادی حفره بجای مانده است که می توان با توجه به نتایج حاصل از آزمایش تعیین ذرات، به ریز بودن ذرات خاکستر بازالتیک نسبت به خاکستر داسیت اشاره نمود، همین امر موجب شده تا ذرات به خوبی در ژئوپلمیرازیسون شرکت کنند. تصویر SEM نمونه ی ساخته شده با خاکستر بازالتیک در شکل ۷-ب نمایش داده شده که این نمونه با نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ۲ به ۱ و با نسبت محلول قلیایی به خاکستر ۵۰ درصد در دمای محیط عمل‌آوری شده است.



شکل۶- تصویر SEM نمونه ۲۸ روزه خاکستر داسیت-الف) بانسبت ۲/۵ به ۱ عمل‌آوری شده با دمای ۶۰ درجه و ضریب ۵۰ درصد

ب) با نسبت ۲ به ۱ عمل آوری شده با دمای محیط و ضریب ۶۰ درصد

(شماره ۱ بزرگنمایی ۲۰۰ میکرون و شماره ۲ بزرگنمایی ۵ میکرون)



شکل۷- تصویر SEM نمونه ۲۸ روزه خاکستر بازالتیک الف) بانسبت ۲/۵ به ۱ عمل‌آوری شده با دمای ۶۰ درجه و ضریب ۵۰ درصد

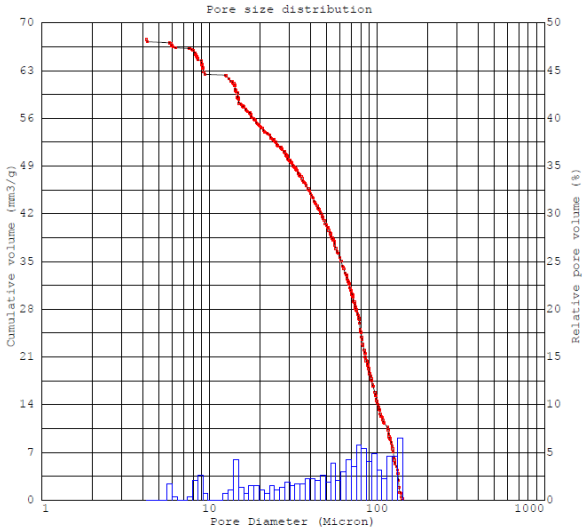
ب) با نسبت ۲ به ۱ عمل آوری شده با دمای محیط و ضریب ۶۰ درصد

(تصاویر سمت راست بزرگنمایی ۲۰۰ میکرون و سمت چپ بزرگنمایی ۵ میکرون)

در تصویر ب-۱ با مقیاس ۲۰۰ میکرون، سطح نمونه با حفره هایی به اندازه تقریبی ۶۵ میکرون قابل مشاهده است که همانطور که قبلا اشاره شد دلیل ایجاد این حفره‌ها می‌تواند محبوس شدن هوا در هنگام عمل‌آوری باشد و یا تبخیر بخشی از آب موجود در ترکیب باشد. در تصویر ب-۲ که با مقیاس ۵ میکرون گرفته شده‌است، سطح همواری را نشان می دهد که ذرات بسیار ریز با اندازه تقریبی ۰/۵ میکرون به صورت فعال نشده بر روی سطح قرارگرفته‌اند. نمونه‌های ساخته شده با خاکستر بازالتیک دارای سطح منسجم و یکپارچه و همچنین ذرات کمتری به‌صورت فعال نشده باقی مانده‌اند که می‌توان به آمورف بودن فازهای این ماده نیز اشاره نمود که باعث شده ذرات در تشکیل ژل به‌خوبی عمل کنند و در نهایت بر بهبود خواص مکانیکی نیز تأثیرگذار باشد [13].

۳-۳- آزمایش اندازه‌گیری تخلخل به وسیله تزریق جیوه(MIP)[1]

جهت بررسی تخلخل، پس از بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری، دو نمونه که دارای کمترین و بیشترین مقاومت بوده‌اند را انتخاب و به آزمایشگاه جهت انجام آزمایش MIP ارسال گردید که نتایج در شکل ۸ و ۹ قابل مشاهده می‌باشند. در گراف بدست آمده از تست MIP مربوط به نمونه ساخته شده با خاکستر داسیت که با نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ۲ به ۱ و ضریب محلول قلیایی به خاکستر ۶۰ درصد که در دمای محیط عمل‌آوری شده است، درشکل ۸ قابل ملاحظه است. بردار عمودی سمت چپ، حجم تجمعی بر حسب میلی‌مترمکعب بر گرم و بردار عمودی سمت راست، حجم نسبی منافذ و بردار افقی پایین، قطر منافذ و بردار افقی بالا، توزیع اندازه منافذ را نشان می‌دهند. همانطور که در شکل مشخص است مجموع حجم تجمعی برابر با ۶۷/۵ میلی‌متر مکعب بر گرم می‌باشد. همچنین میانگین قطر منافذ حدود ۱۳۶/۸ میکرون به‌دست آمده است. در این نمونه تعداد حفره‌ها و همچنین اندازه آن‌ها تحت‌تأثیر اندازه ذرات خاکستر داسیت بوده که به دلیل اندازه بزرگ ذرات حفره‌ها نیز می‌تواند بیشتر و بزرگتر باشد. از طرفی با توجه به آنالیز SEM خاکستر داسیت در صورت کریستالی بودن فاز تشکیل‌دهنده ژل ژئوپلیمر می‌تواند به عدم فعال شدن تمامی ذرات و شرکت نکردن در ژئوپلیمرازیسیون شود که در تحقیقات گذشته به آن اشاره شده‌است که ژئوپلیمرهای دارای فاز کریستالی ساختارشان به‌صورت متخلخل می باشد [14]. از طرفی با توجه به اینکه این نمونه از ۶۰ درصد مواد فعال‌کننده قلیایی به خاکستر داسیت ساخته شده است، بنابراین مقدار آب موجود در نمونه بیشتر بوده و تبخیر آن می‌تواند به اضافه شدن حفره‌ها منجر شود.

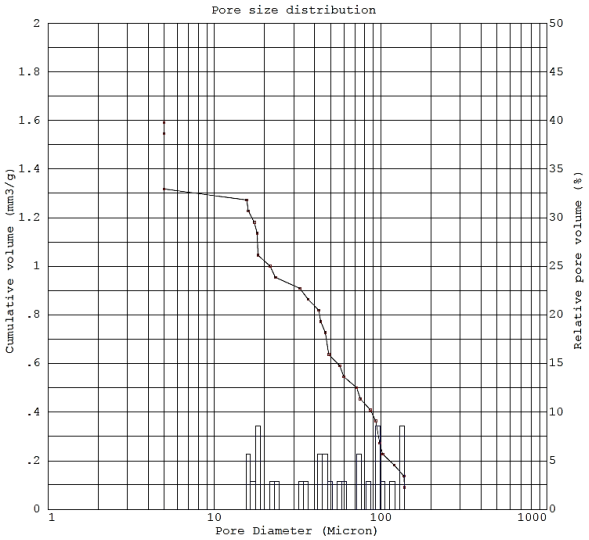


شکل۸- تخلخل نمونه خاکستر داسیت با نسبت ۲ به ۱ و ضریب ۶۰ درصد و عمل‌آوری شده در دمای محیط

گراف به‌دست آمده از تست MIP مربوط به نمونه ساخته شده با خاکستر بازالتیک که با نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید ۲/۵ به ۱ و ضریب محلول قلیایی به خاکستر ۵۰ درصد که در دمای محیط عمل‌آوری شده است، درشکل ۹ قابل ملاحظه است. بردار عمودی سمت چپ، حجم تجمعی بر حسب میلی‌متر مکعب بر گرم و بردار عمودی سمت راست، حجم نسبی منافذ و بردار افقی پایین، قطر منافذ و بردار افقی بالا، توزیع اندازه منافذ را نشان می‌دهند. همانطور که در شکل مشخص است مجموع حجم تجمعی برابر با ۱/۵۹ میلی‌متر مکعب بر گرم می‌باشد. همچنین میانگین قطر منافذ حدود ۱۳۴/۳ میکرون به‌دست آمده است و تخلخل نمونه حدود ۱/۶ درصد می باشد. در این نمونه با توجه به نتایج حاصل از آنالیز تعیین اندازه ذرات، خاکستر بازالتیک از ذرات بسیار کوچکتری نسبت به خاکستر داسیت تشکیل شده است

[1] -Mercury Intrusion Porosimetry

و همین امر موجب شده تا ساختار منسجم‌تری در ساخت خمیر ژئوپلیمر حاصل شود و فضای بین ذرات بسیار کوچکتر شوند. از طرفی با توجه به نتایج حاصل از میکروسکوب الکترون روبشی فاز آمورف این ماده به نسبت بیشتر از نمونه‌های داسیت بوده و همین امر باعث شده تا ذرات بیشتری در ژئوپلیمرازیسیون شرکت داشته باشند و ساختار ژل تشکیل شده از انسجام بسیار مناسبی برخوردار باشد. همانطور که در تحقیقات گذشته نشان داده شده است ژئوپلیمرهای دارای فاز آمورف از ساختار فشرده و منسجم برخوردار می‌باشند[15]. از طرفی با توجه به اینکه نسبت فعال کننده قلیایی در این نمونه ۵۰ درصد می باشد، آب کمتری در نمونه وجود داشته و تبخیر کمتری اتفاق افتاده است و و در نتیجه ساختار دارای حفره‌های کمتر و کوچک‌تر می‌باشد.



شکل۹- تخلخل نمونه خاکستر بازالتیک با نسبت ۲/۵ به ۱ و ضریب ۵۰ درصد و عمل‌آوری شده در دمای محیط

٤- نتایج

از آزمایش مقاومت فشاری برای هر دو پوزولان داسیت و بازالتیک، می‌توان نتیجه گرفت نمونه‌های ساخته شده با خاکستر بازالتیک دارای مقاومت فشاری بالاتری نسبت به مقاومت فشاری نمونه داسیت می‌باشد، به طوری که بیشترین مقاومت فشاری نمونه بازالتیک ۷۲ مگاپاسکال بوده، درحالی که برای نمونه داسیت ۴۹ مگاپاسکال می‌باشد. که نشان داده شد دمای عمل‌آوری در سنین الیه بسیار تأثیرگذار است اما در سن ۲۸ روز اندازه ذرات و همچنین میزان سیلیس موجود در خاکسترها از اهمیت بالاتری برخوردار هستند. همچنین در آزمایش SEM سطح پوزولان ها، که تفاوت سطح این دو پوزولان در تصاویر میکروسوپی مشخص کرد در نمونه‌های ساخته شده با پوزولان بازالتیک دارای سطح یکپارچه و منسجم بودند و ذرات بیشتری در واکنش‌ها شرکت کرده بودند. همچنین بحث شد که خاکستر بازالتیک می‌تواند درای فاز آموف بیشتری بوده درحالی که خاکستر داسیت دارای فاز کریستالی می‌باشد. از طرفی دمای عمل‌آوری ۶۰ درجه سلسیوس باعث تبخیر آب و ایجاد حفره درون نمونه شده است. همچنین در آزمایش MIP مشخص شد نمونه ساخته شده با پوزولان داسیت دارای ساختار متخلخل می‌باشد در صورتی که نمونه ساخته شده با پوزولان بازالتیک دارای ساختار توپر و منسجم‌تری می‌باشد. به این دلیل که خاکستر بازالتیک باتوجه به آزمون تعیین اندازه ذرات دارای ذرات ریزتری نسبت به خاکستر داسیت بود که همین امر باعث شده تا فضای بین ذرات در نمونه خاکستر بازالتیک کوچکتر شود و از طرفی آمورف بودن ذرات باعث شده‌است تا ژئوپلیمرازیسیون به‌خوبی انجام شود. در این حالت ژل به‌صورت منسجم تشکیل شده و در نتیجه نمونه دارای تخلخل کمتری نسبت به داسیت باشد.

٥- مراجع

[1] Davidovits J. Inorganic polymeric new materials. J Therm Anal. 1991;37.
[2] Kani EN, Allahverdi A. Effects of curing time and temperature on strength development of inorganic polymeric binder based on natural pozzolan. Journal of materials science. 2009;44(12):3088-97.
[3] Ibrahim M, Johari MAM, Rahman MK, Maslehuddin M, Mohamed HD. Enhancing the engineering properties and microstructure of room temperature cured alkali activated natural pozzolan based concrete utilizing nanosilica. Construction and Building Materials. 2018;189:352-65.
[4] Firdous R, Stephan D, Djobo JNY. Natural pozzolan based geopolymers: a review on mechanical, microstructural and durability characteristics. Construction and Building Materials. 2018;190:1251-63.
[5] Hasnaoui A, Ghorbel E, Wardeh G. Optimization approach of granulated blast furnace slag and metakaolin based geopolymer mortars. Construction and Building Materials. 2019;198:10-26.

[6] Xie J, Wang J, Rao R, Wang C, Fang C. Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. Composites Part B: Engineering. 2019;164:179-90.
[7] Yip CK, Lukey GC, Provis JL, van Deventer JS. Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation. Cement and Concrete Research. 2008;38(4):554-64.
[8] Chindaprasirt P, Chalee W. Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site. Construction and Building Materials. 2014;63:303-10.
[9] Ranjbar N, Kashefi A, Maheri MR. Hot-pressed geopolymer: Dual effects of heat and curing time. Cement and Concrete Composites. 2018;86:1-8.
[10] Ranjbar N, Kashefi A, Ye G, Mehrali M. Effects of heat and pressure on hot-pressed geopolymer. Construction and Building Materials. 2020;231:117106.
[11] Bondar D, Lynsdale C, Milestone N, Hassani N, Ramezanianpour A. Effect of heat treatment on reactivity-strength of alkali-activated natural pozzolans. Construction and Building Materials. 2011;25(10):4065-71.
[12] Bondar D, Lynsdale CJ, Milestone NB. Alkali-activated natural pozzolan concrete as new construction material. ACI Materials Journal. 2013;110(3):331.
[13] Djobo JNY, Elimbi A, Tchakouté HK, Kumar S. Volcanic ash-based geopolymer cements/concretes: the current state of the art and perspectives. Environmental Science and Pollution Research. 2017;24(5):4433-46.
[14] Duxson P, Provis JL, Lukey GC, Mallicoat SW, Kriven WM, Van Deventer JS. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2005;269(1-3):47-58.
[15] Rovnaník P. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. Construction and building materials. 2010;24(7):1176-83.
[16] Kriven WM, Bell JL, editors. Effect of alkali choice on geopolymer properties. 28th International Conference on Advanced Ceramics and Composites B: Ceramic Engineering and Science Proceedings; 200.

Investigation of Mechanical Properties and Porosity of Inorganic Polymer Concrete Using Inorganics Polymers in Khash Area

Milad Kiali
Department of Civil Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.
Mohammad Mahdi Jabbari*
Department of Civil Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

Abstract

Due to the importance of the use of pozzolans in this study, we attempted to better understand the available pozzolans in Khash region. Therefore, two different rocks from Khash region were investigated for quality assessment. These two rocks are dacite and basaltic and after mill they are called dacite and basaltic ash. In this study, two different types of concrete were designed using inorganic polymer made from the mentioned ash and their mechanical properties were investigated, which significantly showed that the basaltic ash had higher compressive strength, so that the highest compressive strength was obtained from samples made with 72 MPascal basaltic ash. However, the highest compressive strength obtained from specimens made with dacite ash is 49 MPascal. Scanning electron microscopy also showed that many particles were not reacted in samples made with dacite ash. Also, mercury injection porosity test showed that samples made with dacite ash had more porosity than basaltic samples.

Keywords: Inorganic polymer, Dacite, Basaltic, Khash Area, Compressive strength, porosity.

* Corresponding Author: mmjabbari@yahoo.com