مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره بیست یکم، شماره ٦، سال ١٤٠٠

نگاه مروری بر خواص و ویژگی های بتن ژئوپلیمری با مواد پایه مختلف

کمیل مومنی[1*] ، سید امیرعلی صحاوی[2] ، کامیاب نقدی[3]

۱. استادیار فنی گروه مهندسی عمران دانشگاه فنی و حرفه ای،دانشکده فنی امام صادق آستانه اشرفیه، گیلان
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی واحد رشت
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه گیلان

Kmomeni@tvu.ac.ir*

تاریخ دریافت: تاریخ پذیرش:

چکیده

امروزه بتن به عنوان پرمصرف ترین و رایج ترین مصالح ساختمانی، در توسعه زیرساخت‌های عمرانی و اقتصادی به کار می‌رود. بتن از سیمان پرتلند معمولی حاصل می‌شود و با توجه به میزان مصرف بالای بتن و نیاز روزافزون به تولید سیمان، پژوهشها نشان می‌دهد که در آینده میزان تقاضای بتن سیمانی افزایش خواهد یافت و از سوی دیگر تولید سیمان مستلزم مصرف منابع طبیعی از قبیل برق و سوخت فسیلی و همچنین رهاسازی حدود ۷ درصد از گاز CO2 به محیط است و فرآیند تولید آن بعد از فولاد و آلومینیوم بیشترین مصرف انرژی را دارد، به همین دلیل ارائه محصولات جایگزین برای حرکت در مسیر توسعه پایدار، اصلی ضروری به شمار می آید. در استراتژی‌های میان مدت و بلند مدت کاهش گرمایش جهانی ناشی از صنعت سیمان، توسعه تکنولوژی‌های به صرفه به لحاظ مصرف انرژی و کاهش دهنده انتشار CO2 و توسعه آنها در بازار بسیار کلیدی خواهد بود. قابلیت‌های سیمان ژئوپلیمری در زمینه ذخیره‌سازی انرژی و کاهش انتشار CO2 در مقایسه با سیمان پرتلند بسیار قابل توجه است به گونه‌ای که این تکنولوژی ضمن اینکه عملکردهای قابل مقایسه‌ای را با مواد سیمانی تجاری فراهم می‌آورد می‌تواند انتشار CO2 ناشی از صنعت سیمان را به اندازه80٪ کاهش دهد.

واژگان کلیدی: سرباره – خاکستر بادی – بتن ژئوپلیمر – متاکائولن – خواص مکانیکی

۱. مقدمه

کمیسیون جهانی محیط زیست مفهوم توسعه پایدار را به این صورت تعریف کرده است " توانایی برای رفع نیازهای فعلی ما بدون به خطر انداختن توانایی نسل آینده برای رفع نیاز های آنها " این تعریف نیاز ما را به در نظر گرفتن تمام جنبه‌های یک صنعت خاص از طریق عرضه مواد خام، مصرف انرژی و استفاده مجدد یا بازیافت است. از این جهت باید کمبود مواد خام کم هزینه در آینده سیمان و صنعت بتن را در نظر گرفت، زیرا در تولید سیمان مصرف از مواد مبتنی بر سنگ آهک معمولی است؛ باتوجه به پیشرفت و تولید روزافزون سیمان پرتلند،تنها می توان برای کمتر از ۵۹ سال دیگرسیمان تولید نمود [1]، صنعت بتن برای پاسخگویی به رشد مصرف آن با

چالش مواجه است و تقاضا از سیمان پرتلند با توجه به ذخایر محدود از سنگ آهک، مشکل ساز خواهد شد. در سال ۲۰۱۱ تولید سیمان جهان در حدود ۳،۶ میلیارد تن بوده است این به معنی آن است که بیش از ۳ میلیارد تن سنگ آهک برای تولید کلینکر نیاز است و با توجه به متوسط مصرف، محصول سنگ آهک روبه اتمام است ، بتن از مهمترین مصالح ساختمانی تولید شده توسط انسان بوده که از مصالح ساختمانی ارزان و با شکل پذیزی مناسب، شامل سیمان، آب، شن و ماسه (مصالح سنگی) و مواد افزودنی و مضاف، به نسبت‌های مختلف به دست می‌آید. با توجه به مصرف بالای بتن و نیاز روزافزون به تولید سیمان برای تهیه آن، اهمیت مسائل زیست محیطی برای تامین نیاز نسل فعلی ونسل‌های آینده ضرورت بازنگری در تولید بتن را آشکارتر ساخته است [2]، در فرآیند تولید هر تن سیمان بطور متوسط ۱۲۵ لیتر سوخت فسیلی و ۱۱۸ کیلووات ساعت برق مصرف می‌شود. از طرفی ۱۱/۹ درصد از حمل بار جاده‌ای کشور اختصاص به سیمان دارد. ضمن اینکه از تولید هر تن سیمان تقریبا یک تن گاز کربنیک تولید و گازهای آلاینده در اثر سوختن نفت کوره و برق مصرفی در کارخانجات سیمان، وارد محیط زیست می شود [2] سال‌های اخیر توجه به مسایل زیست محیطی و استفاده از مصالح ساختمانی سازگار با محیط زیست مورد توجه بسیاری از پژوهش‌گران و دولت‌ها قرار گرفته است از این رو تولید بتنی جدید و سازگار با محیط زیست که با استفاده از چسباننده‌های پوزولانی فعال شده باشد حس می‌شود، ترکیب شیمیایی آنها شبیه مواد زئولیتی بوده اما ساختار میکروسکوپی آنها به جای کریستالی، آمورف است [2]، آمورف ماده جامدی است که اجزای تشکیل دهنده آن به صورت بلوری و منظم کنار یکدیگر قرار ندارند. هر ماده‌ای حاوی آلومینات و سیلیکات که به صورت آمورف یا نیمه آمورف باشد و با محلول‌های قلیایی مانند هیدروکسید های قلیایی و سیلیکات‌های قلیایی ترکیب شود، پیوندهایی را شکل می‌دهد که دارای ساختاری سه بعدی و تکرار شونده هست، که آن را ژئوپلیمر می‌نامند [3] .اصطلاح ژئوپلیمر را اولین بار فردی به نام جوزف دیویدو ویتس پروفسور انستیتو ژئوپلیمری کشور فرانسه در سال ۱۹۷۹ مطرح کرد، او ژئوپلیمرها را به عنوان شاخه ای جدید از مواد آلومینا سیلیکاتی با ساختار سه بعدی معرفی نمود [2]، برای برون رفت از مشکل پیش رو می‌توان از موادی که در طبیعت موجود است برای ساخت سیمان سبز یا ژئوپلیمری و بدون آلاینده برای محیط زیست استفاده کرد و برای ساخت بتن و کاربرد آن در پروژه‌های مختلف بهره برد. پیشنهاد سیمان ژئوپلیمر به عنوان سیمان نسل سوم پس از آهک و سیمان پرتلند معمولی در نظر گرفته شده است.

۲. دلایل کاربرد سیمان ژئوپلیمر در بتن

فرآیند تولید سیمان ژئوپلیمری شامل یک مرحله فعالسازی حرارتی و سپس فعال سازی قلیایی است. مصالح اولیه آن در تمام جهان وجود دارد، به طوری که هر منبع آلومیناسیلیکاتی که قابلیت انحلال در محیط‌های شدید قلیایی را داشته باشد، می‌تواند به عنوان منبع تهیه این سیمان ها مورد استفاده قرارگیرد[4]. سیمان ژئوپلیمر استفاده شده در بتن در بیشتر موارد ۷۰٪ مقاومت فشاری نهایی را در چهار ساعت اول گیرش به دست می‌آورد [1]، دلیل آن این است که واکنش شیمیایی خمیر ژئوپلیمر که از خاکستر بادی فعال شده با قلیا، تشکیل یک فرآیند پلیمریزاسیون سریع نموده و مقاومت فشاری بعد از ۲٤ ساعت عمل آوری، با افزایش سن بتن، افزایش مشخصی نخواهد داشت. خواص مکانیکی و دوامی ژئوپلیمرها با مواد پایه مختلف هنوز کاملا شناخته نشده است. در این میان مطالعه عوامل مؤثر بر خواص این مصالح به منظور دستیابی به بالاترین مقادیر خواص مکانیکی و کمترین هزینه ضروری است. عوامل متعددی در واکنش ژئوپلیمریزاسیون تاثیرگزاراند که از جمله، دمای عمل‌آوری، غلظت محلول هیدروکسید قلیایی، اندازه سنگدانه، نسبت مصرفی مواد حاوی آلومینات و سیلیکات میتوان نام برد [5]. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که آب اضافه باعث کاهش انبساط حجمی و کاهش مقاومت مکانیکی می‌شود. افزایش بیش از حد غلظت ماده قلیایی باعث افزایش نامطلوب دانسیته می‌شود. همچنین با افزایش دما و زمان عمل آوری مقاومت مکانیکی افزایش می‌یابد [6]. دمای مناسب و بهینه تولید ژئوپلیمر با حداکثر استحکام 90 درجه سانتی‌گراد

است ژئوپلیمرها دارای مزیت‌های زیادی هستند که این امر باعث بوجودآمدن پتانسیل بالای استفاده از این ماده در زمینه‌های مختلف شده است [7].

۳. مزیت های بتن ژئوپلیمری

در این مقاله تلاش شده با مروری بر مقالات و کتاب‌های موجود، بتن‌های ژئوپلیمری بررسی و مزیت‌ها و کاربردهای آن ذکر شود. پژوهش‌ها نشان داده است که بتن ژئوپلیمر علاوه بر دارا بودن کلیه ویژگی‌های مکانیکی بتن با سیمان پرتلند معمولی دارای ویژگی‌های مهم دیگری مانند: ارازنتر بودن، مقاومت در برابر حمله سولفات‌ها و اسیدها و حملات شیمیائی، مقاومت در برابر آتش و یا در برابر آتش مبتنی بر مواد مرکب هیبرید آلی، کاهش تولید CO_2، فناوری آسان تولید، رفتار مناسب در برابر خزش و بعضاً کاهش انقباض نسبت به بتن‌های معمولی و ... اشاره کرد[1 ,8]. همچنین در بسیاری از پروژه‌های بزرگ مدیران پروژه علاقمند به استفاده از بتن‌هایی که در کمترین زمان ممکن، گیرش اولیه صورت پذیرد و بیشترین مقاومت را از خود در آن زمان اندک نشان دهد هستند که بتن ژئوپلیمری چنین ویژگی را در خود دارد، مواد اولیه‌ای که معمولا برای تولید این ماده استفاده می‌شوند، مواد آلومینوسیلیکاتی مانند کائولن، متاکائولن، سرباره‌های صنعتی، ضایعات ساختمانی، خاکستر بادی، سر باره کوره ذوب سرب، الیاف شیشه ای، خاکستر سبوس برنج و ... هستند، که همه این مواد یا ضایعات هستند و یا در طبیعت یافت می‌شوند و استفاده از آن ها نه تنها آلودگی ایجاد نمی‌کند، بلکه برای طبیعت سودمند نیز خواهند بود. خاکستر بادی و الیاف شیشه و ... معمولا به عنوان اجزاء ثانویه سیمانی، به نیمه جایگزین سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرند و مواد دیگر مانند خاک اره، دیاتومیت و بنتونیت را می توان به عنوان پرکننده برای بهبود کارایی خمیر تازه و یا قدرت نهایی آن، استفاده کرد، به منظور کاهش هزینه پرکننده خوب غیر سیمانی می توان از سنگ آهک گرانیتی و سلیس استفاده کرد[9]

٤. ماده پایه و ماده فعال ساز چیست

همانگونه که می‌دانید بتن ژئوپلیمر از دو بخش اصلی ماده پایه و ماده فعال ساز تشکیل شده است. ماده پایه در حقیقت ترکیبات آلومینوسیلیکاتی است و به همین جهت از آنجایی که پوزولان های طبیعی و مصنوعی منابع غنی از این گونه ترکیبات هستند، می توانند به عنوان ماده پایه استفاده شوند، پوزولان‌ها عبارت اند از مواد سیلیسی یا سیلیسی– آلومینی هستند که خود به تنهایی فاقد ارزش چسبانندگی بوده یا دارای ارزش چسبانندگی کم هستند، اما به شکل بسیار ریز در مجاورت با رطوبت طی واکنش شیمیایی با ماده فعال ساز در دمای معمولی ترکیب‌هایی با خاصیت سیمانی به وجود می آورند. این واکنش را واکنش پوزولانی می‌نامند، انواع پوزولان‌ها در پژوهشها توسط پژوهشگران متفاوت به عنوان ماده پایه به کار رفته‌اند.

همانگونه که گفته شد پوزولان‌ها بر دو نوع هستند:

۱. پوزولان‌های طبیعی خام یا تکلیس شده مانند خاکسترهای آتشفشانی
۲. پوزولان‌های صنعتی مانند خاکستر بادی، رس کلسینه، دوده سیلیس، سرباره ذوب آهن، خاکستر پوسته برنج و ...

بر اساس تعاریف ماده فعالساز نیز به محلولی با خاصیت قلیایی اطلاق میشود که موجب انحلال یون‌های آلومینیوم و سیلیسیم موجود در ماده پایه شده و با انجام واکنش، ترکیب خمیر ژئوپلیمری را تشکیل می دهد. محلول‌های سدیم هیدروکسید(سود)، پتاسیم هیدروکسید، سدیم سیلیکات (آب شیشه)، سدیم کربنات و پتاسیم سیلیکات از مهمترین محلول‌های فعالساز در پژوهشها به شمار می‌روند،

درمقایسه با سایر مواد قلیایی سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید سطح بیشتری از قلیائیت را نشان داده است. ماده فعال‌ساز متعددی برای فعال کردن پوزولان‌ها وجود دارد که ممکن است هر پوزولان با تعدادی از این مواد سازگاری داشته و باعث فعال شدن آن شود، انتخاب روش فعال‌سازی، با توجه به انتخاب پیش ماده صورت می‌گیرد .محلول فعال کننده برای انحلال پیش ماده عمل می‌کند و به پیش ماده اجازه می دهد تا به عنوان یک ماده پلیمری غیر آلی باز ساخته شود[10].

به عنوان نمونه ماده فعال ساز متاکائولن یک محلول دو ترکیبی شامل محلول هیدروکسید سدیم (NaOH) به همراه سیلیکات سدیم (Na2SiO) است و یا ماده فعال کننده قلیایی خاکستر بادی سیلیکات قلیایی و محلول هیدروکسید است برای انجام واکنش پلیمریزاسیون، محلول‌های فعال کننده قلیایی به آرامی و پیوسته روی پیش ماده‌ها ریخته شده و عملیات هم زدن با هم زن‌های مکانیکی آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا یک ماده خمیری کاملا همگن به دست آید، زمان مناسب هم زدن محلول قلیایی به پیش ماده‌ها بستگی دارد به عنوان نمونه متاکائولن حداقل 3 دقیقه با مخلوط‌کن، خاکستر بادی 5 دقیقه مخلوط دستی و 10 دقیقه با مخلوط کن، سرباره به مدت 15 دقیقه در یک همزن مغناطیسی با سرعت 120 دور در دقیقه و در نهایت ژلی به دست می آید که با گذشت زمان مرتبا سخت تر شد و ویسکوزیته آن افزایش می‌یابد [11].

۴ . ۱. اندازه سنگ دانه و تاثیر آن بر ژئوپلیمر

افزایش استحکام دما به اندازه نمونه‌های خمیر ژئوپلیمر بستگی دارد، تفاوت دما قابل توجه بین سطح و هسته حاکی از این ست که سطح مقطع نمونه ایجاد ترک حرارتی را القا می‌کند.بنابراین،سازگاری گرمایی که از گرادیان حرارتی ناشی می‌شود به احتمال زیاد دلیل تاثیر اندازه است.اندازه سنگ‌ها عامل مهمی در تعیین رفتار بتن ژئوپلیمر تحت دمای بالامی باشد برطبق نمودار شکل ۱ رفتار سنگدانه های کوچک تر باعث (کمتر از ۱۰ میلی‌متر) ترویج پوسته شدگی (پکیدن- قلوه کن شدن- پوسته شدن- سرشکن شدن- کنده شدن- پوسته انداختن- ورآمدن) و شکاف گسترده در بتون ژئوپلیمری در حالی که بتن ژئوپلیمری شامل سنگ دانه‌های بزرگتر (بزرگتر از ۱۰ میلی‌متر) در دماهای بالا ثبات بیشتری دارند. ناسازگاری حرارتی بین ماتریس ژئوپلیمر و مجموعه سنگدانه‌ها محتمل‌ترین علت از بیین رفتن قدرت در نمونه‌های بتن ژئوپلیمری در درجه حرارت بالا است. این مسئله مشخص شد با مقایسه بتن ژئوپلیمری با ۲ نوع سنگدانه با ویژگی‌های انبساط حرارتی متفاوت که در آن نمونه با ناسازگاری بیشتر منجر به اتلاف استحکام بالاتر می‌شود. نرخ گسترش سنگ دانه‌ها با دما، عامل موثر در عملکرد بتون ژئو.پلیمر تحت دماهای بالا است[12] .

شکل ۱.تاثیر سایز نمونه ها در رفتار ملات ژئوپلیمر

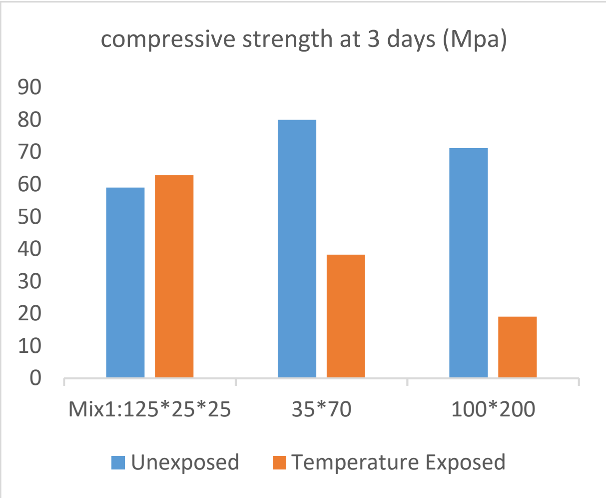

Fig1:compressive strength at 3 days (Mpa)

۵. بررسی تاثیر انواع ماده پایه

در پژوهش زیر برخی از مواد پایه مانند سرباره کوره آهنگدازی، سرباره ذوب آهن، سرباره ذوب مس، ضایعات متاکائولن، .... مورد بررسی قرار گرفتند.

۵ . ۱. بتن ژئوپلیمری با ماده پایه سرباره (مس، کوره آهنگدازی، آهن ،خاکستربادی)

۵ . ۱ . ۱. در تحقیق رمضانیان‌پور و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی تاثیر مقدار ماده پایه و نسبت آب به مواد سیمانی در نفوذ یون‌های کلراید در بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره کوره آهن گدازی پرداختند و سرباره کوره آهنگدازی را به عنوان ماده پایه و دو محلول پتاسیم هیدروکسید با غلظت 6 مولار و سدیم سیلیکات(آب شیشه) با مدول سیلیکاتی ۲/۳۳ به عنوان مواد فعالساز مورد استفاده قرار داد اند، جهت ارزیابی، طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری با هدف شناخت تاثیر مقدار ماده پایه انتخاب شده اند. یک طرح اختلاط بتن معمولی با سیمان پرتلند نیز برای مقایسه این دو نوع بتن در نظر گرفته شد در این پژوهش، خواص بتن تازه با استفاده از آزمایش افت اسلامپ و خواص مکانیکی بتن سخت شده از طریق اندازه‌گیری مقاومت فشاری در سنین 7، 28، 90و 180 روز ارزیابی شده است. از مقایسه

این دو نوع بتن (بتن‌های ژئوپلیمری با بتن‌های معمولی) مشاهده می‌شود که بتن‌های ژئوپلیمری با سرباره کوره آهنگدازی مقاومت و دوام نسبتا بهتر، میزان حرارت آزاد شده کمتر، دوام مطلوب در برابر حملات شیمیایی، مقاومت مناسب در برابر ذوب و یخ و نفوذپذیری کمتری نسبت به بتن‌های معمولی با سیمان پرتلند را دارد. در کنار آسیب‌های کمتر محیط زیستی، وجود مزایای یاد شده می تواند توجیه مناسبی برای بهره گیری از این نوع بتن‌ها باشد. اما این دسته از بتن‌ها عاری از معایب اجرایی نیستند. به صورت کلی این نوع بتن‌ها عموما به سرعت کارایی خود را از دست می‌دهند، همچنین به علت اندرکنش پارامترهای مختلف و تاثیر آنها بر خواص بتن ژئوپلیمری امکان پیش‌بینی مقاومت نهایی به سهولت بتن معمولی با سیمان پرتلند نیست .جمع شدگی زیاد، ایجاد شوره در سطح و واکنش قلیایی سنگدانه از دیگر معایب این نوع بتن‌ها است [12,11].

افزودن سدیم سیلیکات به مخلوط خمیر سیمان ژئوپلیمری با پایه روباره باعث افزایش پخش شدگی خمیر تازه و همچنین افزایش مقاومت فشاری میشود و همچنین نتایج نشان می‌دهد که در خمیرهای سیمان ژئوپلیمری، مقدار بهینه مدول سدیم سیلیکات برای رسیدن به حداکثر مقاومت فشاری برابر با ۲/۳۳ است قیاس الدین و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که عمل‌آوری ژئوپلیمرهای حاوی خاکستر بادی و سرباره کوره آهنگدازی در محلول نمک باعث دستیابی به مقاومت فشاری بالاتر و جذب مویینه کمتری نسبت به عمل آوری در آب می‌شود [13].

۵ . ۱ . ۲. در پژوهش درویش نژاد علی‌آباد و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی مشخصات مکانیکی بتن‌های ساخته شده با ضایعات متاکائولن، سرباره ذوب آهن و سرباره ذوب مس پرداختند و سرباره ذوب مس، ذوب آهن و ضایعات متاکائولن به عنوان ماده‌های پایه پرداخته و با یکدیگر مقایسه شده‌اند، در تمامی طرح‌های حاوی پوزولان شاهد کاهش جذب آب در مقایسه با طرح بدون پوزولان هستیم در این تحقیق به بررسی ویژگی‌های مکانیکی بتن ساخته شده در 16 طرح اختلاط با درصدهای مختلف جایگزینی سرباره ذوب مس، سرباره ذوب آهن و ضایعات متاکائولن پرداخته شده است، ابتدا سنگدانه‌های خشک، سپس مواد سیمانی پس از آن آب و در نهایت محلول فوق روان‌کننده به تدریج به مخلوط اضافه شد روی طرح‌ها در حالت تازه، آزمایش اسلامپ و در حالت سخت شده در سنین 7، 14، 28 و 90 روزه آزمایش مقاومت فشاری براساس استاندارد BS 1881 انجام گرفت [14].

نتایج آزمایش اسلامپ در شکل ۲ نشان می‌دهد که به طور کلی افزودن پوزولان‌ها با توجه به جذب آب بیشتری که در مقایسه با سیمان دارند در بیشتر حالات کاهش آب انداختگی و افت جریان پذیری بتن را باعث می‌شوند. با توجه به شکل ذیل مشاهده میکنیم تاثیر سرباره ذوب آهن روی افت اسلامپ، بیشتر از متاکائولن و سرباره ی مس است .در طرح‌های ترکیبی نیز، سرباره آهن نقش غالب را در افت اسلامپ ایفا میکند. علت این امر را میتوان به ریزتر بودن ذرات سرباره و متاکائولن نسبت داد که چون سطح مخصوص بزرگتری دارند جذب آب بیشتری نسبت به سیمان داشته و از کارایی بتن تازه کم می‌کند.

شکل ۲: نمودار نتایج آزمایش اسلامپ

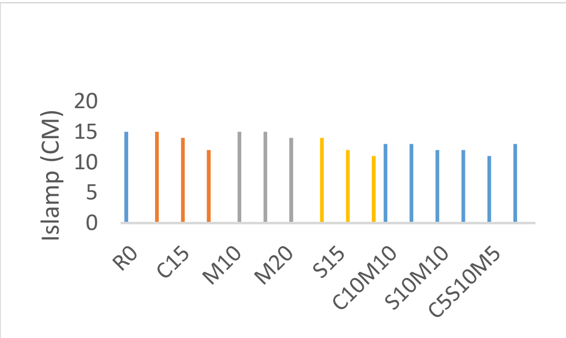

Fig2:Islamp (CM)

*در نامگذاری طرحها حرف C نشانگر سرباره ذوب مس، حرف S نشانگر سرباره ذوب آهن، حرف M نشانگر ضایعات متاکائولن و عدد سمت راست هر حرف نشانگر درصد جایگزینی پوزولان مربوطه است.

افزودن پوزولان به دلیل جذب آب بیشتر پوزولان‌ها، کاهش اسلامپ بتن را در پی دارد .کمترین نفوذ آب مربوط به طرح‌های حاوی ضایعات متاکائولن و بیشترین مربوط به طرح‌های حاوی سرباره ذوب مس است.

نتایج مقاومت فشاری نیز نشان می‌دهد که با بالا رفتن سن نمونه‌ها مقاومت فشاری آنها نیز افزایش می‌یابد .در طرح‌های

اختلاط این مطالعه نسبت آب به سیمان یکسان است .پس تأثیر این عامل در تمامی بتن‌ها یکسان بوده و عامل متغیر در این مطالعه درصد مختلف پوزولان در بتن است .در شکل (۲) مقایسه‌ای از مقاومت فشاری ارائه شده است. در تمامی طرح‌ها با افزایش سن شاهد افزایش مقاومت فشاری هستیم .در مقایسه بین درصدهای مختلف پوزولان که به تنهایی جایگزین سیمان شده‌اند، بیشترین مقاومت فشاری 7، 14 و۲۸ روزه مربوط به طرح حاوی ۱۰٪ ضایعات متاکائولن، و بیشترین مقاومت فشاری 90روزه مشترکا مربوط به طرح حاوی ۱۰٪ ضایعات متاکائولن و طرح حاوی 15 درصد سرباره ذوب آهن است . همچنین کمترین مقاومت فشاری در تمامی سنین مربوط به طرح حاوی ۲۰٪ سرباره ذوب مس است. با جایگزینی متاکائولن از صفر تا ۱۰ درصد شاهد افزایش مقاومت فشاری هستیم. روند افزایش مقاومت برای طرح‌های حاوی ضایعات متاکائولن مشابه طرح شاهد است. ولی با افزایش درصد جایگزینی بیش از ۱۰ درصد با توجه به خاصیت شبه سیمانی متاکائولن و کمتر بودن خاصیت چسبندگی آن نسبت به خود سیمان با افت مقاومت فشاری همراه شد تا جایی که بعد از 17 درصد جایگزینی مقاومت حاصل پایین‌تر از نمونه شاهد است. در نتیجه در طرح‌های حاوی ضایعات متاکائولن بهترین نتیجه مقاومت فشاری را از خود نشان داده است و در طرح‌های حاوی سرباره ذوب مس کمترین مقاومت فشاری را نشان میدهد و سرباره ذوب مس و آهن تاثیری بر مقاومت سنین پایین نداشته ولی در 90 روزگی افزایش مقاومت بتن را در پی دارند

از نتایج نفوذ آب تحت فشار نیز می توان دریافت که در تمامی حالات با جایگزینی پوزولان شاهد کاهش نفوذپذیری بتن و جذب آب هستیم که اکثر بتن‌های حاوی پوزولان‌ها در محدوده نفوذ کمتر از ۳۰ میلی‌متر قرار گرفتند. کمترین میزان نفوذ مربوط به طرح ترکیبی سه جزئی C5S5M10 است. همانطور در نفوذپذیری طرح‌های ترکیبی نیز مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار نفوذ پذیری مربوط به طرح حاوی ۱۰٪ ضایعات متاکائولن و سربارهی ذوب آهن است و کمترین مقدار مربوط به طرح حاوی ۱۰ درصد ضایعات متاکائولن به همراه 5 درصد از هرکدام سرباره‌ها است [16,15] .

۵ . ۲. بتن ژئوپلیمری با ماده پایه خاکستر بادی

۵ . ۲ . ۱. در پژوهش رنجبر و همکاران (۲۰۱۷)

به بررسی مقاومت فشاری بتن ساخته شده با پیش ماده‌های خاکستر بادی، نانو سیلیس و متاکائولن پرداخته شده و استحکام فشاری و عوامل تاثیر گذار بر آن در ملات ژئوپلیمیمورد بررسی قرار گرفته است، استحکام فشاری ملات‌های ژئوپلیمری پس از گذشت زمان 3، 7 و 28 روز در دماهای عمل آوری مختلف بر پایه‌های خاکستر بادی، متاکائولن در بازه بین 25 الی 62 مگا پاسکال قراردارد که استحکام مناسبی در مقایسه با ملات ساخته شده سیمان پرتلند را نشان می‌دهد همچنین با استفاده از مواد نانوسیلیس روی سیمان ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن و افزایش درصد وزنی آن از 0 به 6 درصد موجب افزایش قابل توجهی در استحکام فشاری تا حدود ۳۰ درصد شد [17].

۵ . ۲ . ۲. در تحقیق صورت گرفته توسط بابایی و همکاران (۲۰۱۶) که به بررسی خوردگی ناشی از کلرید در تقویت بتن ژئوپلیمر با ماده پایه خاکستر بادی پرداخته شد، مجموعه‌ای از آزمایش‌های ولتامتری با چرخه سرعتی مابین ۵ تا ۱۰ میلی وات در دقیقه مورد بررسی قرار گرفت به عنوان نمونه در آزمایش‌های دینامیکی (potentio) اندازه آن به قدر کافی آهسته بود که شرایط حالت پایدار را تضمین کنند، که برای جلوگیری از تخمین چگالی در جریان خوردگی مورد نیاز بود و همچنین سرعت آن به اندازه کافی سریع بود که تغییر تعادل الکترود با توجه به تغییر غلظت یون‌های پیرامون الکترود اجتناب کنند که در نتیجه منجر به برآورد کم چگالی جریان خوردگی می‌شود. پتانسیل خوردگی و مقادیر مقاومت پولاریزاسیون بعد از سقوط نیروهای کمکی در همان ناحیه از خطر خوردگی که انتظار می‌رود سیمان پرتلند بر پایه سیستم خوردگی اعمال شوند. از طرف دیگر، براساس طبقه‌بندی‌های مرجع که معمولا برای ارزیابی شدت خوردگی در بتن مسلح پرتلند مورد استفاده قرار می‌گیرد، پتانسیل خوردگی مدار باز نمونه‌های غیرفعال شده در مناطق خطر خوردگی بالا، کاهش یافت. این یافته حاکی از آن است که طبقه‌بندی‌های سنتی که برای سیمان پرتلند بر پایه سیستم خوردگی ایجاد شده‌اند ممکن است نیاز به ریکالیبراسیون (recalibrations) برای

استفاده برای سیستم های درحال پوسیدگی مبتنی بر ژئوپلیمر در هنگام ارزیابی نمونه های غیر فعال داشته باشند [18].

٥ . ٢ .٣. در تحقیق صورت گرفته توسط کاستل و همکاران (٢٠١٥) در مورد استحکام باند بین سرباره مخلوط و بتن ژئوپلیمر با ماده خاکستر بادی متوجه شدند از سوزاندن زغال سنگ، قیری خشک و خالص خاکستر بادی کلاس F تولید می‌شود. طبیعتاً پوزولان حاوی کمتر از ١٠درصد آهک (کلسیم اکسید) است، سیلیس شیشه و آلومینای خاکستر بادی کلاس F نیاز به ماده سیمانی همچون سیمان پرتلند، آهک سریع (آهک هیدراته دار) با حضور آب برای واکنش تولید ترکیبات سیمانی است. با توجه به پژوهش‌های کاستل و همکاران بعد از ٤٨ ساعت از دمای عمل آوری ٨٠ درجه سانتی‌گراد، عملکرد بتن ژئوپلیمر مشابه مخلوط مرجع سیمان پرتلند معمولی بود. برای مقاومت فشاری معادل، مقاومت پیوند بتن ژئوپلیمر اندکی بهتر از بتن مرجع سیمان پرتلند معمولی بود; 10 ٪ افزایش در استحکام اتصال به طور متوسط مشاهده شد. باند تقویتی بتن ژئوپلیمر بعد از ٢ روز عمل آوری گرمایی، برتری داشت نسبت به آن مواردی که از بتن مرجع بودن بعد از ٢٨ روز. این نتایج نشان می‌دهند که خاکستر بادی بتن ژئوپلیمر کلاس F به طور خاص برای سازه‌های پیش ساخته مناسب است [19].

٥ . ٢ .٤. در تحقیق صورت گرفته توسط ژانگ اوا و همکاران، روش مستقر سازی شکفتن ترکیب خاکستر بادی بر پایه ژئوپلیمر با اصلاح سیلان باعث شده که آبگریزی سطح جذب مویرگی آب و انتشار رطوبت به طور کامل سرکوب شده ،در نتیجه، شسته شدن، محلول یون قلیایی کاهش یافته شد[20].

آزمایش‌های sem , Ftir, Xps در شکل ٤ و ٥ و ٦ اثبات کرد که سیلان (مشخص شده) به صورت موفق پیوند میان سطح خاکستر بادی بر پایه ژئوپلیمر با پیوند شیمیایی به جای آن با جذب فیزیکی بهتری صورت گرفته است.

یک سازوکار قابل اجرا از اصلاح سیلان همچنین پیشنهاد شده است برای فرآیند واکنشی که در بالا توضیح داده شد.

شکل ٣: الگوهای XRD از محصولات فلورسانس جمع‌آوری‌شده از سطح

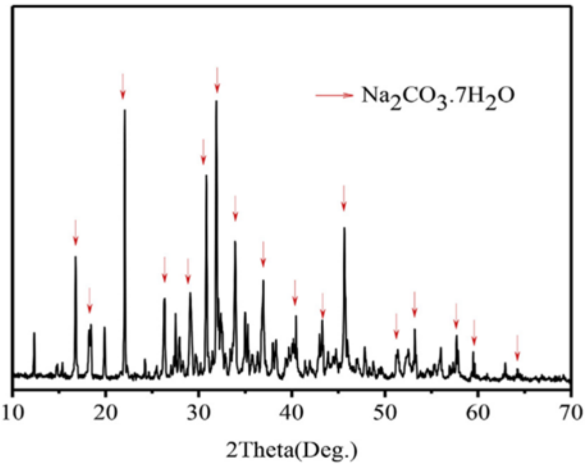

Fig3: XRD patterns of fluorescence products collected from the sample surface

شکل ٤: میانگین جذب آب مویرگی به‌عنوان تابعی از زمان بهره‌برداری

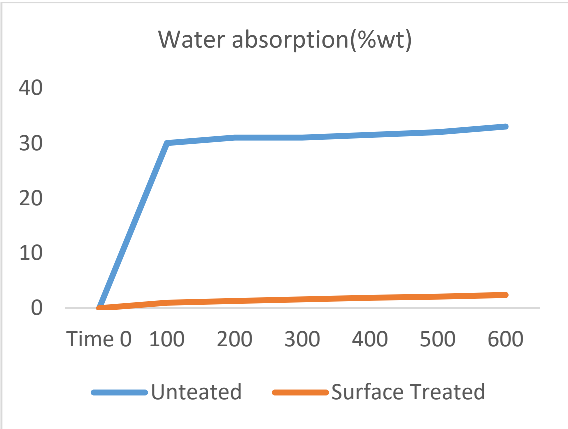

Fig4: Water Absorption

شکل ٥: (a و b) نمونه ژئوپلیمر ساده،(b) نمای بزرگ‌شده.(c و d) نمونه ژئوپلیمر تحت استفاده سیلان،(d) نمای بزرگ‌شده

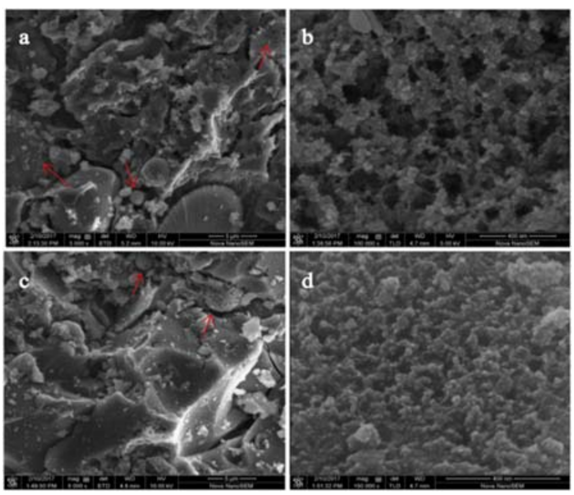

Fig5: (a and b) plain geopolymer sample, (b) enlarged view. (c and d) enlarged geopolymer sample, (d) enlarged view

شکل ٦: مشاهده بصری از تأثیر شکفتن ژئوپلیمر بهسازی سیلان

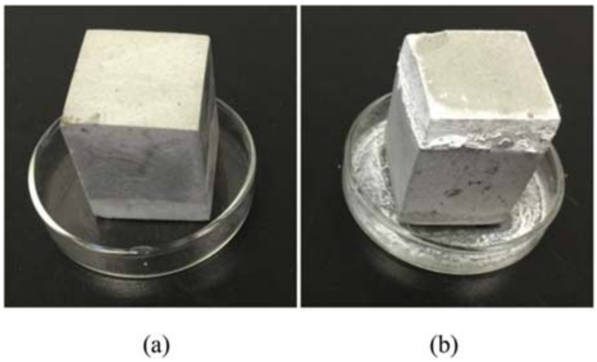

Fig6:Visual observation of the blossoming effect of Ceylon improved geopolymer

۵ . ۳. بتن ژئوپلیمری با ماده پایه متاکائولن

۵ . ۳ . ۱. براساس نتیجه گیری حاصل از مقاله آقای سیر و همکاران (۲۰۱٦) که به بررسی کربن سازی در محلول منافذ ژئوپلیمر مبتنی بر ماده پایه متاکائولن پرداختند متوجه شدند در ٣٦٥ روز ریسک حاصل از خوردگی در متاکائولین برپایه ژئوپلیمر که با سدیم سیلیکات فعال می شود قابل چشم پوشی است و فقط کربن دی اکسید حاصل از تشکیل ملات سیمان افزایش می‌یابد یا یک افزایش دمای چشمگیر که به مشکلات مقاومتی ناشی از کربناتسیون ختم می شود و نتایج به صورت نمودار در شکل ۷ نشان داده شده است [21].

شکل ۷: محلول منافذ ژئوپلیمر تا ٣٦٥ روز در شرایط درونزا نگهداری می‌شود. (a) مقیاس خطی و b) مقیاس لگاریتمی تکامل

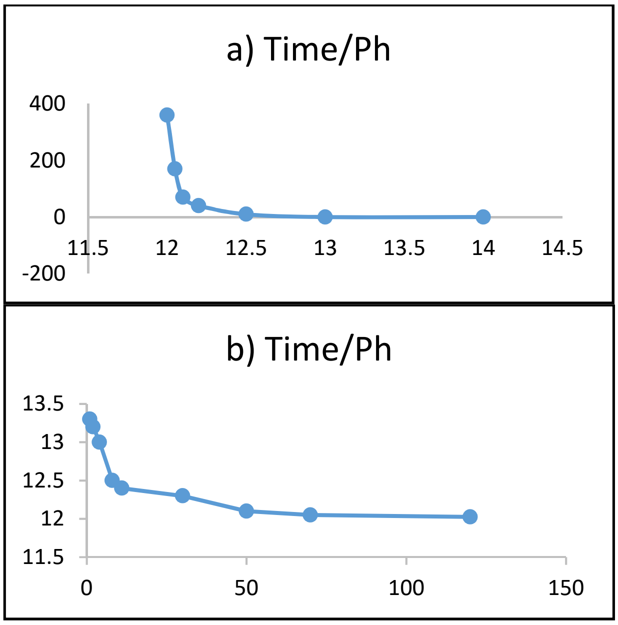

Fig7: pore solution is stored for up to 365 days under endogenous conditions. a) linear scale and b) logarithmic scale of evolution

٦. موارد استفاده از سیمان ژئوپلیمری

بتن‌های ژئوپلیمری یکی از جدیدترین بتن‌های تولید شده هست که برخی از معایب بتن‌های رایج را پوشش می‌دهد [2]. مواد ژئوپلیمری و سیمان های ژئوپلیمری در این حالی که فرآیند تولید ساده‌ای دارد اما دارای پتانسیل قوی برای کاربردهای مختلف هستند. به عنوان نمونه از این ترکیبات می‌توان به عنوان سیمان‌هایی با عملکرد عالی و دوام طولانی مدت برای محبوس سازی و ایزوله کردن موثر مواد خطرناکی که در معدن کاری و فرآیند تخلیص مواد رادیو اکتیو ایجاد می‌شود برای جلوگیری از نشر فلزات سنگین از قبیل آرسنیک، سرب و غیره در آب و خاک، ساخت قطعات پیش ساخته برای ابزارسازی و کامپوزیت‌های ساختاری برای استفاده در محدوده دمای ٦٥٠ تا ۱۰۰۰ درجه سیلیسیوس و ... استفاده نمود و مزیت رقابتی مشخصی نسبت به بتن های معمولی دارد [6,2].

تاثیر افزودن سیمان بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری پوزولانی نشان می‌دهد که با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که با افزودن سیمان به بتن‌های ژئوپلیمری پوزولانی مقاومت فشاری نسبت به مخلوط بدون سیمان، به طور قابل ملاحظه ای افزایش میابد. با عمل‌آوری حرارتی نمونه‌های ژئوپلیمری حاوی سیمان به نمونه‌های که در دمای محیط عمل آوری شده‌اند مقاومت فشاری بالاتری به دست می‌آید. با افزایش نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، مقاومت فشاری بتنهای ژئوپلیمری افزایش می‌یابد. با افزودن سیمان به بتن ژئوپلیمری پوزولانی اگرچه مقاومت فشاری کمتری نسبت به بتن شاهد حاصل می‌شود اما می‌توان بدون عمل‌آوری حرارتی و تنها در دمای محیط چنین بتنی را تولید کرد [22] .

محصولاتی مانند ملات‌ها و بتن، آجر، بلوک جامد و توخالی، بتن عایق، فوم، کائوچو و مواد مرکب ساندویچ از دیگر موارد استفاده از سیمان ژئوپلیمر است که دارای پوشش مقاوم در برابر حرارت ساخته شده و در شکل ۸ قابل مشاهده است.

شکل ۸: انواع بلوک‌های توپر و توخالی با استفاده از سیمان ژئوپلیمر

آجر های توپر ژئوپلیمری
آجر های اسفنجی ژئوپلیمری

Fig8: Types of solid and hollow blocks using geopolymer cement

۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به سند «چشم‌انداز جمهوری اسلامی ایران در افق ١٤٠٤ هجری شمسی» که در آن ایران کشوری است توسعه‌یافته با جایگاه اول اقتصادی، علمی و فناوری در سطح منطقه، با هویت الهام‌بخش و با تعامل سازنده و مؤثر در روابط بین‌الملل است، لزوم توجه به توسعه پایدار در صنعت ساخت و ساز و خصوصا صنعت بتن رابیش از پیش مشخص می‌کند.

در تحقیقاتی که در مقاله تأثیر محتوای سرباره و دوز فعال کننده بر مقاومت اتصال دهنده‌های ژئوپلیمر خاکستر در برابر حمله اسید سولفوریک، اثر مقدار سرباره و دوز فعال کننده بر مقاومت خاکسترهای بادی اتصال دهنده‌های ژئوپلیمر به حمله اسید سولفوریک انجام شد نتیجه‌گیری می‌شود که دوام بتن یکی از ویژگی‌های فزاینده‌ای است که برای بتن به دلیل تقاضا برای سازه‌های با عمر طولانی و هزینه‌های نگهداری حداقل. یکی از دلایل اصلی وخامت بتن در سراسر جهان حمله اسید سولفوریک به باران اسیدی، صنعتی است فرایندها و سیستم های فاضلاب، تقاضای رو به رشد برای محیط زیست بیشترمواد ساختمانی دوستانه ساخته شده است ژئوپلیمر اتصال دهنده‌ها یک گزینه جایگزین برای صنعت سیمان و بتن است. این تحقیقات نشان می‌دهد که گیرنده‌های ژئوپلیمر نیز ممکن است بهبود یافته باشند دوام به حمله اسید سولفوریک که می‌تواند به طور قابل توجهی افزایش یابد عمر مفید و هزینه های نگهداری مرتبط با سازه‌های بتنی را کاهش می‌دهد .

بتن ژئوپلیمری علاوه بر دارا بودن محاسن بتن ساخته شده با سیمان پرتلند، شامل مزیت های مضاعفی مانند انرژی تولید پایین، دوام بالا در برابر محیط های مهاجم، پایین بودن خزش و بعضا کاهش انقباض نسبت به بتن های معمولی است که خود منجر به کاهش تخریب محیط زیست به واسطه کاهش حجم ورودی $Co2$ به اتمسفر، کاهش مصرف انرژی و منابع طبیعی، استفاده از محصولات جانبی صنعتی که خود نوعی بازیافت به حساب آمده و دست اندازی به محیط زیست را کاهش می‌دهد، همه و همه در راستای توسعه پایدار و حفظ شرایط مطلوب طبیعی برای نسل‌های آینده هستند. و همانطور به این نتیجه رسیدیم که از سیمان ژئوپلیمری علاوه بر ساخت در سازه‌های پیش ساخته و لوله‌های فاضلاب مقام در برابر اسید به عنوان ملات‌ها و بتن، آجر، بلوک جامد و توخالی، بتن عایق، فوم، کائوچو و مواد مرکب ساندویچ نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۸-مراجع

[1] Saghi, Hassan and Abdolrahim Mehrdadi, 2015, Geopolymer Cement and its Application in Concrete, Fourth National Conference on New Materials and Structures in Civil Engineering, Yasuj, Yasuj University In Persian.

[2] Bandar, Daly; Nemat Hassani and Mohammad Mehdi Khodaparast, 1390, Jupolymer concrete and its applications, the first international conference on Natrava concretes, drinking water storage tanks, Rasht, Golestan Urban Water and Sewerage Company In Persian.

[3] Redaei, Mohammad Mehdi and Mehdi Mehdikhani, 2016, Effect (CFRP) on Compressive Strength Characteristics of Lightweight Geopolymer Concrete with Economic Approach, 2nd International Conference on New Research Findings in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Tehran, Confederation International Inventors of the World (IFIA), Comprehensive University of Applied Sciences In Persian.

[4] Razmi, Khadijeh; Bahram Rezaei and Abdollah Sadri, 2011, The use of geopolymer concretes instead of Portland concretes in construction projects, the first international conference on Natrava concretes, drinking water storage tanks, Rasht, Golestan Urban Water and Sewerage Company In Persian.

[5] Redaei, Mohammad Mehdi and Mehdi Mehdikhani, 2016, Comparison of the effect of lightweight aggregate on the compressive strength properties of geopolymer concrete and

ordinary concrete according to economic evaluation, International Conference on Civil Engineering, Tehran, Permanent Secretariat of the Conference In Persian.

[6] Najafi Kani, Ebrahim and Azadeh Trameshloo, 2013, Study of effective parameters on the synthesis of environmentally friendly geopolymer cement, 2nd National Conference on Materials and New Structures in Civil Engineering, Isfahan, University of Isfahan In Persian.

[7] Khalaj gjolamreza;Ali Nazari and Shadi Riahi, 2013, The effect of silica and alumina nanoparticles on compressive strength of geopolymer, 2nd International Conference on Cement Industry, Energy and Environment, Tehran, Faculty of Environment, University of Tehran In Persian.

[8] Bahraini, Vahid and Ehsanollah Zeighami, 2012, Geopolymer concretes Properties and Applications, The First National Conference on New Materials and Structures in Civil Engineering, Kerman, Graduate University of Industrial and Advanced Technology In Persian.

[9] Geopolymer mortar and concrete were supplied without using Portland cement, 2017, Amirkabir University of Technology / Student News Agency In Persian.

[10] Investigation of the use of different precursors on the fabrication of geopolymer cement mortar with compressive strength approach Year: 1397 10th National Concrete Conference In Persian.

[11] Ramezanianpour, Ali Akbar, Bahmanzadeh, Farnaz, Zolfagharansab, Arash, Ramezanianpour, Amir Mohammad. Investigation of the effect of base material content and water to cement ratio on the penetration of chloride ions in geopolymer concrete containing smelting furnace slag. Journal of Civil Engineering Amirkabir, 1397 ;In Persian.

[12] Daniel L.Y. Kong, Jay G. Sanjayan, Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete, Cement and Concrete Research,۲ 0 October 2009.

[13] Jafari Nodooshan, Mohsen, Ramezanianpour, Ali Akbar. Investigation of mechanical properties of geopolymer cement paste with composite furnace overlay base and determination of optimal parameters. Journal of Civil Engineering Amirkabir, 1397; In Persian.

[14] Mahdi DarvishNezhad Aliabad, Yusef Zandi, Zahra DarvishNezhad Aliabad, Evaluation of Mechanical Properties of Concrete Made with Metakaolin Scrap, Melting Iron Slag and Copper Smelting Slag, 2019, In persian.

[15] Madani, Seyed Hesam, Pourjahanshahi, Amin. Investigation of pozzolanic properties of different materials and their effect on the properties of super-capable concrete. Journal of Civil Engineering Amirkabir, 1397; In Persian.

[16] Ramezanianpour, Ali Akbar, Zolfagharansab, Arash, Bahmanzadeh, Farnaz, Ramezanianpour, Amir Mohammad. Evaluation of performance of reinforced concrete containing pozzolan against sulfuric acid attack. Journal of Civil Engineering Amirkabir, 1397; In Persian.

[17]Navid Ranjbar, Mohammad Mehrali, Mahmoud R. Maheri, Mehdi Mehrali, Hot-pressed geopolymer, Cement and Concrete Research, Volume 100, 2017, Pages 14-22, ISSN 0008-8846,

[18] M. Babaee, A. Castel, Chloride-induced corrosion of reinforcement in low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, Cement and Concrete Research, Volume 88, 2016, Pages 96-107, ISSN 0008-8846,

[19] Arnaud Castel, Stephen J. Foster, Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement, Cement and Concrete Research, Volume 72, 2015, Pages 48-53, ISSN 0008-8846,

[20] Xiao Xuea, Yun-Lin Liua,b, Jian-Guo Daia,*, Chi-Sun Poona, Wei-Dong Zhangc, Peng Zhangd, Inhibiting efflorescence formation on fly ash–based geopolymer via silane surface modification, Cement and Concrete Composites 22 August 2018,

[21] Raphaëlle Pouhet, Martin Cyr, Carbonation in the pore solution of metakaolin-based geopolymer,Cement and Concrete Research, Volume 88, 2016, Pages 227-235, ISSN 0008-8846,

[22] Ali Akbar Maghsoudi, Mostafa Anjum Shoaa, The effect of cement addition on the compressive strength of pozzolanic geopolymer concrete ,۲۰۱۸Civil, Architecture and Urban Planning Conference of Islamic World Countries; In persian

An overview of the properties and characteristics of geopolymer concrete with different base materials

K. Momeni[1]*, A.Sahavi[2], K.Naghdi[3]

1. PHD of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Imam sadeq Astaneh ashrafiyeh, Guilan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Guilan, Iran
2. M.Sc of Civil Engineering student of Jihad University,Guilan,Iran
3. M.Sc of Civil Engineering student of Guilan University,Guilan,Iran

*** kmomeni@tvu.ac.ir**

Abstract:

Since the development of the construction industry in the field of concrete structures, this material has been known as one of the most commonly used substances in the last century. Extensive use in industries such as bridge construction, dam construction, landscaping, construction structures, and construction of ports, piers and special structures has made concrete a valuable material and made it the center of attention of many researches. But production of Portland cement requires consumption of natural resources such as limestone, fossil fuels and also electrical energy which emit significant amounts of greenhouse gases, resulting in environmental pollution. Therefore, it is better to look for other materials to replace Portland cement. Geopolymers can be a suitable and inexpensive alternative to various types of cement because the raw materials used to produce them are more accessible than that of the conventional cements. Additionally, because geopolymers are produced in lower temperatures, the emission of pollutants such as carbon dioxide produced by cement kilns is prevented.

The World Environment Commission has defined the concept of sustainable development as the ability to meet the current needs without compromising the ability of future generations to meet their needs. This definition requires increased consideration of all aspects of a particular industry from the supply of raw materials and energy consumption to reuse or recycling. Therefore, the shortage of low-cost raw materials in the future of cement and concrete industry should be carefully considered. Because in the production of cement, the use of materials based on limestone is common and reserves of limestone are limited, the concrete industry is facing multiple challenges to provide an increasing need for Portland cement. In fact, due to this shortage and increasing production of Portland cement, these goods can only be produced for less than 59 years. In 2011, the world's cement production was about 3.6 billion tons which means that more than 3 billion tons of limestone was needed to produce clinker which illustrated that the limestone reserves were already running low.

Geopolymer concrete consists of two main parts: the base material and the activating material. The base material is actually a combination of aluminosilicates, and since natural and synthetic pozzolans are rich sources of such compounds, they can be used as base material. Different forms of Pozzolans such as silica or silica-aluminum materials have little effect or no adhesion value; however, in a very ultrafine form and in the presence of moisture during the chemical reactions with the activating substance at normal temperature, compounds with cementitious properties can be formed. This process is called pozzolanic reaction, and the types of pozzolans that can be mentioned are raw or calcined natural pozzolans such as volcanic ash, and industrial pozzolans such as fly ash, calcite clay, silica fume, iron slag, rice husk ash, etc.Based on the definitions of the activating substance, it can be said that it is an alkaline solution that dissolves aluminum and silicon ions in the base material, and by performing the reaction, it forms the composition of geopolymer paste. The most important activating solutions in the research are sodium hydroxide, potassium hydroxide, sodium silicate, sodium carbonate and potassium silicate, and compared to other alkalis, sodium hydroxide and potassium hydroxide show higher levels of alkalinity.