



Research Article

Reviewing on the properties of geopolimer concrete

Alireza Hakak^{1*}, Mohammadali Dashti Rahmat abadi²

1*- Ph.D. student in construction engineering and management, Islamic Azad University, Yazd branch, Yazd, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Yazd Branch, Yazd, Iran

Received: 23 June 2024; Revised: 28 July 2024; Accepted: 30 July 2024; Published: 30 July 2024

Abstract:

Geopolymer concrete is a new material in the construction industry with good performance and efficiency. Moreover, geopolymer concrete has good mechanical and durable properties against chemical attacks. The need to produce superior materials with a higher strength-to-weight ratio and better physical, mechanical, and durability properties is a new trend in the field of construction and building materials to achieve optimal use of resources and sustainable development. Due to the high consumption of cement, conventional concrete is known as an important factor in spreading harmful greenhouse gases during the production process of this important adhesive. Geopolymers minimize carbon dioxide emissions and may be a partial substitute for Portland cement in the construction industry and can play a valuable role in sustainable development. Geopolymer technology offers a solution for the use of industrial by-products containing aluminosilicate phases. On this occasion, today, many efforts are underway to use new technologies to produce environmentally friendly concrete, or in other words, green concrete. For this reason, this review article has extensively investigated the mechanical properties and durability of geopolymer concrete.

Keywords: Geopolymer concrete, concrete, sustainable development, construction management, properties.

Cite this article as: akakzadeh,A. and Dashti rahmat abadi,M. A. (2024). Reviewing on the properties of geopolimer concrete. (e201567). Civil and Project, 6(10), e201567.
<https://doi.org/10.22034/cpj.2024.469647.1310>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2024 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

بررسی مروری بر خواص بتن ژئوپلیمری

علیرضا حاکاک^{۱*}، محمدعلی دشتی رحمت آبادی^۲

*۱- دانشجوی دکتری، گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، گروه عمران، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران
۲- استادیار، گروه عمران، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۰۳ تیر ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۰۷ مرداد ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۰۹ مرداد ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۹ مرداد ۱۴۰۳

چکیده:

بتن ژئوپلیمری ماده نوینی در صنعت ساخت و ساز با عملکرد و کارایی مطلوب است. علاوه بر این، بتن ژئوپلیمری دارای خصوصیات مکانیکی و دوامی مناسبی در برابر حملات شیمیایی است. نیاز به تولید مصالح برتر با نسبت مقاومت به وزن بالاتر و خواص فیزیکی، مکانیکی و دوام بهتر، روند جدیدی در زمینه ساخت و ساز و مصالح ساختمانی برای دستیابی به استفاده بهینه از منابع و توسعه پایدار است. بتن معمولی به دلیل مصرف بالای سیمان به عنوان عاملی مهم، در پخش گازهای گلخانه‌ای مضر در طول فرآیند تولید این چسباننده مهم شناخته می‌شود. ژئوپلیمرها انتشار دیاکسید کربن را به حداقل می‌رسانند و ممکن است جایگزین جزئی برای سیمان پرتلند در صنعت ساختمان باشند و می‌تواند نقش ارزنده‌ای در توسعه پایدار می‌باشد. فناوری ژئوپلیمر راهحلی برای استفاده از محصولات جانبی صنعتی حاوی فازهای آلومینیوسیلیکات ارائه می‌دهد. به این مناسبت امروزه، تلاش‌های بسیاری جهت به کارگیری از فناوری‌های نوین برای تولید بتن‌های هم‌سو و دوست‌دار محیط زیست یا به تعبیر دیگر بتن سبز در جریان است. به همین جهت این مقاله مروری به بررسی گسترده خواص مکانیکی و دوام بتن ژئوپلیمری پرداخته است.

کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمری، بتن، توسعه پایدار، مدیریت ساخت، خواص.

۱- مقدمه

بتن یکی از مهمترین مصالح ساختمانی است که به دست انسان تولید می شود که از مصالح ساختمانی ارزان قیمت و شکل مناسب شامل سیمان، آب، ماسه (مصالح سنگ) و مواد افزودنی به نسبت های مختلف به دست می آید. نیاز روزافزون به تولید سیمان برای ساخت آن، اهمیت مسائل زیست محیطی و به ویژه توجه به «توسعه پایدار» به معنای وسیع «استفاده بهینه و استفاده صحیح و کارآمد از منابع اولیه، طبیعی و... برای رفع نیازهای نسل کنونی و نسل های آینده» ضرورت بازنگری در تولید بتن را بیش از پیش آشکار کرده است. توجه به اثرات زیانبار زیست محیطی تولید این ماده از جمله سهم حدود ۷ درصدی انتشار گاز CO₂ در جو، مصرف قابل توجه انرژی مانند برق و سوخت های فسیلی و ارائه محصولات جایگزین اجتناب ناپذیر است. برای دایره مسیر توسعه پایدار و کاهش این اثرات ضروری تلقی می شود (Anjomshoa, 2024b; Sood et al., 2023).

افزایش مصرف سیمان پرتلند معمولی باعث نگرانی های زیست محیطی شده است. در میان گازهای گلخانه ای، CO₂ حدود ۶۵ درصد از گرمایش جهانی را تشکیل می دهد. یکی دیگر از مشکلات عمده سیمان پرتلند رایج، آسیب پذیری و در نهایت ریزش سازه های مرتبط در حین بهره برداری است، به طوری که سازه های بتنی که در دهه های اخیر با سیمان پرتلند رایج ساخته شده اند، اکنون ظاهری فروریخته دارند (Anjomshoa, 2024a; Wasim et al., 2021). علاوه بر این، این سیمان عملکرد و دوام ناکافی را در موارد تعمیر از خود نشان داده است. اگرچه در نگاه اول مشکلات دوام بتن ناشی از تراکم و فرآوری ناقص است، مشکل اصلی در مورد دوام سیمان پرتلند مربوط به خواص ذاتی مواد آن است. در این مورد می توان به نفوذپذیری بالا و تمایل به کربناته شدن اشاره کرد. علاوه بر این، سیمان پرتلند مقدار زیادی هیدروکسید کلسیم تولید می کند که با اسیدهای محلول واکنش می دهد (Pacheco-Torgal et al., 2008b).

اصطلاح ژئوپلیمر اولین بار توسط شخصی به نام جوزف دیوید ویتس در سال ۱۹۷۹ مطرح شد. او ژئوپلیمرها را شاخه جدیدی از مواد سیلیکات آلومینا با ساختار سه بعدی معرفی کرد. به دنبال توسعه فناوری ژئوپلیمر، فرصت بسیار خوبی برای رشد و تولید محصولات مختلف مبتنی بر ژئوپلیمر فراهم شد (Davidovits, 1999).

بتن ژئوپلیمری بتنی است که در آن از مواد سیلیکات آلومینا غنی از سیلیکون (Si) و آلومینیوم (Al) و محلول قلیایی به عنوان چسب استفاده می شود. از مزایای بتن ژئوپلیمری، علاوه بر مصرف انرژی کم تولید، می توان به خواص مکانیکی مطلوب و دوام بالا در محیط های خورنده اشاره کرد (Hardjito et al., 2004a).

در واقع ژئوپلیمرها جایگزین مناسبی برای بسیاری از انواع سیمان هستند. زیرا مواد اولیه ای که برای تولید آن استفاده می شود نسبت به سیمان ها و پلیمرهای آلی معمولی ارزان تر و فراوان تر است. علاوه بر این، محدوده دمایی اکثر تولیدات آن بسیار کمتر از سیمان های معمولی است، بنابراین از انتشار آلاینده هایی مانند CO₂ از کوره های سیمان و آلاینده های ناشی از سوختن پلاستیک جلوگیری می کند (Khale & Chaudhary, 2007; Kishore et al., 2023).

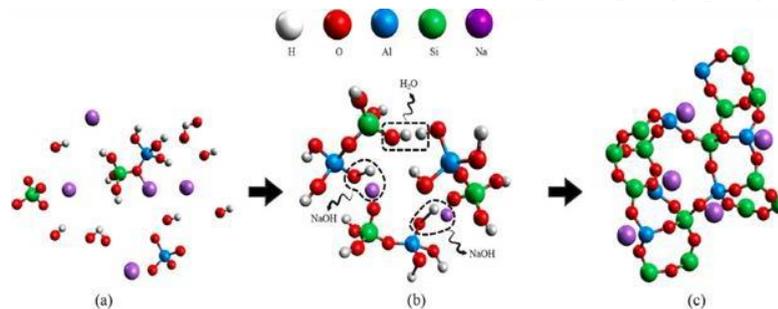
پلیمرهایی که آلومینوسیلیکات نیستند به عنوان ژئوپلیمر شناخته می شوند. این مفهوم برای اولین بار توسط دانشمند فرانسوی جوزف دیویدویتز در سال ۱۹۷۸ پیشنهاد شد. واکنش ژئوپلیمریزاسیون یک واکنش شیمیایی بین اکسیدهای آلومینوسیلیکات جامد و محلول های سیلیکات فلزات قلیایی در محیطی با قلیائیت بالا است که منجر به ساختاری سه بعدی بی شکل تا نیمه کریستالی می شود. که شامل پیوندهای Si-O-Al می باشد. این واکنش گرمازا است و تحت فشار اتمسفر و در دمای بین دمای اتاق و کمتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد انجام می شود (Manzoor et al., 2024).

شبکه ژئوپلیمری سیلیکواتلومینات از چهار وجهی SiO₄ و AlO₄ تشکیل شده است که به طور متناوب با به اشتراک گذاشتن تمام اکسیژن ها به هم متصل می شوند. یون های منفی (Na⁺, K⁺, Li⁺, Ca⁺⁺, NH⁺⁺, H₃O⁺) در سوراخ های شبکه وجود دارند تا بار منفی Al³⁺ را با هماهنگی چهارگانه متعادل کنند. اصطلاح پلی سیالات برای توصیف ساختار ژئوپلیمرها استفاده می شود (Alahmari et al., 2023).

بتن فعال قلیایی یا بتن ژئوپلیمری به عنوان یک جایگزین امیدوارکننده برای بتن معمولی مبتنی بر سیمان پرتلند ظاهر شده است. به عبارت دیگر ژئوپلیمر یک اصطلاح کلی است که طیف را پوشش می دهد (Zaid et al., 2024). این به طیف وسیعی از مواد پلیمری آلومینوسیلیکات مصنوعی اشاره دارد که به طور کلی بایندهای فعال قلیایی در اصطلاح عمومی تر نامیده می شوند. مواد ژئوپلیمری را می توان از طیف گسترده ای از جامدات پوزولانی طبیعی و مصنوعی که با محلول های قلیایی مانند هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم فعال می شوند، تولید کرد. ژئوپلیمرها می توانند به عنوان چسب "بدون سیمان" برای جایگزینی خمیرهای سیمان پرتلند در محصولات بتنی عمل کنند. یک ماده ژئوپلیمر رایج PFA است (Farooq et al., 2021)

۱-۲- مکانیزم و ساختار

ژئوپلیمر یک سیستم پیوند معدنی (آلومینوسیلیکات) است که عمدتاً در دمای اتاق سخت می شود و ساختار آن توسط ماتریس های سه بعدی آمورف تا نیمه بلوری آلومینوسیلیکات چهار وجهی تشکیل می شود (Ahmed et al., 2021). طور کلی فرآیند ژئوپلیمریزاسیون دارای دو مرحله است، مرحله اول مواد با پیوندهای کووالانسی (Si-O-Si و Si-O-Al) در اثر واکنش یون های هیدروکسید شکسته شده و ساختار ژل مونومر را تشکیل می دهند. در مرحله دوم، گروه های OH در مونومرها به یکدیگر متصل شده و آب آزاد می کنند و این سه را تشکیل می دهند (Thomas et al., 2022). ساختارهای بعدی آلومینات های سیلیکونی به صورت گرافیکی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: تصویر شماتیک از فرآیند ژئوپلیمریزاسیون (Singh & Middendorf, 2020)

۲- بررسی خواص مکانیکی

۱-۲- بررسی مقاومت فشاری

این ویژگی به طور گسترده در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است و اکثر کارهای تحقیقاتی در مورد بتن ژئوپلیمری شامل داده هایی در مورد این ویژگی می باشند. پارامترهایی که بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری تأثیر می گذارند، در اینجا به طور خلاصه مورد بحث قرار می گیرند. شهاب و همکاران (۲۰۱۶) مشاهده کردند که مقادیر مقاومت فشاری، مقاومت چسبندگی، مقاومت کششی شکاف و مقاومت خمشی در جایگزینی ۵۰٪ سیمان پرتلند معمولی (OPC) با خاکستر بادی بیشترین مقدار را دارند، در حالی که ویجای و همکاران (۲۰۱۲) دریافتند که جایگزینی ۱۰٪ خاکستر بادی با OPC در مخلوط بتن ژئوپلیمری منجر به افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی شکاف و مقاومت خمشی می شود. آزمایشات لوید و رانگن (۲۰۰۹) نشان داد که افزودن یک دوره ۲۴ ساعته قبل از عمل آوری، مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری را افزایش می دهد. عمل آوری در شرایط محیطی بتن با مقاومت اولیه پایین تولید می کند، در حالی که استفاده از دمای بالا بهبود قابل توجهی در مقاومت ایجاد می کند. لازم به ذکر است که افزایش زمان عمل آوری می تواند مکانیسم ژئوپلیمریزاسیون و در نتیجه مقاومت را افزایش دهد؛ با این حال، مدت زمان طولانی تر عمل آوری در دمای بالا منجر به شکست بتن می شود (Anjomshoa, 2024c; Nurrudin et al., 2018). به طور کلی، دمای و مدت زمان عمل آوری اولیه بالاتر منجر به مقاومت فشاری بالاتر می شود (Hassan et al., 2019a). آزمایشات تجربی آدام و هوریانتو (۲۰۱۴) نشان داد که هم دما و هم مدت زمان عمل آوری حرارتی اولیه نقش عمده ای در توسعه مقاومت ملات ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی دارد. رژیم بهینه عمل آوری حرارتی در دمای ۱۲۰ درجه

سانتیگراد به مدت ۲۰ ساعت یافت شد. آزمایشات جوزف و متنو (۲۰۱۲) دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد را به عنوان بهترین دما نشان می دهد، در حالی که زمان بهینه عمل آوری در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد توسط چیندپراسیرت و همکاران (۲۰۰۷) ۳ ساعت مشاهده شد. این محققان دمای بهینه عمل آوری را ۷۵ درجه سانتیگراد یافتند. واکنش در ۷ روز برای دستیابی به حداکثر مقاومت تکمیل شد و هیچ افزایش مقاومتی مشاهده نشد. اهمیت عمل آوری حرارتی اولیه همچنین توسط ویجای و همکاران (۲۰۱۱)، عبدالله و همکاران (۲۰۱۱) و الموحسن و همکاران (۲۰۱۸) مشاهده شد. محققان اخیر افزایش ۵۶ درصدی در مقاومت فشاری بتن تحت یک ساعت عمل آوری در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد را یافتند. افزایش زمان عمل آوری حرارتی به ۹۰ ساعت و ۱۱۰ ساعت منجر به افزایش مقاومت فشاری شد (Görhan & Kürklü, 2014; Patankar et al., 2014)

مدت زمان عمل آوری حرارتی نیز توسط گورخان و کورکلو (۲۰۱۴) مورد بررسی قرار گرفت که در آن مشاهده کردند با افزایش عمل آوری حرارتی (۶۵ و ۸۵ درجه سانتیگراد) از ۵ به ۲۴ ساعت، افزایش مقاومت فشاری وجود دارد. مشخص شد که زمان عمل آوری بیش از ۲۴ ساعت تأثیر قابل توجهی بر مقاومت ندارد (Joseph & Mathew, 2012). آزمایشات ساتیش کومار و همکاران (۲۰۱۷) نشان می دهد که نسبت مقاومت فشاری ۷ روزه به ۲۸ روزه بتن ژئوپلیمری سه گانه بین ۸۸ تا ۹۰ درصد است. آزمایشات دیگر توسط نگوین و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که بیش از ۹۳ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه را می توان در ۷ روز، صرف نظر از نوع خاکستر بادی، روش عمل آوری حرارتی یا جایگزینی خاکستر بادی (FA) با سرباره کوره بلند گرانوله (GGBS) به دست آورد. در مقابل، آزمایشات چی (۲۰۱۷) نشان می دهد که این نسبت برای ملات عمل آوری شده در دمای ۶۵ درجه سانتیگراد ۸۸ درصد است که بزرگتر از ۶۶ درصد در عمل آوری معمولی است. برای مخلوط بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولین تحت عمل آوری هوای معمولی، نسبت مقاومت فشاری ۷ روزه به ۲۸ روزه ۷۳ و ۸۸ درصد یافت شد (Abbas et al., 2020). آزمایشات بر روی بتن ژئوپلیمری خود تراکم بر پایه خاکستر بادی و متاکائولین نشان می دهد که مقدار مقاومت فشاری ۷ روزه نزدیک به مقاومت ۲۸ روزه است (Arun et al., 2019).

به گفته نگوین و همکاران (۲۰۲۰)، افزایش نسبت آب به جامد از ۰/۲ به ۰/۳ می تواند مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی را برای نسبت قلیایی به چسباننده ۰/۳ و ۰/۴ کاهش دهد، در حالی که آزمایشات احمد (۲۰۲۰). برای بتن ژئوپلیمری تحت عمل آوری اولیه در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد (فر) به مدت ۲۴ ساعت نشان داد که نسبت بهینه آب به چسباننده برای دستیابی به حداکثر مقاومت فشاری ۰/۲۵ است. با افزایش نسبت قلیایی به خاکستر بادی تا ۰/۴۵، افزایش مقاومت وجود داشت که کمتر از ۰/۵ اندازه گیری شده توسط البکری و همکاران (۲۰۱۲) و عبدالله و همکاران (۲۰۱۱) بود. با توجه به نسبت قلیایی مایع به خاکستر بادی، مقدار بهینه ۰/۴ مشاهده شد (Aliabdo et al., 2016; Sathonsaowaphak et al., 2009)، در حالی که آزمایشات فو-نگرنخم و فیانگفیمما [۲۳] کاهش مقاومت فشاری را با افزایش نسبت محلول قلیایی فعال کننده به خاکستر بادی از ۰/۴ به ۰/۹ برای هر دو محلول M10 و M15 NaOH نشان می دهد. برای بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره بلند گرانوله، ترکیب بهینه نسبت جامد به مایع ۳/۰ تعیین شد که نشان دهنده نسبت ۰/۳۳ برای نسبت قلیایی به سرباره کوره بلند گرانوله است.

البکری و همکاران (۲۰۱۲) بتن ژئوپلیمری با عمل آوری اولیه در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت را آزمایش کردند و حداکثر مقاومت فشاری برای مخلوطی با نسبت $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ برابر با ۲/۵ بدست آمد. همین مشاهده توسط عبدالله و همکاران (۲۰۱۱)، علیابدو و همکاران (۲۰۱۶) نیز انجام شد. آزمایشات دیگر توسط نیس (۲۰۱۹) نشان داد که مدول سیلیکات بحرانی به مولاریته بستگی دارد، که برای M1۴ نسبت ۱ و برای مولاریته های پایین تر مقدار توصیه شده ۲ است. این یافته از یافته قبلی توسط راتاناساک و چیندپراسیرت (۲۰۰۹) پشتیبانی می کند. علاوه بر این، مقدار ۱/۵ برای M1۰ مطابق با آزمایشات ساتونساوفاک و همکاران (۲۰۰۹) به عنوان بهینه یافت شد. استفاده از مخلوط NaOH و سیلیکات سدیم با نسبت ۱:۱ ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 8$) توانست ژئوپلیمریزاسیون خاکستر بادی را فعال کند (Ryu et al., 2013).

۲-۲- بررسی مقاومت کششی و خمشی

مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت خمشی روند مشابهی با مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری دارند (Raijiwala & Patil, 2010). و به طور کلی، افزایش مقاومت فشاری با افزایش هم مقاومت کششی و هم مقاومت خمشی همراه است. نتایج آزمایش هاردیجیتو (۲۰۰۵) نشان داد که مقاومت کششی شکاف بتن ژئوپلیمری تنها کسری از مقاومت فشاری است. با این حال، برخی انحرافات از این پاسخ کلی توسط برخی محققان توصیف شده است. ريو و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که سرعت افزایش مقاومت کششی با افزایش مقاومت فشاری کاهش می یابد. مشخص شد که جایگزینی خاکستر بادی با سرپاره کوره بلند گرانوله (GGBS) اثر کمتری بر مقاومت کششی شکاف و مقاومت خمشی نسبت به مقاومت فشاری دارد (Abhilash et al., 2016). آزمایشات اودرجی و همکاران (۲۰۱۹) کاهش مقاومت خمشی را با افزایش جایگزینی خاکستر بادی با سرپاره از ۱۵ درصد به ۲۰ درصد نشان داد، با دانستن اینکه افزایش مقاومت فشاری با این تغییر وجود دارد. داده های آزمایشی حسن و همکاران (۲۰۱۹) نشان داد که برخلاف مدول الاستیسیته بتن ژئوپلیمری، مقاومت فشاری و خمشی در نتیجه پیش گرمایش بتن در دمای ۷۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۶ ساعت بهبود یافته است. آزمایشات دیگر توسط ساروانان و الاونتل (۲۰۱۸) نشان داد که برخلاف مقاومت فشاری، اگر ۵۰ درصد خاکستر بادی با سرپاره کوره بلند گرانوله جایگزین شود، افزایش قابل توجهی در مقاومت کششی شکاف وجود دارد. همین مشاهده برای ویژگی مدول الاستیسیته نیز انجام شد. مقایسه داده های ارائه شده توسط پارثا و همکاران (۲۰۱۳) با سایرین نشان داد که استفاده از عمل آوری حرارتی ویژه تأثیر بر افزایش نسبت خمشی به فشاری و در درجه کمتر نسبت کششی به فشاری نسبت به حالت عمل آوری در دمای محیط دارد.

۳- بررسی دوام

دوام را می توان به عنوان توانایی بتن در دفع محیط های در معرض دید، به عنوان مثال مقاومت در برابر فرسایش، سایش و حمله شیمیایی، در حالی که حفظ ویژگی های مهندسی پیش بینی شده خود که برای عدم تخریب برای یک عمر مفید طولانی طراحی شده است، تعریف کرد. بتن ساخته شده با سیمان پرتلند در محیط های ملایم دوام خوبی نشان داده است (Anuradha et al., 2014). با این حال، مدتی است که مشخص شده است که حملات تهاجمی سولفات، کلرید و اسید ممکن است باعث تخریب بتن معمولی شود (Neupane, 2016).

واکنش شیمیایی در خمیر سیمان ناشی از مواد خطرناک نفوذپذیر (که طبق بخش ۳۰۲ در CFR 40 تعیین شده است) یکی از منابع اصلی حمله است؛ منبع دیگر واکنش های آنها با سنگدانه است. ژای و همکاران (۲۰۰۸) دو فرآیند را برای تنظیم تخریب شیمیایی مواد سیمانی، انحلال فازهای مختلف هیدرات و انتشار گونه های حل شده به سیال بینابینی پیشنهاد کردند. پورتلندیت و C-S-H که مهمترین محصولات هیدراتاسیون هستند که به چسبندگی بین سنگدانه و خمیر و مقاومت کمک می کنند، در برابر حملات شیمیایی آسیب پذیر هستند. چنین پدیده هایی به طور گسترده در بتن سیمان پرتلند معمولی و بتن سیمان مخلوط رخ می دهد (Embong et al., 2016). در برخی موارد، این تخریب می تواند به حدی جدی باشد که نیاز به تعمیر یا حتی جایگزینی سازه باشد (Zhuang et al., 2016).

۳-۱- عوامل موثر بر دوام بتن ژئوپلیمری

۳-۱-۱- نسبت های بتن ژئوپلیمری

مهمترین عواملی که بر ویژگی های خمیر ژئوپلیمر تأثیر می گذارند، نسبت های $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ، $\text{R}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ و $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}$ (R نشان دهنده Na یا K) و نسبت مایع به جامد است (Singh et al., 2015). اکثر تحقیقات نشان داده است که یک چارچوب ژئوپلیمر غیربلوری برای دستیابی به مقاومت مکانیکی مطلوب است (Hassan et al., 2019b). تحقیقات قبلی نشان داده است که محتوای قلیایی بالاتر یا محتوای سیلیکات کمتر به دلیل توسعه ساختارهای آلومینو سیلیکات، مقاومت ژئوپلیمر را افزایش می دهد [۱۲۹]. ژئوپلیمرهایی که فقط با سدیم هیدروکسید فعال می شوند، ژئولیت کریستالی با Si / Na

۴/۴ یا کمتر تشکیل می دهند، اما کریستال های نانومقیاس ژئولیت اضافی در نسبت بیش از ۴/۴ تشکیل می شود (Rakhimova & Rakhimov, 2014). اگرچه مقادیر کمی سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید اضافه می شود و تشکیل کریستالیت ها به طور قابل توجهی کاهش می یابد زیرا واحدهای سیلیکات مدل می شوند. منافذ در خمیر خاکستری با دوز فعال کننده کم (۱۸٪) بزرگتر و عریض تر بودند، در حالی که در دوز فعال کننده بالا (۳۰٪) (Somna et al., 2011). منافذ کوچکتر و محدوده کوچکی داشتند، عمدتاً به دلیل اتمام منافذ ناشی از انحلال جزئی بیشتر و توسعه محصول واکنش. کاهش تخلخل، مقاومت خمیرهای ژئوپلیمر را بهبود بخشید (Koushkbaghi et al., 2019). به طور معمول، با نسبت SiO_2/Al_2O_3 بین ۳،۰ تا ۳،۸ و نسبت Na_2O/Al_2O_3 بین ۱،۰، مقاومت بهینه ژئوپلیمر مستند شده است (Reddy & Elavenil, 2017). تغییرات خارج از این محدوده در نسبت SiO_2/Al_2O_3 برای تولید مقاومت ضعیف یافت شده است. زمان گیرش خمیر بتن ژئوپلیمری به طور کلی گزارش شده است که به محتوای آب جذب شده توسط میکروکپسول، ویسکوزیته نمونه و احتمالاً گرمای نهان بستگی دارد (Pilehvar et al., 2018). در نتیجه، زمان گیرش اولیه افزایش یافت و زمان گیرش نهایی با افزایش غلظت مواد تغییر فاز میکروکپسوله شده^۱ کاهش یافت (Zhang et al., 2016).

۳-۱-۲- محتوای چسباننده

نقش چسباننده فعال شده با قلیایی ایجاد یک پیکربندی اسکلت پایدار از بتن و در عین حال محدود کردن انتشار کربن و همچنین تبدیل چندین ضایعات به محصولات مفید است (Reddy & Elavenil, 2017). در بتن معمولی، سیمان پرتلند به تنهایی یا با مصالح پوزولانی به عنوان چسباننده عمل می کند، اما در بتن ژئوپلیمری، مصالح پوزولانی مانند مواد مکمل سیمان به عنوان چسباننده استفاده می شوند. این مصالح پوزولانی غنی از Si و Al هستند (Singh et al., 2015). این مواد با محلول های سدیم هیدروکسید یا هیدروکسید پتاسیم و سایر مواد اولیه فعال می شوند. نشان می دهد که در بتن ژئوپلیمری، فعال کننده قلیایی و چسباننده های آلومینوسیلیکاتی مانند خاکستر بادی، سرباره کوره ذوب آهن یا متاکائولین واکنش نشان می دهند (Naveena & Rao, 2016). با این حال، به خوبی شناخته شده است که ساختار مواد اولیه که ژل ها را در چارچوب های فعال شده با قلیایی باند می کند، مهم است، یعنی ماده واکنش حاصل از فعال سازی قلیایی مواد مکمل سیمان تفاوت اساسی ایجاد کرده است (Khan et al., 2018). فرض بر این است که مقاومت مکانیکی از یک ماتریس ژل هیدرات آلومینوسیلیکات نامنظم سه بعدی (N-A-S-H) در شبکه های فعال شده خاکستری ناشی می شود که آب را در محیط واکنش در هنگام سخت شدن خارج می کند (Fernández-Jiménez et al., 2005). همچنین پیشنهاد شده است که افزودنی هایی مانند ساکارز و اسید سیتریک به عنوان کندکننده در بتن OPC عمل می کنند. با این حال، این افزودنی ها ساختارهای متفاوتی در ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر بادی دارند (Naveena & Rao, 2016).

۳-۱-۳- فعال کننده قلیایی

یکی از عواملی که بر دوام و عملکرد مشخصه ژئوکرت تأثیر می گذارد، ترکیب و غلظت فعال کننده قلیایی است (Payá et al., 2019). محلول قلیایی به عنوان فعال کننده برای فرآیند پلیمریزاسیون تحت شرایط قلیایی بالا روی مواد معدنی Si-Al عمل می کند و منجر به یک توالی پلیمری پیچیده از پیوندهای Si-O-Al-O می شود. اهمیت اصلی فناوری ژئوکرت توانایی آن در تولید چسباننده با کارایی بالا از مواد جایگزین سیمان ها است. طیف گسترده ای از مواد فعال کننده قلیایی در گذشته استفاده شده است، رایج ترین آنها SS و SH به صورت جداگانه یا در ترکیب با نتایج متفاوتی است (Pacheco-Torgal et al., 2008a). با این حال، فعال کننده قلیایی مشتق شده از ترکیب SS و SH منجر به نتایج بهتری شد (Moon et al., 2014). مطالعه قبلی نشان می دهد که نسبت SS/SH بین ۰/۲۵ و ۳ بود (Yahya et al., 2015)، در حالی که مولیته سدیم هیدروکسید به طور قابل توجهی از ۴ تا ۲۰ در فعال کننده های قلیایی بود (Hardjito & Rangan, 2005). مشخص شده است که نسبت SS/SH بالاتر به دلیل وجود سیلیکون بیشتر در سیستم به مقاومت بیشتر کمک می کند، با این حال، فراتر از مقدار مشخصی، مقاومت

¹ MPCM

تمایل به کاهش دارد. نسبت SS/SH، ۲/۵ توصیه شده برای خاکستر بادی برای دستیابی به ویژگی های تازه و سخت شده بهتر این چسباننده ها مناسب بود. در مورد غلظت SH، نتایج بیشتر مطالعات قبلی نشان داده است که با افزایش غلظت، مقاومت نیز افزایش می یابد (Nazari et al., 2011). با این حال، فراتر از مولیته مشخصی از SH برای یک پیش ماده خاص، تأثیر منفی بر ویژگی های تازه این چسباننده ها و همچنین توسعه مقاومت آنها وجود داشت. علاوه بر این، افزایش مقاومت در AAB عمدتاً به دلیل وجود SH در فعال کننده های قلیایی است. در یکی از مطالعات قبلی، مشخص شد که مقدار اکسید سدیم^۲، که نسبت مدول سیلیکات فعال کننده های قلیایی را تعیین می کند، تأثیر عمیقی بر ویژگی های مکانیکی و دوام چسباننده های مبتنی بر سرباره داشت (Chi, 2012). مطالعاتی نیز بر عملکرد مکانیکی محصولات فعال شده با قلیایی سرباره برای ارزیابی اثرات دمای بالا انجام شد. مقاومت حرارتی ملات فعال شده با قلیایی که به مدت ۲۸ روز از فعال کننده های قلیایی مختلف خشک شده بود، بررسی شد و مقاومت فشاری و خمشی بیشتری در مقایسه با بتن پرتلند معمولی در دماهای بالا با غلظت سدیم بهینه ۶ درصد به جرم سرباره برای هر دو سدیم هیدروکسید و فعال کننده های کربنات سدیم^۳ گزارش شد (Karahana & Yakupoğlu, 2011).

۳-۱-۴- فاز هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H)

پلیمر شدن ژئوالومینوسیلیکات ها برای درک نقش آن در مقاومت در سن اولیه مورد بررسی قرار گرفت. C-S-H توسط واکنش سیمان با آب شکل می گیرد. کریستال ها چند ساعت پس از واکنش بین آب و سیمان تشکیل می شوند. در مخلوط های سرباره کوره ذوب و متاکاولین، ژل های C-S-H و N-A-S-H در خمیر همزمان با ژئومتریک با مقاومت بالا بر پایه خاکستر بادی فعال شده توسط سدیم هیدروکسید وجود دارند که دلیل افزایش مقاومت است (Koushkbaghi et al., 2019). هنگامی که مواد معدنی سیلیکات طبیعی برای کاهش قلیایی، مقاومت ژئوپلیمر و مقدار ژل C-S-H اضافه می شوند، مقدار کمی از انحلال کلسیم رخ می دهد (Yip et al., 2008).

در مخلوط های خاکستر بادی / سرباره کوره ذوب آهن، فعال سازی سرباره کوره ذوب آهن بر واکنش در ۲۷ درجه سانتیگراد غالب است، در حالی که واکنش در ۶۰ درجه سانتیگراد به دلیل ترکیبی از فعال سازی خاکستر بادی و سرباره کوره ذوب آهن است (Payá et al., 2019). افزایش مقاومت خمیرها با ترکیب سرباره کوره ذوب آهن به تراکم ریزساختاری آن مرتبط است. فعال سازی سخت شدن ژئوپلیمر خاکستر بادی / سرباره کوره ذوب آهن با سیلیکات پتاسیم^۴ و هیدروکسید پتاسیم ناشی از ظهور C-S-H/C-A-S-H بود و در نتیجه توسعه سریع K-A-S-H(Ca, K)-A-S-H و C-A-S-H بستگی به مقدار یون های کلسیم و pH در سیستم دارد (Nath & Kumar, 2013).

۳-۱-۵- درجه تراکم

بتن ژئوپلیمری خود تراکم، یک ویژگی منحصر به فرد بتن است که در فناوری خود تراکم ارائه شده است، بدون نیاز به تراکم اضافی و جریان آزاد توسط وزن خود، به ویژه در میلگردهای متراکم (Alsubari et al., 2018). آزمایش های دوام انجام شده در محیط های سولفات و دریایی نشان داده اند که برای خنثی کردن تأثیرات نامطلوب خاکستر رده C در ژئوتکنیک از غلظت بالاتری از سدیم هیدروکسید استفاده شده است (Chindaprasirt & Chalee, 2014). همچنین PH و خواص میکروساختاری ژئوپلیمر رسی- خاکستر که در محلول سولفات ۵٪ غوطه ور شده بود، مورد مطالعه قرار گرفت، نتایج مطالعه نشان داد که کاهش ناچیزی در مقاومت وجود دارد، در حالی که کاهش بیشتر مقاومت زمانی مشاهده شد که نمونه ها در معرض محلول سولفات منیزیم^۵ ۵٪ قرار گرفتند، دلیل اصلی تخریب زیاد، توسعه ترینگایت بود (Sukmak et al., 2015).

² Na₂O

³ Na₂CO₃

⁴ K₂SiO₃

⁵ MgSO₄

ترکیبات متعددی از پیش سازنده‌هایی مانند خاکستر بادی نوع F، سرباره و دود سیلیسی مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج دوام خوبی را به همراه داشته است (Thaarrini & Ramasamy, 2016). همچنین استفاده از مقاومت اسید سولفوریک روی نمونه‌هایی در ۲۸ و ۴۲ روز که از ۵۰ درصد ضایعات سرامیکی و ۵۰ درصد سرباره تولید شده‌اند، بررسی می‌شود، آزمایش‌ها نشان داد که چگالی و مقاومت فشاری به دلیل غوطه‌وری در اسید کمی تحت تأثیر قرار گرفته است (Shafiq et al., 2017). این ژئوپلیمر هیبریدی با نگهداری در فر که از خاکستر و سیمان پرتلند تشکیل شده است، سپس در معرض آزمایش حمله اسید، سولفات و جذب قرار می‌گیرد (Jeyaseela, 2024). آنها دریافتند که نمونه‌های ۵ درصد سیمان پرتلند تحمل بالایی در برابر اسید، سولفات و جذب دارند. علاوه بر این، استفاده از متاکائولین، میکروسیلیس به عنوان پوزولان و به عنوان ماده پرکننده، خاکستر پوسته برنج، سرباره کوره ذوب آهن و پوزولان خاکستر بادی به طور قابل توجهی عملکرد دوام ژئوتکنیک را بهبود بخشیده است. به طور کلی، توصیه می‌شود از خاکستر با کلسیم بالا در ژئوتکنیک برای بتن بادوام و ژئوپلیمری‌اسیون استفاده شود.

۳-۱-۶- دوره عمل آوری

طبق دستورالعمل‌ها دمای عمل آوری و زمان برای ژئوتکنیک بسته به منبع مواد اولیه سیمانی به طور قابل توجهی متفاوت است (Zhuang et al., 2016). تأثیر فرآیندهای مختلف ترمیم روی خمیرهای ژئوپلیمر توسط (Najafi Kani & Allahverdi, 2009) مورد مطالعه قرار گرفته است. گزارش شده است که دمای عمل آوری برای واکنش‌های کامل ژئوپلیمری‌اسیون بین ۴۰ تا ۸۵ درجه سانتیگراد متغیر بوده است. گزارش شده است که دمای بالای عمل آوری برای مقاومت مطلوب بوده است. همچنین گزارش شده است که رطوبت نسبی پایین برای ترمیم ژئوتکنیک مبتنی بر متاکائولین ترجیح داده می‌شود (Kuenzel et al., 2012). برای توسعه مقاومت، دمای عمل آوری بالاتر ترجیح داده می‌شود (Heah et al., 2011). با این حال، برخی از محققان اشاره کرده‌اند که عمل آوری باند Si-O-Al-O در دمای بالاتر برای مدت طولانی‌تر باعث خرابی نمونه‌ها می‌شود. همچنین مشخص شده است که رشد مقاومت بالاتر در مدت زمان طولانی‌تر زمانی که نمونه‌های ژئوپلیمر در دمای محیط عمل آوری شدند (Najafi Kani & Allahverdi, 2009). به طور خاص، عمل آوری کافی مواد ژئوپلیمری برای دستیابی به عملکرد مکانیکی و دوام بهینه برای حفظ استحکام سازه‌ای آنها مهم است (Sata et al., 2013). به طور کلی این نتیجه حاصل می‌شود که کاربردهای ژئوتکنیک ساخته شده با دمای عمل آوری پایین می‌تواند مقاومت فشاری بسیار پایین تری را به همراه داشته باشد و این امر باعث کاهش توانایی آن در برابر اثرات شرایط محیطی و عوامل خوردنده می‌شود.

۳-۲- ویژگی‌های دوام بلندمدت ژئوپلیمر

دوام به مقاومت بتن در برابر فرسایش و تخریب اشاره دارد. نفوذپذیری یکی از عوامل کلیدی موثر بر دوام است، که می‌تواند سرعت جذب موبرگی و مقاومت بتن در برابر مواد بالقوه مضر را افزایش دهد. ژئوپلیمر با اطمینان از تراکم کامل افزودنی‌ها و عمل آوری مناسب، به اندازه کافی برای تحمل اثرات محیطی بادوام است. نفوذپذیری، مقاومت در برابر حمله محیطی^۶ و مقاومت در برابر محیط خشن^۷ ژئوپلیمر در زیرشاخه‌های بعدی توضیح داده شده است.

۳-۲-۱- نفوذپذیری

نفوذپذیری (ASTM C 1543) نشان‌دهنده میزان نفوذ آب و سایر عناصر خوردنده به ژئوپلیمر و منجر به حملات شیمیایی یا فیزیکی می‌شود (Castel, 2016b). کاهش نفوذپذیری می‌تواند به کاهش ورود اسید به ماتریس ژئوپلیمر و در نتیجه بهبود مقاومت بتن در برابر حملات اسیدی کمک کند (Deb et al., 2016). حجم حقابل نفوذ، دوام بتن مرتبط با نفوذپذیری را نشان می‌دهد (Shaikh, 2016). فرآیند مناسب تراکم، شکل‌گیری و اندازه ذرات پیش‌ماده آلومینو-سیلیکات خاکستر بادی پرکننده می‌تواند با بهبود تحکیم بتن، نفوذپذیری را کاهش دهد (Pacheco-Torgal et al., 2008a). نتایج نشان داد که با استفاده از

⁶ RoCA

⁷ AE

خاکستر پرکننده، مقاومت ۶ درصد افزایش یافته و با استفاده از محتوی متاکائولین، مقاومت ۳۴ درصد کاهش یافته است که منجر به افزایش نفوذپذیری با اجازه دادن به خروج رطوبت از ماتریس و در نتیجه کاهش میزان آسیب به بتن می شود (Kong et al., 2007). همچنین، افزودن نانوذرات ممکن است نفوذپذیری گاز و اشتعال پذیری بتن را تا حدود ۲۰ برابر کاهش دهد (Pan et al., 2017) نتیجه گیری شده است که حجم بیشتر مایع به مقاومت فشاری کمتر و نفوذپذیری آب بیشتر منجر می شود (Wongpa et al., 2010). همچنین مشخص شده است که ماده دفع کننده آب بر پایه سیلان-سیلوکسان می تواند انتشار کلرید را از ۱۱ درصد به ۱۷ درصد افزایش دهد و نمی تواند از ورود آب جلوگیری کند (Medeiros & Helene, 2008). به طور ایده آل، مواد بتنی باید با اطمینان از مقدار کافی سیمان، نسبت آب به سیمان به اندازه کافی کم (Castel, 2016b) و تراکم کامل، که به نوبه خود با افزایش درصد جایگزینی سرباره (Chithra & Dhinakaran, 2014)، افزایش محتوای متاکائولین (Bernal et al., 2012)، ترکیب سنگ آهک و میکروسلیسیس (Koksal et al., 2015)، افزایش خاکستر بادی (Hemalatha & Ramaswamy, 2017) و اطمینان از عمل آوری مناسب قابل حصول است، به نفوذپذیری کم برسند. گزارش شده است که ژئوپلیمر و سایر چسباننده های فعال شده قلیایی دارای اندازه گیری های مستقیم نفوذپذیری آب و هوا هستند که به شدت به طرح اختلاط بستگی دارند (Leong et al., 2016).

۳-۲-۲- میزان جذب موئینه

سرعت جذب موئینگی (RoCA، استاندارد ASTM C 642) تابعی وابسته به نفوذپذیری سیستم تخلخل است (Corinaldesi & Moriconi, 2009) و با روش آزمون ASTM C1585 اندازه گیری می شود. سرعت جذب موئینگی خاکسترهای آتشفشانی فعال (آهک) با گذشت زمان افزایش می یابد (Wardhono et al., 2017)، و سرعت جذب موئینگی سایر مواد نیز همراه با افزایش مقدار محتوای بتن سنگدانه بازیافتی آن ها بالا می رود، به جز در شرایطی که مقدار محتوای بتن سنگدانه بازیافتی برابر با ۱۵ درصد باشد، که کمی پایین تر از ژئوپلیمر است که حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه معمولی نیز می باشد (Chen & Brouwers, 2007). این فرضیه مطرح شده است که میزان میکروترک خوردگی ژئوپلیمر تحت تأثیر محتوای خمیر، مقدار بیش از حد چسبنده و تکنیک عمل آوری به کار رفته برای طراحی مخلوط بتنی قرار دارد که همه این موارد می توانند در سنین اولیه به طور حرارتی منجر به ایجاد میکروترک شوند (Chen & Brouwers, 2007). دو نوع ملات ژئوپلیمری با نسبت مولی سود سوزآور (سدیم هیدروکسید) ۱۴ مولار و ۱۸ مولار، سرعت جذب موئینگی بسیار پایینی در حدود ۰/۱۵ کیلوگرم بر مترمربع مجذور ریشه نیم ساعت دارند. در همین حال، یک بتن ساده با مقاومت کلاس C30/37 بعد از ۲۸ روز عمل آوری به سرعت جذب موئینگی^۸ برابر با ۰/۲۵۱ کیلوگرم بر مترمربع مجذور ریشه نیم ساعت دست می یابد (Collins & Sanjayan, 2001). این یافته نشان می دهد که مقدار مزو منافذ ($\emptyset > 50$ نانومتر و $\emptyset > 1$ میکرومتر) به دلیل اتصال آن ها به بتن حجیم از طریق رگ های موئینه و مزوپدهای موجود در خمیر ژل آلومینو-سیلیسی، سرعت جذب موئینگی (RoCA) ژئوپلیمر را کنترل می کند (Gunasekara et al., 2016). افزودن مقدار زیادی از ذرات درشت در خاکسترهای آتشفشانی فعال (آهک) می تواند منجر به تراکم حجمی پایین و در نتیجه تخلخل درشت و سرعت جذب موئینگی بالای ژئوپلیمر شود (Castel, 2016) فضاهای موجود در منافذ موئینه بزرگ (تقریباً ۱۰۰ نانومتر تا ۱۰۰۰ نانومتر) با ژل های آلومینو-سیلیسی پر می شوند و تنها یک پیک پهن در آن چسباننده ها با ساختار متخلخل متراکم مشاهده می شود (Gunasekara et al., 2016).

اضافه کردن مواد پوزولانی (مانند خاکستر رویی، خاکسترهای آتشفشانی فعال، سرباره آسیاب شده با دانه بندی ریز، متاکائولن و سیلیس دود) به مواد سیمانی با نسبت آب به سیمان پایین نیز می تواند سرعت جذب موئینگی ژئوپلیمر را ۱۲ تا ۸۰ درصد کاهش دهد (Pritchard & Speake, 1987). به عنوان مثال، تحقیقات انجام شده بر روی ژئوپلیمرهای پایه سرباره کوره ذوب آهن / یا خاکستر بادی نشان داد که نمونه های آزمایش نسبت به بتن معمولی سرعت جذب کمتری در ژئوپلیمر از خود نشان

⁸ RoCA

می‌دهند، زیرا تخلخل ژئوپلیمر به دلیل ریزتر بودن خاکستر بادی نسبت به سیمان پرتلند کمتر است (Venkatesan & Pazhani, 2016).

۳-۲-۳- مقاومت در برابر محیط خورنده

ژئوپلیمر در برابر حملات شیمیایی (مانند سارین، گاز، هیدروژن، کلر و سیانید) و محیط‌های خورنده تهاجمی (استاندارد ASTM C 452) مقاومت بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد (Deb et al., 2016). افزایش محتوای خاک رس می‌تواند زبری سطح بتن را تا حدود ۲۰ درصد کاهش دهد و در نتیجه سطح در معرض محیط تهاجمی آن را کوچک کند (Pan et al., 2017). ژئوپلیمر مقاومت بالاتری نسبت به محیط‌های تهاجمی از جمله غوطه‌وری در اسید سولفوریک، سولفات منیزیم و اسید نیتریک نشان می‌دهد. مقاومت فشاری این ماده تنها در صورت قرار گرفتن در معرض محیط تهاجمی کاهش ۱۲ تا ۴۰ درصدی را نشان می‌دهد، در حالی که بتن سیمان پرتلند در مدت زمان مشابهی از قرارگیری در معرض، کاهش ۴۰ تا ۶۵ درصدی در مقاومت فشاری را نشان می‌دهد (Castel, 2016b). یافته‌ها حاکی از آن است که ژئوپلیمر پایه خاکسترهای آتشفشانی فعال در مقایسه با سایر بتن‌ها مقاومت بهتری در برابر محیط تهاجمی نشان می‌دهد (Shaikh, 2016). بنابراین، نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که قرار گرفتن ژئوپلیمر در معرض اسید سولفوریک ۳ درصد تنها می‌تواند منجر به کاهش وزن ۰.۵ درصدی شود، در حالی که یک ژئوپلیمر با خاکسترهای آتشفشانی فعال کم‌کلسیم به دلیل محتوای کلسیم پایین می‌تواند تا ۱۰ درصد در برابر اسید سولفوریک مقاومت کند (Olivia & Nikraz, 2013). اضافه کردن سرباره آسیاب شده با دانه‌بندی ریز با CaO (۳۰ - ۵۰٪)، SiO_2 (۲۸-۳۸٪)، Al_2O_3 (۸-۲۴٪) و MgO (۱-۱۸٪) می‌تواند مقاومت در برابر محیط تهاجمی ژئوپلیمر را ۱۰-۱۴٪ افزایش دهد (Kirupa & Sakthieswaran, 2015).

گزارش شده است که استفاده از ۳۰ درصد خاکستر پوسته برنج و ۵۰ درصد سیلیس آمورف می‌تواند مقاومت در برابر محیط تهاجمی (AE) (به عنوان مثال، حمله سولفات در سازه‌های دریایی) ژئوپلیمر را به طور قابل توجهی افزایش دهد (Sangeetha, 2015). علاوه بر این، مطالعه‌ای بر روی نمونه‌های ملات ژئوپلیمری پایه دود سیلیس سرباره آسیاب شده با دانه‌بندی ریز که به مدت ۱۸ هفته در اسید سولفوریک ۱۰ درصد غوطه‌ور شده بودند، نشان داد که نمونه‌ها هیچ تغییر قابل مشاهده‌ای در رنگ نشان نمی‌دهند، اما از طریق میکروسکوپ نوری، هنگامی که برای مدت طولانی‌تر در معرض قرار می‌گیرند، ثبت یک ماتریس خورده شده است (Kong et al., 2007).

با این حال، می‌توان نتیجه گرفت که ژئوپلیمر به دلیل ساختار کمتر متخلخل خود در مقایسه با بتن معمولی مقاومت بهتری در برابر محیط تهاجمی نشان می‌دهد.

۳-۲-۴- تأثیر مواجهه با اسید

تحقیقات زیادی در مورد مقاومت ژئوپلیمر در برابر اسید توسط محققان مختلف انجام شده است (Ariffin et al., 2013; Ismail et al., 2013). همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، مقاومت ژئوپلیمر در برابر اسید به غلظت محلول اسید و زمان تماس بستگی دارد. دیویدوویتس (۲۰۰۵) نشان داد که ژئوپلیمری که با متاکائولن ساخته شده است، در صورت غوطه‌وری به مدت ۳۰ روز در اسید سولفوریک ۵ درصد، ۷ درصد از نظر جرمی از بین می‌رود. این نشان می‌دهد که مقاومت ژئوپلیمر ساخته شده با خاکسترهای آتشفشانی فعال در برابر اسید به شدت به ساختار معدنی آن بستگی دارد (Ismail et al., 2013). تخریب در خمیرها به دلیل دپلمریزاسیون چارچوب آلومینوسیلیکات و ظهور ژئولیت است (Singh & Middendorf, 2020). مشخص شده است که پس از یک سال قرار گرفتن در معرض محلول اسید سولفوریک^۹ به مقدار ۵٪، کاهش مقاومت ژئوپلیمر پایه خاکستر بادی حدود ۲۰ درصد بوده است (Hardjito et al., 2004b). آن‌ها همچنین بیان کردند که ژئوپلیمر از نظر مقاومت در برابر اسید نسبت به بتن سیمان پرتلند عالی عمل می‌کند. همچنین نمونه‌های ژئوپلیمر به مدت ۱۸ ماه در محلول اسید سولفوریک ۲ درصد در معرض قرار گرفتند (Ariffin et al., 2013). کاهش وزن ژئوپلیمر ۸ درصد بود، در حالی که بتن

⁹ H2SO4

بود، در حالی که در محلول سولفات منیزیم هم پوسته شدن دانه ها و هم ماتریس حل شده آلومینو-سیلیکات مشاهده شد که نشان دهنده شدت بیشتر حمله سولفات منیزیم است (Jaturapitakkul et al., 2007).

این تخریب عمدتاً ناشی از تجزیه اسکلت آلومینو-سیلیکات، آزاد شدن اسید سیلیس و شسته شدن یون سدیم در نظر گرفته می شود. این واکنش ها تأثیر عمده ای بر مقاومت مکانیکی دارند. تحقیقات نشان داده است که تغییرات کمی در ژئوپلیمر بتن پایه خاکستر بادی پس از ۳ ماه قرار گرفتن در معرض محیط سولفاتی مشاهده می شود (Hardjito et al., 2005). به طور کلی، تحقیقات انجام شده با استفاده از نمونه های ژئوپلیمر بتن مخلوط با خاکستر نشان داد که پس از ۱۸ ماه غوطه وری در محلول ۵ درصد سولفات سدیم، هیچ تغییر عمده ای مشاهده نشد، اما نمونه های بتن معمولی در مقایسه با نمونه های ژئوپلیمر بتن که به دلیل جذب کم آب و محتوای کم کلسیم چسباننده آن تنها ۴ درصد کاهش وزن داشتند، حدود ۲۰ درصد کاهش وزن نشان دادند. سولفات ها به جز در مواردی که مواد شیمیایی وجود داشته باشد، به شدت به ژئوپلیمر بتن حمله نمی کنند و تمایل به آسیب در سطح و ماتریس ژئوپلیمر بتن به تخلخل آن بستگی دارد.

۳-۲-۶- نفوذ یون کلر

یون های کلر می توانند از طریق شبکه تخلخل بتن نفوذ کرده و به طور بالقوه منجر به خوردگی میلگرد فولادی شوند (Andrade et al., 2014). خوردگی فولاد ناشی از نفوذ یون های کلر یکی از رایج ترین مشکلات مرتبط با دوام سازه های بتنی است (Guoping et al., 2011). برای طراحی و کنترل کیفیت، درک پتانسیل نفوذ یون های کلر به داخل بتن ضروری است. با این وجود، نفوذ یون های کلر به داخل بتن فرآیندی تدریجی است (Olivia & Nikraz, 2012). این مسئله را نمی توان به طور خاص در یک دوره زمانی که برای سنجش کیفیت مفید باشد، اندازه گیری کرد.

تحقیقات نشان داده است که مقاومت فشاری ژئوپلیمر بتن نسبت به بتنی که با سیمان پرتلند معمولی ساخته شده است، بیشتر است (Halim & Ekaputri, 2017). با این وجود، غلظت کلر در ژئوپلیمر بتن بیشتر از بتن معمولی است. آزمایش pH نشان داد که بر اساس آزمایش نفوذپذیری سریع کلر^{۱۰}، ژئوپلیمر بتن نسبت به بتن معمولی دارای pH کمتری است (شکل ۹). مشخص شده است که تخلخل بتن بر نفوذ کلر و pH بتن تأثیر می گذارد. بنابراین، محیط کلریدی اغلب می تواند مقاومت فشاری ژئوپلیمر بتن را افزایش دهد (Megahed et al., 2019).

مطابق با بعضی مطالعات اولیه، ژئوپلیمر بتن ساخته شده با خاکستر (FA) دوام بیشتری در شرایط سخت مانند سولفات، اسید و آتش نسبت به بتن پورتلندی دارد (Giasuddin et al., 2013). محقق دیگری گزارش کرد که کاهش نفوذ کلر به دلیل اثر پرکننده و واکنش تراکم پلیمر در بتن با غلظت بالای سدیم هیدروکسید مشاهده شده است. همچنین کشف شده است که نمونه های ژئوپلیمر بتن ساخته شده از خاکستر بادی کلاس F نسبت به نمونه های حاوی سیمان پرتلند معمولی، از جمله نمونه های ژئوپلیمر بتن ساخته شده با خاکستر کلاس C، مقاومت بسیار بیشتری در برابر نفوذ یون کلر از خود نشان می دهند (Kupwade-Patil & Allouche, 2013).

۳-۲-۷- مقاومت در برابر یخ زدگی و آب شدن

مقاومت در برابر یخ زدگی و آب شدن یکی از عوامل مهم در تعیین دوام سازه های بتنی است، با این حال، بیشتر تحقیقات مستند در مورد مقاومت در برابر یخ زدگی و آب شدن روی مواد ژئوپلیمر ساخته شده از خاکستر بادی نوع F، سرباره کوره ذوب و متاکائولینانجام شده است (Değirmenci, 2018).

تحقیقات نشان داده است که مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمر تحت ۱۵۰ سیکل یخ زدگی و آب شدن تنها ۳۰ درصد نسبت به نمونه های بدون این سیکل ها کاهش یافته است (Fernández-Jiménez et al., 2005). همانطور که توسط ژوانگ (۲۰۱۶) گزارش شده است، ژئوپلیمر فعال شده با قلیایی خاکستر بادی در مقایسه با بتن سیمان پرتلند با مقاومت فشاری مشابه، می تواند ۲/۲ برابر در برابر فرآیند یخ زدگی و آب شدن مقاومت کند. رودریگز (۲۰۱۰) تأثیر مقاومت در برابر یخ زدگی و آب شدن

انواع مختلف محلول فعال کننده قلیایی را ارزیابی کرد و بیان کرد که بتن سرباره و خاکستر پسته برنج فعال شده با سیلیکات سدیم به دلیل ساختار متخلخل کمتر، مقاومت بسیار بالایی دارند. تحقیقات نشان داده است که چسباننده های سرباره فعال شده با قلیایی پس از ۱۰۰ سیکل مقاومت در برابر یخ زدگی و آب شدن، مقاومت فشاری بالایی را از خود نشان می دهند (Provis & Bernal, 2014). گزارش شده است که ژئوپلیمر پایه خاکستر نوع F با اختلاط هوا بعد از ۴۰ سیکل یخ زدگی و آب شدن، نرخ پسته شدن کمی دارد (Dimas et al., 2009). یافته‌ها در مورد کاهش وزن و بهبودهای بصری نمونه‌ها، مقاومت بسیار قابل توجه ژئوپلیمر فعال شده با قلیایی خاکستر بادی را در برابر سیکل‌های یخ زدگی نشان می‌دهد (Degirmenci, 2018).

همچنین مشخص شد که افزودنی های مولد حباب هوا که به طور گسترده برای بهبود دوام یخ زدگی و آب شدن بتن سیمان پرتلند استفاده می شود، دوام مواد فعال شده با قلیایی خاکستر بادی را افزایش نمی دهد. گزارش شده است که ژئوپلیمر پایه خاکستر بادی نیز مقاومت در برابر یخ زدگی و آب شدن را به خوبی نشان می دهد، بنابراین برای کاربرد در بتن مسلح در محیط های بسیار سرد مناسب است (Joseph & Mathew, 2012). با این حال، تأثیر انواع مختلف محلول های فعال کننده قلیایی بر مقاومت در برابر یخ زدگی و آب شدن مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده است که بتن سرباره فعال شده با سیلیکات سدیم به دلیل ساختار متخلخل کمتر، دوام بیشتری دارد. همچنین گزارش شده است که بتن ژئوپلیمر ساخته شده با سرباره کوره ذوب فعال شده با قلیایی می تواند تا ۳۰۰ سیکل یخ زدگی و آب شدن را تحمل کند (Fu et al., 2011). به طور خلاصه، مطالعات منتشر شده در مورد مقاومت در برابر یخ زدگی و آب شدن ژئوپلیمرها محدود است. بر اساس منابع موجود، به نظر می رسد ژئوپلیمرهای پایه سرباره فعال شده با قلیایی مقاومت بسیار خوبی در برابر یخ زدگی و آب شدن دارند.

۴- نتیجه گیری

این مقاله کار بررسی گسترده ای را روی دوام بلندمدت و رفتار ژئوپلیمرها انجام داده است، که به عنوان یک ماده ساختمانی نوآورانه در نظر گرفته می شود که جایگزینی برای سیمان پرتلند ارائه می دهد. در دهه های اخیر، ژئوپلیمر به دلیل سازگاری بیشتر با محیط زیست نسبت به سیمان پرتلند سنتی محبوبیت بیشتری پیدا کرده است. این ماده دارای مزایای زیست محیطی و اقتصادی است که شامل اصلاح بتن موجود و مواد تولیدی می شود.

اکثر مطالعات قبلی تلاش کرده اند تا سیمان پرتلند معمولی را با یک بتن سازگارتر با محیط زیست جایگزین کنند که از چندین محصول جانبی استفاده می کند. یافته های تحقیقات موجود همچنین به تأثیر مواد مختلفی که در ساخت ژئوپلیمر استفاده می شود، بر دوام عملکرد بتن پرداخته است؛ از جمله مقاومت در برابر آتش ماتریس ژئوپلیمر. برای اطمینان از یک جایگذاری رضایت بخش، جنبه های مختلف کاربردی که می تواند توانایی پر شدن و عبور ژئوپلیمر را کنترل کند باید به دقت مورد بررسی قرار گیرد تا تأثیر آن بر عملکرد بلندمدت کاهش یابد.

بر اساس یافته های این کار می توان نتیجه گیری های زیر را گرفت:

- مشخص شده است که مقدار بیشتر مواد چسباننده در بتن ژئوپلیمر می تواند باعث چسبندگی بتن و افت ناگهانی کارایی شود و گرمای هیدراتاسیون بالا در سنین اولیه مشکل دیگری در بتن با مقاومت بالای ژئوپلیمر است که می تواند منجر به ترک خوردگی حرارتی شود.

- برخلاف بتن مبتنی بر سیمان پرتلند معمولی، مشخص شده است که مقاومت بتن فعال شده با قلیایی در محیط کلرید بهبود می یابد. همچنین به دلیل ساختار متخلخل کمتر، مقاومت بهتری نسبت به محیط های خشن در مقایسه با بتن معمولی نشان می دهد. بنابراین، تغییر در تخلخل ریزساختار ژئوپلیمر تمایل به کاهش تأثیر کربناسیون با افزایش سن دارد.

- بتن فعال شده با قلیایی مقاومت خوبی در برابر اسید دارد. پس از یک سال قرار گرفتن در معرض محیط اسیدی، تقریباً ۸۰ درصد از مقاومت خود را حفظ کرد. تخریب بتن فعال شده با قلیایی به غلظت اسید یا سولفات در محیط بستگی دارد. بنابراین، مشخص شده است که در مقایسه با مواد چسباننده مبتنی بر سیمان پرتلند، از دوام بسیار خوبی برخوردار است.

- مشخص شد که افزایش حجم الیاف در بار ترک و جذب نهایی انرژی برشی نقش دارد.
- گزارش شده است که هرچه مولاریته محلول سدیم هیدروکسید برای مقدار معینی متاسیلیکات سدیم^{۱۱} بالاتر باشد، فرآیند ژئوپلیمریزاسیون سریعتر و مقاومت فشاری بتن در برابر جریان خوردگی نسبت به بتن پرتلند معمولی بالاتر است.
- استفاده از خاکستر بادی با کلسیم بالا برای بتن با دوام و ژئوپلیمریزاسیون در ژئوپلیمر توصیه می شود. با این حال، وجود سرباره گرانول بلند (GGBS) و متاکاولین (MK) در مواد فعال شده با قلیایی، واکنش قلیایی-سیلیسی آن را کاهش می دهد.

مراجع

- Abbas, R., Khereby, M. A., Ghorab, H. Y., & Elkhoshkhany, N. (2020). Preparation of geopolymer concrete using Egyptian kaolin clay and the study of its environmental effects and economic cost. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22, 669-687 .
- Abhilash, P., Sashidhar, C., & Reddy, I. R. (2016). Strength properties of Fly ash and GGBS based Geopolymer Concrete. *Int. J. ChemTech Res*, 9(3), 350-356 .
- Ahmed, H. U., Mohammed, A. A., Rafiq, S., Mohammed, A. S., Mosavi, A., Sor, N. H., & Qaidi, S. M. (2021). Compressive strength of sustainable geopolymer concrete composites: a state-of-the-art review. *Sustainability*, 13(24), 13502 .
- Alahmari, T. S., Abdalla, T. A., & Rihan, M. A. M. (2023). Review of recent developments regarding the durability performance of eco-friendly geopolymer concrete. *Buildings*, 13(12), 3033 .
- Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., & Salem, H. A. (2016). Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance. *Construction and building materials*, 121, 694-703 .
- Alsubari, B., Shafiqh, P., Ibrahim, Z., Alnahhal, M. F., & Jumaat, M. Z. (2018). Properties of eco-friendly self-compacting concrete containing modified treated palm oil fuel ash. *Construction and building materials*, 158, 742-754 .
- Andrade, C., d'Andrea, R., & Rebolledo, N. (2014). Chloride ion penetration in concrete: The reaction factor in the electrical resistivity model. *Cement and concrete composites*, 47, 41-46 .
- Anjomshoa, E. (2024a). The application of building information modeling (BIM) system in the smartification of green and sustainable buildings. *Engineering, Construction and Architectural Management* .
- Anjomshoa, E. (2024b). Investigation of lightweight gypsum based on montmorillonite nanoclay with enhanced insulation properties. *International Journal of Building Pathology and Adaptation* .
- Anjomshoa, E. (2024c). Key performance indicators of construction companies in branding products and construction projects for success in a competitive environment in Iran. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 31(5), 2151-2175 .
- Anuradha, R., Thirumala, R., & John, P. N. (2014). Optimization of molarity on workable self-compacting geopolymer concrete and strength study on SCGC by replacing fly ash with silica fume and GGBFS. *Int. J. Adv. Struct. Geotech. Eng*, 3(1), 11-18 .
- Ariffin, M., Bhutta, M., Hussin, M., Tahir, M. M., & Aziah, N. (2013). Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *Construction and building materials*, 43, 80-8 .
- Arun, B., Nagaraja, P., & Srishaila, J. (2019). An effect of NaOH molarity on fly ash—metakaolin-based self-compacting geopolymer concrete. *Sustainable construction and building materials: Select Proceedings of ICSCBM 2018* ,
- ASTM, A. (2017). C150/C150M-17, standard specification for Portland cement. *Am. Soc. Test. Mater. West Conshohocken, PA, USA* .
- Bernal, S. A., De Gutiérrez, R. M., & Provis, J. L. (2012). Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends. *Construction and building materials*, 33, 99-108 .
- Castel, A. (2016a). Bond between steel reinforced and geopolymer concrete Ch14. pdf. *Handb. Low Carbon Concr*, 375-386 .

¹¹ Na₂SiO₃

- Castel, A. (2016b). Bond between steel reinforcement and geopolymer concrete. *Handbook of low carbon concrete*, 375-387 .
- Chen, R., Ahmari, S., & Zhang, L. (2014). Utilization of sweet sorghum fiber to reinforce fly ash-based geopolymer. *Journal of Materials science*, 49, 2548-2558 .
- Chen, W., & Brouwers, H. (۲۰۰۷). The hydration of slag, part 1: reaction models for alkali-activated slag. *Journal of Materials science*, 42, 428-443 .
- Chi, M. (2012). Effects of dosage of alkali-activated solution and curing conditions on the properties and durability of alkali-activated slag concrete. *Construction and building materials*, 35, 240-245 .
- Chindaprasirt, P., & Chalee, W. (2014). Effect of sodium hydroxide concentration on chloride penetration and steel corrosion of fly ash-based geopolymer concrete under marine site . *Construction and building materials*, 63, 303-310 .
- Chithra, S., & Dhinakaran, G. (2014). Effect of hot water curing and hot air oven curing on admixed concrete. *International Journal of ChemTech Research*, 6(2), 1516-1523 .
- Collins, F., & Sanjayan, J. (20۰۷). Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete. *Cement and concrete composites*, 23(4-5), 345-352 .
- Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2009). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete . *Construction and building materials*, 23(8), 2869-2876 .
- Davidovits, J. (1999). Chemistry of Geopolymeric systems, terminology in: proceedings of 99 international conference. eds. *Joseph Davidovits, R. Davidovits & C. James, France* .
- Deb, P. S., Sarker ,P. K., & Barbhuiya, S. (2016). Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica. *Cement and concrete composites*, 72, 235-245 .
- Değirmenci, F. N. (2018). Freeze-Thaw and fire resistance of geopolymer mortar based on natural and waste pozzolans .
- Dimas, D., Giannopoulou, I., & Panias, D. (2009). Polymerization in sodium silicate solutions: a fundamental process in geopolymerization technology. *Journal of Materials science*, 44(14), 3719-3730 .
- Embong, R., Kusbiantoro ,A., Shafiq, N., & Nuruddin, M. F. (2016). Strength and microstructural properties of fly ash based geopolymer concrete containing high-calcium and water-absorptive aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 112, 816-822 .
- Farooq, F., Jin, X., Javed, M. F , Akbar, A., Shah, M. I., Aslam, F., & Alyousef, R. (2021). Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review. *Construction and building materials*, 306, 124762 .
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & Criado, M. (2005). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1204-1209 .
- Fu, Y., Cai, L., & Yonggen, W. (2011). Freeze–thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete. *Construction and building materials*, 25(7), 3144-3148 .
- Giasuddin, H. M., Sanjayan, J. G., & Ranjith, P. (2013). Strength of geopolymer cured in saline water in ambient conditions. *Fuel*, 107, 34-39 .
- Görhan, G., & Kürklü, G. (2014). The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites part b: engineering*, 58, 371-377 .
- Gunasekara, C., Law, D. W., & Setunge, S. (2016). Long term permeation properties of different fly ash geopolymer concretes. *Construction and building materials*, 124, 352-362 .
- Guoping, L., Fangjian, H., & Yongxian, W. (2011). Chloride ion penetration in stressed concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(8), 1145-1153 .
- Halim, L. N., & Ekaputri, J. J .(۲۰۱۷). The influence of salt water on chloride penetration in geopolymer concrete. MATEC Web of Conferences ,
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete .
- Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw ,D., & Rangan, B. (2005). Introducing fly ash-based geopolymer concrete: manufacture and engineering properties. 30th conference on our world in concrete & structures ,

- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D., & Rangan, B. (2004a). Brief review of development of geopolymer concrete. 8th CANMET/ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Las Vegas (USA) ,
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2004b). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials Journal*, 101(6), 467-472 .
- Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2019a). Effect of curing condition on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete. *SN Applied Sciences*, 1, 1-9 .
- Hassan, A., Arif, M & ,Shariq, M. (2019b). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment–A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of Cleaner Production*, 223, 704-728 .
- Heah, C., Kamarudin, H., Al Bakri, A. M., Binhussain, M., Luqman ,M., Nizar, I. K., Ruzaidi, C., & Liew, Y. (2011). Effect of curing profile on kaolin-based geopolymers. *Physics Procedia*, 22, 305-311 .
- Hemalatha, T., & Ramaswamy, A. (2017). A review on fly ash characteristics–Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 147, 546-559 .
- Hwang, J. P., Shim, H. B., Lim, S., & Ann, K. Y. (2013). Enhancing the durability properties of concrete containing recycled aggregate by the use of pozzolanic materials. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17, 155-163 .
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., Hamdan, S., & van Deventer, J. S. (2013). Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. *Materials and Structures*, 46, 36-۳۷۳-۱
- Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W., & Saeting, T. (2007). Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash. *Construction and building materials*, 21(7), 1399-1405 .
- Jeyaseela, J. (2024). Study on workability and durability characteristics of self-compacting geopolymer concrete composites .
- Joseph, B., & Mathew, G. (2012). Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete. *Scientia Iranica*, 19(5), 1188-1194 .
- Karahan ,O., & Yakupoğlu, A. (2011). Resistance of alkali-activated slag mortar to abrasion and fire. *Advances in cement research*, 23(6), 289-297 .
- Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review .*Journal of Materials science*, 42(3), 729-746 .
- Khan, M. Z. N., Shaikh, F. U. A., Hao, Y., & Hao, H. (2018). Effects of curing conditions and sand-to-binder ratios on compressive strength development of fly ash geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(2), 04017267 .
- Kirupa, J., & Sakthieswaran, N. (2015). Possible materials for producing Geopolymer concrete and its performance with and without Fibre addition-A State of the art review. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 5(3), 296-307 .
- Kishore, K., Pandey, A., Wagri, N. K., Saxena, A., Patel, J., & Al-Fakih, A. (2023). Technological challenges in nanoparticle-modified geopolymer concrete: A comprehensive review on nanomaterial dispersion, characterization techniques and its mechanical properties. *Case Studies in Construction Materials*, e02265 .
- Koksal, F., Gencil, O., & Kaya, M. (2015). Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. *Construction and building materials*, 88, 175-187 .
- Kong, D. L., Sanjayan, J. G., & Sagoe-Crentsil, K. (2007). Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 37(1), ۱۰۸۹-۱۰۸۳,(۲
- Koushkbaghi, M., Alipour, P., Tahmouresi, B., Mohseni, E., Saradar, A., & Sarker, P. K. (2019). Influence of different monomer ratios and recycled concrete aggregate on mechanical properties and durability of geopolymer concretes. *Construction and building materials*, 205, 519-528 .
- Kuenzel, C., Vandeperre, L. J., Donatello, S., Boccaccini, A. R., & Cheeseman, C. (2012). Ambient temperature drying shrinkage and cracking in metakaolin-based geopolymers. *Journal of the American Ceramic Society*, 95(10), 3270-3277 .

- Kupwade-Patil, K., & Allouche, E. N. (2013). Examination of chloride-induced corrosion in reinforced geopolymer concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(10), 1465-1476 .
- Leong, H. Y., Ong, D. E. L., Sanjayan, J. G & Nazari, A. (2016). Suitability of Sarawak and Gladstone fly ash to produce geopolymers: A physical, chemical, mechanical, mineralogical and microstructural analysis. *Ceramics International*, 42(8), 9613-9620 .
- Manzoor, T., Bhat, J. A., & Shah, A. H. (2020). Performance of geopolymer concrete at elevated temperature— A critical review. *Construction and building materials*, 420, 135578 .
- Medeiros, M., & Helene, P. (2008). Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete. *Materials and Structures*, 41, 59-71 .
- Megahed, S. Y., Elthakeb, A. M., Mohamed, W. A., Nooman, M. T., & Soufy, W. H. (2019). The impact of marine water on different types of coarse aggregate of geopolymer concrete. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 7(5), 330-353 .
- Moon, J., Bae, S., Celik, K., Yoon, S., Kim, K.-H., Kim, K. S., & Monteiro, P. J. (2014). Characterization of natural pozzolan-based geopolymeric binders. *Cement and concrete composites*, 53, 97-104 .
- Najafi Kani, E., & Allahverdi, A. (2009). Effects of curing time and temperature on strength development of inorganic polymeric binder based on natural pozzolan. *Journal of Materials science*, 44, 3088-3097 .
- Nath, S., & Kumar, S. (2013). Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer. *Construction and building materials*, 38, 924-930 .
- Naveena, K., & Rao, H. (2016). A review on strength and durability studies on geopolymer concrete produced with recycled aggregates. *International Journal for Scientific Research and Development*, 4(07), 27-30 .
- Nazari, A., Bagheri, A., & Riahi, S. (2011). Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash. *Materials Science and Engineering: A*, 528(24), 7395-7401 .
- Neupane, K. (2016). Fly ash and GGBFS based powder-activated geopolymer binders: A viable sustainable alternative of portland cement in concrete industry. *Mechanics of Materials*, 103, 110-122 .
- Nurruddin, M. F., Sani, H., Mohammed, B. S., & Shaaban, I. (2018). Methods of curing geopolymer concrete: A review. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 5(1), 31-36 .
- Olivia, M., & Nikraz, H. (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design*, 36, 1980-1991 .
- Olivia, M., & Nikraz, H. (2013). Properties of fly ash geopolymer concrete in seawater environment. Proceedings of the 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, EASEC 2013 ,
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008a). Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and building materials*, 22(7), 1315-1322 .
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008b). Alkali-activated binders :A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and building materials*, 22(7), 1305-1314 .
- Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T.-C., & Li, N. (2017). A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms. *Construction and building materials*, 132, 578-590 .
- Patankar, S. V., Ghugal, Y. M., & Jamkar, S. S. (2014). Effect of concentration of sodium hydroxide and degree of heat curing on fly ash-based geopolymer mortar. *Indian journal of materials science*, 2014(1), 938789 .
- Payá, J., Agrela, F., Rosales, J., Morales, M. M., & Borrachero, M. V. (2019). Application of alkali-activated industrial waste. In *New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete* (pp. 357-424). Elsevier .
- Pilehvar, S., Cao, V. D., Szczotok, A. M., Carmona, M., Valentini, L., Lanzón, M., Pamies, R., & Kjønksen, A.-L. (2018). Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymer concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials. *Construction and building materials*, 173, 28-39 .
- Pritchard, G., & Speake, S. (1987). The use of water absorption kinetic data to predict laminate property changes. *Composites*, 18(3), 227-232 .

- Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 44(1), 299-327 .
- Raijiwala, D., & Patil, H. (2010). Geopolymer concrete A green concrete. 2010 2nd international conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering ,
- Rakhimova, N., & Rakhimov, R. (2014). A review on alkali-activated slag cements incorporated with supplementary materials. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 3(1), 61-74 .
- Reddy, C. J., & Elavenil, S. (2017). Geopolymer concrete with self-compacting: A review. *Int. J. Civ. Eng. Technol*, 8(2), 163-172 .
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., & Chung, Y. S. (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and building materials*, 47, 409-418 .
- Salami, B. A., Johari, M. A. M., Ahmad, Z. A., & Maslehuddin, M. (2017). Durability performance of palm oil fuel ash-based engineered alkaline-activated cementitious composite (POFA-EACC) mortar in sulfate environment. *Construction and building materials*, 131, 229-244 .
- Sangeetha, B. (2015). Effect of Rice Husk Ash and GGBS on performance of concrete. *Int. J. Eng. Res*, 4, 491-495 .
- Sanni, S. H., & Khadiraikar, R. (2012). Performance of geopolymer concrete under severe environmental conditions. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 3(2), 396-407 .
- Sata, V., Wongsu, A., & Chindaprasirt, P. (2013). Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. *Construction and building materials*, 42, 33-39 .
- Sathonsaowaphak ,A., Chindaprasirt, P., & Pimraksa, K. (2009). Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. *Journal of hazardous materials*, 168(1), 44-50 .
- Shafiq, I., Azreen, M., & Hussin, M. (2017). Sulphuric acid resistant of self compacted geopolymer concrete containing slag and ceramic waste. MATEC Web of Conferences ,
- Shaikh, F. U. A. (2016). Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 277-287 .
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and building materials*, 85, 78-90 .
- Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and building materials*, 237, 117455 .
- Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., & Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, 90, 2118-2124 .(۶)
- Sood, H., Kumar, R., Jena, P. C., & Joshi, S. K. (2023). Eco-friendly approach to construction: Incorporating waste plastic in geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings* .
- Sukmak, P., De Silva, P., Horpibulsuk, S., & Chindaprasirt ,P. (2015). Sulfate resistance of clay-portland cement and clay high-calcium fly ash geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(5), 04014158 .
- Thaarrini, J., & Ramasamy, V. (2016). Properties of foundry sand, ground granulated blast furnace slag and bottom ash based geopolymers under ambient conditions. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60(2), 159-168 .
- Thomas, B. S., Yang, J., Bahurudeen, A., Chinnu, S., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., & Hamada, H. M. (2022). Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review. *Cleaner Materials*, 3, 100056 .
- Venkatesan, R. P., & Pazhani, K. (2016). Strength and durability properties of geopolymer concrete made with ground granulated blast furnace slag and black rice husk ash. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20, 2384-2391 .
- Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D. W., & Setunge, S. (2017). Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes. *Construction and building materials* . ۲۷۹-۲۷۲ , ۱۴۳ ,
- Wasim, M., Ngo, T. D., & Law, D. (2021). A state-of-the-art review on the durability of geopolymer concrete for sustainable structures and infrastructure. *Construction and building materials*, 291, 123381 .

- Wongpa, J., Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2010). Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete. *Materials & Design*, 31(10), 4748-4754 .
- Yahya, Z., Abdullah, M. M. A. B., Hussin, K., Ismail, K. N., Abd Razak, R & ,Sandu, A. V. (2015). Effect of solids-to-liquids, Na₂SiO₃-to-NaOH and curing temperature on the palm oil boiler ash (Si+ Ca) geopolymerisation system. *Materials*, 8(5), 2227-2242 .
- Yip, C. K., Lukey, G. C., Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (۲۰۰۸). Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation. *Cement and Concrete Research*, 38(4), 554-564 .
- Zaid, O., Sor, N. A. H., Martínez-García, R., de Prado-Gil, J., Elhadi, K. M., & Yosri, A. M. (2024). Sustainability evaluation, engineering properties and challenges relevant to geopolymer concrete modified with different nanomaterials: A systematic review. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), 102373 .
- Zhang, Z., Provis, J. L., Zou, J., Reid, A., & Wang, H. (2016). Toward an indexing approach to evaluate fly ashes for geopolymer manufacture. *Cement and Concrete Research*, 85, 163-173 .
- Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., Yu, W. H., & Wang, H. (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267 .