

Effect of using geopolymer on behavior of structural concrete: a review study

L.Tavakoli¹, M.R. Shiravand² and S. Mahboubi^{3*}

1 Ph.D Student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2 Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3 Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

ABSTRACT

In this century, the destruction of the ozone layer, the problem of global warming, the increase in waste materials and the increase in demand for construction materials and the greater use of these wastes have led to extensive studies in this field. One of the effective methods in reducing greenhouse gas emissions and preserving the environment in the construction industry is the use of geopolymer concrete and recycled materials. The use of geopolymer materials as a substitute for cement in concrete, in addition to the environmental effects caused by reducing carbon dioxide emissions and reducing the consumption of fossil fuels for cement production affects in many characteristics of concrete materials such as water absorption, compressive strength and resistance. Also, the higher durability of many geopolymer concretes compared to the ordinary concrete has led to the expansion of studies in the field. This paper reviews the studies on geopolymer concrete from 2005 to 2024. For this purpose, the articles have been studied with the aim of classifying the types of materials used as geopolymers and the effect of each on the properties of concrete. The main purpose is to review the existing materials and present a new approach for the use of other materials such as geopolymer in concrete with an emphasis on reducing the environmental effects and improving the structural characteristics of concrete.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 October 2024

Revise Date: 25 December 2024

Accept Date: 02 February 2025

Keywords:

*Geopolymer,
Compressive strength,
Fly ash,
Slag,
Red mud*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2025.483143.3543](https://doi.org/10.22065/jsce.2025.483143.3543)

*Corresponding author: Shima Mahboubi

Email address: sh_mahboubi@sbu.ac.ir

بررسی اثر استفاده از ژئوپلیمر بر رفتار بتن سازه‌ای: مطالعه مروری

لیلا توکلی^۱، محمودرضا شیراوند^{۲*}، شیما محبوبی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

چکیده

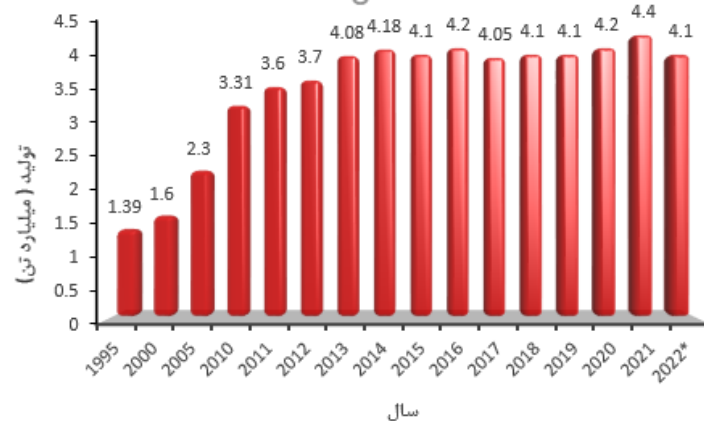
در قرن حاضر تخریب لایه اوزن، مساله گرمایش زمین، افزایش مواد ضایعاتی و افزایش تقاضا برای ساخت در مصالح ساختمانی و استفاده بیشتر از این ضایعات منجر به انجام مطالعات گسترده‌ای در این زمینه شده است. با توجه به این مطالعات، یکی از روش‌های موثر در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ محیط زیست در صنعت ساخت و ساز، استفاده از بتن‌های ژئوپلیمری و مواد بازیافتی است. استفاده از مواد ژئوپلیمری به عنوان جایگزین سیمان در بتن، علاوه بر اثرات زیست محیطی ناشی از کاهش انتشار دی اکسید کربن و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی برای تولید سیمان، در بسیاری از ویژگی‌های مصالح بتن از جمله جذب آب، مقاومت فشاری، مقاومت در برابر حرارت، مقاومت در برابر سولفات، مقاومت در برابر اسید سولفوریک، مقاومت در برابر یخ زدگی، نفوذ یون کلرید، ذوب شدن تاثیر گذار می‌باشد. همچنین دوام بالاتر بسیاری از بتن‌های ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی موجب گسترش مطالعات در زمینه بتن ژئوپلیمری شده است. با این حال، تعدد مواد مورد استفاده به عنوان ژئوپلیمر و عدم وجود اطلاعات کافی از اثر هر یک در ویژگی‌های بتن نیاز به بررسی جامع مطالعات انجام شده در این زمینه را بیش از پیش بیان می‌کند. در این مقاله مطالعات انجام گرفته بر روی بتن ژئوپلیمری از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور مطالعات انجام شده و مقالات منتشر شده در این زمینه با هدف دسته‌بندی انواع مصالح مورد استفاده به عنوان ژئوپلیمر و اثر هر یک بر ویژگی‌های بتن مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج حاصل ارائه می‌شود. هدف اصلی این مقاله بررسی مواد موجود و ارائه نگرشی جدید برای استفاده از سایر مواد به عنوان ژئوپلیمر در بتن با تاکید بر کاهش اثرات زیست محیطی و بهبود مشخصات سازه‌ای بتن می‌باشد.

کلمات کلیدی: ژئوپلیمر، مقاومت فشاری، خاکستر بادی، سرباره، گل قرمز

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.483143.3543	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2025.483143.3543	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۳/۱۱/۱۴	۱۴۰۳/۱۱/۱۴	۱۴۰۳/۱۰/۰۵	۱۴۰۳/۰۸/۰۲
		*نویسنده مسئول: شیما محبوبی				
		پست الکترونیکی: sh_mahboubi@sbu.ac.ir				

۱- مقدمه

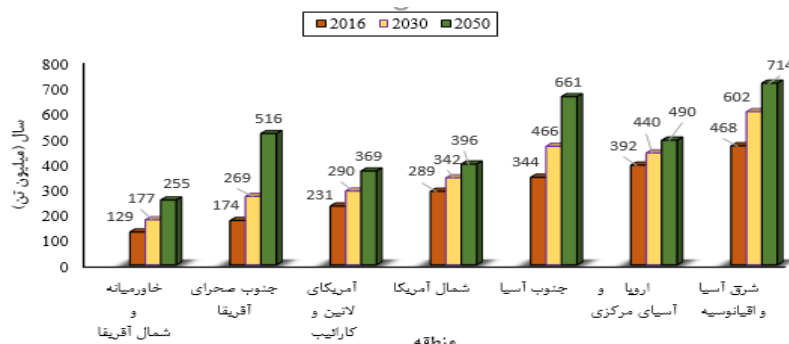
گرم شدن کره زمین از چالش‌های اساسی در دهه‌های اخیر است که به یکی از اصلی‌ترین موضوعات تحقیقات علمی و مهندسی تبدیل شده است [۱]. گزارش‌های منتشر شده توسط سازمان جهانی هواشناسی در سال ۲۰۲۱، حاکی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای داشته است. انتشار گازهای گلخانه‌ای از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ به میزان ۲۴ درصد یعنی ۳ برابر بیشتر از دهه قبل گزارش شده است [۲]. در سال‌های اخیر رشد تولیدات صنعتی و مصرف بیش از اندازه مصالح و منابع طبیعی، منجر به کاهش سریع منابع طبیعی شده است. از سویی دیگر حجم بالای تولید هم مقدار قابل توجهی مواد زائد ایجاد کرده که می‌تواند اثرات نامطلوبی بر محیط زیست داشته باشد [۳]. بنابراین، پایداری محیط زیست از مهم‌ترین دغدغه‌های زیست محیطی در جهت کاهش ضایعات تولیدی پروژه‌های صنعتی و معدنی می‌باشد و اتخاذ تدابیری برای تبدیل ضایعات به محصولات با ارزش بالا به یک زمینه تحقیقاتی رو به رشد تبدیل شده است [۴]. تولید سیمان و هم‌چنین مصرف سوخت‌های فسیلی به خصوص زغال سنگ در نیروگاه‌ها و صنایع تولید فولاد نیز به مقدار فزاینده‌ای در تولید گازهای گلخانه‌ای و تولید CO₂ نقش دارند، به طوری که در سال ۲۰۱۵ تولید سیمان، حدود ۲/۸ میلیارد تن CO₂ را به خود اختصاص داده است [۵، ۶]. بتن نیز که از مخلوط آب، سنگدانه، سیمان و سایر افزودنی‌ها ایجاد می‌شود، به عنوان انبوه‌ترین محصول تولیدی ساختمانی در جهان به شمار می‌آید [۷، ۸] و به عنوان دومین ماده پرمصرف بعد از آب می‌توان در نظر گرفت. منشأ آن به روم و مصر باستان برمی‌گردد و با انتشار قابل توجهی CO₂ همراه می‌باشد [۹]. اصلی‌ترین ماده مورد استفاده در ساخت بتن، سیمان پرتلند معمولی (OPC) است [۱۰]. تقاضای رو به رشد برای بتن نشان از رشد قابل پیش‌بینی افزایشی در تولید سیمان است و انتظار می‌رود از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ به ترتیب از ۴/۳ به ۶/۱ میلیارد تن افزایش یابد [۱۱]. به دلیل تولید سیمان پرتلند معمولی، منابع طبیعی کاهش می‌یابد چرا که برای تولید ۱ تن تولید سیمان پرتلند معمولی به ۱/۷ تن مواد خام (سنگ آهک)، نیاز است [۱۲]. از طرفی انتشار سالانه CO₂ از تولید سیمان پرتلند معمولی حدود ۴ میلیارد تن برآورد شده است [۱۳]، که در حدود ۷-۹٪ از انتشار CO₂ در سراسر جهان را بر عهده دارد [۱۴]. در شکل ۱ روند مصرف سیمان تا سال ۲۰۲۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: تولید جهانی سیمان از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۲.

تولید زباله نیز در چند دهه اخیر در سطح جهانی افزایش قابل توجهی داشته است. مطالعات آماری نشان می‌دهند که از سال ۲۰۱۶ تا سال ۲۰۵۰، تولید زباله دو برابر و به ۳/۴ میلیارد تن خواهد رسید و تا سال ۲۱۰۰ سه برابر خواهد شد [۱۵]. شکل ۲ تولید زباله در مناطق مختلف جهان را نشان می‌دهد.

¹ Ordinary Portland cement



شکل ۲: تولید زباله پیش بینی شده براساس منطقه (میلیون تن در سال) [۱۵].

با توجه به موارد ذکر شده، روند رو به رشد استفاده از مصالح ساختمانی پایدار، به ویژه بتن ژئوپلیمری (GPC) [۱۶]، مورد توجه قرار گرفته است. علت این امر آن است که تولید ژئوپلیمر به دمای کلسینه بسیار پایینی نیاز دارد و دی اکسید کربن کمتری نسبت به سیمان پرتلند منتشر می‌کند. همچنین بتن ژئوپلیمری در مدت کوتاهی در دمای اتاق، مقاومت مناسبی به دست آورده و در بیشتر موارد، ۷۰ درصد از مقاومت فشاری نهایی آن در ۱۲ ساعت اول ایجاد می‌شود. نفوذپذیری کم، مقاومت در برابر آتش و حملات اسیدی بتن‌های ژئوپلیمر نسبت به بتن‌های حاوی سیمان پرتلند بسیار بیشتر است. از دیگر مزایای بتن‌های ژئوپلیمری، مقاومت خوب در برابر چرخه‌های انجماد-ذوب می‌باشد. این ویژگی‌ها باعث می‌شود ژئوپلیمر پتانسیل‌های بسیاری برای کاربرد در بخش‌های مختلف مهندسی عمران، پل، روسازی و تصفیه زباله داشته باشد [۱۷]. استفاده از بتن‌های ژئوپلیمری نتایج امیدوارکننده و پتانسیل قابل توجهی برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، ساده-سازی بازیافت و استفاده مجدد از مواد زائد و ترکیب محصولات جانبی صنعتی و کشاورزی برای تولید بتن ژئوپلیمری را به همراه داشته است. بتن ژئوپلیمری به عنوان ماده‌ای با دوام بهتر و پایدارتر برای کاربردهای ساختمانی در مقایسه با بتن معمولی است. به همین دلایل این مقاله به مرور مطالعات انجام شده بر روی بتن ژئوپلیمری در ۲۰ سال گذشته و انواع ژئوپلیمرهای مورد استفاده در بتن و اثرات هر یک و اثر کاربرد آن در رفتار اعضای سازه‌ای از سال ۲۰۰۵ تاکنون می‌پردازد. به طور کلی، بتن ژئوپلیمری یک نوآوری اساسی در زمینه فناوری بتن است که به طور خاص با هدف کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و همچنین حذف مواد از محل‌های دفن زباله انجام می‌شود. بنابراین امکان ساخت و ساز پایدار را فراهم می‌نماید [۱۸]. شکل ۳ کارایی بتن ژئوپلیمری را در ساخت و ساز نشان می‌دهد.

در این مقاله مطالعات انجام گرفته بر روی بتن ژئوپلیمری از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفته و پس از معرفی ژئوپلیمر و انواع آن به دسته‌بندی مطالعات انجام شده بر روی کاربرد انواع ژئوپلیمرها در بتن‌های سازه‌ای و به طور خاص بتن‌های ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی، گل قرمز، سرباره و بتن‌های ژئوپلیمری مبتنی بر افزودنی‌های متفاوت پرداخته شده است. همچنین تاثیر استفاده از انواع ژئوپلیمرها بر روی مقاومت، دوام و مدول الاستیسته بتن مورد بررسی قرار گرفته است.

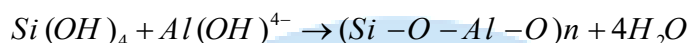
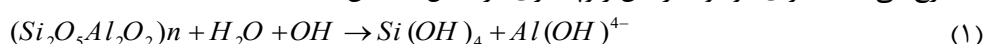


شکل ۳: استفاده از بتن ژئوپلیمری در ساخت و ساز [۱۹].

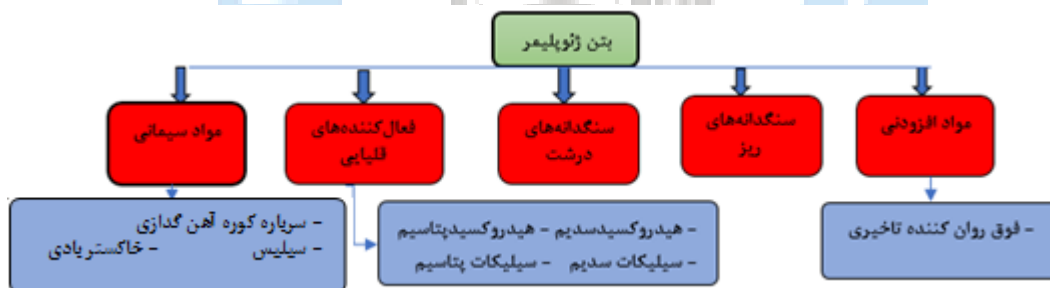
۲- معرفی ژئوپلیمر و انواع آن

² Geopolymer concrete

اصطلاح ژئوپلیمر در دهه ۱۹۷۰ توسط پروفسور جوزف داوود ویتز و محققان فرانسوی نام گذاری شده است و برای توصیف خانواده‌ای از چسب‌های معدنی معرفی شد که دارای ریزساختار آمورف و ترکیب شیمیایی مانند ژئولیت‌ها هستند. ژئوپلیمریزاسیون، یک واکنش چندتراکمی بین مواد آلومینوسیلیکات و سیلیکات فلزات قلیایی در شرایط قلیایی قوی است که منجر به تشکیل پلیمرهای Si-O-Al-O می‌شود. ژئوپلیمرها مقاومت ساختاری خود را از این امر به دست می‌آورند [۲۰]. بتن ژئوپلیمری که به آن ژئوپلیمریزاسیون گفته می‌شود، با فعال شدن یک ماده پوزولانی فراوان در سیلیکون (Si) آلومینیوم (Al) با استفاده از محلول قلیایی آغاز می‌شود [۲۱]. این فرآیند دارای چندین مرحله شامل نشت، پراکندگی، جهت‌گیری مجدد، پلیمریزاسیون و تراکم است [۲۲]. در طی فرآیند تراکم گرما در طی واکنش گرماگیر بتن ژئوپلیمری آزاد می‌شود [۲۳]. بتن ژئوپلیمری می‌تواند به عنوان جانشین آهک معمولی و بتن سیمان پرتلند در نظر گرفته شود [۲۴]. با توجه به فرایندهای بتن‌های ژئوپلیمری مطابق رابطه (۱) می‌توان گفت هر چیزی که حاوی Si و Al آمورف باشد، می‌تواند برای تولید بتن ژئوپلیمری استفاده شود. این مواد می‌توانند مواد معدنی طبیعی یا فرعی صنعتی باشند. واکنش‌های زیر در طول ژئوپلیمریزاسیون [۲۵] رخ می‌دهد. اجزای موجود در بتن ژئوپلیمری در شکل ۴ نشان داده شده است.



محلول‌های فعال کننده قلیایی معمولاً از هیدروکسید سدیم (NaOH) یا هیدروکسید پتاسیم (KOH) و سیلیکات سدیم (Na₂SiO₃) یا سیلیکات پتاسیم (K₂SiO₃) تشکیل می‌شوند و برای تولید ساختارهای کریستالی Si و Al بسیار مهم هستند [۲۶]. مخلوط‌های مبتنی بر پایه سدیم مانند NaOH و Na₂SiO₃ در محلول قلیایی به دلیل هزینه نسبتاً کم و در دسترس بودن، کاربرد بیشتری در مقایسه با ترکیبات حاوی پتاسیم (KOH) دارند [۲۷]. پایه اصلی کل فرآیند ژئوپلیمریزاسیون پخت بهینه بتن ژئوپلیمری تازه است، چون نقش به‌سزایی در به حداکثر رساندن مقاومت فشاری دارد. در کل، بتن ژئوپلیمری با استفاده از روش‌های مختلفی مانند پخت در فر، پخت با بخار، پخت در دمای محیط و غیره انجام می‌شود [۲۸، ۲۹]. بتن ژئوپلیمری مقاومت فشاری اولیه عالی، حداقل انقباض و مقاومت قابل توجه در برابر خزش را نشان می‌دهد و برای محیط‌های اسیدی مناسب است [۳۰].



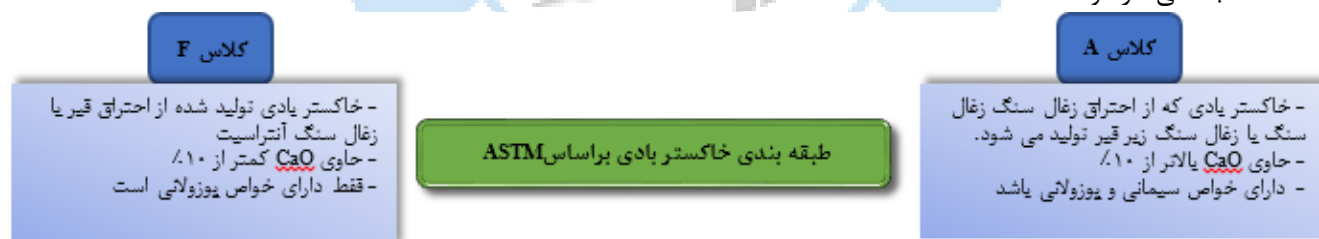
شکل ۴: اجزای بتن ژئوپلیمری [۳۱].

۳- مطالعات انجام گرفته بر روی کاربرد انواع ژئوپلیمرها در بتن سازه‌ای

۳-۱- بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی

خاکستر بادی یک زباله صنعتی است که معمولاً برای جایگزینی سیمان پرتلند در ساخت بتن استفاده می‌شود و تا حدی می‌تواند جایگزین سیمان پرتلند شود، زیرا SiO₂ و Al₂O₃ در خاکستر بادی هنوز به Ca(OH)₂ از هیدراتاسیون سیمان پرتلند برای واکنش پوزولانی آن برای تولید هیدرات سیلیکات کلسیم و هیدرات آلومینات کلسیم نیاز دارند شکل دیگری از مواد سیمانی به نام ژئوپلیمر ساخته شده است که معمولاً از خاکستر بادی فعال شده با محلول قلیایی در دمای پایین ساخته می‌شود و گاهی به آن خاکستر بادی فعال شده با قلیایی می‌گویند [۳۲]. دو نوع رایج خاکستر بادی وجود دارد، خاکسترهای بادی کلاس F و کلاس C که خاکسترهای بادی کلاس F دارای ذراتی هستند که در نوعی شیشه ذوب و پوشانده شده‌اند. در مجموع خاکسترهای بادی کلاس F کلسیم کم‌تری دارند و میزان کربن آن‌ها کمتر از ۵ درصد است، اما گاهی به ۱۰ درصد نیز می‌رسد. خاکسترهای بادی کلاس C نیز در مقابل انقباض ناشی از حمله شیمیایی مقاومت داشته و نسبت به خاکسترهای بادی کلاس F دارای درصد بیشتری اکسید کلسیم هستند [۳۳]. در سال ۲۰۰۵ سوماجو و همکاران با استفاده از سیلیکون و آلومینیوم موجود در خاکستر بادی کم کلسیم و فعال سازی با ترکیبی از محلول‌های هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم فعال،

سنگدانه‌ها و سایر مواد واکنش‌دهنده را به هم متصل کردند. رفتار و مقاومت تیرهای بتن ژئوپلیمری مسلح با تیرهای بتنی سیمان پرتلند معمولی تفاوتی نداشت و ظرفیت خمشی تیرها نیز با افزایش نسبت آرماتورکشی و مقاومت فشاری بتن افزایش یافت [۳۴]. شکل ۵ دسته بندی خاکستریادی براساس ASTM را نشان داده است. سوماجو و رنکو در سال ۲۰۰۶ نشان دادند رفتار سازه‌ای تیر ساخته شده با بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی، مشابه تیرهای بتن مسلح معمولی است. ستون ساخته شده از بتن ژئوپلیمری، مبتنی بر خاکستر بادی نیز همانند بتن معمولی شکست شکننده گزارش شده است [۳۵]. چندپراسیرت و همکاران در سال ۲۰۰۶ کارایی و مقاومت ملات ژئوپلیمری ساخته شده از خاکستریادی با کلسیم بالا حاصل از زغال سنگ درشت را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور ژئوپلیمر با هیدروکسیدسدم، سیلیکات سدیم و حرارت فعال شد. نتایج نشان داد که کارایی ملات ژئوپلیمر در محدوده 5 ± 110 و 5 ± 135 درصد بوده و به نسبت جرم سیلیکات سدیم به NaOH و غلظت NaOH بستگی دارد. مقاومت فشاری در محدوده ۶۵-۱۰ مگاپاسکال به دست آمد. نسبت سیلیکات سدیم به NaOH بهینه برای تولید ژئوپلیمر با استحکام بالا ۰/۶۷-۱/۰۰ بود. تغییر غلظت NaOH بین ۱۰ تا ۲۰ مولر تأثیر کمی بر استحکام داشت. نمونه‌های ژئوپلیمری با استحکام بالا با روش‌های مختلف به دست آمدند. زمان تأخیر پس از قالب‌گیری و قبل از قراردادن نمونه در معرض حرارت یک ساعت و دمای بهینه پخت در کوره ۷۵ درجه سانتی‌گراد، زمان پخت حداقل دو روز بود [۳۶]. اثر مواد افزودنی مختلف از دوده سیلیس یا خاکستر بادی فعال بر مقاومت مکانیکی ملات و همچنین استفاده احتمالی از این خاکسترهای بادی فعال شده به عنوان جایگزینی برای دوده سیلیس در تولید ملات یا بتن با مقاومت بالا توسط بلانکو و همکاران (۲۰۰۶) مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که ملات‌های حاوی خاکستر بادی فعال، مقاومت فشاری بالاتری دارند. همچنین خاکستر بادی فعال یک افزودنی مهم برای ساخت ملات‌هایی است که در مراحل اولیه هیدراتاسیون نیاز به مقاومت بالایی دارند [۳۷]. در مطالعه دیگری تموجین و همکاران تأثیر ترکیبات کلسیم شامل (CaO) و $CA(OH)_2$ را بر خواص مکانیکی ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر بادی مورد مطالعه قرار دادند. براساس نتایج حاصل، افزودن ترکیبات کلسیم به عنوان یک جایگزین خاکستر بادی در دمای محیط، خواص مکانیکی نمونه‌های پخت شده را بهبود بخشید اما خواص مکانیکی نمونه‌های پخت شده در دماهایی غیر از دمای محیط را نیز کاهش داد [۳۸]. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۰۹ بر روی فرآوری قلیایی خاکستر بادی مخلوط با محلول NaOH و روش اختلاط برای تهیه ژئوپلیمر توسط یوبولوک و همکاران انجام شد، فرآوری قلیایی SiO_2 و Al_2O_3 با اختلاط خاکستر بادی با محلول NaOH در فواصل زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، برای تهیه خمیر ژئوپلیمر از اختلاط جداگانه و اختلاط معمولی استفاده شد. نتایج نشان داد که حلالیت خاکستر بادی به غلظت NaOH و مدت زمان اختلاط با NaOH بستگی دارد و ملات



شکل ۵: طبقه بندی خاکستر بادی بر اساس ASTM [۳۴].

حاصل از اختلاط جداگانه مقاومت بهتری نسبت به ملات حاصل از اختلاط معمولی دارد [۳۹]. تموجین و همکاران (۲۰۱۰) ملات‌های ژئوپلیمری در سطوح مختلف از سنگدانه شن و ماسه تهیه و خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور مواد طبیعی مانند کوارتز، بازالت، گرانیت، ماسه سنگ و سنگ آهک به عنوان سنگدانه در خمیر ژئوپلیمرها در خاکستر بادی مورد استفاده قرار گرفت. براساس نتایج مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی به مقاومت چسب ژئوپلیمر و پیوند عالی بین چسب ژئوپلیمر و سنگدانه بستگی دارد. افزایش نسبت سنگدانه در ملات، میزان ژئوپلیمریزاسیون را کاهش داده اما تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری ندارد. آن‌ها پیشنهاد کردند که مقاومت فشاری ملات‌های ژئوپلیمری با سطوح بالای سنگدانه را می‌توان با بهینه‌سازی مقدار قلیایی افزایش داد [۴۰]. چندپراسیرت و همکاران در سال ۲۰۱۱ سنتز ژئوپلیمر با مقاومت بالا با استفاده از خاکستر بادی ریزدانه با کلسیم بالا را مورد مطالعه قرار دادند. اثر خاکستر بادی ریزدانه بر زمان گیرش خمیر ژئوپلیمر، کارایی، مقاومت، و انقباض خشک شدن ملات‌های ژئوپلیمری ساخته شده از خاکستر بادی ریزدانه طبقه‌بندی شده با کلسیم بالا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد زمان گیرش خمیر با افزایش خاکستر بادی ریز

دانه کاهش می‌یابد. هم‌چنین جریان، مقاومت و ویژگی‌های خشک‌کردن و انقباض ملات‌ها با استفاده از خاکستر بادی ریزدانه بهبود یافت [۳۲]. سعید احمدی و همکاران (۲۰۱۲) خواص تولید چسب ژئوپلیمری از پودر بتن ضایعاتی آسیاب شده (GWC) ۳ مخلوط با خاکستر بادی کلاس F را مورد مطالعه قرار دادند و اثر ترکیب و غلظت محلول قلیایی و محتوای پودر بتن ضایعاتی آسیاب شده بر مقاومت فشاری محصور نشده چسب ژئوپلیمری تولید شده، را بررسی کردند. نتایج نشان داد گنجاندن ضایعات بتن (WC) ۴ به همراه خاکستر بادی می‌تواند مقاومت فشاری نامحدود مقاومت فشاری نامحدود UCS ۵ چسب ژئوپلیمری را تا ۵۰٪ محتوای ضایعات بتن افزایش دهد. افزایش بیشتر پودر بتن ضایعاتی آسیاب شده باعث کاهش مقاومت فشاری نامحدود چسب ژئوپلیمری می‌شود. با ترکیب مناسب پودر بتن ضایعاتی آسیاب شده و خاکستر بادی می‌توان چسب ژئوپلیمری با مقاومت لازم تولید کرد [۴۱]. سفیان بدر و همکاران (۲۰۱۴) بتن‌های ژئوپلیمری تقویت شده با استفاده از سه خاکستر بادی با محتوای کلسیم متفاوت را مدتی در معرض کرنانه شدن تسریع شده قرار دادند. خاکسترهای بادی کلاس F با کلسیم پایین برای تولید بتن ژئوپلیمری تقویت شده با فولاد، از نظر دوام مناسب‌تر از آن‌هایی هستند که حاوی سطوح بالاتری از کلسیم هستند و بتن‌های ژئوپلیمری تهیه شده از خاکستر بادی با محتوای کرنانه مناسب‌تر هستند، زیرا به نظر می‌رسد خواص این مواد خطر کرنانه شدن را کاهش می‌دهد [۴۲]. تاناکورا و همکاران به بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار ژئوپلیمر خاکستر بادی کلسیم بالا حاوی سیمان پرتلند معمولی به عنوان افزودنی با شرایط پخت متفاوت پرداختند. استفاده از سیمان پرتلند معمولی به عنوان افزودنی در خاکستر بادی با کلسیم بالا منجر به افزایش خواص مکانیکی از جمله کاهش تخلخل‌ها و جذب آب و افزایش مقاومت فشاری شده و روش‌های پخت نیز به طور قابل توجهی بر خواص ژئوپلیمرها با سیمان پرتلند معمولی تأثیر می‌گذارد [۴۳]. زانتانگ و همکاران (۲۰۱۵) اثر غلظت NaOH، جایگزین جزئی خاکستر بادی به عنوان چسب ژئوپلیمر و خاکستر پایین ۶BA به عنوان سنگدانه درشت در ژئوپلیمر را با سیمان پرتلند معمولی (OPC) و هم‌چنین اثر دمای عمل‌آوری بر روی خواص بتن ژئوپلیمری (PGC) ۷ را مورد بررسی دادند. نتایج نشان داد که قدرت خواص بتن ژئوپلیمری با غلظت NaOH و سطح جایگزینی سیمان پرتلند معمولی افزایش یافت. پخت در دمای بالا نیز یک عامل مهم برای افزایش مقاومت خواص بتن ژئوپلیمری بود [۴۴]. خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری با خاکستر بادی کم کلسیم با حرارت پخت و رفتار تیرهای بتنی ژئوپلیمری توسط خوانان نگوین و همکاران (۲۰۱۶) مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر اندازه‌گیری شده مدول الاستیسیته بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی کم کلسیم با حرارت پخت، با مقاومت فشاری با بتن معمولی متفاوت بود. نسبت پواسون بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی مشابه مقادیر بتن معمولی می‌باشد. روابط تنش-کرنش بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی حرارت دیده در تراکم به خوبی با فرمول طراحی شده برای بتن سیمانی پرتلند مطابقت داشت. مقاومت کششی غیرمستقیم اندازه‌گیری شده بتن ژئوپلیمری خاکستر بادی بیشتر از مقادیر محاسبه شده با استفاده از بیان طراحی شده برای بتن سیمانی پرتلند به دست آمد [۴۵]. پیم نواکلونگ و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی اثرات متاکائولین (MK) ۸ بر خواص یک بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی حاوی ۱۰۰٪ سنگدانه درشت بازیافت شده از نمونه‌های خرد شده آزمایشگاهی به بررسی پرداختند. بتن ژئوپلیمری با متاکائولین دارای مقاومت، تخلخل، جذب آب و مقاومت اسیدی بهتری بود. افزایش استفاده از متاکائولین منجر به مقاومت‌های بالاتر در بتن ژئوپلیمری سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی می‌شود. خاکستر بادی با کلسیم بالا مخلوط شده با بتن ژئوپلیمر متاکائولین حاوی سنگدانه بازیافتی برای ساخت و ساز سازگار با محیط زیست مناسب است و از نظر عملکرد مکانیکی با یک بتن ژئوپلیمری معمولی ساخته شده با سنگدانه طبیعی قابل مقایسه است [۴۶]. چاکردار و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی انتقادی خمیر و بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی پرداختند. مطالعات بر روی تأثیر دمای پخت، مدت زمان پخت، دوره استراحت، مولاریته NaOH و نسبت Na_2SiO_3 بر خواص بتن ژئوپلیمری انجام گرفته است [۴۷]. هم‌چنین مریم قاضی و همکاران (۲۰۲۲) یک محلول قلیایی قوی برای فعال کردن سیلیکون و آلومینیوم موجود در خاکستر بادی و افزودنی‌های تنظیم‌کننده مورد بررسی قرار دادند. اهداف اصلی این کار تعیین اثرات نوع محلول قلیایی بر خواص تازه و مکانیکی ملات ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی فعال شده با قلیایی (کلاس F) بود. محلول‌ها به ترتیب با مخلوط کردن مایع سیلیکات سدیم با هیدروکسید سدیم و با هیدروکسید پتاسیم ساخته شد. هم‌چنین به جای

³ Ground waste concrete

⁴ waste concrete

⁵ unconfined compressive strength

⁶ Bottom ash

⁷ Properties of geopolymer concrete⁷ Metakaolin

⁸ Metakaolin

مایع سیلیکات سدیم از مایع سیلیکات پتاسیم استفاده شد. بر اساس بررسی‌های تجربی فعلی و تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش غلظت محلول هیدروکسید کارایی تمام مخلوط‌های ملات ژئوپلیمری را کاهش می‌دهد. سیلیکات پتاسیم یا هیدروکسید پتاسیم در ملات ژئوپلیمر خاکستر بادی به طور کلی کارایی را افزایش می‌دهد. بالاترین درصد جریان ملات ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی توسط مخلوطی از محلول‌های KS+KH ثبت شده است [۴۸]. باتورالپ یالچینکایا و همکاران نیز اثرات کربن خاکستر بادی زیست توده (BFA) ۹ در تشکیل بتن ژئوپلیمری و هزینه آن را با بتن معمولی مقایسه کردند. نتایج تفاوت قابل توجهی را نشان داد. محققان به این نتیجه دست یافتند که ژئوپلیمرها به کاهش اثرات تولید سیمان بر محیط زیست کمک کرده و انتشار گازهای سبز را ۴۰ تا ۸۰ درصد کاهش می‌دهند. انتشار CO₂ و هزینه تولید برای بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی زیست توده کمتر از بتن معمولی نسبت به بتن معمولی منتشر می‌کند. جدول شماره ۱ و ۲ به مقایسه این موضوع پرداخته است [۴۹].

۲-۳- بتن ژئوپلیمری مبتنی بر گل قرمز و افزودنی‌هایش

گل قرمز یا لجن قرمز (RM) ۱۰، یک زباله بسیار قلیایی است که اغلب از اکسید آهن در تهیه صنعتی آلومینیوم تولید می‌شود. سالانه حدود ۷۷ میلیون تن از این مواد خطرناک تولید می‌شود، از این رو می‌توان گل قرمز را یک مشکل جدی در صنعت استخراج معادن در نظر گرفت. گل قرمز، هم‌چنین به عنوان ضایعات بوکسیت شناخته می‌شود و یک محصول جانبی فرآیند بایر است و اصلی‌ترین روش پالایش بوکسیت در مسیر آلومینیوم اکسید محسوب می‌شود. برای تولید آلومینا، ۵ تن بوکسیت شسته و تصفیه می‌شود تا ۲ تن فلز آلومینیوم تولید شود. تولید جهانی ۲۱ میلیون تنی آلومینیوم سالانه ۸۲ میلیون تن لجن تولید می‌کند. این بقایای استخراج که بسیار قلیایی (pH=10) بوده و به نام گل قرمز شناخته می‌شوند، در مقادیر زیادی تولید و تخلیه شده و در محل‌های دفن زباله بزرگ دفع می‌شوند. گل قرمز می‌تواند مشکلات زیست‌محیطی

جدول ۱: مقادیر انتشار CO₂ مرتبط با ۱ تن بتن معمولی [۴۹].

نام مصالح بتن آرمه	وزن (کیلوگرم)	نسبت وزن	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	ضریب انتشار CO ₂ برابر در کیلوگرم
مخلوطی از ماسه‌ها	۴۷/۳۰۳	٪۳۰/۳۰	۱۶۵۰	۱۴۷/۰
سیمان (۷۵ مگاپاسکال)	۴۷/۲۹۸	٪۲۹/۸۰	۳۰۵۰	۲۵۰/۱
آب	۵۱/۲۷۶	٪۲۷/۷۰	۱۰۰۰	۰۰۰۵۹/۰
مخلوط چسب	۷۴/۸	٪۰/۹۰	۲۶۸۵	۲۱۰/۳
میله‌های فولادی	۸۰/۱۱۲	٪۱۱/۳۰	۷۸۵۰	۸۹۰/۲
چگالی بتن			۶۰/۲۵۹۶	
کل مخلوط (کیلوگرم)	۰۰/۱۰۰۰			
(برای ۱ تن CO ₂) کل				۹۳۲/۷۷۱
کیلوگرم CO ₂ معادل بر کیلوگرم				۷۷۲/۰

جدول ۲: مقادیر انتشار CO₂ مرتبط با ۱ تن بتن ژئوپلیمری [۴۹].

نام مصالح بتن آرمه	وزن (کیلوگرم)	نسبت وزن	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	ضریب انتشار CO ₂ برابر در کیلوگرم
متاکائولین	۹۰۳/۲۹۲	٪۲۹/۳۰	۱۸۵۰	۲۴۵/۰
معرف برای قلیایی شدن	۲۷۹/۲۸۷	٪۲۸/۷۰	۱۰۵۰	۴۲۴/۰

⁹ Biomass fly ash

¹⁰ Red mud

SIO2	۴۰۶/۳۱	%۳/۱۰	۳۱۹	۸۹۰/۲
ماسه	۷۴/۸	%۰/۸۰	۳۵۰	۰۵۱/۰
فیبر کربن	۳۴۰/۹۴	%۹/۴۰ %۰/۸۰	۱۶۵۰	۳۵۰
خاکستر بادی زیست توده	۰۱۹/۲۸۳	%۲۸/۳۰	۴۲۵	۰۰۰/۰
آلومینیوم	۰۴۳/۳	%۰/۳۰	۲۷۰۰	۷۹/۱۲
چگالی ژئوپلیمر			۵۰/۱۱۴۰	
کل مخلوط (کیلوگرم)	۱۰۰۰۰/۰			
(برای ۱ تن CO ₂) کل				۵۳۰/۳۳۷
کیلوگرم CO ₂ معادل بر				۳۳۸/۰
کیلوگرم				

جدی ایجاد کند و استفاده از آن در صنعت به حل این مشکل کمک شایانی می‌کند. شکل ۶ خطرات زیست محیطی گل قرمز و هم‌چنین کاربرد آن در صنعت را نشان می‌دهد [۵۰]. از جمله مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از گل قرمز در بتن مطالعه آجیان هو و همکاران در سال ۲۰۱۲ است که با هدف تبدیل دو ماده از ضایعات صنعتی شامل گل قرمز (RM) و خاکستر پوسته برنج (RHA) به یک ماده ساختمانی مفید از طریق ژئوپلیمریزاسیون نوع جدیدی از بتن ژئوپلیمر RM-RHA ارائه کردند. محصولات حاصل که با آزمایش فشرده‌سازی مکانیکی، پراش اشعه ایکس و اسکن مشخص می‌شوند، سنتز شد. در این مطالعه، میکروسکوپ الکترونی برای ارزیابی خواص مکانیکی، ریزساختار و واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که پخت طولانی مدت به طور قابل توجهی مقاومت فشاری و مدول یانگ بتن ژئوپلیمری



شکل ۶: الف) مخاطرات زیست محیطی گل قرمز (ب) کاربرد گل قرمز در صنعت ساختمان [۵۰].

را افزایش و شکل‌پذیری را کاهش می‌دهد. هر چه نسبت مقدار گل قرمز به پوسته برنج بیشتر باشد، مقاومت، سختی و شکل‌پذیری بتن حاصل بیشتر می‌شود، اگر پوسته برنج بیش از حد استفاده شود، ممکن است اثر معکوس ایجاد کند. نتایج حاصل از تحلیل‌های ریزساختاری و ترکیبی نشان داد که محصولات نهایی اغلب از چسب ژئوپلیمر آمورف با فازهای کریستالی ارثی و نئوفرم شده به عنوان پرکننده تشکیل شده‌اند که ترکیبات کامپوزیت را بسیار پیچیده و خواص مکانیکی را بسیار متغیر می‌سازد. براساس از نتایج می‌توان گفت که ژئوپلیمرهای RM-RHA سنتز شده نوعی کامپوزیت متشکل از چسب‌های ژئوپلیمر خالص و سایر فازها به عنوان پرکننده هستند. این فناوری بالقوه، در صورت موفقیت آمیز بودن، می‌تواند اثرات زیست محیطی و اقتصادی قابل توجهی را برای صنایع ساختمانی، تولیدی و انرژی ایجاد کند [۵۱]. هوجوجی و همکاران (۲۰۱۳) ژئوپلیمری را با فعال‌سازی سیلیکات سدیم (NaOH) مخلوط‌های متاکائولین، اکسید آهن و گل قرمز طراحی کردند. اثرات مواد اولیه بر ریزساختار و خواص مکانیکی مورد مطالعه قرار گرفت. محصولات متاکائولین و متاکائولین-گل قرمز جذب آب و چگالی قابل توجهی را نشان دادند. گل قرمز به عنوان یک ماده مناسب برای تولید ژئوپلیمر است که می‌تواند پس از اعمال نسبت‌های معقول نسبت به متاکائولین استفاده شود [۵۲]. تهیه ژئوپلیمر مستقیماً از گل قرمز به دلیل واکنش پذیری ضعیف و محتوای Si/Al کم آن ایده‌آل

¹¹ Rice husk ash

نیست. مطالعات نشان می‌دهند که افزودن الیاف خاک اره (SD) ۱۲، محصول جانبی پودر شدن چوب، به عنوان جزء تقویت کننده ژئوپلیمر، برای مقاومت در برابر ترک خوردگی و انقباض خشک شدن مفید می‌باشد. ان جی کان و همکاران (۲۰۱۸) سنتز کامپوزیت ژئوپلیمری تشکیل شده توسط گل قرمز و خاک اره و مورفولوژی، خواص شیمیایی، حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌های ژئوپلیمری تهیه شده و فعال شده توسط هیدروکسید سدیم (NaOH) مورد بررسی قرار دادند. کامپوزیت‌های ژئوپلیمری مبتنی بر گل قرمز و خاک اره با ترکیبات مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند تا روابط ساختاری-عملکردی برای سیستم ایجاد شود. آزمایش‌ها نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌ها برای گل قرمز و خاک اره متفاوت بود [۵۳]. بررسی اثر استفاده مشترک از دو ماده عمده زباله صنعتی، خاکستر بادی نیروگاه و گل قرمز توسط گابور موسی و همکاران (۲۰۱۹) انجام شده است. براساس نتایج حاصل، مقاومت فشاری ژئوپلیمر تا ۱۵ درصد افزایش گل قرمز در خاکستر بادی، افزایش یافت. تأثیر گل قرمز بر ترکیب فاز و پیوندهای شیمیایی ژئوپلیمر حاصل با استفاده از آنالیز XRD و مطالعات FTIR تعیین شد. با توجه به واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون، فازهای جدیدی مانند هیدروکسی کانکرینیت، فوژازیت و تناردیت در محصول ظاهر شد [۵۴]. در سال ۲۰۲۰ جیان ژانگ و همکاران به منظور کاهش استفاده از سیمان پرتلند و حل مشکل آلودگی گل قرمز، یک دوغاب جدید بر پایه گل قرمز جدید-سیمان منیزیم فسفات پتاسیم (RMG) (MKPC) ۱۳ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که گل قرمز زمان گیرش، مقاومت مکانیکی و فشردگی سیمان منیزیم فسفات پتاسیم را افزایش می‌دهد. گل قرمز می‌تواند خواص سیمان منیزیم فسفات پتاسیم را کاهش دهد. مقاومت فشاری ابتدا افزایش و سپس با افزایش مقدار گل قرمز کاهش می‌یابد [۵۵]. پارامترهایی مانند زمان گیرش و کارایی، تأثیر عواملی مانند انواع فعال کننده قلیایی، غلظت فعال کننده‌های قلیایی، نسبت مولی ترکیبات شیمیایی مختلف، نسبت مایع به جامد، نسبت سنگدانه ریز به چسب، شرایط پخت، افزودن نرم کننده و غیره در مطالعه‌ای توسط منجوشا مورالیدهران و همکاران ۲۰۲۱ که از گل قرمز (RM) و زباله شیشه (GW) ۱۴ برای تولید چسب و ملات ژئوپلیمر استفاده کرده بودند، مورد بررسی قرار گرفت. استفاده بالقوه از گل قرمز و زباله شیشه برای سنتز ژئوپلیمر به نیاز به تحقیقات بیشتر در مورد تناسب مخلوط و ترکیب این دو ماده خام با سایر مواد پوزولانی اشاره دارد [۵۶]. هم‌چنین مانیش مودگال و همکاران (۲۰۲۱) خاکستر بادی و گل قرمز را برای تهیه بتن ژئوپلیمری مورد مطالعه قرار دادند. ژئوپلیمر تهیه شده از خاکستر بادی و گل قرمز با مقاومت بالا در شرایط آزمایشگاهی به دست آمد و حداکثر مقاومت فشاری با ۱۰ درصد وزنی گل قرمز حاصل شد. درحالی‌که ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی در شرایط آزمایشگاهی مشابه، مقاومت فشاری کم‌تری را نشان داد. برای مطالعه خواص ساختاری مواد خام و ژئوپلیمر از طیف سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس (XPS)، طیف سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)، آنالیز اندازه ذرات و FE-SEM استفاده شد. مطالعات XPS نشان داد که آهن در ژئوپلیمریزاسیون شرکت نمی‌کند. هم‌چنین مشاهده شد که وجود گل قرمز منجر به افزایش نسبت مولی Si/Al و Na/Al در مقایسه با ژئوپلیمر گل قرمز می‌شود. مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تشکیل ساختاری با مترکم بالا را برای ژئوپلیمر خاکستر بادی-گل قرمز تأیید کرد که گل قرمز، آلومینیوم را برای مشارکت در ژئوپلیمریزاسیون فراهم می‌کند و به طور هم‌زمان به عنوان پرکننده عمل می‌کند و در نتیجه منجر به فرآیند ژئوپلیمریزاسیون پیشرفته و فعال در ترکیب خاکستر بادی با گل قرمز می‌شود [۵۷]. یکی از مواد زاید رادیواکتیو سمی گل قرمز (RM) که به عنوان محصول b از فرآیند تولید آلومینیوم (Al) تولید می‌شود، توسط شارک و همکاران با هدف کاهش استفاده از سیمان پرتلند معمولی در ساخت و ساز مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه انجام یک بررسی پیشرفته در مطالعات استفاده از گل قرمز و خاکستر بادی (FA) در تولید کامپوزیت‌های ژئوپلیمری خاکستر گل قرمز (RM-FAGPC) بوده است. براساس نتایج این مطالعه، پیامدهای زیست محیطی و اقتصادی، ویژگی‌های فیزیکی و فیزیکی گل قرمز، همگی به صورت دیسکی هستند. تولید، توزیع، طبقه‌بندی، و کاربردهای آینده‌نگر، پیشرفت‌های فعلی در استفاده از گل قرمز و FA برای سنتز ژئوپلیمر از نظر خصوصیات مکانیکی، دوام و ریزساختار psi مورد بررسی قرار گرفت [۵۰]. تحقیقاتی با هدف به حداقل رساندن مضرات، بازیافت فلزات ارزشمند، کاربردهای زیست محیطی و استفاده به عنوان مصالح ساختمانی بر روی گل قرمز توسط آنی نیو و همکاران انجام شد. بررسی‌ها نشان داد که گل قرمز متمایل به سیلیس و کلسیم و آهن بیشتر، سدیم و آلومینیوم کمتری در مقایسه با گل قرمز ساده دارد. هم‌چنین گچ پرمصرف‌ترین عامل برای کاهش مضرات گل قرمز و به دنبال آن گاز CO₂ بود [۵۸].

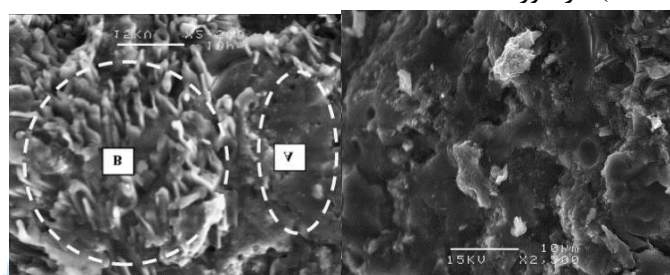
۳-۳- بتن ژئوپلیمری مبتنی بر سرباره و افزودنی‌هایش

¹² Sawdust

¹³ Red mud geopolymers

¹⁴ Glass waste

سرباره محصولی مصنوعی و جانبی است، که به هنگام جداسازی آهن در کوره ذوب آهن از ناخالصی‌های موجود در سنگ آهن به وجود می‌آید. سرباره ترکیبی از سیلیکات و اکسید پیچیده است که پس از سرد شدن مواد ناخالصی باقی می‌ماند. این ترکیب پس از گرفتن شکل جامد در مصارف گوناگون شامل سیمان‌های سرباره‌ای، مواد نسوز، پشم سرباره و پاره سنگ و مصالح جاده و مصالح سنگی آسفالت و بتن است. در سال ۲۰۰۷ یان شن و همکاران مطالعاتی شامل سنتز ژئوپلیمر با استفاده از سرباره و متاکائولین و همین‌طور رفتارهای تثبیت ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره در حضور یون‌های سرب و مس بود انجام دادند. در مورد سنتز ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره، سه نوع رژیم پخت برای به دست آوردن شرایط سنتز بهینه را بررسی کردند. در خصوص مقاومت فشاری و خمشی، نتایج آزمایش نشان داد که ملات ژئوپلیمری حاوی ۵۰ درصد سرباره که در عمل آوری با بخار مقاومت مکانیکی بالاتری از خود نشان می‌دهد. تکنیک‌های فرسوخ (IR)، پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نیز مطابق شکل ۷ برای توصیف ریزساختار خمیر ژئوپلیمر مبتنی بر سرباره استفاده شد. در مورد تثبیت فلزات سنگین، آزمایش‌های لیچینگ نشان می‌دهد که ملات ژئوپلیمری مبتنی بر سرباره می‌تواند به طور موثر یون‌های فلزات سنگین مس و سرب را بی‌حرکت کند. سرب نیز کارایی تثبیت بهتری نسبت به مس در مورد دوزهای زیاد فلزات سنگین نشان می‌دهد [۱۷]. ژئوپلیمری (FAGPC-15SGPC) را مورد



ب)

الف)

شکل ۷: میکروگراف SEM چهارچوب بتن ژئوپلیمری الف) مبتنی بر سرباره ب) بدون سرباره [۱۷].

بررسی قرار دادند. شکل ۸ نمونه‌های مختلف را در معرض آب دریا، سولفات منیزیم و اسیدسولفوریک ۵٪ نشان می‌دهد. هدف این مطالعه بررسی قابلیت استفاده بتن‌های ژئوپلیمری به جای بتن معمولی سیمانی پرتلند برای استفاده سازه‌ای بود. لذا نمونه‌های بتن ژئوپلیمری مبتنی بر سرباره، بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی و سیمان پرتلند معمولی به ترتیب در معرض محلول‌های اسید سولفوریک (H_2SO_4)، سولفات منیزیم ($MgSO_4$) و آب دریا قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بتن ژئوپلیمری مبتنی بر سرباره به دلیل ساختار پلیمری آلومینا سیلیکات با پیوند متقابل پایدارتر و بادوام‌تر از بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی است و نمونه‌های بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی، مقاومت دوام بهتری نسبت به نمونه‌های سیمان پرتلند معمولی نشان دادند. با این حال، نمونه‌های بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی، عملکرد مکانیکی پایین‌تری نسبت به نمونه‌های سیمان پرتلند معمولی به دلیل واکنش پذیری کم ذرات خاکستر بادی، مقدار کم کلسیم و ساختار متخلخل‌تر نشان دادند. در میان محیط‌های شیمیایی، اسید سولفوریک (H_2SO_4) خطرناک‌ترین محیط برای همه انواع بتن بود. [۵۹].

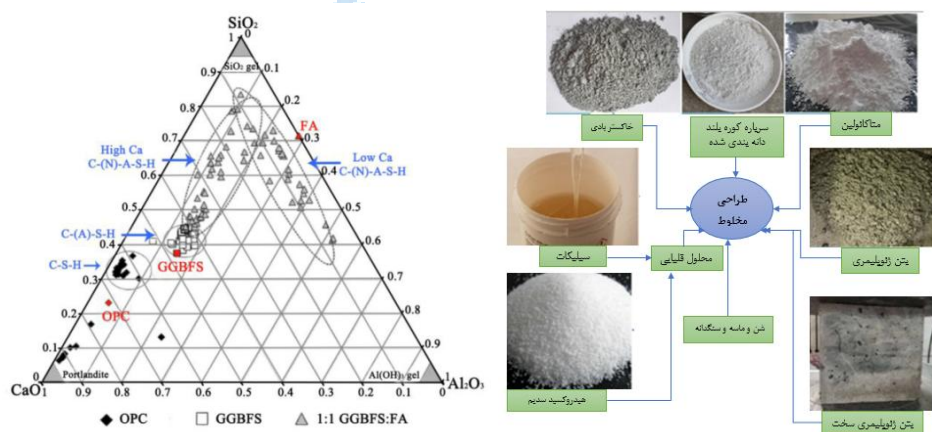


الف) نمونه‌های بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره ب) نمونه‌های بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی ج) نمونه‌های سیمان پرتلند معمولی شکل ۸: مشاهدات عینی نمونه‌هایی که در معرض حمله شیمیایی قرار گرفته‌اند [۵۹].

عارف حسین و همکاران (۲۰۱۹) با تحقیق در مقالات گذشته بر استفاده پایدار از سرباره صنعت فولاد (SIS) در صنعت ساخت و ساز برای هدف‌های توسعه پایدار تاکید داشتند. نتایج نشان داد که سرباره صنعت فولاد مورد استفاده در تولید سیمان و بتن به عنوان سنگدانه یا به عنوان مواد سیمانی اضافی دارای مقاومت و دوام طولانی مدت است. علاوه بر این، جایگزینی سیمان با سرباره صنعت فولاد واکنش هیدراتاسیون در سنین پایین را بدون هیچ مشکل قابل توجهی به تعویق انداخت. هم‌چنین جایگزینی زیاد سرباره صنعت فولاد با سیمان می‌تواند مشکل ناپایداری حجمی را ایجاد کند که با استفاده از سرباره کوره آهن گدازی (GGBS) ۱۷ به عنوان مخلوط ترکیبی، مشکل اسلامپ مخلوط‌های بتن را حل کرد [۶۰]. مکانیسم واکنش ژئوپلیمرها، کارایی، خواص مکانیکی و دوام بتن ژئوپلیمری بتن ژئوپلیمری مبتنی بر FA/GGBFS تازه و سخت شده توسط پنگ ژانگ و همکاران ۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد مواد خام اصلی مورد استفاده در بتن ژئوپلیمری زباله‌های صنعتی مانند خاکستر بادی و GGBFS هستند و استفاده از بتن ژئوپلیمری می‌تواند انتشار CO₂ را کاهش، بازیافت زباله را تسهیل و توسعه پایدار جامعه را ارتقا دهد. به دلیل ویسکوزیته بالای محلول Na₂SiO₃ اسلامپ بتن ژئوپلیمری با افزایش مقدار Na₂SiO₃ کاهش می‌یابد. مقایسه‌ها نشان داد که بتن ژئوپلیمری مبتنی بر FA/GGBFS خواص مکانیکی بهتری نسبت به بتن معمولی دارد. می‌توان نشان داد که بتن ژئوپلیمری مبتنی بر FA/GGBFS نسبت به بتن معمولی پس از حمله اسیدی دارای افت مقاومت و کاهش جرم کمتری است، که نشان می‌دهد بتن ژئوپلیمری مقاومت اسیدی عالی دارد. با این حال، مقاومت کربناته شدن بتن ژئوپلیمری کمتر از بتن معمولی است. خواص بتن ژئوپلیمری مبتنی بر FA/GGBFS به ترکیب شیمیایی چسب‌ها، شرایط پخت، فرآیندهای ریخته‌گری و شرایط محیطی بستگی دارد. شکل ۹ الف جریان فرآیند تولید بتن ژئوپلیمر را نشان می‌دهد که مزیت آن نسبت به بتن معمولی در این است که این بتن با جایگزینی زباله‌های صنعتی تولید می‌شود و شکل ۹ ب ترکیبات بتن معمولی، خاکستر بادی و سرباره کوره بلند دانه بندی شده را نشان می‌دهد [۶۱].

۳-۴- بتن ژئوپلیمری مبتنی بر افزودنی‌ها

بی‌سینگ و همکاران مروری بر پیشرفت‌های ژئوپلیمرهای حاصل از فعال‌سازی قلیایی آلومینوسیلیکات‌ها همراه با فرصت‌هایی برای استفاده از آن‌ها در ساخت و ساز ساختمان ارائه دادند. مقررات طراحی ذکر شده در دستورالعمل‌های ACI و سایر قوانین ملی بتن معمولی برای بتن ژئوپلیمری نیز قابل اجرا گزارش شده است. خواص ملات/ بتن ساخته شده از چسب‌های ژئوپلیمری با توجه به حالت‌های تازه و سخت شده، منطقه انتقال سطحی بین سنگدانه و ژئوپلیمر، پیوند با میله‌های تقویت کننده فولاد و مقاومت در برابر دمای بالا، مورد بحث قرار گرفته و هم‌چنین دوام خمیرهای ژئوپلیمر و بتن از نظر زوال آن‌ها در محیط‌های مختلف تهاجمی مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های این مطالعه نشان داد که بتن ژئوپلیمری دارای خواص قابل مقایسه‌ای با بتن معمولی است که پتانسیل استفاده در کارهای مهندسی عمران را دارد. به طور معمول، چسب‌های



ب) ترکیبات ژل چسب ژئوپلیمرها و بتن معمولی.

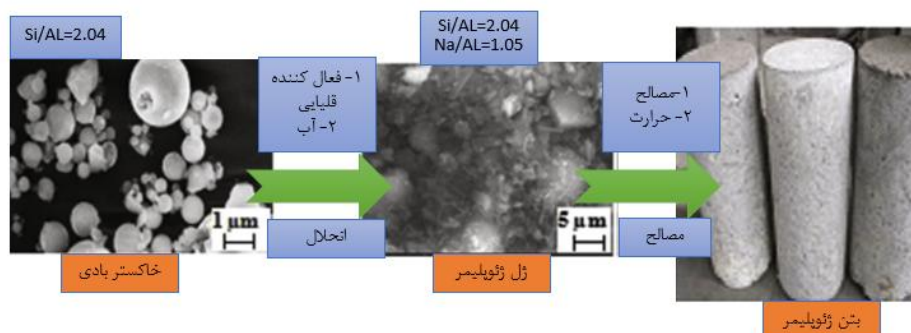
الف) تولید بتن ژئوپلیمری.

شکل ۹: ترکیبات و تولید بتن ژئوپلیمری [۶۱].

¹⁶ Steel industry slag

¹⁷ Ground granulated blast furnace slag

ژئوپلیمری نیاز به پخت حرارتی، pH بالا دارند و هم‌چنین در جابه‌جایی میدانی مشکل دارند. بنابراین، با توجه به پذیرش گسترده‌تر آن در این زمینه، تلاش‌هایی برای ایجاد یک سیستم ژئوپلیمری یک جزئی با دمای اتاق با استفاده از فعال‌کننده‌های جامد به جای محلول‌های قلیایی مورد نیاز گزارش شده است. نمایش شماتیک در مورد تشکیل ژئوپلیمرهای بتن مبتنی بر خاکستر بادی در شکل ۱۰ نشان داده شده است [۶۲].



شکل ۱۰: تبدیل خاکستر بادی به بتن ژئوپلیمر [۶۲].

در سال ۲۰۱۶ وهاب توفیق و همکاران به بررسی تاثیر میزان رزین اپوکسی بر رفتار بتن پلیمری و مقایسه رفتار بتن پلیمری با بتن معمولی پرداختند. در این تحقیق، یک سری آزمایش‌های فشاری و کششی به منظور بررسی رفتار تنش-کرنش بتن پلیمری انجام شد و کاربرد مدل‌های بتن سیمانی مورد ارزیابی قرار گرفت و مدل مفهوم حالت آشفته (DSC) ۱۸ برای پیش‌بینی رفتار بتن پلیمری پیشنهاد شد. نتایج به دست آمده نشان داد که کرنش در اوج برای بتن پلیمری دو تا سه برابر بیشتر از کرنش بتن معمولی مربوط به محتوای رزین اپوکسی می‌باشد و هم‌چنین با افزایش مقدار رزین اپوکسی، مقاومت فشاری افزایش یافته، در حالی که مقاومت کششی نسبتاً ثابت بود. در رفتار فشاری، محتوای رزین اپوکسی بالاتر، تنش ماکزیمم بالاتر و کرنش نسبتاً ثابت مربوط به تنش ماکزیمم، یعنی مدول الاستیسیته بالاتر را به همراه داشت. سطح زیر منحنی تنش-کرنش فشاری بتن پلیمری که شاخص جذب انرژی و شکل پذیری مواد است، به ترتیب تقریباً سه و چهار برابر بیشتر از بتن معمولی OC ۱۹ و بتن با مقاومت بالا HSC ۲۰ بود [۶۳]. کیم هونگ مو و همکاران تحقیقات و تمرکز خود را به سمت مطالعه رفتار بتن ژئوپلیمری در مقیاس‌های میکرو و کلان معطوف داشتند. مشخص شد به طور کلی استفاده از بتن ژئوپلیمری به عنوان عضو سازه‌ای از نظر ظرفیت باربری آن اثر مخربی ندارد و آیین‌نامه‌های استاندارد می‌تواند برای طراحی ایمن اعضای بتنی ژئوپلیمری مورد استفاده قرار گیرند و اعضای ساخته شده از بتن ژئوپلیمری مانند تیرها و ستون‌ها را می‌توان با استفاده از آیین‌نامه‌های طراحی برای اعضای بتن آرمه معمولی طراحی کرد [۶۴]. مطالعه دیگری با هدف بررسی امکان فعال‌سازی ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی با هیبریداسیون خاکستر بادی (FA) و خاکستر چوب با کلسیم بالا (HCWA) ۲۱ (XRD) و بدون افزودن فعال‌کننده‌های قلیایی معمولی توسط چن چی بان و همکاران (۲۰۱۶) انجام گرفت. مواد خام یعنی خاکستر بادی و خاکستر چوب با کلسیم بالا از نظر فازهای شیمیایی و کانی‌شناسی با پراش اشعه ایکس و X-ray فلورسانس (XRF) مشخص شدند و عملکرد مکانیکی ملات‌های ژئوپلیمر از نظر مقاومت فشاری، خمشی، سرعت پالس اولتراسونیک (UPV) و مدول دینامیکی ارزیابی شد. خواص دوام یعنی جذب آب، تخلخل خلاء و جذب مویرگی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در مورد زنده ماندن هیبریداسیون خاکستر بادی و خاکستر چوب با کلسیم بالا برای تولید ملات‌های ژئوپلیمر خود فعال جدید مثبت بود [۶۵]. هم‌چنین وی جایا و همکاران خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمر با متاکائولین به عنوان ماده پایه را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها با افزودن فیبر پلی وینیل الکل (PVA) ۲۲ پس از ریخته‌گری، روش پخت با بخار انجام و زمان گیرش، مقاومت فشاری، شکاف کششی، کشش مستقیم و تخلخل انجام شد. نتایج نشان دهنده افزایش مقاومت نمونه‌های فیبری با افزایش دمای پخت از دمای اتاق بود [۶۶]. هائو وانگ، بیوی لیو در سال ۲۰۱۹ مروری بر روش‌های طراحی مخلوط گزارش‌شده فعلی بتن‌های ژئوپلیمری تهیه شده با سرباره و خاکستر بادی FA ارائه

¹⁸ disturbed state concept

¹⁹ ordinary concrete

²⁰ High strength concrete

²¹ High calcium wood ash

²² Poly vinyl alcohol fiber

دادند. روش‌های مختلف به سه دسته طبقه بندی شدند، روش مقاومت هدف، روش مبتنی بر عملکرد و روش مدل فاکتوریل آماری. تفاوت در روش‌ها، مزایا و معایب آن‌ها مورد بحث قرار گرفت. روش مورد استفاده روش مقاومت هدف بود. نسبت مایع قلیایی به چسب (AL/B) و نسبت آب به چسب (W/B) با قدرت و کارایی بتن‌های ژئوپلیمری مرتبط هستند که مشابه W/B در بتن سیمانی پرتلند است. روش مبتنی بر مقدار ثابت آب به طور کلی مورد استفاده قرار گرفت و نوع سنگدانه، اندازه، درجه بندی و حداکثر را در نظر گرفتند [۶۷]. در سال ۲۰۲۰ پدram قاسمی و همکاران اثرات طولانی مدت چهار محیط مختلف تهاجمی شامل محلول‌های آب دریا، اسیدی، قلیایی و آب شیرین بر دوام و خواص مکانیکی بتن پلیمری اپوکسی (EPC) ۲۳ و بتن سیمانی معمولی (OCC) ۲۴ به مدت دوازده ماه مورد بررسی قرار دادند. همین‌طور ۲۵UPV (تست سرعت پالس اولتراسونیک) انجام پذیرفت و هم‌بستگی بین مقاومت فشاری و UPV تعیین شد. براساس نتایج حاصل، بتن پلیمری اپوکسی به طور کلی مقاومت بهتری در برابر حملات شیمیایی در مقایسه با بتن سیمانی معمولی پس از یک سال قرار گرفتن در معرض محیط تهاجمی از خود نشان دادند. علاوه بر این، نمونه‌های بتن پلیمری اپوکسی با یک محتوای بالای رزین اپوکسی، مقاومت و عملکرد شگفت‌انگیزی را در بین نمونه‌های دیگر نشان دادند. از طرفی محلول اسیدی به طور قابل ملاحظه‌ای خواص مکانیکی هر دو نمونه بتن پلیمری اپوکسی و بتن سیمانی معمولی را کاهش داد و در محلول قلیایی، کاهش مقاومت فشاری برای بتن سیمانی معمولی بیشتر از نمونه‌های بتن پلیمری اپوکسی بود. بر اساس تجزیه و تحلیل SEM ۲۶ (میکروسکوپ الکترونی روبشی)، هیچ خرابی قابل توجهی در رزین اپوکسی پس از قرار گرفتن در معرض محیط‌های شیمیایی یافت نشد. علاوه بر این، ساختارهای گسترده C-S-H برای بتن سیمانی پس از یک سال قرار گرفتن در آب شیرین مشاهده شد. تجزیه و تحلیل تاگوچی نشان داد که محیط‌های اسیدی و قلیایی تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتنی داشتند. علاوه بر این، نمونه‌های EPC ۱۲ عملکرد بهتری در مقایسه با سایر انواع بتن نشان دادند. آناوا نشان داد که نوع بتن مؤثرترین پارامتر در کاهش مقاومت کششی و فشاری در مقایسه با pH و زمان قرار گرفتن در معرض بود [۶۸]. جیان ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ مواردی بر روی بتن ژئوپلیمری ارائه کرده‌اند. بحث شامل اجزاء و نسبت مخلوط آن‌ها، خواص مکانیکی و رئولوژیکی بتن ژئوپلیمر، منطقه انتقال سطحی (ITZ) ۲۷، مقاومت پیوند برای تقویت فولاد است. همراه با تغییر در خواص با ترکیبات مختلف سرباره کوره بلند دانه بندی شده آسیاب شده در بتن ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی، اثرات اجزای تشکیل دهنده بر روی خواص مشخص شده است. هم‌چنین مقایسه‌ای بین بتن سیمانی پرتلند معمولی و بتن ژئوپلیمر را بر اساس کار محققان مختلف ارائه داده‌اند. ژئوپلیمر دارای ترکیبی از سرباره کوره بلند دانه بندی شده آسیاب شده تا ۱۱۰ درصد افزایش در مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. مدول الاستیسیته ۵ تا ۱۰ درصد بیشتر از بتن معمولی بود. مقاومت خمشی بتن ژئوپلیمر، ۱/۴ برابر بیشتر و مقاومت کششی شکاف ۸ تا ۱۲ درصد بیشتر از بتن معمولی بود. بتن ژئوپلیمر دارای ترکیبی از سرباره با خاکستر بادی در مقایسه با بتن سیمانی پرتلند معمولی با مقاومت فشاری معادل ۱۰٪ مقاومت باند بالاتری با تقویت فولادی دارد. در مقایسه با بتن سیمانی پرتلند معمولی، ژئوپلیمر دوام، مقاومت در برابر آتش و مقاومت اسیدی بهتری دارد. مشخص بتن ژئوپلیمر بیشتر به پخت حرارتی وابسته است و این امر طیف استفاده آن را محدود می‌کند. اگرچه داده‌های تجربی بسیاری توسط نویسندگان مختلف ارائه شده است که به ما کمک می‌کند تا نسبت‌های مخلوط بتن ژئوپلیمری را درک کنیم، فقدان کدهای استاندارد مانع از انطباق انبوه آن می‌شود [۳۱]. تیان لینگبو و همکاران به تحقیق در مورد مقاومت کربناته شدن، مقاومت ساختاری در برابر آتش، مقاومت در برابر خوردگی، خواص نفوذی و مقاومت در برابر یخبندان بتن‌های ژئوپلیمری پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که ژئوپلیمرها دارای خاصیت مکانیکی فوق العاده هستند و مقاومت فشاری آن‌ها می‌تواند بالاتر از ۱۰۰ مگاپاسکال باشد. به طور کلی، هر چه مقاومت بتن ژئوپلیمر بیشتر باشد، مقاومت بیشتری در برابر کربناته شدن دارد. بتن ژئوپلیمر مقاومت عالی در برابر آتش دارد. چون ژئوپلیمرها در دمای اتاق با اسیدها واکنش نمی‌دهند، می‌توان از آن‌ها برای ساخت مواد مقاوم در برابر اسید استفاده کرد. علاوه بر این، بتن ژئوپلیمر حجم تخلخل کم و مقاومت مناسب در برابر نفوذپذیری نشان داد. مکانیسم شکست انجماد و ذوب بتن‌های ژئوپلیمری عمدتاً براساس تئوری فشار هیدرواستاتیک و اسمزی است. هم‌چنین براساس نتایج بتن ژئوپلیمر مقاومت ضعیفی در برابر یخ زدگی دارد [۶۹]. در سال ۲۰۲۳ راحیل اصغر و همکاران به این نتیجه رسیدند که بتن ژئوپلیمر را می‌توان به عنوان یک جایگزین بالقوه احتمالی برای بتن معمولی با

²³ Epoxy polymer concrete

²⁴ Ordinary cement concrete

²⁵ ultrasonic pulse velocity test

²⁶ Scanning electron microscopy

²⁷ Interfacial Transition Zone

داشتن خواص ساختاری و مکانیکی مشابه یا بهتر در نظر گرفت. اهمیت بتن ژئوپولیمری به آن علت است که می توان به جای استفاده از این منابع طبیعی، از ضایعات صنعتی و برخی محصولات جانبی دیگر مانند خاکستر بادی (FA)، دود سیلیس (SF) ۲۸، خاکستر پوسته برنج (RHA)، متاکائولین (MK)، سرباره کوره بلند دانه بندی شده زمینی استفاده کرد. هم چنین کاهش گرمایش جهانی، کاهش انتشار CO₂، کاهش استفاده از مواد بکررا به همراه دارد. بررسی عملکرد مکانیکی و ساختاری بتن ژئوپولیمر براساس دو نوع روش تجزیه و تحلیل یعنی یک روش علم سنجی و یک روش متداول انجام شد [۷۰]. محمد نجار و همکاران در مطالعه ای ترکیب گل قرمز ناشی از ضایعات صنعت آلومینیوم (RM)، خاکستر بادی (FA) و خاکستر پوسته برنج (RHA) را مورد بررسی قرار دادند. مصالح ساختمانی پایدار حاصل از پالایشگاه آلومینا (گل قرمز) همراه با خاکستر بادی و خاکستر پوسته برنج ساخته شد. مولاریته فعال کننده های قلیایی یعنی هیدروکسید سدیم و سیلیکات های سدیم تأثیر قابل توجهی بر تمام پارامترهای در نظر گرفته شده نشان دادند. مقاومت فشاری ژئوپولیمر با افزایش مولاریته افزایش می یابد در حالی که چنین روندی برای چگالی مشاهده نمی شود [۷۱]. احمد بابکر الهاق و همکاران در سال ۲۰۲۳ مطالعه ای جامع در صنعت محصولات جانبی، از جمله پودر ضایعات گرانیت (GWP) ۲۹ و باقیمانده بوکسیت (BR)، برای بررسی مناسب بودن آن ها در صنعت ساختمان قرار گرفت. هدف ارائه یک بررسی دقیق از رفتار بتن تازه، مکانیکی، دوام و ریزساختاری خمیر ژئوپولیمر تولید شده با استفاده از باقیمانده بوکسیت و پودر ضایعات گرانیت بود. نتایج نشان داد که باقیمانده بوکسیت خالص با نسبت کمتر از Al₂O₃/SiO₂ واکنش ضعیفی نشان می دهد. بنابراین برای ژئوپولیمریزاسیون بهتر با سایر آلومینوسیلیکات ها که دارای نسبت بیشتری از Al₂O₃/SiO₂ هستند، مخلوط شوند. ترکیب نانومواد در ژئوپولیمر مبتنی بر پودر ضایعات گرانیت تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری و کششی اولیه نشان داد [۷۲]. ولید المام در مطالعه ای، سرباره کوره بلند دانه بندی شده زمینی (GGBFS) و سنگدانه های ریز بتن ژئوپولیمری معمولی تا حدی با پودر آجر رسی (CBP) ۳۰ و آجر سفالی ریز (FCB) ۳۱ مشتق شده از C&D ۳۲ را جایگزین کردند و ضایعات به ترتیب، با هدف تولید بتن ژئوپولیمری با مقاومت بالا (HSGC) ۳۳. خاکستر بادی (FA) هم چنین به عنوان جایگزینی جزئی برای سرباره کوره بلند دانه بندی شده در بتن ژئوپولیمری معمولی استفاده شد عملکرد مخلوط بتن ژئوپولیمری با مقاومت بالا پیشنهادی با اندازه گیری چندین ویژگی مکانیکی و دوام ارزیابی شد. علاوه بر این، انواع روش های فیزیکی شیمیایی، از جمله طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس، پراش اشعه ایکس و اسکن میکروسکوپ الکترونی برای بررسی ویژگی های کانی شناسی و ریزساختاری استفاده شد. یافته ها نشان داد که الحاق خاکستر بادی یک پارامتر ضروری برای از بین بردن اثرات منفی افزودن ضایعات C&D بر بتن است. علاوه بر این، عملکرد ضد کربناته و مقاومت انجماد بتن ژئوپولیمری با مقاومت بالا بهینه نیز افزایش یافت و تخلخل ظاهری کاهش یافت [۷۳]. آل احمری و همکاران (۲۰۲۳) تحولات اخیر در مورد دوام عملکرد بتن ژئوپولیمری دوست دار محیط زیست را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این بررسی، دوام بیشتر بتن ژئوپولیمری را نسبت به بتن معمولی مبتنی بر سیمان نشان می دهد. هم چنین بتن ژئوپولیمری به عنوان ماده ای با دوام بهتر، جایگزین پایدارتر و ماده ای بادوام تر برای کاربردهای ساختمانی در مقایسه با بتن معمولی است. مشاهده شده است که بتن ژئوپولیمری در مقایسه با بتن معمولی به دلیل دوام افزایش یافته پیوند ژئوپولیمری شده خود، که در مقاومت در برابر زوال اسید سولفوریک از پیوند سیمان پر تلند بهتر عمل می کند، پایداری شیمیایی بیشتری از خود نشان می دهد. مقاومت سایشی بالا ممکن است به طور بالقوه با استفاده از بتن ژئوپولیمری که دارای سنگدانه های متراکم و کم متخلخل است ایجاد شود. شکل ۱۱ مقاومت خاکستر بادی با کلسیم بالا و فعال ساز قلیایی را برای بتن ژئوپولیمری تا ۴۵ روز در محلول اسید سولفوریک ۲٪ برای نمونه های M40، M20 و M60 نشان می دهد. یافته ها نشان داد که لبه های نمونه ها و سطوح به نظر کمی آسیب دیده است [۷۴].

²⁸ Silica fume

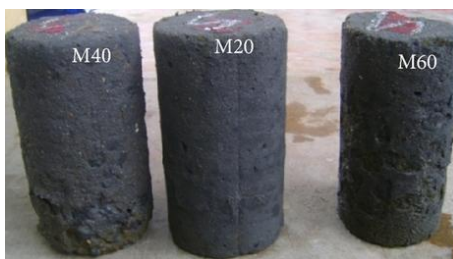
²⁹ Granite waste

³⁰ Clay brick powder

³¹ Fine clay brick

³² construction and demolition

³³ high-strength geopolymers concrete



شکل ۱۱: نمونه های ژئوپلیمر در معرض محلول اسید سولفوریک ۲٪ [۷۴].

۴- اثر ژئوپلیمر بر رفتار سازه‌ای اعضای بتنی

با مرور مطالعات انجام شده می‌توان دریافت که که متغیرهای زیادی می‌توانند بر عملکرد بتن ژئوپلیمری تاثیرگذار باشند. در جدول شماره ۱ خلاصه بررسی‌ها گنجانده شده است. اما بررسی این متغیرها نشان می‌دهد که نظم خاصی چه به جهت ترکیبات و چه به جهت آزمایشات در برخی از مطالعات انجام شده تاکنون موجود نمی‌باشد که خود نشان دهنده نیاز به تحقیقات و آزمایشات بیشتر در این زمینه می‌باشد. تحقیقات گذشته بیشتر بر روی طرح اختلاط، نسبت بین فعال‌کننده‌ها و آلومینوسیلیکات‌ها و اثر فیبرهای اضافی به عنوان متغیرها تمرکز داشته و اثر انواع مختلف آلومینوسیلیکات که یک پارامتر مهم است، به طور معمول مورد آزمایش و ارزیابی قرار نگرفته است. از طرفی اثر هر یک از پارامترها و مواد مورد استفاده بر مشخصه رفتاری خاصی از بتن بیشتر از سایر ویژگی‌های آن است که در ادامه نتایج حاصل از مطالعات انجام شده بر اثر ترکیبات ژئوپلیمری بر برخی مشخصات بتن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- مقاومت فشاری

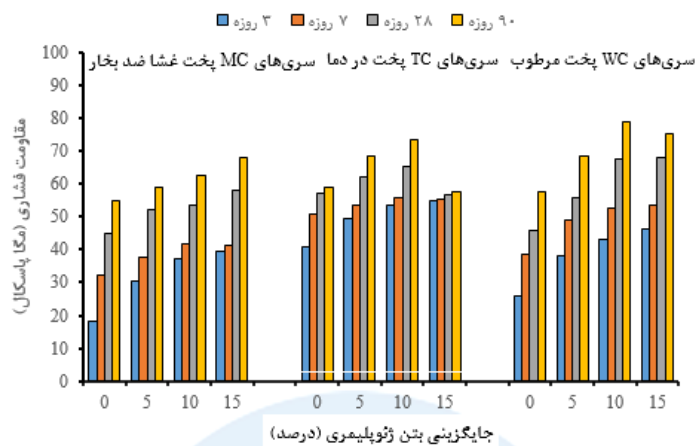
تحقیقات نشان داده که افزایش سطح جایگزینی سیمان پرتلند در مخلوط‌های ژئوپلیمری، مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد. افزایش مقاومت به تشکیل محصولات اضافی مانند $C-S-H$ و $C-A-S-H$ به واسطه واکنش عناصر کلسیم در کنار محصولات ژئوپلیمری بازمی‌گردد. مقاومت فشاری با گذشت زمان افزایش می‌یابد و افزایش محتوای سیمان پرتلند منجر به افزایش قابل توجه‌تری می‌شود. در آزمایشات به عمل آمده مطابق با شکل ۸، ۴ نمونه شامل خاکستر بادی با ۵،۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد بتن معمولی ساخته شدند. نمودار شکل ۱۲ نتایج تأثیرات متفاوتی از نظر مقاومت را نشان دادند که می‌توان به مقاومت فشاری بالاتر در سری TC در ابتدای دوره اشاره کرد. در نهایت، برای مخلوط‌هایی با مقدار بالای بتن معمولی، افزایش ملاحظه شده، در مقاومت در ابتدای دوره با کاهش سرعت، افزایش مقاومت در طولانی مدت همراه بود که به تغییرات ساختار میکروسکوپی فازهای محصولات هیدراتاسیون مربوط بود [۴۳]. تحقیق دیگری در مقاومت فشاری ژئوپلیمرها مورد بررسی قرار گرفت که در آن از گل قرمز جهت بررسی در مقاومت فشاری استفاده گردیده است. نتایج نشان می‌دهند که مقاومت فشاری اولیه این ژئوپلیمرها (در روز پخت) حدود ۸ مگاپاسکال است شکل ۱۳. میزان مقدار گل مایع قرمز تأثیر متغیری بر خواص مکانیکی ژئوپلیمرها داشته است. نتایج نشان داد هرچه نسبت SiO_2/Al_2O_3 کم‌تر باشد، مقاومت ژئوپلیمر کاهش می‌یابد. این عملکرد مکانیکی مشابه در نمونه GFE (اکسید آهن تجاری با نسبت $MK/1/12$) نیز مشاهده شد که دارای کم‌ترین مقاومت فشاری است. در نمونه معادل مبتنی بر گل مایع قرمز GR12 (با نسبت گل مایع قرمز $MK/1/12$)، حضور آهن با خصوصیات قلیایی بالا به خوبی جبران شده است. با افزایش مقدار گل مایع قرمز، نیز نسبت Na_2O/SiO_3 افزایش یافته و مقاومت بالاتری برای نسبت‌های ۱/۱، ۱/۸ و ۱/۶ اندازه‌گیری شد. این روند با مطالعات قبلی محققان سازگار است که نشان داده‌اند زمانی که نسبت‌های مولی Na_2O/Al_2O_3 بین ۱ و ۳ باشد، مقاومت فشاری حداکثر است. مقادیر مقاومت مکانیکی نمونه‌های ۱۲-۱۰-۶ GR به نزدیکی مقادیر نمونه GMK است و در مورد نمونه GR10 حتی بهتر است (۱۰/۸ مگاپاسکال در زمان ۲۸ روز) [۵۲]. نویسنی و همکاران بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی با کلسیم کم با ۱۲ روش‌های مختلف پخت حرارتی مورد آزمایش قرار دادند. شکل ۱۴ مقاومت فشاری ۷،۳ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتن ژئوپلیمری را در دمای محیط و پس از پخت حرارتی نشان می‌دهد. دمای پخت به طور قابل توجهی بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی تأثیر گذاشت. در نمونه‌های پخت، سرعت رشد اولیه مقاومت فشاری با دما و مدت زمان پخت افزایش و مقاومت فشاری بهینه در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به دست آمد [۶۱].

جدول ۱: آزمون متغیرها و روش‌ها

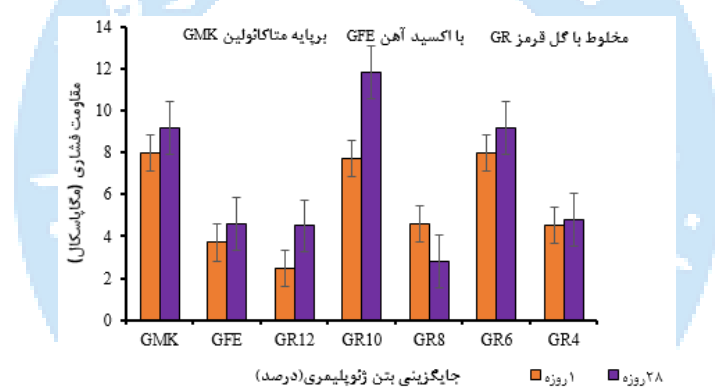
منابع	نوع بتن	روش	تست متغیرها
[48, 51, 72, 75, 76]	FA/RM+RHA/ Mk+Cao/ GWP+BR	ملات	نسبت مولی
[48]	FA	ملات	انواع فعال کننده
[46]	FA+MK	مکعب	نسبت خاکستر بادی به متاکائولین
[46]	FA+MK	مکعب	نسبت سنگدانه های بازیافتی
[45]	FA	استوانه	انواع سنگدانه
[45]	FA	استوانه	نسبت مایع به خاکستر
[44]	FA+BA	استوانه	درجه حرارت بالا
[34, 43]	FA	تیر/ مکعب	نسبت بتن ژئوپلیمر و خاکستر بادی
[43, 53-55, 59, 61, 75, 77]	FA/GPC-SGPC-OPC/ GGBFS-FNS/ RM+SD/ MKPC+ RMG/ FA-GGBFS	مکعب	نسبت مخلوط کنید
[41]	FA+GWC	استوانه	بتن مسلح استوانه ای
[17, 51, 52, 75]	Slag+MK/ FS-AW/ RM+RHA	مکعب	زمان و شرایط پخت
[78]	Slag+GBFS/MC/GC		اثر افزودن سنگدانه بازیافتی
[61, 73]	FA-GGBFS-GPC-OPC/ HSGC+CBP+FCP	مکعب	نسبت مواد
[53, 75]	FS-AW/RM+MK/ RM+SD	مکعب	نسبت مولی
[79]	RM+BFS	مکعب	درجه حرارت بالا
[77]	GGBFS-FNS	مکعب	غلظت فعال کننده
[60, 75]	FA+RM	مکعب	نسبت خاکستر بادی / گل قرمز
[63]	epoxy resin/PC	استوانه	نسبت رزین اپوکسی به بتن پلیمری
[68]	EPC-OCC	استوانه	اثر افزودن مواد
[76]	MK	استوانه	اثر افزودن فیبر وینیل الکل
[61, 76]	MK/ FA-GGBFS	استوانه	زمان و شرایط پخت
[65]	HCWA-FA	ملات	نسبت خاکستر چوب با کلسیم بالا و خاکستر بادی
[80]	UHPC-SF-MK- Ceramic waste aggregates	مکعب	اثر افزودن سنگدانه بازیافتی
[81]	FA-MK	ملات	درجه حرارت بالا
[82]	RHA-FA-CA	ملات	نسبت مواد نانو
[71, 72, 83]	RM+FA+RHA/ GWP+ BR/ BFS-FA	ملات	نسبت مواد
[83]	BFS-FA	ملات	زمان و شرایط پخت

FA: خاکستر بادی، BA: زباله های گرانیات، GPC: بتن ژئوپلیمر، SGPC: بتن های ژئوپلیمری مبتنی بر سرباره، OPC: بتن معمولی، FNS: سرباره فرونیکل، RM: گل قرمز، SD: خاک اره، MKPC: سیمان منیزیم فسفات پتاسیم، RMG: گل قرمز، GGBFS: سرباره کوره بلند دانه بندی شده زمینی، GWC: بتن زباله زمینی، FS: سرباره فروسیلیس، AW: ضایعات آلومینا، GBFS: سرباره کوره بلند زمینی، MC: بتن مرمر، GC: بتن گرانیاتی، HSGC: بتن ژئوپلیمری با مقاومت بالا، CBP: پودر آجر

خاک رس، FCP آجر سفالی ریز، BFS سرباره کوره بلند: epoxy resin/PC، رزین اپوکسی/ بتن پولیمری، EPC بتن پلیمری اپوکسی، OCC بتن سیمانی معمولی، HCWA خاکستر چوب با کلسیم بالا: UHPC، بتن با کارایی فوق العاده بالا: SF، دود سیلیس، Ceramic waste aggregates سنگدانه‌های زباله سرامیکی، RHA: خاکستر پوسته برنج CA، مخلوط کریستالی، GWP ضایعات گرانیت، BR: باقیمانده بوکسیت، furnace slag سرباره کوره:



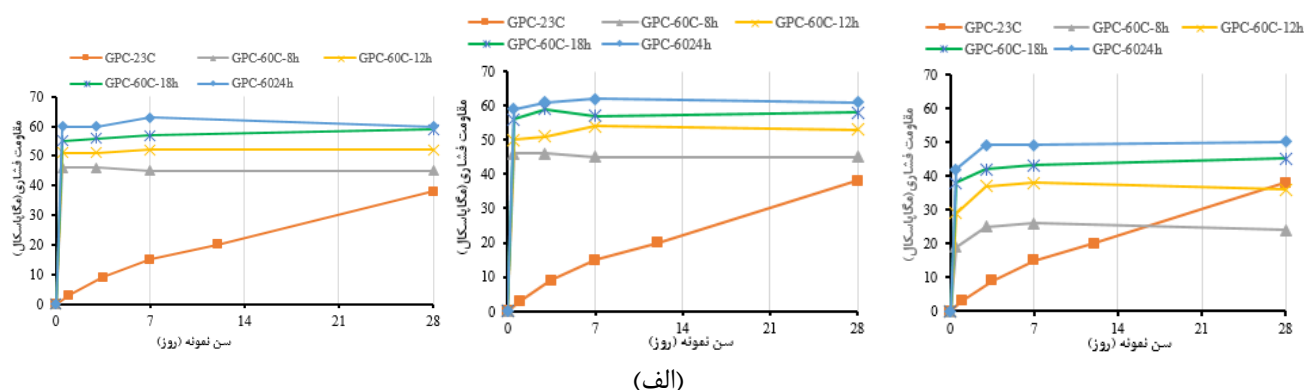
شکل ۱۲: مقاومت ملات ژئوپلیمر [۴۳].



شکل ۱۳: مقاومت فشاری ژئوپلیمرها در زمان‌های مختلف پخت [۵۲].

۴-۲- دوام

یکی از اشکالات عمده سیستم ژئوپلیمر، تکیه بیش از حد بر فعال کننده قلیایی به منظور دستیابی به عملکرد مکانیکی و دوام مطلوب است. علاوه بر این، سیستم ژئوپلیمری معمولی اغلب به پخت با دمای بالا در محدوده ۶۰-۹۰ درجه سانتی‌گراد نیاز دارد. در آزمایشی چن چی بان و همکاران (۲۰۱۷)، با هدف بررسی امکان فعال سازی ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی با هیبریداسیون خاکستر بادی (FA) با خاکستر چوب با کلسیم بالا (HCWA)، بدون افزودن فعال کننده‌های قلیایی معمولی و رژیم پخت پس از عملیات حرارتی انجام شد. مواد خام یعنی خاکستر بادی و خاکستر چوب با کلسیم بالا از نظر فازهای شیمیایی و کانی شناسی با پراش اشعه ایکس (XRD) و فلورسانس اشعه ایکس (XRF) مشخص شدند. خاکستر بادی با خاکستر چوب با کلسیم بالا در سطح جایگزینی بالا ۵۰٪ تا ۱۰۰٪ در ۱۰٪ افزایشی، با وزن چسب جایگزین شد. نمونه‌های ملات‌های ژئوپلیمری سخت شده تحت عمل‌آوری با آب در سنین ۷، ۲۸ و ۷ روز ۲۴+ ساعت هیدروترمال مورد آزمایش قرار گرفتند.

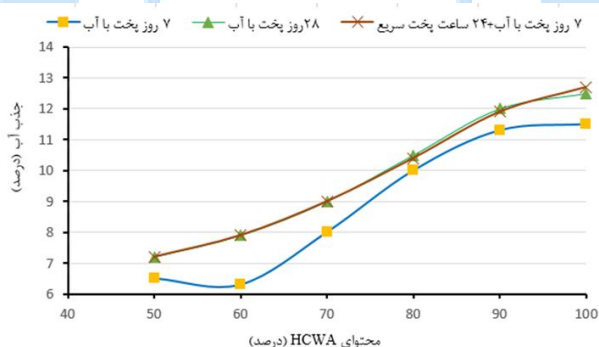


(ج)

(ب)

شکل ۱۴: مقاومت فشاری نمونه‌های محیطی و حرارتی [۶۵].

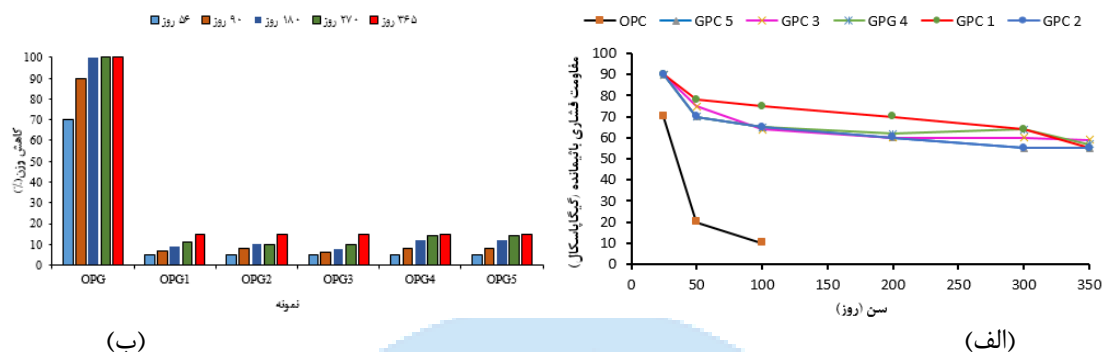
همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، مخلوط‌هایی با سطح جایگزینی ۵۰٪ و ۶۰٪ خاکستر بادی شده عملکرد مکانیکی و دوام بیشتری را در تمام سنین پخت در مقایسه با سایر ملات‌های ژئوپلیمر خاکستر چوب با کلسیم بالا- خاکستر بادی نشان دادند. بررسی مقاومت اولیه ملات‌های ژئوپلیمر با ترکیب خاکستر چوب با کلسیم بالا و ژئوپلیمریزاسیون خاکستر بادی انجام شد. در پخت طولانی مدت، توسعه قدرت به دلیل واکنش‌های فوق‌الذکر، به علاوه واکنش پوزولانی بین سیلیس واکنش پذیر از خاکستر بادی و پورتلندیت تشکیل شده از خاکستر چوب با کلسیم بالا بود که ژل‌های ثانویه C-S-H را تولید می‌کرد. این برنامه آزمایشی یافته‌های مثبتی را در ترکیب مواد بسیار قلیایی مانند خاکستر چوب با کلسیم بالا ($12\%K_2O$) در جهت فعال‌سازی ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی نشان داده و نیاز به فعال‌کننده قلیایی خارجی در طراحی مخلوط ژئوپلیمر معمولی را حذف کرد [۶۵]. آسیب به چسب سیمان تحت حمله اسید عمدتاً ناشی از واکنش ترکیبات کلسیم با محلول اسیدی است که باعث ایجاد تنش کششی و ایجاد ترک در چسب سیمان می‌شود. بتن ژئوپلیمری مبتنی بر سرباره کوره آهن‌گدازی/خاکستر بادی دارای مقاومت اسیدی عالی است که به دلیل جذب کم آب و مقدار کلسیم ژئوپلیمر است و منجر به ترکیبات کم‌تر محلول می‌شود. دوام طولانی مدت بتن ژئوپلیمری مبتنی بر سرباره کوره بلنددانه بندی شده نیز در یک محیط خورنده (محلول اسید سولفوریک H_2SO_4) ۵٪ مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۶ (الف) کاهش وزن بتن معمولی تقریباً ۷۵٪ در ۵۶ روز و تخریب ۱۰۰٪ پس از قرار گرفتن بتن معمولی در معرض محلول H_2SO_4 برای ۱۰۳ روز را نشان داد.



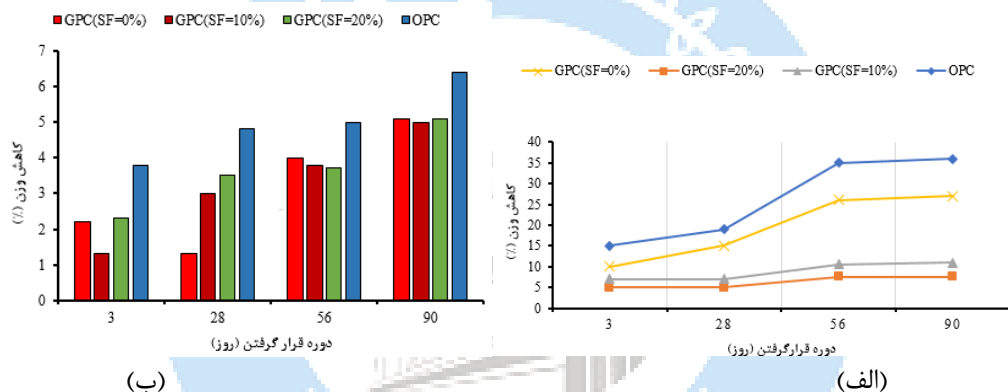
شکل ۱۵: جذب آب ملات‌های ژئوپلیمر کلسیم بالا- خاکستر سوخته پودر شده (HCWA-PFA) در سنین مختلف [۶۴].

کاهش وزن بتن ژئوپلیمری مبتنی بر سرباره کوره آهن‌گدازی، کم‌تر از ۱۰٪ پس از قرار گرفتن در معرض محلول H_2SO_4 برای ۳۶۵ روز بود و افت متناظر مقاومت فشاری در شکل ۱۶ (ب) نشان داده شده است. کاهش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری پس از ۳۶۵ روز قرار گرفتن در معرض محلول H_2SO_4 (۳۶/۴٪-۳۹/۱٪) (به طور قابل توجهی کم‌تر از بتن معمولی) (تقریباً ۹۰٪) پس از ۹۰ روز قرار گرفتن در معرض محلول بود. تمام نمونه‌های بتن ژئوپلیمری، مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به بتن معمولی داشتند. مقاومت اسیدی عالی بتن ژئوپلیمری ممکن است به دلیل کلسیم‌زدایی ژل C-A-S-H در مخلوط باشد. کاهش قابل توجه کاهش وزن و کاهش مقاومت فشاری ممکن است به دلیل ریزساختار متراکم و ساختار منفذی عالی باشد که منجر به نفوذ کم محلول اسید شده و فرصت کم‌تری برای واکنش‌های بیشتر فراهم

می‌کند. هم‌چنین اثر محلول اسید سولفوریک H_2SO_4 ۲٪ را بر دوام بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی مبتنی بر خاکستر بادی در ۹۰ روز نشان داد. ظاهر نمونه نشان داد که بتن ژئوپلیمری حاوی ۲۰٪ فوم SiO_2 در محلول اسیدی خراب نشده و سطح آن خورده نشده است. با این حال، در بتن معمولی خوردگی سطح و شکستگی لبه را نشان داد. در بین نمونه‌های آزمایش شده، بتن معمولی بیشترین کاهش وزن و کاهش مقاومت فشاری را در محلول H_2SO_4 نشان داد. همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، بتن ژئوپلیمری با ۲۰٪ دوده سیلیکون به جای خاکستر بادی کم‌ترین کاهش وزن و کاهش مقاومت فشاری را نشان داده است. [۶۱].



شکل ۱۶: کاهش وزن و کاهش مقاومت فشاری OPC و GPC در معرض ۵٪ H_2SO_4 برای مدت زمان‌های مختلف [۶۱].



شکل ۱۷: کاهش وزن و کاهش مقاومت فشاری OPC و GPC در معرض ۲٪ H_2SO_4 برای مدت زمان‌های مختلف [۶۱].

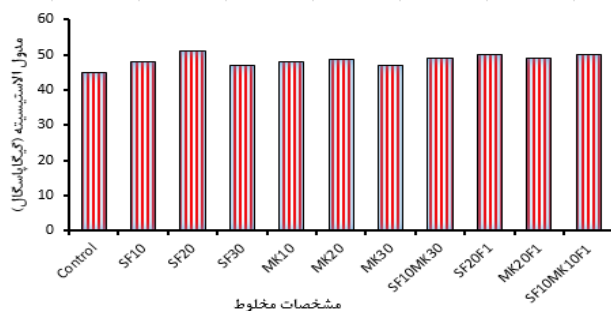
۳-۴- مدول الاستیسیته

از ضایعات سرامیک می‌توان در جهت رفع مشکلات کمبود مواد در ساختمان و کاهش ضایعات زیست محیطی استفاده کرد. محمد امین و همکاران (۲۰۲۰) اثر بخشی جایگزین کردن دوده سیلیس (SF) و متاکائولین (MK) با سیمان را برای بهبود بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا (UHPC) تهیه و با استفاده از ضایعات سرامیکی به عنوان سنگدانه‌های درشت با یازده مخلوط بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا با نسبت‌های ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ SF یا MK طراحی کردند. شکل ۱۸ مدول الاستیسیته مخلوط‌های بتن با عملکرد فوق‌العاده و تغییرات آن‌ها را نشان می‌دهد. به طور کلی جایگزینی سنگدانه‌های درشت طبیعی با سنگدانه‌های ضایعات سرامیکی (CWA)، مدول الاستیسیته مخلوط‌ها را بهبود بخشیده و مدول الاستیسیته با مقدار دوده سیلیس بدون توجه به نوع بتن افزایش یافته است. مدول الاستیسیته SF10، SF20 و SF30 به ترتیب ۶۱٪، ۱۲/۵ و ۳/۷ درصد بیشتر از مخلوط مرجع بود. هم‌چنین مدول الاستیسیته MK10، MK20، MK30 و SF10MK10 به ترتیب ۴/۹، ۷/۱، ۲/۷ و ۸/۳ درصد بیشتر از مخلوط مرجع است. در همین حال، مدول الاستیسیته SF20F1، MK20F1 و SF10MK10F1 به ترتیب از ۴۵/۲۶ گیگاپاسکال به ۵۱/۷۰ (۱۴/۲ درصد)، ۴۹/۲۴ (۸/۸ درصد) و ۴۹/۹۷ (۱۰/۴ درصد) گیگاپاسکال نسبت به ترکیب مرجع افزایش یافت. SF20F1 بالاترین مدول الاستیسیته ۵۱/۷۰ گیگاپاسکال را نتیجه داد که ۱۴/۲ درصد بیشتر از مخلوط مرجع بود [۸۰].

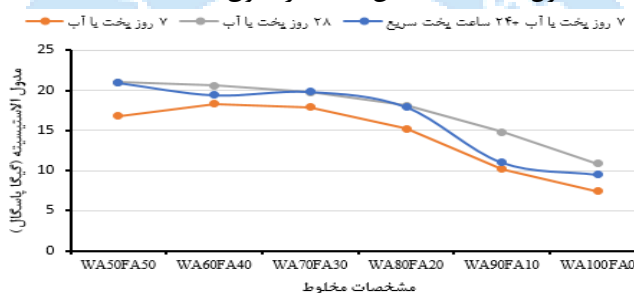
بر اساس مطالعه انجام شده توسط چن چی بان و همکاران (۲۰۱۷)، کاهش مدول الاستیسیته به میزان قابل توجه در حدود ۱۰۰٪ ملات‌های ژئوپلیمر خاکستر چوب با کلسیم بالا- خاکستر سوخته پودر شده (HCWA-PFA) ۳۴ برای تمام سنین پخت، با ۷۰٪ سطح جایگزینی

³⁴ Pulverized Fuel Ash-High Calcium Wood Ash

خاکستر چوب با کلسیم بالا در شکل ۱۹ نشان داده شده است که خود بیانگر ساختار داخلی ضعیف مخلوط می‌باشد. در سنین اولیه پخت، WA60FA40 بالاترین مقدار مدول الاستیسیته ۱۸/۳ گیگاپاسکال را نشان داد و پس از آن مخلوط‌های WA70FA30 و WA50FA50 با مقدار مدول الاستیسیته ۱۷/۹ و ۱۶/۸ گیگاپاسکال به ترتیب بعد از آن قرار گرفتند. پس از ۲۸ روز از سن پخت، WA50FA50 بالاترین مقدار مدول الاستیسیته ۲۱/۰ گیگاپاسکال را نشان داد و پس از آن WA60FA40 و WA70FA30، به ترتیب با مقدار مدول الاستیسیته ۲۰/۶ و ۱۹/۸ گیگاپاسکال بعد از آن قرار گرفتند. روند مشابهی نیز برای مخلوط‌های پخت سریع مشاهده شد، که نشان می‌دهد واکنش ژئوپلیمری بالاتری در مخلوط‌هایی با مقدار خاکستر سوخته پودر شده بالاتر به دلیل عملیات حرارتی بالا رخ می‌دهد، که این امر منجر به تشکیل بیشتر ژل K-A-S-H در سطح مشترک مخلوط و متعاقباً مدول الاستیسیته بالاتر می‌گردد [۶۵].



شکل ۱۸: مدول الاستیسیته بتن با عملکرد فوق العاده بالا (UHPC) [۸۰].



شکل ۱۹: مدول الاستیسیته ملات‌های ژئوپلیمر HCWA-PFA در سنین مختلف پخت [۶۵].

۵- نتیجه گیری

مطالعات ۲۰ سال اخیر بر روی بتن ژئوپلیمری و ارزیابی عملکرد بتن‌های ژئوپلیمری از نظر ترکیبات متفاوت مورد بررسی قرار داده گرفته است. مطالعات بر روی بتن‌های ژئوپلیمری بسیار گسترده بوده و تنوع استفاده از مواد جایگزین در این بتن بسیار زیاد می‌باشد. در این مطالعات به خواص مکانیکی، مقاومت، خوردگی، دوام و سایر پارامترها مانند اثرات زیست محیطی این مواد پرداخته شده که نتایج به شرح زیر می‌باشد: انتخاب مناسب خاکستر بادی عملکرد بتن‌های ژئوپلیمری را بهبود و اثرات مخرب بر محیط زیست را کاهش داد. افزودن متاکائولین به بتن ژئوپلیمری باعث بهبود مقاومت، کاهش تخلخل، جذب آب بهتر و افزایش مقاومت اسیدی می‌شود. خاکستر بادی با کلسیم بالا به همراه بتن ژئوپلیمری حاوی سنگدانه بازیافتی، منجر به ساخت بتنی سازگار با محیط زیست با عملکرد مکانیکی قابل مقایسه با بتن‌های معمولی می‌شود. این یافته‌ها می‌توانند در بهبود فناوری‌های ساخت و ساز مورد استفاده قرار گرفته و به عملکرد پایدارتر همراه با سازگاری بیشتر با محیط زیست در صنعت ساخت و ساز کمک کنند. به عنوان نمونه، ملات‌های ژئوپلیمر HCWA-PFA با محتوای HCWA ۵۰ و ۶۰ درصد به طور مداوم عملکرد مکانیکی و دوام مطلوبی را از خود نشان می‌دهند.

با افزایش مقدار گل قرمز در ترکیبات، خواص مکانیکی و شیمیایی مواد تولیدی تغییر و این امکان فراهم می‌شود که محصولات با خواص متنوعی تولید شوند. استفاده از گل قرمز به عنوان ماده اولیه برای تولید ژئوپلیمرها و کامپوزیت‌ها نیازمند بهینه‌سازی و پژوهش بیشتری می‌باشد، به ویژه در مورد ترکیب آن با سایر مواد، مانند خاکستر بادی یا زباله‌های شیشه‌ای. استفاده از روش‌های مناسب می‌تواند اثرات مضرات زیست محیطی گل قرمز را به حداقل برساند و آن را به عنوان یک منبع مصالح ساختمانی قابل استفاده تبدیل نماید. نیاز بیشتری به بررسی انواع فعال‌کننده‌های قلیایی، غلظت این فعال‌کننده‌ها، نسبت مولی ترکیبات شیمیایی مختلف، و شرایط پخت مواد می‌باشد تا به بهبود

کارایی و کاربردی تر شدن محصولات حاصل از گل قرمز و حفظ محیط زیست انجام گردد. تحقیقات نشان داده که پخت محیطی در-RM-GPC می تواند برای مواردی که به استحکام پایین نیاز دارند بهتر باشد. عمل آوری حرارتی در دماهای بین ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد می تواند برای افزایش دوام و استحکام در سنین پایین مفید باشد.

سرباره صنعتی به عنوان سنگدانه در تولید بتن معمولی و ژئوپلیمری باعث بهبود خواص مکانیکی، کارایی و مقاومت شیمیایی مخلوطهای بتن می شود. سرباره صنعتی به طور موثر یونهای فلزات سنگین مس و سرب را بی حرکت نموده و این امر به بهبود و حفظ محیط زیست کمک می نماید. تحقیقات بیشتری نیاز است تا روشهای بهینه سازی برای استفاده از سرباره صنعتی در تولید مواد ساختمانی مانند ژئوپلیمرها و بتن ها توسعه یافته و به کار گرفته شوند.

بتن های ژئوپلیمری می توانند نقش مهمی در توسعه مواد ساختمانی با دوام و دوستدار محیط زیست ایفا کنند. در ارتباط با تأثیر کاهش انتشار دی اکسید کربن در مخلوطهای ژئوپلیمر می توان ادعا کرد که ضریب انتشار مرتبط با بتن معمولی ۰/۷۷۲ کیلوگرم دی اکسید کربن منتشر شده به ازای هر کیلوگرم بتن است. از سوی دیگر، ضریب انتشار برای بتن ژئوپلیمری ۰/۳۳۸ کیلوگرم CO₂ بر کیلوگرم است. بتن ژئوپلیمری کاهش انتشار دی اکسید کربن ۵۶/۰٪ را نشان می دهد. یافته های مطالعه ما با ادبیات موجود تأیید می شود.

طیف وسیعی از دیدگاهها در رابطه با پیامدهای مالی مرتبط با تهیه ژئوپلیمرها وجود دارد. برخی منابع ادعا می کنند که هزینه اولیه تولید بتن ژئوپلیمری دو برابر بتن معمولی است، ثابت شده است که هزینه بتن ژئوپلیمری نیز تحت تأثیر عواملی مانند نوع منبع خاکستر بادی زیست توده و هزینه های مرتبط است. مطالعات شواهدی از مقرون به صرفه بودن بتن ژئوپلیمری ارائه کرده اند که نشان می دهد می تواند تا ۴۰ درصد اقتصادی تر از بتن معمولی باشد.

۶- مراجع

- [1] R. J. G. c. Mccaffrey and I. magazine, 2002, Climate change and the cement industry, vol. 15, p. 19.
- [2] I. IEA, "Greenhouse gas emissions from energy data explorer," in IEA, 2021.
- [3] A. Mehta and D. K. J. J. o. B. E. Ashish, 2020, Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review, vol. 29, p. 100888.
- [4] Ž. Rudžionis *et al.*, 2021, Natural zeolite powder in cementitious composites and its application as heavy metal absorbents, vol. 43, p. 103085.
- [5] F. Martins, C. Felgueiras, M. Smitkova, and N. J. E. Caetano, 2019, Analysis of fossil fuel energy consumption and environmental impacts in European countries, vol. 12, no. 6, p. 964.
- [6] E. Benhelal, E. Shamsaei, and M. I. J. J. o. E. S. Rashid, 2021, Challenges against CO₂ abatement strategies in cement industry: A review, vol. 104, pp. 84-101.
- [7] K. L. Scrivener, V. M. John, E. M. J. C. Gartner, and c. Research, 2018, Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, vol. 114, pp. 2-26.
- [8] A. J. M. Neville and structures, 2001, Consideration of durability of concrete structures: Past, present, and future, vol. 34, pp. 114-118.
- [9] B. S. Thomas *et al.*, 2022, Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review, vol. 3, p. 100056.
- [10] W. P. Zakka, N. H. A. S. Lim, and M. C. J. J. o. C. P. Khun, 2021, A scientometric review of geopolymer concrete, vol. 280, p. 124353.
- [11] M. A. Sağır, M. B. Karakoç, A. Özcan, E. Ekinci, and A. J. S. C. Yolcu, 2023, Effect of silica fume and waste rubber on the performance of slag-based geopolymer mortars under high temperatures, vol. 24, no. 5, pp. 6690-6708.
- [12] B. S. Chandra Kumar and K. Ramesh, "Analytical study on flexural behaviour of reinforced geopolymer concrete beams by ANSYS," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 455, p. 012065: IOP Publishing.
- [13] T. M. Tran *et al.*, 2023, Development of sustainable ultra-high-performance concrete containing ground granulated blast furnace slag and glass powder: Mix design investigation, vol. 397, p. 132358.
- [14] A. Palomo, P. Monteiro, P. Martauz, V. Bilek, A. J. C. Fernandez-Jimenez, and C. Research, 2019, Hybrid binders: A journey from the past to a sustainable future (opus caementicium futurum), vol. 124, p. 105829.
- [15] K. Pasupathy, S. Ramakrishnan, J. J. C. Sanjayan, and C. Composites, 2023, 3D concrete printing of eco-friendly geopolymer containing brick waste, vol. 138, p. 104943.
- [16] F. A. Shilar, S. V. Ganachari, V. B. Patil, T. Y. Khan, S. Javed, and R. U. J. P. Baig, 2022, Optimization of alkaline activator on the strength properties of geopolymer concrete, vol. 14, no. 12, p. 2434.
- [17] Z. Yunsheng, S. Wei, C. Qianli, and C. J. J. o. h. m. Lin, 2007, Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer, vol. 143, no. 1-2, pp. 206-213.

- [18] D. V. Dao, H.-B. Ly, S. H. Trinh, T.-T. Le, and B. T. J. M. Pham, 2019, Artificial intelligence approaches for prediction of compressive strength of geopolymer concrete, vol. 12, no. 6, p. 983.
- [19] A. L. Almutairi, B. A. Tayeh, A. Adesina, H. F. Isleem, and A. M. J. C. S. i. C. M. Zeyad, 2021, Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review, vol. 15, p. e00733.
- [20] J. Hosseinbor, H. Madani, and M. N. J. S. Norouzifar, 2023, Improving the characteristics of less active geopolymer binders utilizing ground granulated blast-furnace slag under different curing conditions, vol. 15, no. 16, p. 12165.
- [21] M. Clausi, S. C. Tarantino, L. L. Magnani, M. P. Riccardi, C. Tedeschi, and M. J. A. C. S. Zema, 2016, Metakaolin as a precursor of materials for applications in Cultural Heritage: Geopolymer-based mortars with ornamental stone aggregates, vol. 132, pp. 589-599.
- [22] K. Komnitsas and D. J. M. e. Zaharaki, 2007, Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry, vol. 20, no. 14, pp. 1261-1277.
- [23] R. R. Bellum, K. Muniraj, and S. R. C. J. M. Madduru, 2020, Influence of activator solution on microstructural and mechanical properties of geopolymer concrete, vol. 10, p. 100659.
- [24] P. Pradhan, S. Panda, S. K. Parhi, S. K. J. C. Panigrahi, and B. Materials, 2022, Factors affecting production and properties of self-compacting geopolymer concrete—A review, vol. 344, p. 128174.
- [25] K. A. J. P. E. Komnitsas, 2011, Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities, vol. 21, pp. 1023-1032.
- [26] A. B. Moradikhoh, M. Safehian, E. M. J. C. Golafshani, and B. Materials, 2023, High-strength geopolymer concrete based on coal washing waste, vol. 362, p. 129675.
- [27] F. A. Shilar, S. V. Ganachari, V. B. Patil, T. Y. Khan, and S. D. A. J. C. S. i. C. M. Khadar, 2022, Molarity activity effect on mechanical and microstructure properties of geopolymer concrete: A review, vol. 16, p. e01014.
- [28] Y. M. Amran, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, and M. J. J. o. C. P. El-Zeadani, 2020, Clean production and properties of geopolymer concrete; A review, vol. 251, p. 119679.
- [29] M. Kalaivani, G. Shyamala, S. Ramesh, K. Angusenthil, and R. J. M. T. P. Jagadeesan, 2020, Performance evaluation of fly ash/slag based geopolymer concrete beams with addition of lime, vol. 27, pp. 652-656.
- [30] P. Nuaklong, V. Sata, A. Wongsas, K. Srinavin, P. J. C. Chindaprasirt, and B. Materials, 2018, Recycled aggregate high calcium fly ash geopolymer concrete with inclusion of OPC and nano-SiO₂, vol. 174, pp. 244-252.
- [31] S. Chowdhury, S. Mohapatra, A. Gaur, G. Dwivedi, and A. J. M. T. P. Soni, 2021, Study of various properties of geopolymer concrete—A review, vol. 46, pp. 5687-5695.
- [32] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, S. Hatanaka, and T. J. J. o. M. i. C. E. Cao, 2011, High-strength geopolymer using fine high-calcium fly ash, vol. 23, no. 3, pp. 264-270.
- [33] E. Diaz, E. Allouche, and S. J. F. Eklund, "Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers," vol. 89, ed. 2010, pp. 992-996.
- [34] D. Sumajouw, D. Hardjito, S. Wallah, and B. J. C. E. D. Rangan, 2005, Behaviour and strength of reinforced fly ash-based geopolymer concrete beams, vol. 6, no. 2, p. 1020.
- [35] M. Sumajouw and B. V. Rangan, 2006, Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: reinforced beams and columns.
- [36] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, V. J. C. Sirivatnanon, and c. composites, 2007, Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer, vol. 29, no. 3, pp. 224-229.
- [37] F. Blanco, M. Garcia, J. Ayala, G. Mayoral, and M. J. F. Garcia, 2006, The effect of mechanically and chemically activated fly ashes on mortar properties, vol. 85, no. 14-15, pp. 2018-2026.
- [38] J. Temuujin, A. Van Riessen, and R. J. J. o. h. m. Williams, 2009, Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes, vol. 167, no. 1-3, pp. 82-88.
- [39] U. Rattanasak and P. J. M. E. Chindaprasirt, 2009, Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, vol. 22, no. 12, pp. 1073-1078.
- [40] J. Temuujin, A. van Riessen, K. J. C. MacKenzie, and B. materials, 2010, Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars, vol. 24, no. 10, pp. 1906-1910.
- [41] S. Ahmari, X. Ren, V. Toufigh, L. J. C. Zhang, and B. Materials, 2012, Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash, vol. 35, pp. 718-729.
- [42] M. S. Badar, K. Kupwade-Patil, S. A. Bernal, J. L. Provis, E. N. J. C. Allouche, and B. Materials, 2014, Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes, vol. 61, pp. 79-89.
- [43] S. Pangdaeng, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, P. J. M. Chindaprasirt, and Design, 2014, Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive, vol. 53, pp. 269-274.
- [44] Y. Zaetang, A. Wongsas, V. Sata, P. J. C. Chindaprasirt, and B. Materials, 2015, Use of coal ash as geopolymer binder and coarse aggregate in pervious concrete, vol. 96, pp. 289-295.

- [45] K. T. Nguyen, N. Ahn, T. A. Le, K. J. C. Lee, and B. Materials, 2016, Theoretical and experimental study on mechanical properties and flexural strength of fly ash-geopolymer concrete, vol. 106, pp. 65-77.
- [46] P. Nuaklong, V. Sata, P. J. C. Chindapasirt, and B. Materials, 2018, Properties of metakaolin-high calcium fly ash geopolymer concrete containing recycled aggregate from crushed concrete specimens, vol. 161, pp. 365-373.
- [47] C. R. Meesala, N. K. Verma, and S. J. S. C. Kumar, 2020, Critical review on fly-ash based geopolymer concrete, vol. 21, no. 3, pp. 1013-1028.
- [48] M. Taman, M. Ghazy, M. J. I. J. o. A. i. S. Abd Elaty, and G. Engineering, 2021, Fresh and mechanical properties of fly ash-based geopolymer mortars activated by different alkaline solutions, vol. 5, no. 02, pp. 24-39.
- [49] B. Yalcinkaya *et al.*, 2023, Unlocking the Potential of Biomass Fly Ash: Exploring Its Application in Geopolymeric Materials and a Comparative Case Study of BFA-Based Geopolymeric Concrete against Conventional Concrete, vol. 6, no. 3, pp. 1682-1704.
- [50] S. M. Qaidi, B. A. Tayeh, H. U. Ahmed, and W. Emad, "RETRACTED: A review of the sustainable utilisation of red mud and fly ash for the production of geopolymer composites," ed: Elsevier, 2022.
- [51] J. He, Y. Jie, J. Zhang, Y. Yu, G. J. C. Zhang, and C. Composites, 2013, Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites, vol. 37, pp. 108-118.
- [52] W. Hajjaji *et al.*, 2013, Composition and technological properties of geopolymers based on metakaolin and red mud, vol. 52, pp. 648-654.
- [53] I. Kong, K. M. Khoo, O. Buddrick, A. A. Baharuddin, and P. Khalili, "Synthesis and characterization of red mud and sawdust based geopolymer composites as potential construction material," in *Materials science forum*, 2018, vol. 923, pp. 130-134: Trans Tech Publ.
- [54] G. Mucsi, R. Szabó, Á. Rácz, F. Kristály, and S. J. R.-g.-n. z. Kumar, 2019, Combined utilization of red mud and mechanically activated fly ash in geopolymer, vol. 34, no. 1.
- [55] J. Zhang *et al.*, 2020, Properties of red mud blended with magnesium phosphate cement paste: feasibility of grouting material preparation, vol. 260, p. 119704.
- [56] M. Mudgal, A. Singh, R. Chouhan, A. Acharya, A. J. C. E. Srivastava, and Technology, 2021, Fly ash red mud geopolymer with improved mechanical strength, vol. 4, p. 100215.
- [57] M. Muraleedharan and Y. J. C. I. Nadir, 2021, Factors affecting the mechanical properties and microstructure of geopolymers from red mud and granite waste powder: A review, vol. 47, no. 10, pp. 13257-13279.
- [58] A. Niu and C. J. J. o. E. M. Lin, 2024, Trends in research on characterization, treatment and valorization of hazardous red mud: A systematic review, vol. 351, p. 119660.
- [59] A. E. Kurtoglu *et al.*, 2018, Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolymer concrete, vol. 6, no. 4, p. 345.
- [60] M. M. Hoque and M. A. J. O. J. o. A. S. Hosse, 2019, Sustainable use of Steel Industry Slag (SIS) for concrete production: A state art of review, vol. 9, no. 12, p. 841.
- [61] P. Zhang, Z. Gao, J. Wang, J. Guo, S. Hu, and Y. J. J. o. C. P. Ling, 2020, Properties of fresh and hardened fly ash/slag based geopolymer concrete: A review, vol. 270, p. 122389.
- [62] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, S. J. C. Bhattacharyya, and b. materials, 2015, Geopolymer concrete: A review of some recent developments, vol. 85, pp. 78-90.
- [63] V. Toufigh, M. Hosseinali, S. M. J. C. Shirshorshidi, and B. Materials, 2016, Experimental study and constitutive modeling of polymer concrete's behavior in compression, vol. 112, pp. 183-190.
- [64] K. H. Mo, U. J. Alengaram, M. Z. J. C. Jumaat, and B. Materials, 2016, Structural performance of reinforced geopolymer concrete members: A review, vol. 120, pp. 251-264.
- [65] C. C. Ban, P. W. Ken, and M. J. P. e. Ramli, 2017, Mechanical and durability performance of novel self-activating geopolymer mortars, vol. 171, pp. 564-571.
- [66] J. J. Ekaputri and S. J. P. e. Junaedi, 2017, Effect of curing temperature and fiber on metakaolin-based geopolymer, vol. 171, pp. 572-583.
- [67] N. Li, C. Shi, Z. Zhang, H. Wang, and Y. J. C. P. B. E. Liu, 2019, A review on mixture design methods for geopolymer concrete, vol. 178, p. 107490.
- [68] P. Ghassemi, V. J. C. Toufigh, and B. Materials, 2020, Durability of epoxy polymer and ordinary cement concrete in aggressive environments, vol. 234, p. 117887.
- [69] T. Lingyu, H. Dongpo, Z. Jianing, and W. J. R. o. A. M. S. Hongguang, 2021, Durability of geopolymers and geopolymer concretes: A review, vol. 60, no. 1, pp. 1-14.
- [70] R. Asghar, M. A. Khan, R. Alyousef, M. F. Javed, M. J. C. Ali, and B. Materials, 2023, Promoting the green Construction: Scientometric review on the mechanical and structural performance of geopolymer concrete, vol. 368, p. 130502.

- [71] M. Najjar, V. Sakhare, A. Karn, M. Chaddha, A. J. J. o. C. T. Agnihotri, and Metallurgy, 2022, VALUE-ADDED GEOPOLYMER PRODUCT TO OFFSET EXPENDITURE ON WASTE MANAGEMENT AND SUSTAINABILITY, vol. 57, no. 1.
- [72] A. B. Elhag *et al.*, 2023, A critical review on mechanical, durability, and microstructural properties of industrial by-product-based geopolymer composites, vol. 62, no. 1, p. 20220306.
- [73] W. E. Elemam, A. M. Tahwia, M. Abdellatif, O. Youssf, and M. A. J. S. Kandil, 2023, Durability, microstructure, and optimization of high-strength geopolymer concrete incorporating construction and demolition waste, vol. 15, no. 22, p. 15832.
- [74] T. S. Alahmari, T. A. Abdalla, and M. A. M. J. B. Rihan, 2023, Review of recent developments regarding the durability performance of eco-friendly geopolymer concrete, vol. 13, no. 12, p. 3033.
- [75] M. M. Ahmed *et al.*, 2021, Fabrication of thermal insulation geopolymer bricks using ferrosilicon slag and alumina waste, vol. 15, p. e00737.
- [76] A. Aboulayt, M. Riahi, M. O. Touhami, H. Hannache, M. Gomina, and R. J. A. P. T. Moussa, 2017, Properties of metakaolin based geopolymer incorporating calcium carbonate, vol. 28, no. 9, pp. 2393-2401.
- [77] Q. D. Nguyen and A. J. C. Castel, 2023, Developing geopolymer concrete by using ferronickel slag and ground-granulated blast-furnace slag, vol. 6, no. 3, pp. 1861-1878.
- [78] G. C. Ulubeyli, R. J. P.-s. Artir, and b. sciences, 2015, Sustainability for blast furnace slag: use of some construction wastes, vol. 195, pp. 2191-2198.
- [79] X. Liang and Y. J. S. A. S. Ji, 2021, Mechanical properties and permeability of red mud-blast furnace slag-based geopolymer concrete, vol. 3, no. 1, p. 23.
- [80] M. Amin, B. A. Tayeh, and I. S. J. J. o. C. P. Agwa, 2020, Effect of using mineral admixtures and ceramic wastes as coarse aggregates on properties of ultrahigh-performance concrete, vol. 273, p. 123073.
- [81] R. He, N. Dai, and Z. J. A. i. C. E. Wang, 2020, Thermal and mechanical properties of geopolymers exposed to high temperature: a literature review, vol. 2020, no. 1, p. 7532703.
- [82] A. R. Alvee *et al.*, 2022, Experimental study of the mechanical properties and microstructure of geopolymer paste containing nano-silica from agricultural waste and crystalline admixtures, vol. 16, p. e00792.
- [83] A. Mohsen *et al.*, 2023, Facile synthesis and optimization of reactive bunsenite for the production of thermally stable geopolymeric composite, vol. 27, pp. 876-893.

