

Investigating the Effect of precursor and Activator on the Properties of Geopolymer

Gholamreza Havaei

Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Environmental, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Geopolymer concrete is recognized as a green and sustainable alternative to conventional concrete, capable of reducing the environmental impacts associated with cement production. This study investigates the effect of pozzolanic materials such as fly ash, slag, and metakaolin on the mechanical properties and durability of geopolymer concrete. The research also explores the impact of alkaline solutions like NaOH and KOH on the geopolymerization process and compressive strength of the concrete. The results showed that the use of fly ash and slag as pozzolanic materials in combination with alkaline solutions significantly improves the compressive strength, durability, and stability of geopolymer concrete under various environmental conditions. Furthermore, the use of geopolymer concrete notably reduces CO₂ emissions and can be applied in civil defense projects. Ultimately, the findings of this research indicate that using geopolymers as a substitute for cement not only provides environmental benefits but also enhances the mechanical properties and durability of concrete.

ARTICLE INFO

Receive Date: 25 December 2021

Revise Date: 04 April 2022

Accept Date: 28 May 2022

Keywords:

Geopolymer Concrete

Slag

Fly ash

Durability

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525731.3741>

*Corresponding author: Gholamreza Havaei

Email address: Havaei@aut.ac.ir

بررسی اثر ماده پایه و فعال ساز بر خواص ژئوپلیمر

غلامرضا هوآئی

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

بتن ژئوپلیمر به عنوان یک جایگزین سبز و پایدار برای بتن‌های معمولی شناخته می‌شود که می‌تواند به کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید سیمان کمک کند. این تحقیق به بررسی تأثیر مواد پوزولانی مانند خاکستر بادی، سرباره و متاکائولن بر خواص مکانیکی و دوام بتن ژئوپلیمر پرداخته است. در این تحقیق، تأثیر محلول‌های قلیایی مانند $NaOH$ و KOH بر فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و مقاومت فشاری بتن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از خاکستر بادی و سرباره به عنوان مواد پوزولانی در ترکیب با محلول‌های قلیایی، باعث بهبود مقاومت فشاری، دوام و پایداری بتن ژئوپلیمر در برابر شرایط محیطی مختلف می‌شود. همچنین، استفاده از ژئوپلیمر به طور قابل توجهی میزان تولید CO_2 را کاهش داده و می‌تواند در پروژه‌های پدافند غیرعامل نیز کاربرد داشته باشد. در نهایت، نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که استفاده از ژئوپلیمرها به عنوان جایگزینی برای سیمان نه تنها از نظر زیست‌محیطی مؤثر است، بلکه خواص مکانیکی و دوام بتن را نیز بهبود می‌بخشد.

کلمات کلیدی: بتن ژئوپلیمر، سرباره، خاکستر بادی، دوام

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2025.525731.3741	۱۴۰۰/۱۰/۰۴	۱۴۰۱/۰۱/۱۵	۱۴۰۱/۰۳/۰۷	۱۴۰۱/۰۳/۰۷	۱۴۰۱/۱۰/۳۰
doi: 10.22065/jsce.2025.525731.3741					
غلامرضا هوآئی					نویسنده مسئول:
havaei@aut.ac.ir					پست الکترونیکی:

۱- مقدمه

امروزه بتن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در توسعه زیرساخت‌های عمرانی و اقتصادی جوامع شناخته می‌شود. میزان مصرف بتن به قدری بالاست که پس از آب، به عنوان پرمصرف‌ترین ماده در دنیا شناخته می‌شود. با توجه به مصرف بالای بتن و در پی آن تولید سیمان، باید تدابیر لازم جهت کنترل آلودگی‌های ناشی از تولید سیمان اندیشیده شود. مصرف قابل ملاحظه انرژی از قبیل سوخت‌های فسیلی و برق و تولید مقدار زیاد CO₂ (در حدود ۷ درصد کل مقدار CO₂ وارده به جو و ۵ درصد از انرژی مصرف شده در صنایع) از جمله مشکلات صنایع تولید سیمان هستند. صنعت سیمان بعد از صنایع فولاد و آلومینیوم بیش‌ترین مصرف انرژی را دارد. در کشور ما نیز میزان تولید و مصرف سیمان بالاست. به نحوی که نام ایران در چند سال اخیر همواره در بین ۱۰ کشور اول تولیدکننده سیمان در دنیا بوده است. بنابراین با توجه به مشکلات ناشی از آلودگی هوا در کشور ما در سال‌های اخیر، باید تدابیر لازم در جهت کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی اندیشیده شود. یکی از راهکارهای کاهش آلودگی‌های ناشی از تولید سیمان، استفاده از چسباننده‌های پوزولانی می‌باشد. بر اساس تحقیقات گذشته، استفاده از مواد با خاصیت سیمانی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان می‌تواند علاوه بر کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن شود. ژئوپلیمرها یکی از موادی هستند که می‌توانند در بتن به عنوان ماده چسبنده استفاده شوند. پلیمرهای غیرآلی آلومینوسیلیکاته به عنوان ژئوپلیمرها معروف هستند. این مفهوم نخستین بار توسط دانشمند فرانسوی جوزف داوید ویتز در سال ۱۹۷۸ مطرح گردید. ژئوپلیمرها از جمله پلیمرهای معدنی هستند که ترکیب شیمیایی آن‌ها شبیه به مواد ژئولیتی می‌باشد، اما ساختار میکروسکوپی آن‌ها بر خلاف ژئولیت‌ها، آمورف می‌باشد. جایگزینی کلینکر با ژئوپلیمرها به عنوان ماده چسبنده می‌تواند روش مناسبی برای کاهش استفاده از کلینکر در سیمان و به تبع آن، کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از آن باشد. بتن ژئوپلیمر بتنی است که در آن از مصالح آلومینا-سیلیکاتی غنی از سیلیکون (Si) و آلومینیوم (Al) و محلول قلیایی به عنوان چسباننده استفاده می‌شود. این بتن به علت عدم استفاده از کلینکر در آن، دارای مزایای مختلف از جمله انرژی تولید پایین، آلودگی کم‌تر، خواص مکانیکی مناسب و دوام بالا در محیط‌های خورنده می‌باشد.

امروزه بتن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در توسعه زیرساخت‌های عمرانی و اقتصادی جوامع شناخته می‌شود. میزان مصرف بتن به قدری بالاست که پس از آب، به عنوان پرمصرف‌ترین ماده در دنیا شناخته می‌شود. با توجه به مصرف بالای بتن و در پی آن تولید سیمان، باید تدابیر لازم جهت کنترل آلودگی‌های ناشی از تولید سیمان اندیشیده شود.

یکی از راه‌های مناسب برای بهبود خواص بتن، استفاده از مواد پوزولانی و افزودنی در طرح اختلاط بتن می‌باشد. سرباره کوره‌های آهن‌گدازی یکی از مواد دیگر پوزولانی است که در کشور ما به مقدار کافی وجود دارد. هدف اصلی این پژوهش، تولید یک نوع بتن با مقاومت و خواص دوامی بالا به نام بتن ژئوپلیمری با سرباره است. در سال‌های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک عامل سیمانی جدید و دوستدار محیط زیست، به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند مطرح شده است.

استفاده از این بتن‌ها می‌تواند میزان تولید CO₂ را تا ۸۰ درصد، در صورت جایگزینی کامل سیمان، کاهش دهد [۴]. ژئوپلیمرها یک جایگزین مناسب برای انواع سیمان در بتن می‌باشد. زیرا از طرفی ژئوپلیمرها نسبت به سیمان‌های مرسوم و پلیمرهای آلی ارزان‌تر بوده و از طرف دیگر به وفور یافت می‌شوند. همچنین دمای لازم برای تولید آن‌ها به مراتب پایین‌تر از سیمان‌های مرسوم می‌باشد و به همین دلیل باعث کاهش تولید و انتشار CO₂ می‌شود. همچنین این بتن‌ها به علت مقاومت فشاری و کششی بیشتر و مدول الاستیسیته کمتر در مقایسه با بتن معمولی، دارای مقاومت خوب در برابر ضربه بوده و می‌تواند در مباحث پدافند غیرعامل مورد استفاده قرار گیرد. مواد ژئوپلیمری از طریق فعال‌سازی مواد آلومینوسیلیکاتی با محلول‌های سیلیکات قلیایی و هیدروکسید قلیایی و عمل‌آوری در گستره دمایی محیط تا حداکثر ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد ساخته می‌شوند. بسته به دمای عمل‌آوری، ژئوپلیمرها می‌توانند دارای ساختار آمورف تا نیمه بلورین با اندازه نانو باشند. مواد آلومینوسیلیکاتی مورد استفاده در سنتز پلیمرها شامل خاکستر بادی، کائولن، متاکائولن و کانی‌های آلومینوسیلیکاتی می‌باشند. محلول‌های قلیایی فعال‌کننده مورد استفاده نیز معمولاً سیلیکات پتاسیم یا سدیم می‌باشند که می‌توان همراه با آن‌ها از هیدروکسید پتاسیم و سدیم نیز استفاده کرد. تفاوت اصلی بین بتن‌های معمولی و بتن‌های ژئوپلیمری در این است که مکانیسم گیرش بتن‌های ژئوپلیمری،

پلیمریزاسیون می‌باشد و در یک زمان کوتاه اتفاق می‌افتد، حال آن‌که مکانیسم گیرش بتن‌های معمولی هیدراتاسیون می‌باشد که فرایندی زمان‌بر است [۵].

صرف قابل ملاحظه انرژی از قبیل سوخت‌های فسیلی و برق و تولید مقدار زیاد CO₂ (در حدود ۷ درصد کل مقدار CO₂ وارده به جو و ۵ درصد از انرژی مصرف شده در صنایع) از جمله مشکلات صنایع تولید سیمان هستند [۱-۳]. صنعت سیمان بعد از صنایع فولاد و آلومینیوم بیش‌ترین مصرف انرژی را دارد. در کشور ما نیز میزان تولید و مصرف سیمان بالاست. به نحوی که نام ایران در چند سال اخیر همواره در بین ۱۰ کشور اول تولیدکننده سیمان در دنیا بوده‌است. بنابراین با توجه به مشکلات ناشی از آلودگی هوا در کشور ما در سال‌های اخیر و توصیه‌های رهبر معظم انقلاب در مورد اهمیت حفظ محیط‌زیست و حفظ آن، باید تدابیر لازم در جهت کاهش آلودگی‌های زیست-محیطی اندیشیده شود. یکی از راهکارهای کاهش آلودگی‌های ناشی از تولید سیمان، استفاده از چسباننده‌های پوزولانی می‌باشد. بر اساس تحقیقات گذشته، استفاده از مواد با خاصیت سیمانی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان می‌تواند علاوه بر کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، موجب بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن شود. ژئوپلیمرها یکی از موادی هستند که می‌توانند در بتن به عنوان ماده چسبنده استفاده شوند. پلیمرهای غیرآلی آلومینوسیلیکاته به عنوان ژئوپلیمرها معروف هستند. این مفهوم نخستین بار توسط دانشمند فرانسوی جوزف داوید ویتز در سال ۱۹۷۸ مطرح گردید. ژئوپلیمرها از جمله پلیمرهای معدنی هستند که ترکیب شیمیایی آن‌ها شبیه به مواد ژئولیتی می‌باشد، اما ساختار میکروسکوپی آن‌ها بر خلاف ژئولیت‌ها، آمورف می‌باشد. جایگزینی کلینکر با ژئوپلیمرها به عنوان ماده چسبنده می‌تواند روش مناسبی برای کاهش استفاده از کلینکر در سیمان و به تبع آن، کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از آن باشد. بتن ژئوپلیمر بتنی است که در آن از مصالح آلومینا-سیلیکاتی غنی از سیلیکون (Si) و آلومینیوم (Al) و محلول قلیایی به عنوان چسباننده استفاده می‌شود. این بتن به علت عدم استفاده از کلینکر در آن، دارای مزایای مختلف از جمله انرژی تولید پایین، آلودگی کم‌تر، خواص مکانیکی مناسب و دوام بالا در محیط‌های خورنده می‌باشد. استفاده از این بتن‌ها می‌تواند میزان تولید CO₂ را تا ۸۰ درصد، در صورت جایگزینی کامل سیمان، کاهش دهد [۴]. ژئوپلیمرها یک جایگزین مناسب برای انواع سیمان در بتن می‌باشد. زیرا از طرفی ژئوپلیمرها نسبت به سیمان‌های مرسوم و پلیمرهای آلی ارزان‌تر بوده و از طرف دیگر به وفور یافت می‌شوند. همچنین دمای لازم برای تولید آن‌ها به مراتب پایین‌تر از سیمان‌های مرسوم می‌باشد و به همین دلیل باعث کاهش تولید و انتشار CO₂ می‌شود. همچنین این بتن‌ها به علت مقاومت فشاری و کششی بیشتر و مدول الاستیسیته کمتر در مقایسه با بتن معمولی، دارای مقاومت خوب در برابر ضربه بوده و می‌تواند در مباحث پدافند غیرعامل مورد استفاده قرار گیرد. مواد ژئوپلیمری از طریق فعال‌سازی مواد آلومینوسیلیکاتی با محلول‌های سیلیکات قلیایی و هیدروکسید قلیایی و عمل‌آوری در گستره دمایی محیط تا حداکثر ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد ساخته می‌شوند. بسته به دمای عمل‌آوری، ژئوپلیمرها می‌توانند دارای ساختار آمورف تا نیمه بلورین با اندازه نانو باشند. مواد آلومینوسیلیکاتی مورد استفاده در سنتز پلیمرها شامل خاکستر بادی، کائولن، متاکائولن و کانی‌های آلومینوسیلیکاتی می‌باشند. محلول‌های قلیایی فعال‌کننده مورد استفاده نیز معمولاً سیلیکات پتاسیم یا سدیم می‌باشند که می‌توان همراه با آن‌ها از هیدروکسید پتاسیم و سدیم نیز استفاده کرد. تفاوت اصلی بین بتن‌های معمولی و بتن‌های ژئوپلیمری در این است که مکانیسم گیرش بتن‌های ژئوپلیمری، پلیمریزاسیون می‌باشد و در یک زمان کوتاه اتفاق می‌افتد، حال آن‌که مکانیسم گیرش بتن‌های معمولی هیدراتاسیون می‌باشد که فرایندی زمان‌بر است امروزه در اکثر کشورها بحث آلاینده‌های زیست‌محیطی از جمله نگرانی‌های اصلی به حساب می‌آید. صنایع مختلفی همچون صنایع فولاد، پتروشیمی، نفت و ... باعث ایجاد آلودگی‌ها زیست‌محیطی از جمله آلودگی هوا به دنبال تولید گازهای گلخانه‌ای مثل CO₂ می‌شوند. در این بین صنایع ساخت و ساز نیز سهم قابل توجهی از این آلودگی را به خود اختصاص داده‌اند. از جمله صنایع فعال در زمینه ساخت و ساز، صنعت سیمان می‌باشد. همان‌طور که پیش از این نیز گفته شد، صنایع سیمان باعث ایجاد مقدار زیاد گاز CO₂ و به تبع آن آلودگی هوا می‌شوند. میزان تولید CO₂ در سیمان برابر با مقدار سیمان تولید شده است. ماده اصلی سیمان کلینکر است. بنابراین با کاهش میزان استفاده از کلینکر می‌توان میزان CO₂ تولیدی را نیز کاهش داد. یکی از روش‌های کاهش استفاده از سیمان در بتن، استفاده از مواد با خاصیت سیمانی به عنوان جایگزین درصدی از سیمان است. طبق نتایج تحقیقات گذشته، این نوع بتن‌ها نتایج مطلوبی از جمله افزایش مقاومت فشاری، بهبود دوام و کارایی را از خود نشان داده‌است [۵]. البته این نوع بتن‌ها دارای ضعف‌ها و مشکلاتی از قبیل نبود آئین‌نامه معتبر برای طراحی، نبود اطلاعات کامل و قابل اطمینان، جمع‌شدگی بالا و گیرش سریع نیز هستند [۶-۷]. این مواد با خاصیت سیمانی،

محصول اصلی صنایع نیستند و از محصولات جانبی صنایع می‌باشند. همچنین ممکن است این مواد به صورت طبیعی از طبیعت بدست آیند که در این صورت به آن‌ها پوزولان طبیعی می‌گویند. بنابراین استفاده از این مواد، خطری برای محیط زیست ندارد و استفاده از آن‌ها در بتن موجب کاهش آلودگی‌ها می‌شود.

روش دیگری که به کمک آن می‌توان آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید بتن را کاهش داد، استفاده از بتن‌های ژئوپلیمری [۸] می‌باشد. در این نوع بتن‌ها از سیمان استفاده نمی‌شود و “در واقع دو بخش ماده پایه و ماده فعال‌ساز ساختار این نوع بتن‌ها را تشکیل می‌دهد [۱]. منظور از بخش ماده پایه ترکیبات آلومینوسیلیکاتی است. انواع پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی می‌توانند به عنوان ماده پایه مورد استفاده قرار بگیرند، زیرا دارای منابع غنی ترکیبات آلومینوسیلیکاتی هستند. از انواع پوزولان‌ها در تحقیقات مختلف استفاده شده‌است. بخش دیگر بتن‌های ژئوپلیمری، ماده فعال‌ساز است. ماده فعال‌ساز نیز ماده‌ای با خاصیت قلیایی است که باعث انحلال یون‌های آلومینیوم و سیلیسیم موجود در ماده پایه می‌شود و با انجام واکنش، ترکیب خمیر ژئوپلیمری را تشکیل می‌دهد. محلول‌ها سدیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید، سدیم سیلیکات و سدیم کربنات از جمله مهم‌ترین محلول‌های فعال‌ساز استفاده شده در تحقیقات می‌باشند. در مقالات مختلف از مواد پایه و فعال‌ساز مختلف استفاده شده است و به تبع آن نتایج متنوعی گرفته شده‌است که در ادامه آن‌ها بیان می‌کنیم. همچنین تفاوت در میزان سیلیس و آلومینیوم ماده پایه نیز می‌تواند بر روی نتایج تاثیرگذار باشد.

امروزه بتن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در توسعه زیرساخت‌های عمرانی و اقتصادی جوامع شناخته می‌شود. میزان مصرف بتن به قدری بالاست که پس از آب، به عنوان پرمصرف‌ترین ماده در دنیا شناخته می‌شود. با توجه به مصرف بالای بتن و در پی آن تولید سیمان، باید تدابیر لازم جهت کنترل آلودگی‌های ناشی از تولید سیمان اندیشیده شود. یکی از راه‌های کاهش آلودگی‌های ناشی از سیمان، کاهش مقدار مصرف سیمان است و یکی از راه‌های مناسب جهت کاهش و حتی به صفر رساندن درصد سیمان مصرفی، استفاده از چسباننده‌های پوزولانی است. بنابر تحقیقات پیشین صورت گرفته استفاده از چسباننده‌های پوزولانی به عنوان جایگزین سیمان علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، می‌تواند در بتن به عنوان ماده چسبنده ایفای نقش کنند و حتی باعث بهبود برخی خواص مقاومتی و دوام آن شوند. یکی از مواد چسباننده ژئوپلیمرها هستند که از دو بخش اصلی منبع آلومینوسیلیکاتی و ماده فعال‌ساز (قلیایی یا اسیدی) تشکیل می‌شوند و می‌توانند با عمل آوری در گستره دمای محیط تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد خاصیت سیمانی و چسبندگی ایجاد کنند. ترکیب شیمیایی ژئوپلیمرها شبیه مواد ژئولیتی بوده اما ساختار میکروسکوپی آن‌ها بسته به دمای عمل‌آوری، آمورف تا نیمه بلورین است [۱]، آمورف ماده جامدی است که اجزای تشکیل دهنده آن به صورت بلوری و منظم کنار یکدیگر قرار ندارند. هر ماده‌ای حاوی آلومینات و سیلیکات که به صورت آمورف یا نیمه آمورف باشد و با محلول‌های قلیایی مانند هیدروکسیدهای قلیایی و سیلیکات‌های قلیایی ترکیب شود، پیوندهایی را شکل می‌دهد که دارای ساختاری سه بعدی و تکرار شونده است که آن را ژئوپلیمر می‌نامند [۳]. مفهوم ژئوپلیمر در ابتدا توسط داویدویتس در سال ۱۹۷۸ مطرح شد. وی بیان کرد که یک محلول قلیایی می‌تواند با سیلیسیم و آلومینیوم موجود در یک ماده با منشأ طبیعی و یا یک محصول جانبی مانند خاکستر بادی واکنش دهد و یک ماده چسباننده ایجاد کند. پالمو و همکاران [۲] سیستم‌های قلیافعال را به دو مدل تقسیم کردند. در مدل اول سرباره کوره بلند (Si + Ca) با محلول‌های قلیایی ملایم واکنش می‌دهد و ژل C-S-H تولید می‌کند و در مدل دوم، مواد حاوی سیلیس و آلومین (Si + Al) با محلول‌های با قلیائیت متوسط به بالا واکنش می‌دهند که در بین منابع آلومینوسیلیکاتی، متاکائولین و خاکستر بادی نوع F مناسب‌ترین مواد است. داویدویتر مدل دوم را به دلیل ساختار پلیمری، ژئوپلیمر نامید.

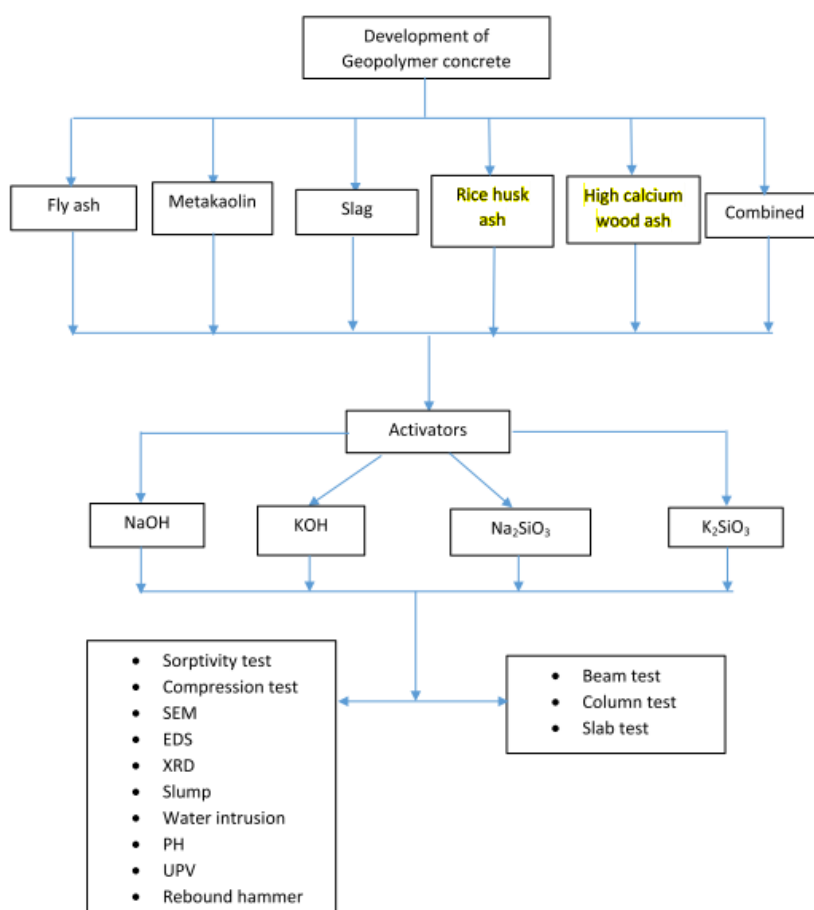
فرآیند تولید سیمان ژئوپلیمری شامل یک مرحله فعال‌سازی حرارتی و سپس فعال‌سازی قلیایی است. مصالح اولیه آن در تمام جهان وجود دارد، به طوری که هر منبع آلومیناسیلیکاتی که قابلیت انحلال در محیط‌های شدید قلیایی را داشته باشد، می‌تواند به عنوان منبع تهیه این سیمان‌ها مورد استفاده قرار گیرد [4]. با توجه به نحوه تشکیل ژئوپلیمر و فرایند تشکیل آن که در ادامه توضیح داده خواهد شد، هرچه درصد آلومینا و سیلیس (آمورف) در منبع آلومینوسیلیکاتی بیش تر باشد، بتن ژئوپلیمری ساخته شده دارای خواص مکانیکی و دوام بهتری است. در ابتدا برای تولید ژئوپلیمر از متاکائولن به عنوان منبع آلومینوسیلیکاتی استفاده شد، اما به علت دسترسی محدود و هزینه بالای آن، در تحقیقات بعدی از مواد دیگر به خصوص خاکستر بادی استفاده شده است. از جمله موادی که تاکنون به عنوان منبع آلومینوسیلیکاتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، می‌توان به خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی، ژئولیت و متاکائولن اشاره کرد [۳][۴][۵]. از بین مواد نام

برده شده، خاکستر بادی به دلیل دارا بودن درصد بالای آلومینا و سیلیس و خاکستر بادی به دلیل درصد بالای سیلیس، و همچنین دسترسی آسان تر نسبت به سایر مواد، به مصالح عامه پسندتری تبدیل شده اند.

ژئوپلیمرهای بر پایه متاکائولن نسبت به سایر مواد ژئوپلیمر دارای خواص پایدارتری است. این در حالی است که مواد ژئوپلیمر بر پایه متاکائولن به دلیل تخلخل بالای متاکائولن نیازمند مقدار بیش تر آب برای دستیابی به خواص رئولوژی مشابه با سایر مواد ژئوپلیمر می باشد. همچنین مواد ژئوپلیمر بر پایه خاکستر بادی در مقایسه با سایر مواد پایه آلومینوسیلیکاتی دارای خواص دوامی بهتر است. نتایج تحقیقات نشان می دهد که مواد ژئوپلیمر بر پایه سرباره دارای مقاومت بالا در سن پایین و مقاومت بالا در برابر اسید می باشد [۶].

۲- اجزا تشکیل دهنده ژئوپلیمر

همان طور که پیش تر نیز گفته شد، اجزا اصلی ژئوپلیمر شامل ماده پایه آلومینوسیلیکاتی (خاکستر بادی، سرباره، متاکائولن، خاکستر پوسته برنج و ...) و ماده فعال ساز قلیایی می باشد. ویژگی ها و مشخصات هر یک از این اجزا بر روی خواص مکانیکی و دوام ملات ها و بتن های ژئوپلیمری تاثیرگذار است و می تواند روی خواص مختلف ژئوپلیمر از جمله مقاومت فشاری، جمع شدگی، زمان سخت شدن، مقاومت حرارتی و ضریب انتقال حرارت تاثیرگذار باشد. بنابراین لازم است تا شناخت و بررسی کافی نسبت به خواص و ویژگی های هر یک صورت گیرد. در شکل شماره ۱، نمودار مواد پایه و فعال سازهای مختلف مورد استفاده در تحقیقات و همچنین آزمون های انجام شده بر روی نمونه ها به صورت خلاصه آمده است.



شکل ۱- طبقه بندی مطالعات انجام شده بر روی ژئوپلیمر

۱-۱ ماده پایه آلومینوسیلیکاتی

مواد پایه آلومینوسیلیکاتی از نظر شکل ساختار و عناصر تکمیل دهنده متفاوت اند که این می تواند باعث خصوصیات متفاوت در آن ها شود. در جدول شماره ۱، لیستی از مواد مورد استفاده در تحقیقات مختلف همراه با آنالیز XRF آن ها آمده است. همان طور که در جدول شماره ۱ مشاهده می شود، مواد مورد استفاده به عنوان ماده پایه در تحقیقات گذشته دارای درصدهای مختلفی از اجزا تشکیل دهنده می باشند. این در حالی است که در یک نوع ماده نیز (برای مثال خاکستر بادی) درصدها متفاوت است. این نشان می دهد که آنالیز دقیق و شناخت ویژگی های ماده پایه مورد استفاده امری ضروری است. در ژئوپلیمر، دو ترکیب SiO_2 و Al_2O_3 نقش اساسی را بازی می کنند. سایر ترکیبات نیز مانند Fe_2O_3 اهمیت دارند، اما نقش اصلی را دو جزء سیلیس و آلومین ایفا می کنند. Fe_2O_3 در مخلوط های ژئوپلیمری باعث افزایش مقاومت حرارتی و کاهش جذب آب می شود.

با توجه به جدول شماره ۱ مشاهده می شود که خاکستر پوسته برنج و میکروسیلیس دارای بیشترین مقدار سیلیس (در حدود ۹۰ درصد) نسبت به سایر مواد پایه می باشد. این در حالی است که این دو ماده دارای کمترین مقدار آلومین (کمتر از ۱ درصد) می باشند. بنابر نتایج تحقیقات گذشته مشاهده می شود که در صورتی که نسبت سیلیس به آلومین در ماده پایه در حدود ۲ تا ۳/۵ باشد، از نظر مقاومت و دوام بهترین نتایج حاصل می شود. با توجه به جدول شماره ۱، موادی نظیر خاکستر بادی و سرباره کوره آهن گدازی می توانند از این نظر مناسب باشند که در اکثر تحقیقات نیز از همین مواد استفاده شده است. لازم به ذکر است که خاکستر بادی هم از نظر میزان سیلیس و هم آلومین نسبت به سرباره دارای مقادیر بیش تری است. متاکائولن نیز از موادی است که با توجه به درصد سیلیس و آلومین قابلیت استفاده به عنوان منبع آلومینوسیلیکاتی را داراست اما به علت هزینه بالای تولید، استفاده از آن چندان مقرون به صرفه به نظر نمی رسد. دیگر مواد موجود در جدول مانند خاکستر آتشفشانی، پودر شیشه، ضیعات آجرهای رسی، ضایعات ذغال سنگ و ... نیز می توانند به عنوان منبع آلومینوسیلیکاتی مورد استفاده قرار گیرند اما با توجه به حجم هم تولید آن ها، دشواری تهیه و ... کم تر در تحقیقات مورد توجه قرار گرفته اند. از دیگر مشخصه هایی که در خصوص مواد پایه ژئوپلیمری در تحقیقات مورد استفاده قرار می گیرد، مجموع اکسیدها (مجموع سیلیس، آلومین و اکسید آهن) می باشد.

جدول ۱- مواد پایه آلومینوسیلیکاتی مورد استفاده در تحقیقات مختلف

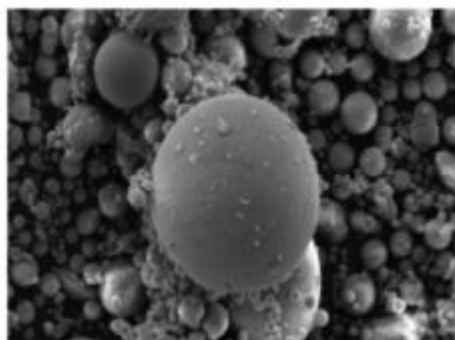
Type	Content (%)								Reference
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	
Kaolin	46.15	49.91	0.87	0.04	0.37	0.06	0.51	1.59	Yu et al. (2020a)
Kaolin	44.17	36.55	1.69	0.81	0.27	—	1.43	2.13	Sellami et al. (2019)
MK	58.39	35.47	2.71	0.01	0.30	—	—	1.44	Istuque et al. (2019)
MK	51.52	44.53	0.48	0.02	0.19	—	0.29	0.16	Villaquiran-Caicedo (2019)
Laterite	6.54	37.18	32.45	0.17	0.12	—	0.06	0.26	Mathew and Issac (2020)
Laterite	43.91	27.80	17.21	0.28	0.17	—	0.04	0.03	Mathew and Issac (2020)
Laterite	64.48	19.01	13.74	0.10	—	—	—	0.63	Subaer et al. (2019)
Zeolite	78.680	11.680	1.120	3.430	1.120	0.017	0.440	3.080	Nikolov et al. (2020)
Diatomite	80.30	6.10	6.79	1.04	0.65	0.12	0.62	0.44	Hassan et al. (2019)
Halloysite	55.50	29.08	2.55	0.02	0.02	—	0.10	0.10	Bayiha et al. (2019)
FA	55.38	28.14	3.31	3.45	1.85	0.32	2.30	1.39	Gholampour et al. (2019b)
FA	56.00	18.10	5.31	7.24	0.93	1.65	1.21	1.36	Guo and Yang (2020)
FA	65.90	24.00	2.87	1.59	0.42	—	0.49	1.44	Hu et al. (2019)
FA	47.90	25.70	14.70	4.11	1.36	0.19	0.81	0.67	Khan et al. (2019)
HCFA	37.30	14.90	16.50	17.10	3.72	2.56	1.74	1.66	Mohammed et al. (2019)
HCFA	34.00	13.50	5.00	16.50	3.10	2.80	1.50	5.50	De Rossi et al. (2019)
HCFA	36.20	19.90	11.90	14.20	1.90	3.60	—	2.40	Nuaklong et al. (2019)
GGBS	35.34	20.69	0.18	31.32	8.11	1.79	1.36	0.29	Yu et al. (2020a, b)
GGBS	18.90	6.43	0.74	66.90	1.41	1.97	—	0.67	Alrefaei et al. (2019)
GGBS	28.20	9.73	0.98	52.69	2.90	1.46	—	1.22	Bouaissi et al. (2019)
GGBS	36.50	9.95	0.38	43.38	6.74	—	—	0.35	Alonso et al. (2019)
RM	14.40	22.20	40.20	2.00	0.17	0.28	12.70	0.11	Li et al. (2020)
RM	16.51	28.05	30.32	2.22	0.70	—	8.70	0.26	Yang et al. (2020)
RM	27.544	30.591	4.603	25.478	0.818	1.422	—	—	Shi et al. (2020a)
RHA	92.33	0.18	0.17	0.63	0.49	—	0.07	0.15	Villaquiran-Caicedo (2019)
RHA	93.10	0.30	0.20	1.50	0.60	—	0.06	2.30	Liang et al. (2019)
OBFA	12.60	2.97	2.30	20.21	4.85	4.00	1.12	26.34	Alonso et al. (2019)
OBBA	23.61	5.41	6.12	20.61	6.02	0.80	1.29	17.31	Alonso et al. (2019)
VA	43.32	14.84	14.19	8.80	7.70	0.01	3.04	1.52	Baenla et al. (2019)
VA	43.00	15.00	12.00	11.00	6.80	—	4.60	1.70	Lemougna et al. (2020)
SF	87.60	0.38	0.66	0.57	3.67	—	1.26	2.36	Villaquiran-Caicedo (2019)
SF	90.00	1.20	2.00	1.00	0.60	0.50	—	—	Cheah et al. (2019)
CPA	22.60	19.67	9.67	10.10	2.52	4.68	0.39	14.20	Baenla et al. (2019)
SSA	38.28	20.72	11.27	5.51	1.91	4.18	0.70	0.73	Istuque et al. (2019)
STS	21.90	9.78	14.90	37.40	10.30	0.60	0.20	0.29	Guo and Yang (2020)
STS	11.90	1.23	31.85	45.72	3.16	0.22	0.03	0.03	Chen et al. (2019)
DWTR	21.246	23.100	42.004	9.358	0.581	1.231	0.279	0.384	Ji and Pei (2020)
IOT	40.00	8.70	48.90	—	—	—	—	—	Defaveri et al. (2019)
GWR	43.70	17.60	12.00	19.70	—	1.30	—	—	Defaveri et al. (2019)
HMNS	43.22	4.35	10.34	3.45	26.15	0.28	0.23	0.18	Bouaissi et al. (2019)
WBA	21.86	7.29	2.56	29.36	2.55	4.76	2.54	3.89	Hassan et al. (2019)
WBA	0.98	1.51	1.19	44.81	3.81	1.07	1.64	6.89	Hassan et al. (2019)
CG	59.73	20.16	5.50	1.96	1.01	—	0.23	2.52	Huang et al. (2018)
CEG	53.77	42.75	1.25	0.10	0.16	—	—	0.60	Kovarik et al. (2017a, b)
POFA	64.20	4.25	3.13	10.20	5.90	0.09	0.10	8.64	Huseien et al. (2016)
GP	58.37	3.94	11.15	2.85	0.49	—	8.75	4.66	Cristelo et al. (2019)
MSWIFA	4.17	0.97	1.05	44.40	1.08	6.58	10.00	5.13	Liu et al. (2020b)
CCR	3.19	1.24	0.24	63.35	0.16	0.64	0.28	0.01	Biloni et al. (2018)
RCBW	60.31	15.61	7.72	5.60	3.05	—	0.56	4.48	Mahmoodi et al. (2020)

با توجه به جدول ۱-۲، مشاهده می‌شود یکی از موادی که در تهیه ژئوپلیمر مورد استفاده قرار می‌گیرد، خاکستر بادی با درصد بالای CaO (HCFA) است. مقدار بالای CaO آزاد در این ماده، کاربرد آن در سیستم‌های بتن با سیمان معمولی محدود می‌کند، اما کاربرد آن در تهیه ژئوپلیمر فراتر از حد تصور است (Nuaklong et al., 2018a; Phoo-ngernkham et al., 2015; Wongsu et al., 2020).

در ادامه، ویژگی‌ها و نتایج تحقیقات صورت گرفته بر روی ماده‌های پایه اصلی مانند خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی و ... مورد بحث قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که سرباره کوره آهن‌گدازی در گزارش مربوط به مواد قلیا فعال به صورت جامع مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۱-۲ خاکستر بادی

خاکستر بادی یکی از رایج‌ترین موادی است که برای تولید ملات و بتن ژئوپلیمر به کار می‌رود. این ماده به علت در دسترس بودن، قیمت پایین، شکل ذرات کروی و همچنین درصد بالای سیلیس و آلومین و همچنین واکنش‌پذیری بالا به ماده‌ای مناسب برای تولید ژئوپلیمر تبدیل شده است. تصویر میکروسکوپ الکترونی این ماده در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی خاکستر بادی [۷]

این ماده می‌تواند در بتن، باعث افزایش چرخه حیات و دوام بتن شود. خاکستر بادی در رده‌های (کلاس‌های) C و F وجود دارد. خاکستر بادی کلاس F، دارای خاصیت پوزولانی و بدون خاصیت سیمانی شدن، یا خاصیت سیمانی شدن بسیار کم است. این در حالی است که خاکستر بادی کلاس C علاوه بر خاصیت پوزولانی، دارای خاصیت سیمانی نیز می‌باشد. خاصیت سیمانی شدن با مقدار CaO رابطه مستقیم دارد و می‌توان گفت که مقدار CaO در خاکستر بادی کلاس F مقدار کمی است [۸]. همچنین مقادیر سیلیس و آلومین در خاکستر بادی کلاس F بیش‌تر از کلاس C است. خاکستر بادی کلاس F شباهت زیادی با خاکستر آتشفشانی دارد [۹]. موارد گفته شده، در جدول شماره ۲ قابل مشاهده است. در این جدول آنالیز XRF خاکسترهای بادی کلاس C و F آمده است. سایر تحقیقات نیز نتایج مشابهی را بدست می‌دهد.

جدول ۲- مقایسه اجزا تشکیل دهنده خاکستر بادی کلاس F و C [۱۰]

Component	Class C fly ash (%)	Class F fly ash (%)	Rapid set cement (%)
SiO ₂	38.38	59.73	15.40
Al ₂ O ₃	18.72	30.18	13.74
Fe ₂ O ₃	5.06	2.80	2.38
CaO	24.63	0.73	50.87
MgO	5.08	0.83	1.26
SO ₃	1.37	0.02	12.52
Na ₂ O	1.71	0.24	0.56 Na equivalent
K ₂ O	0.56	2.42	Not determined
TiO ₂	1.48	1.60	Not determined
P ₂ O ₅	1.24	0.08	Not determined
Mn ₂ O ₃	0.02	0.02	Not determined
SrO	0.37	0.05	Not determined
Cr ₂ O ₃	<0.01	0.03	Not determined
ZnO	<0.01	<0.01	Not determined
BaO	0.94	0.12	Not determined
Loss on ignition	0.26	0.79	2.84

خاکستر بادی بسته به نوع ذغال سنگ می‌تواند ترکیب شیمیایی متفاوتی داشته باشد، اما در حالت کلی دارای ۴۰ تا ۶۰ درصد سیلیس و ۲۰ تا ۳۰ درصد آلومینات می‌باشد. میزان آهن موجود در خاکستر بادی نیز بسیار متنوع است.

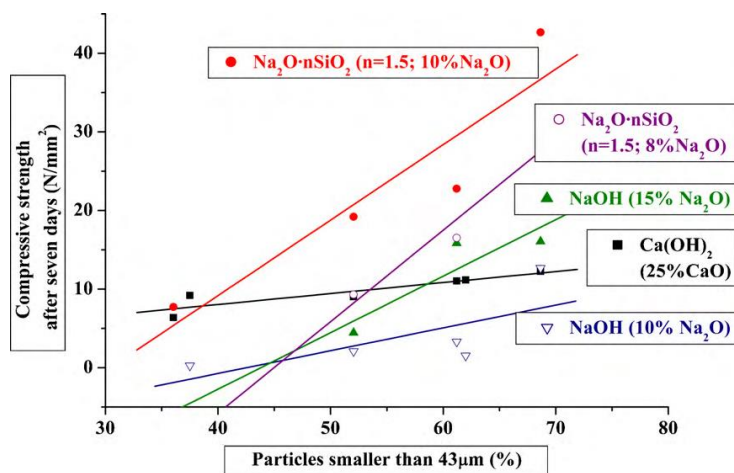
با توجه به موارد ذکر شده و خصوصیات بتن ژئوپلیمر ذکر شده در سایر تحقیقات، خاکستر بادی کلاس F به جهت مقدار بالاتر سیلیس و آلومین برای تولید ژئوپلیمر مناسب‌تر است. در جدول شماره ۲-۳، اکسیدهای تشکیل دهنده ۶ نوع خاکستر بادی کلاس F که در

تحقیقی برای تهیه ملات ژئوپلیمری مورد استفاده قرار گرفته است، آورده شده است. در این تحقیق نسبت ماسه به مواد چسباننده (خاکستر بادی و هیدروکسید کلسیم) برابر ۳ در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به جدول شماره ۳ مشاهده می شود که خاکستر بادی شماره ۱، ۴ و ۵ دارای بیشترین مقادیر ریزدانه (کوچکتر از ۴۳ میکرومتر) هستند. نتایج این تحقیق نشان داد که در حالت استفاده از محلول کلسیم هیدروکسید مقادیر مقاومت فشاری تفاوت چندانی در خاکسترهای بادی مختلف ندارد. تنها نمونه حاوی خاکستر بادی شماره ۶ دارای مقاومت کم تر است. نکته قابل توجه در این تحقیق این است که رده بندی پوزولانی خاکسترهای بادی مورد استفاده در این تحقیق مطابق با استاندارد صربستان (SRPS B.C.018/01) نمی تواند در تعیین مقاومت فشاری نمونه های ژئوپلیمر معتبر باشد.

جدول ۳- مقایسه اجزا تشکیل دهنده و مشخصات ۶ نوع خاکستر بادی کلاس F [۱۱]

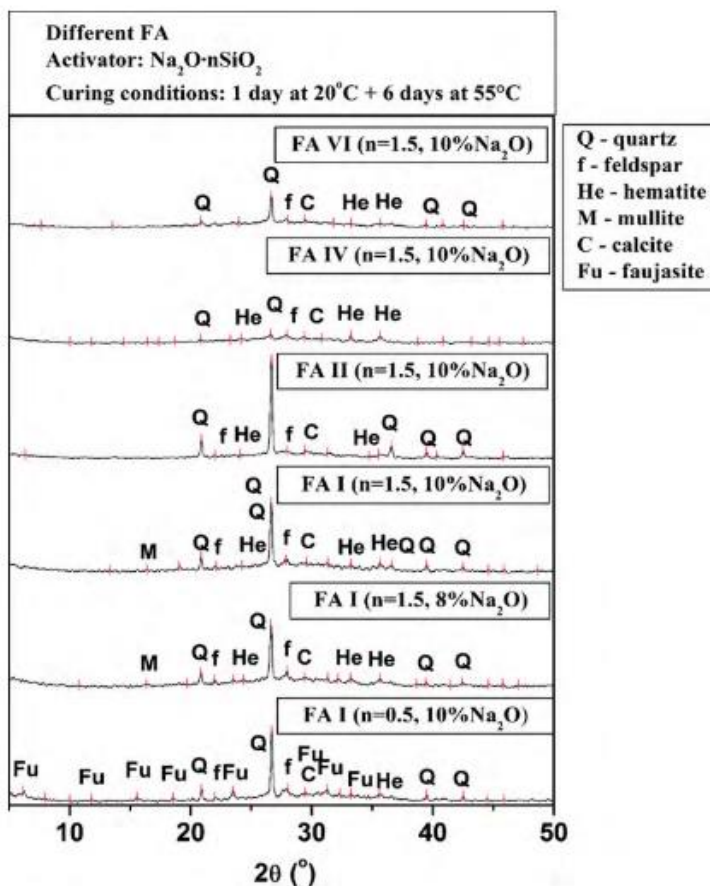
Investigated properties	FA					
	I	II	III	IV	V	VI
SiO ₂	51.74	60.29	44.09	44.71	48.12	53.96
Al ₂ O ₃	21.36	17.53	21.74	22.43	23.99	24.83
Fe ₂ O ₃	8.80	9.61	14.49	15.04	7.90	6.75
MnO	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02
CaO	11.34	6.21	10.96	10.27	11.03	7.93
MgO	1.56	1.20	1.19	1.09	1.30	1.24
SO ₃	1.27	0.66	1.77	1.56	2.25	0.90
Na ₂ O	0.64	0.58	0.52	0.40	0.46	0.48
K ₂ O	1.35	1.04	0.76	0.81	1.31	1.31
LOI at 1000 °C	1.60	2.83	4.40	3.59	3.61	2.31
Sum of oxides (SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	81.90	87.43	80.32	82.18	80.01	85.54
Classification acc. to ASTM C 618	F	F	F	F	F	F
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	2.42	3.44	2.03	1.99	2.01	2.17
Particle content > 63 μm (%)	23.30	42.65	56.50	30.35	30.66	55.70
Particle content 43-63 μm (%)	8.05	5.30	6.00	8.45	7.33	8.25
Particle content < 43 μm (%)	68.65	52.05	37.50	61.20	62.01	36.05

اگرچه مشخصات فیزیکی، شیمیایی و معدنی خاکسترهای بادی بر روی فرایند ژئوپلیمریزاسیون تاثیرگذار است، اما مشخصات فیزیکی تاثیرات بیش تری دارد و پارامتر بسیار مهمی است که باید به صورت جدا مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد [۱۱]. در میان خصوصیات فیزیکی خاکستر بادی، ریزی دانه ها نقش اصلی را بازی می کند. هرچه در نمونه های ژئوپلیمر مقدار ذرات با اندازه کوچک تر از ۴۵ میکرون بیش تر باشد، مقاومت فشاری بیش تری دارد. این موضوع در نمودار شکل ۳ به وضوح مشاهده می شود. با توجه به نمودار و نتایج تحقیقات می توان گفت که با افزایش ریزی دانه ها، ذرات سریع تر وارد واکنش می شوند و واکنش سریع تر به وقوع می پیوندد و بنابراین مقادیر مقاومت ۷ روزه افزایش می یابد. این نتیجه نشان می دهد که ذرات بزرگ تر، توسط مواد فعال ساز کم تر فعال شده و وارد واکنش می شوند.



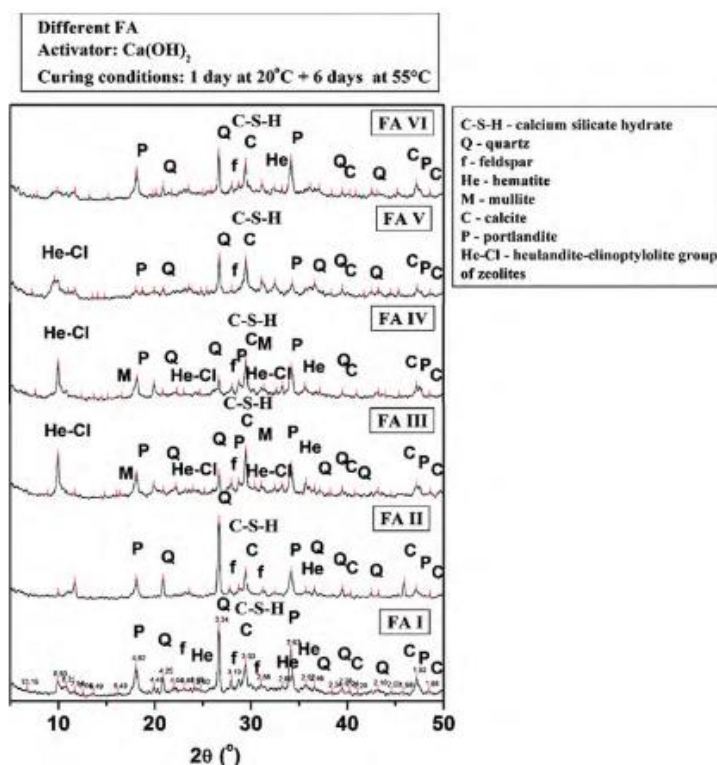
شکل ۳- نمودار مقاومت فشاری نمونه های ملات ژئوپلیمر در برابر میزان ذرات ریزتر از ۴۳ میکرون خاکستر بادی [۱۱]

نتایج بررسی آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌های خاکستر بادی فعال شده با فعال‌ساز قلیایی نشان می‌دهد که محصول واکنش اغلب آمورف است که در فاصله 2θ بین ۲۵ تا ۳۵ درجه مشاهده می‌شود. نتایج آزمون پراش پرتو ایکس یک تحقیق که بر روی خاکستر بادی فعال شده با سدیم سیلیکات انجام شده است، در شکل شماره ۴ آمده است.



شکل ۴- نمودار XRD نمونه‌های خاکستر بادی فعال شده با محلول سدیم سیلیکات [۱۱]

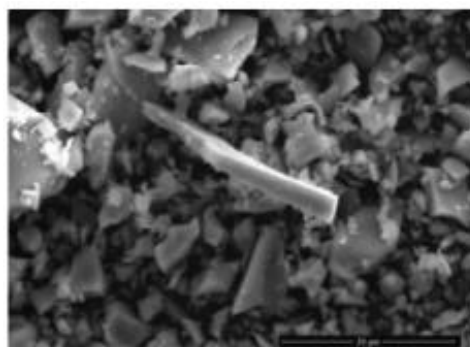
در نمودار شکل ۵، نمودار XRD نمونه‌های خاکستر بادی فعال شده با کلسیم هیدروکسید آمده است. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که علاوه بر کلسیت و پرتلندیت واکنش نداد، کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) نیز در محصول نهایی واکنش حضور دارد.



شکل ۵- نمودار XRD نمونه‌های خاکستر بادی فعال شده با محلول کلسیم هیدروکسید [۱۱]

۲-۱-۲- سرباره کوره آهن‌گدازی

سرباره کوره آهن‌گدازی یک محصول جانبی صنایع آهن است که تقریباً در دمای 1500°C درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید [۱۲]. بسته به نوع فرایند سرد کردن، سرباره‌ای که در آب سرد شود GGBS^1 نام دارد. این ماده به علت ساختار آمورف، سختی بالا و فعالیت پوزولانی، پس از خردایش به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده یکی از مواد رایج در تهیه ژئوپلیمر است که نسبت سیلیس به آلومین در آن بین $1/71$ تا $3/67$ است. GGBS در فرایند پلیمریزاسیون فعالیت بالایی دارد و می‌تواند در دمای پایین حدود صفر درجه سانتی‌گراد نیز نرخ واکنش خوبی داشته باشد [۱۳]. تصویر میکروسکوپ الکترونی سرباره در شکل شماره ۶ آمده است.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی سرباره [۷]

¹ ground granulated blast furnace slag

وقتی که در بتن از سرپاره استفاده می‌شود، به جهت تولید گرمای کم‌تر، احتمال رخداد ترک خوردگی کاهش می‌یابد. GGBS می‌تواند باعث بهبود تخلخل، مقاومت بلند مدت، مقاومت در برابر سولفات و واکنش‌های قلیایی سیلیسی بتن، کاهش تقاضای آب، نفوذپذیری و گرمای واکنش بتن شود [۱۲]

۳-۱-۲ خاکستر پوسته برنج (RHA^2)

مواد زائد کشاورزی مانند خاکستر پوسته برنج به عنوان یک جایگزین مناسب برای بهبود خواص ژئوپلیمر شناخته می‌شود [۱۴]. استفاده از خاکستر پوسته برنج در بتن ژئوپلیمر می‌تواند باعث کاهش مصرف نانوسیلیس شود و به کاهش آلودگی و مشکلات ناشی از جمع شدن خاکستر پوسته برنج در لندفیل‌ها به خصوص در کشورهای تولید کننده برنج کمک کند. از خاکستر پوسته برنج به دلیل واکنش پذیری بالای آن به دلیل مقدار بالای سیلیس و سطح ویژه بسیار بالای آن به صورت گسترده در بتن‌های ژئوپلیمر خود متراکم استفاده می‌شود [۱۵].

۴-۱-۲ متاکائولن

متاکائولن یک ماده پوزولانی است که از حرارت‌دهی خاک رس حاوی کائولینیت در دمای بالا (حدود ۶۵۰ تا ۸۰۰ درجه بسته به خلوص کائولینیت و شکل کریستالی یا آمورف آن [۱۶] تولید می‌شود. این ماده همچنین می‌تواند از کلسینه کردن ضایعات کارخانه‌های کاغذسازی بدست آید [۱۷]. منابع موجود برای متاکائولن که می‌توانند برای استفاده در ژئوپلیمر مورد استفاده قرار گیرند، از نظر اندازه ذرات، خلوص و میزان کریستالی یا آمورف بودن بسیار متنوع هستند. اگرچه پراکندگی اندازه ذرات بر خصوصیات رئولوژی ترکیب تاثیرگذار است، با این حال مشاهده شده است که بین متاکائولن‌های با مساحت سطح متفاوت، تغییرات چندان قابل توجه نیست [۱۸]. فرمول تبدیل کائولن به متاکائولن در زیر آمده است.



همان‌طور که مشاهده می‌شود، متاکائولن دارای سیلیس و آلومینات است و از این رو می‌تواند در تهیه سیمان ژئوپلیمری مورد استفاده قرار گیرد. نکته قابل توجه در این جا این است که با حرارت دادن کائولن، ساختار به سمت حالت آمورف تغییر شکل پیدا می‌کند و بنابراین باعث می‌شود که خاصیت واکنش‌زایی سیلیس و آلومینات افزایش پیدا کند.

در جدول شماره ۴، ترکیب شیمیایی متاکائولن و سرپاره با هم مقایسه شده است.

جدول ۴- مقایسه اکسیدهای موجود در متاکائولن و سرپاره

Chemical composition wt.%	GGBFS	Metakaolin
SiO ₂	31-38	49-52
CaO	38-44	-
Al ₂ O ₃	9-13	40-43
MgO	7-12	-

در تحقیقات دیگر بر روی متاکائولن، مقادیر متفاوتی برای مقدار سیلیس و آلومینات گزارش شده است، اما در حالت کلی این مقادیر بین حدود ۲۰ تا ۶۰ درصد می‌باشد که در برخی از متاکائولن‌ها نسبت سیلیس به آلومین در محدوده مناسب برای تولید بتن ژئوپلیمر (حدود ۲ تا ۳/۵) قرار دارد.

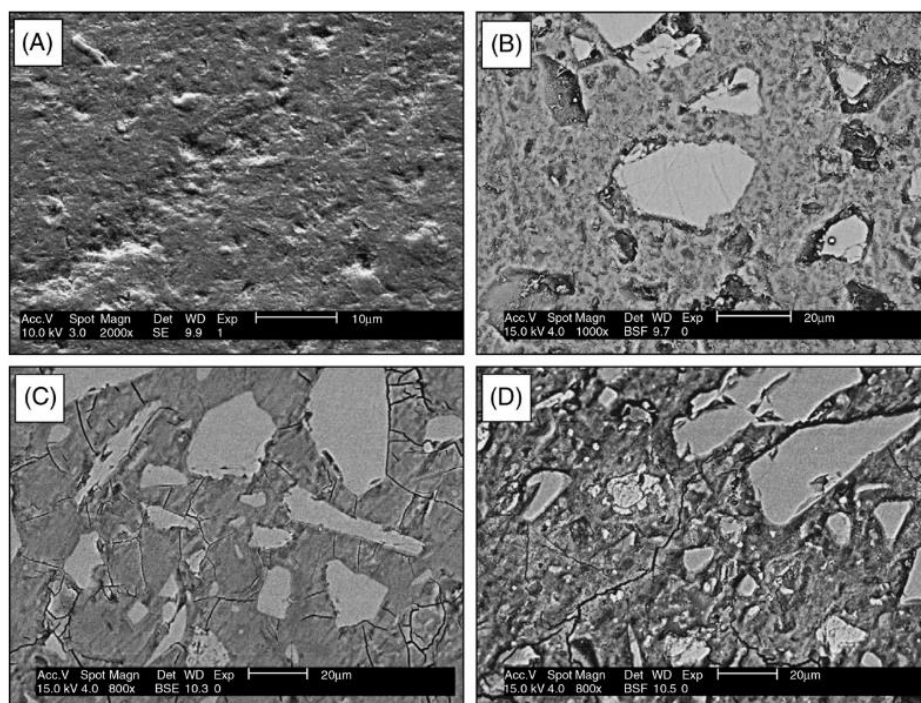
در تعداد زیادی از تحقیقات و به کمک آزمون FTIR و MAS-NMR اشاره شده است که فعال‌سازی متاکائولن به کمک محلول سدیم هیدروکسید باعث تشکیل ژل N-A-S-H می‌شود که دارای مشخصات مکانیکی خوبی است [۱۹]، [۲۰]. در حالتی که ماده ۹ فعال‌ساز

² Rice husk ash

سدیم هیدروکسید به همراه سدیم سیلیکات باشد، ماده تشکیل شده آمورف و سیمانی است، ولی در صورتی که از سدیم هیدروکسید تنها استفاده شود، ساختار متفاوت خواهد بود [۲۱]. علاوه بر این، ژل آمورف N-A-S-H تشکیل شده همانند ترکیبات شیمیایی ژئولیت طبیعی است، با این تفاوت که ساختار مانند ژئولیت کریستالی وسیع نمی‌باشد [۲۲][۲۳][۲۴]

در فرایند ژئوپلیمریزاسیون، Al تمایل دارد تا با سیلیس که ۴ ظرفیتی است احاطه شود و پیوندهای ۴ وجهی ایجاد کند. با توجه به ساختار آمورف ژل N-A-S-H، تشخیص آن به کمک آزمون XRD دشوار است و برای بررسی آن می‌توان از آزمون‌های دیگر نظیر FTIR، SEM و TEM استفاده کرد [۲۵].

*- استفاده از روش XRD به این دلیل در نمونه‌های آمورف دشوار است که در این آزمون، پیک‌هایی برای فازهای کریستالی در نمودار نتایج مشاهده می‌شود و در صورتی که فاز کریستالی نباشد، در نمودار XRD برای آن پیکی مشاهده نمی‌شود یا بسیار ضعیف است. در شکل شماره ۷، تصویر میکروسکوپی نمونه‌های متاکائولن، سرباره و ترکیب متاکائولن و سرباره فعال شده به کمک ماده فعال‌ساز قلیایی با سیمان پرتلند معمولی مقایسه شده است.



شکل ۷- مقایسه تصویر میکروسکوپی نمونه‌های متاکائولن، سرباره و ترکیب متاکائولن و سرباره فعال شده به کمک ماده فعال‌ساز قلیایی با سیمان پرتلند معمولی

با توجه به تصاویر مشخص است که نمونه حاوی متاکائولن (A) دارای ساختار منسجم‌تر و یکدست‌تری می‌باشد.

۱. ۲-۵ ترکیب مواد پایه

مواد پایه آلومینوسیلیکاتی به صورت ترکیب ۲ یا ۳ تایی نیز در تحقیقات مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند که خلاصه برخی از آن‌ها در جدول شماره ۵ آمده است. با توجه به جدول، خاکستر بادی به همراه سرباره، سرباره و سرباره نیکل سرشار از منیزیم، بوکسیت، و سیمان معمولی در تهیه ژئوپلیمر به کار رفته است. سرباره نیز به همراه خاکستر بادی، خاکستر بادی و متاکائولن، خاکستر بادی و میکروسیلیس، و متاکائولن و خاکستر پوسته برنج مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین متاکائولن همراه با سرباره و همچنین خاکستر پوسته برنج استفاده شده است. با توجه به جدول، مشاهده می‌شود که تقریباً در تمامی تحقیقات از ماده فعال‌ساز سدیم هیدروکسید به همراه

سدیم سیلیکات استفاده شده است. با توجه به نتایج جدول مشاهده می‌شود که تمامی نمونه‌های حاوی خاکستر بادی توانسته‌اند مقاومت خوبی را به ثبت برسانند. در این میان نمونه حاوی خاکستر بادی و سرباره با نسبت مایع به چسباننده (محلول به ماده پایه) ۰/۳۱ و عمل‌آوری در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد توانسته است بیش‌ترین مقدار مقاومت فشاری را کسب کند. پس از آن نمونه حاوی خاکستر آتشفشانی و سرباره قرار دارد که با توجه به شباهت ساختار خاکستر آتشفشانی و خاکستر بادی، نتایج مقاومتی خوبی کسب کرده است.

جدول ۵- خلاصه نتایج تحقیقات پیشین با ماده پایه دو یا سه تایی

Aluminosilicate precursor	Activator	L/B ratio	Curing time & temperature	Compressive strength (MPa)	
				7 d	28 d
*HCFA (Mohammed et al., 2019)	NAp	0.25	25 °C		50.00
*FA + GGBS (Alrefaei et al., 2019)	NAp	0.40	25 °C		74.40
*FA + GGBS + HMNS (Bouaissi et al., 2019)	SS + SH	0.50	25 °C		76.57
*FA + Bauxite (Wang et al., 2020)	SS + SH	0.25	80 °C for 12 h		45.54
*FA + OPC (Zailani et al., 2020)	SS + SH	0.50	24 °C		76.50
*VA + GGBS (Lemougna et al., 2020)	SS + SH	0.42	25 °C		85.00
*Clay (Bayiha et al., 2019)	SS + SH	0.78	24 °C		47.77
*Halloysite (Zhang et al., 2020a)	PA	1.30	80 °C for 2 d	65.0	
FA (Kaur et al., 2018b)	SS + SH		80 °C for 1 d		40.42
FA (Hadi et al., 2018)	SS + SH	0.50	25 °C	67.0	
FA (Bhutta et al., 2019)	SS + SH	0.50	80 °C for 4 h		52.75
HCFA + FA (Nuaklong et al., 2019)	SS + SH	0.50	60 °C for 2 d	52.5	
FA + GGBS (Hadi et al., 2019)	NA	0.31	23 °C		105.00
FA + GGBS + SF (Elyamany et al., 2018)	SS + SH	0.35	90 °C for 2 d	47.0	
GGBS + MK + RHA (Sharmin et al., 2017)	SS + SH	0.50	65 °C for 1 d		47.90
CG + GGBS (Huang et al., 2018)	SS + SH	0.50	20 °C		57.83
MK + GGBS (Huseien et al., 2018)	SS + SH	0.65	27 °C		47.84
PFD + GGBS (Katpady et al., 2020)	SS + SH	0.40	20 °C		69.77
MK + CEG (Kovarik et al., 2017a, b)	PS	0.80	22 °C		97.00
FA + Nano-MK (Kaur et al., 2018a)	SS + SH	0.30	70 °C for 1 d	45.0	
MK + RHA (Liang et al., 2019)	SS + SH	0.70	50 °C		56.60
RM + FA (Yeddula and Karthiyaini, 2020)	SS + SH	0.45	27 °C		32.70
CPA + VA (Baenla et al., 2019)	SS + SH	0.47	25 °C		25.00
BOT + GGBS (Ye et al., 2017)	SH	0.50	20 °C		50.00
IOT (Defaveri et al., 2019)	SH	0.27	100 °C	112.8	
EMDR (Han et al., 2018)	PA	0.80	80 °C for 2 d	96.3 (2 d)	

نتایج چند تحقیق دیگر در جدول شماره ۶ آمده است. با توجه به جدول، مشاهده می‌شود که نمونه حاوی متاکائولن، خاکستر بادی و میکروسیلیس فعال شده با محلول پتاسیم سیلیکات و پتاسیم هیدروکسید توانسته است بیش‌ترین مقدار مقاومت فشاری ۲۸ روزه را کسب کند.

جدول ۶- خلاصه نتایج تحقیقات پیشین

Table 4 – Compressive strength of geopolymer concrete.

Aluminosilicate precursor	Activator	L/B ratio	Slump (mm)	Density (kg/m ³)	Curing time & temperature	Compressive strength (MPa) (28 d)
GGBS (Zannerni et al., 2020)	SH	0.35		2249	25 °C	36.0
GGBS (Bondar et al., 2018)	SS + SH	0.55 (w/b)	240	2420	23 °C	64.4
FA + GGBS (Askarian et al., 2019)	SS + CH + LH	0.45		1680	25 °C	38.0
FA + GGBS (Hu et al., 2019)	SS + SH		130	2432	75 °C for 1 d	52.3
HCFA + RHA (Nuaklong et al., 2020)	SS + SH		721		25 °C	38.1
GGBS + RHA (Mehta and Siddique, 2018)	SS + SH	0.55			80 °C for 1 d	59.7 (3 d)
FA (Al-Azzawi et al., 2018)	SS + SH		100		70 °C for 1 d	64.0 (7 d)
MK + FA + SF (Zhang et al., 2020b)	PS + PH				25 °C	80.7

بنابراین با توجه به نتایج تحقیقات پیشین می‌توان نتیجه گرفت که مواد فعال‌ساز می‌توانند به صورت ۲ یا ۳ تایی با هم ترکیب شده و در برخی موارد مقاومت‌های خوبی را نتیجه دهند. البته نتایج بدست آمده در تحقیقات مختلف با یکدیگر متفاوت است. برای مثال با توجه

به جدول شماره ۲-۶، مشاهده می‌شود که در دو تحقیق مختلف، از سرباره استفاده شده است که در تحقیق اول نسبت مایع به چسباننده برابر ۰/۳۵ و در تحقیق دوم برابر ۰/۵۵ در نظر گرفته شده است. با این حال، مقدار مقاومت فشاری در تحقیق دوم نسبت به تحقیق اول مقدار قابل توجهی بیش تر است. البته بخشی از این اختلاف می‌تواند ناشی از استفاده سیلیکات سدیم در تحقیق دوم باشد، اما با این حال میزان تاثیر هر متغیر مشخص نیست و به نظر می‌رسد نیاز به تحقیقات بیش تر در این زمینه باشد.

یبپ و همکاران [۲۶] گزارش کرد که در خمیرهای ژئوپلیمری مبتنی بر MK/SG، ژل C-S-H و ژل آلومینوسیلیکات (N-A-S-H) را می‌توان یافت. همان‌طور که توسط سومنا و همکاران گزارش شده است، این کاملاً شبیه به یک ژئوپلیمر مبتنی بر کلسیم بالا است که به ویژه توسط هیدروکسید سدیم (NaOH) فعال می‌شود [۲۷]. استحکام خمیر بتن توسط C-S-H و N-A-S-H ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر، مقاومت خمیرهای ژئوپلیمر به شدت به سطح قلیایی فعال‌کننده‌های مورد استفاده بستگی دارد. علاوه بر این، همچنین گزارش شده است که دما نقش بسیار مهمی در فعال‌سازی آلومینوسیلیکات‌ها دارد. تحقیقات نشان داد که در مخلوط‌های بر پایه FA/SG، فرآیند فعال‌سازی در دمای پایین‌تر (در حدود ۲۷ درجه سانتی‌گراد) باعث فعال‌سازی SG می‌شود، در حالی که در سطح دمای بالاتر (در حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد)، هر دو FA و SG فعال می‌شوند. با این وجود، سرباره به دلیل فشرده بودن ریزساختار خود در استحکام خمیرها نقش دارد [۲۸]. سخت شدن ژئوپلیمر مبتنی بر FA/SG به دلیل تشکیل C-S-H و C-A-S-H است. سخت شدن با تشکیل C-S-H، N-A-S-H و C-A-S-H دنبال می‌شود. با این حال، تشکیل ژل‌های هیدرات به یون‌های کلسیم و سطح pH بستگی دارد. پرینیا و همکاران [۲۹] گزارش داد که محیط اسیدی ژل N-A-S-H را در ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر بادی تولید می‌کند. غلظت بالای یون کلسیم در ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر بادی کلاس F می‌تواند منجر به مقاومت فشاری بالاتری شود [۳۰]. وجود مقدار بالای اکسید پتاسیم در خاکستر بادی چوب با کلسیم بالا^۳ به افزایش مقاومت اولیه [۳۱] و همچنین به خود فعال‌سازی ژئوپلیمر بدون استفاده از فعال‌کننده قلیایی کمک کرد [۳۲].

۲-۱ ماده فعال‌ساز قلیایی

در جدول شماره ۷، منابع آلومینوسیلیکاتی و محلول‌های فعال‌ساز قلیایی استفاده شده در تحقیقات پیشین به صورت خلاصه آمده است.

جدول ۷- منابع آلومینوسیلیکاتی و مواد فعال‌ساز قلیایی استفاده شده در ساخت بتن ژئوپلیمر در تحقیقات گذشته

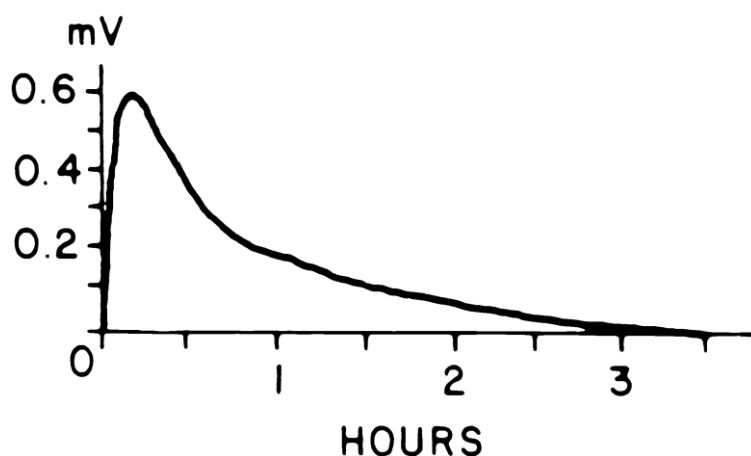
Alumino silicate source material	Alkaline activator
Calcined clays, fly ash, rice husk ash, slag, waste glass, copper mine tailings, zeolite, pure $Al_2O_3-2SiO_2$ powder and Na_2SiO_3 , magnesium-containing minerals, palm oil fuel ash obtained from Malaysia	NaOH, KOH, $Ca(OH)_2$ NaOH + Na_2CO_3 , $K_2CO_3 + Ca(OH)_2$ Sodium silicate (other silicates also)

همان‌طور که در جدول شماره ۲-۸ مشاهده می‌شود، مواد قلیایی بسیاری برای تولید بتن ژئوپلیمر مورد استفاده قرار می‌گیرند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به محلول‌های سدیم هیدروکسید (سود)، پتاسیم هیدروکسید، سدیم سیلیکات (آب شیشه)، سدیم کربنات و پتاسیم سیلیکات اشاره کرد. همچنین مواد فعال‌ساز قلیایی می‌توانند به صورت دوتایی (۲ ماده فعال‌ساز همراه با هم) یا سه تایی (سه ماده فعال‌ساز همراه با هم) مورد استفاده قرار گیرند. درمقایسه با سایر مواد قلیایی، سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید سطح بیشتری از قلیابیت را نشان داده است و از بین این دو، سدیم هیدروکسید نسبت به سایر محلول‌ها در دسترس‌تر و از نظر اقتصادی به صرفه‌تر است. علاوه بر مواد فعال‌ساز قلیایی، از مواد اسیدی نیز می‌توان برای فعال‌سازی منابع آلومینوسیلیکاتی استفاده کرد، اما به علت خطرات و سختی کار با اسید و مضرات آن برای سلامتی، چندان کاربرد عملی ندارد. مواد قلیایی مختلف می‌توانند تاثیر متفاوتی بر روی مواد آلومینوسیلیکاتی داشته باشد و

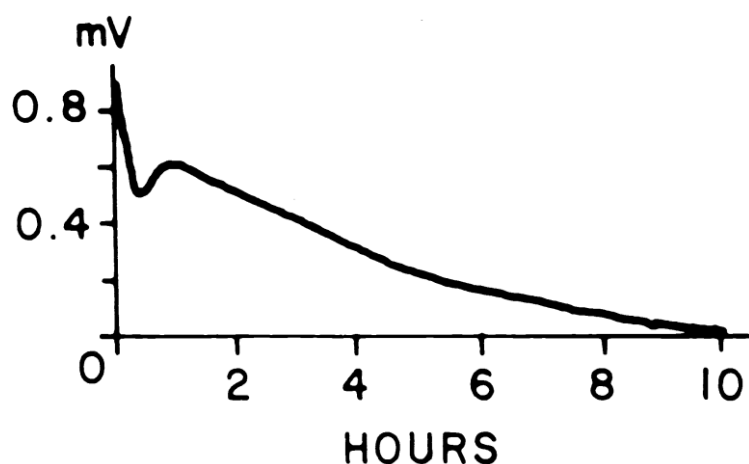
³ HCWA

هر ماده پایه (آلومینوسیلیکاتی) با یک یا چند نوع محلول قلیایی فعال‌ساز نتیجه بهتری می‌دهد. برای مثال ماده فعال‌ساز متاکائولن یک محلول دو بخشی شامل محلول هیدروکسید سدیم (NaOH) به همراه سیلیکات سدیم (Na_2SiO) است و یا ماده فعال‌کننده قلیایی خاکستر بادی سیلیکات سدیم و محلول هیدروکسید سدیم است. مواد فعال‌ساز قلیایی گاه به صورت کاتالیزور در طی فرایند ژئوپلیمریزاسیون عمل می‌کنند [۳۳] و گاه خود وارد واکنش می‌شوند [۳۴].

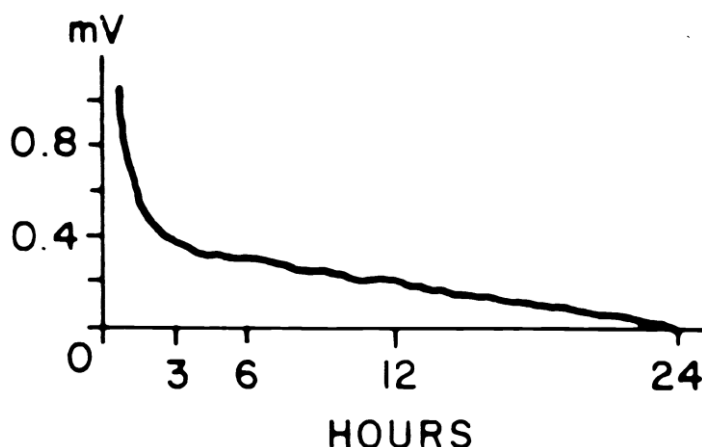
در تحقیقی که پالمو و همکاران [۳۵] در سال ۱۹۹۹ انجام دادند، مشخص شد که نمونه‌های حاوی سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات دارای بیش‌ترین مقدار مقاومت فشاری می‌باشد. همچنین با توجه به نمودار گرمایی سنجی این واکنش که در شکل ۸ آمده است، مشاهده می‌شود که در مدت زمان حدود ۴ ساعت تقریباً اکثر واکنش‌ها انجام شده و میزان گرمای خروجی نزدیک به صفر می‌شود. این در حالی است که در سایر نمونه‌ها (نمونه‌های حاوی سدیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید و پتاسیم سیلیکات) مدت زمان انجام واکنش طولانی‌تر است.



شکل ۱-۱ نمودار گرمایی سنجی (کالریمتری) نمونه حاوی سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات



شکل ۱-۲ نمودار گرمایی سنجی (کالریمتری) نمونه حاوی سدیم هیدروکسید



شکل ۸- نمودار گرمایی سنجی نمونه حاوی پتاسیم هیدروکسید

بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده در تحقیقات، مشاهده می‌شود که با اضافه شدن سیلیکات سدیم مقدار مقاومت فشاری افزایش می‌یابد، اما با افزایش نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید مقاومت فشاری می‌تواند کاهش یابد.

نتایج تحقیقات بسیاری نشان می‌دهد که خصوصیات فیزیکی و دوام بتن‌های ساخته شده با چسباننده‌های قلیا فعال مشابه سیمان پرتلند و حتی در برخی موارد بهتر است [۳۶]. پتاسیم هیدروکسید، سدیم هیدروکسید، سدیم کربنات و همچنین ترکیب سدیم - پتاسیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات و پتاسیم سیلیکات از رایج‌ترین موادی فعال ساز قلیایی هستند که در بتن‌های ژئوپلیمری از آن‌ها استفاده می‌شود. ترکیب سدیم هیدروکسید به همراه سدیم سیلیکات بهترین محلول قلیایی در افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های قلیا فعال حاوی سرباره می‌باشد [۳۷]. سدیم هیدروکسید pH مخلوط را بالا می‌برد و باعث تجزیه سریع سرباره می‌شود و سیلیکات سدیم نیز به عنوان منبع Si باعث افزایش میزان تولید ژل C-S-H می‌شود که این افزایش در میزان تولید ژل C-S-H باعث بهبود ریزساختار و ریزساختاری مترکم‌تر می‌شود. همچنین در حالت دیگر می‌توان با ایجاد یک محیط اسیدی (با فسفریک اسید) باعث واکنش ژئوپلیمریزاسیون شد [۳۸]

۲-۲-۱. محلول سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید

رایج‌ترین ماده‌ای که به عنوان فعال‌ساز قلیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، ترکیب سدیم هیدروکسید یا پتاسیم هیدروکسید به همراه سدیم سیلیکات و پتاسیم سیلیکات است (۹). نوع و غلظت ماده قلیایی فعال‌ساز بر روی حل شدن خاکستر بادی تاثیرگذار است. انحلال یون‌های Si^{4+} و Al^{3+} توسط محلول سدیم هیدروکسید، بیش‌تر از محلول پتاسیم هیدروکسید است. غلظت ماده قلیایی یکی از عوامل مهمی است که انحلال آلومینات و سیلیس را در خاکستر بادی و به دنبال آن فرایند ژئوپلیمریزاسیون و خصوصیات مکانیکی ژئوپلیمر سخت شده را کنترل می‌کند (۱۰). در تحقیقی که در سال ۲۰۱۰ بر روی فعال‌سازی خاکستر بادی با میکروسکوپ الکترونی انجام شد، مشخص شد که حضور سدیم هیدروکسید در ماده فعال‌ساز، باعث سریع‌تر شدن واکنش و سختی بیش‌تر ژل می‌شود [۳۹].

در خصوص افزایش سریع مقاومت در نمونه‌های حاوی سدیم هیدروکسید می‌توان گفت که با توجه به انرژی فعال‌سازی کم‌تر سدیم در مقایسه با پتاسیم، پیوندهای سدیم سریع‌تر تشکیل می‌شود. این در حالی است که پتاسیم نیاز به زمان یا انرژی (از طریق عمل آوری) دارد تا بتواند سریع‌تر واکنش دهد. از طرفی پتاسیم با توجه به انرژی اکتیواسیون بالاتر و شعاع اتمی بیشتر، در طول زمان شاخه‌های پیوندی بیش‌تری تشکیل می‌دهد و می‌تواند مقاومت دراز مدت بیش‌تری از سدیم داشته باشد.

۳. ۲-۲-۲. محلول سدیم سیلیکات

پالمو در سال ۱۹۹۹ [۴۰] عنوان داشت که نوع ماده فعال‌ساز قلیایی نقش اساسی در فرایند پلیمریزاسیون ایفا می‌کند. سرعت و شدت واکنش‌ها با اضافه کردن محلول سیلیکات (سیلیکات سدیم یا پتاسیم) نسبت به حالتی که تنها از هیدروکسید قلیایی (سدیم هیدروکسید

و پتاسیم هیدروکسید) استفاده می شود بیش تر است. در تحقیقی که در سال ۲۰۰۰ انجام شد [۴۱] مشاهده شد که اضافه کردن محلول سدیم سیلیکات به محلول سدیم هیدروکسید، باعث بهبود واکنش بین ماده پایه و محلول قلیایی می شود.

فاز مایع در واکنش های ژئوپلیمری نقش مهمی دارد و به عنوان انتقال دهنده ماده فعال ساز به ماده پایه عمل می کنند. از طرفی اگر فاز مایع بیش از حد باشد، باعث اثرات مخرب بر روی خواص ژئوپلیمر می شود.

برای مصارف معمول در مهندسی عمران، نسبت پایین Si/Al (بین ۱ تا ۳) مورد نیاز است. این در حالی است که نسبت بهینه بین ۲ تا ۳/۵ است. در جدول شماره ۲-۸ مصارف گوناگون ژئوپلیمر بر اساس نسبت سیلیس به آلومینات آورده شده است.

۴- نتیجه گیری

بتن ژئوپلیمری به عنوان یک جایگزین سبز و پایداری برای بتن معمولی شناخته می شود و می تواند در کاهش تولید CO₂ و مصرف منابع انرژی در صنعت ساختمان مؤثر باشد. این نوع بتن با استفاده از مواد آلومینوسیلیکاتی و فعال سازی آن ها با محلول های قلیایی، ویژگی های مکانیکی و دوام بتن را بهبود می بخشد. در این تحقیق، بررسی های مختلفی بر روی اثرات ترکیب مواد پوزولانی مانند خاکستر بادی، سرباره، و متاکائولن در تولید بتن ژئوپلیمری و تاثیر محلول های قلیایی مختلف بر خواص این بتن انجام شد. نتایج این تحقیق به صورت موردی در ادامه آمده است:

۱. استفاده از خاکستر بادی و سرباره در ژئوپلیمر: استفاده از خاکستر بادی و سرباره در تهیه بتن ژئوپلیمر باعث بهبود مقاومت فشاری و دوام بتن در شرایط محیطی مختلف شده است. خاکستر بادی به دلیل درصد بالای سیلیس و آلومین می تواند مقاومت بتن را در برابر حملات شیمیایی و شرایط سخت افزایش دهد. همچنین، سرباره به علت فعالیت پوزولانی و خاصیت ساختاری آمورف، در شرایط مختلف به خصوص در برابر سولفات ها، مقاومت مناسبی از خود نشان داده است.
۲. تأثیر محلول های قلیایی: محلول های قلیایی مختلف نظیر NaOH و KOH در ترکیب با سیلیکات های سدیم و پتاسیم به عنوان فعال کننده های قلیایی در بهبود فرآیند ژئوپلیمریزاسیون موثر بوده اند. از میان آن ها، محلول سدیم هیدروکسید و سیلیکات سدیم بهترین نتیجه را در افزایش مقاومت فشاری و مقاومت بتن در برابر شرایط مختلف از جمله حرارت و سولفات ها به همراه داشته اند.
۳. پایداری و دوام بتن ژئوپلیمر: نتایج آزمایشات نشان داد که بتن های ژئوپلیمری دارای پایداری و دوام بالاتری نسبت به بتن های معمولی در برابر شرایط مختلف مانند حملات اسیدی، نفوذ آب و کرناسیون هستند. استفاده از مواد پوزولانی نظیر خاکستر بادی و سرباره در ترکیب بتن های ژئوپلیمر باعث افزایش مقاومت در برابر این عوامل و همچنین کاهش میزان جذب آب در بتن می شود.
۴. کاهش تأثیرات زیست محیطی: جایگزینی سیمان با ژئوپلیمرها می تواند تأثیرات زیست محیطی ناشی از تولید سیمان را به طور قابل توجهی کاهش دهد. این تحقیق نشان می دهد که استفاده از ژئوپلیمرها می تواند به کاهش ۸۰ درصدی تولید CO₂ در صورت جایگزینی کامل سیمان منجر شود.
۵. کاربرد در پروژه های پدافند غیرعامل: به دلیل ویژگی های برجسته مقاومتی، این نوع بتن می تواند در پروژه های پدافند غیرعامل و ساخت سازه های مقاوم به ضربه و شرایط سخت استفاده شود. این بتن ها علاوه بر داشتن مقاومت فشاری بالا، مقاومت کششی بیشتری نیز نسبت به بتن های معمولی دارند که این ویژگی در ساخت سازه های خاص مانند پناهگاه ها و دیوارهای محافظ کاربرد دارد.

۶. در نهایت، استفاده از ژئوپلیمرها به عنوان یک جایگزین برای سیمان در پروژه‌های عمرانی نه تنها به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است، بلکه با کاهش مصرف منابع طبیعی و آلودگی‌های زیست‌محیطی، گامی مؤثر در جهت توسعه پایدار به شمار می‌آید.

مراجع

- [1] Bandar, D., Hassani, N., & Khodaparast, M. M. (1390). Geopolymer concrete and its applications. The First International Conference on Natrava Concretes, Drinking Water Storage Tanks, Rasht, Golestan Urban Water and Sewerage Company. in Persian
- [2] Palomo, A., Grutzeck, M.W., & Blanco, M.T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323–1329.
- [3] Naik, T. R., & Singh, S. S. (1995). Use of high-calcium fly ash in cement-based construction materials. *Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, Milwaukee, 1–44.
- [4] CEEJ_Volume 50_Issue 4_Pages 673-684 (1). (2016). *Cement and Concrete Engineering Journal*, 50(4), 673–684. <https://doi.org/10.22060/ceej.2016.695>.
- [5] Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455>.
- [6] Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 283–314. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>.
- [7] Temuujin, J., van Riessen, A., & Mackenzie, K. (2010). Preparation and characterization of fly ash-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 24, 1906–1910.
- [8] Bentz, D. P., & Ferraris, C. F. (2010). Rheology and setting of high-volume fly ash mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 32(4), 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.01.008>.
- [9] Komljenović, M., Baščarević, Z., & Bradić, V. (2010). Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1–3), 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.064>.
- [10] Amran, Y. H. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & El-Zeadani, M. (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119679>.
- [11] Lemougna, P. N., MacKenzie, K. J. D., Jameson, G. N. L., Rahier, H., & Melo, U. F. C. (2013). The role of iron in the formation of inorganic polymers (geopolymers) from volcanic ash: A ^{57}Fe Mössbauer spectroscopy study. *Journal of Materials Science*, 48, 5280–5286.
- [12] Tosti, L., van Zomeren, A., Pels, J. R., et al. (2018). Technical and environmental performance of lower carbon footprint cement mortars containing biomass fly ash as a secondary cementitious material. *Resources Conservation and Recycling*, 134, 25–33.
- [13] Raisi, E. M., Amiri, J. V., & Davoodi, M. R. (2018). Mechanical performance of self-compacting concrete incorporating rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 177, 148–157.
- [14] Glukhovskiy, V. D. (1959). *Soil silicates*. Gosstroyizdat, Kiev, 154p.
- [15] Xu, H., Provis, J. L., van Deventer, J. S., & Krivenko, P. V. (2008). Characterization of aged slag concretes. *ACI Materials Journal*, 105(2), 131–139.
- [16] Davidovits, J. (1994). Properties of geopolymer cements. In *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 1, 131–149.
- [17] Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (1999). Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, 29(1), 113–120.
- [18] Wang, S. D., Scrivener, K. L., & Pratt, P. L. (1994). Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 1033–1043.
- [19] Krizan, D., & Zivanovic, B. (2002). Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1181–1188.
- [20] Ravikumar, D., & Neithalath, N. (2012). Effects of activator characteristics on the reaction product formation in slag binders activated using alkali silicate powder and NaOH. *Cement and Concrete Composites*, 34(7), 809–818.
- [21] Arya, S., Niranjana, V., & Husk, R. (2017). Experimental investigation on strength and durability characteristics of multi-blended cement concrete. Vol. 6, 20–22.
- [22] Wang, H., Li, H., & Yan, F. (2005). Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 268(1), 1–6.
- [23] Isgor, O. B., & Razaqpur, A. G. (2004). Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 26(1), 57–73.

- [24] Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1232–1243. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>.
- [25] Krivenko, P. V. (1994). Alkaline cements. In *Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 1, 11–129.
- [26] Palomo, A., Grutzeck, M.W., & Blanco, M.T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29, 1323–1329.
- [27] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.
- [28] Rashad, A. M. (2014). A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash. *Materials Design*, 53, 1005–1025. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.074>.
- [29] Temuujin, J., Rickard, W., Lee, M., & van Riessen, A. (2011). Preparation and thermal properties of fire-resistant metakaolin-based geopolymer-type coatings. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357(5), 1399–1404. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.09.063>.
- [30] Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., López Hombrados, C., & Lleyda, J.L. (2007). Railway sleepers made of alkali activated fly ash concrete. *Revista Ingeniería*, 22(2), 75–80.
- [31] Naik, T. R. (2008). Sustainability of concrete construction. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13(2), 98–103.
- [32] Hassani, N., & Khodaparast, M. M. (1390). Geopolymer concrete and its applications. The First International Conference on Natrava Concretes, Drinking Water Storage Tanks, Rasht, Golestan Urban Water and Sewerage Company. in Persian
- [33] Tchakoute, H. K., & Ruscher, C. H. (2017). Mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer cements from sodium waterglass and phosphoric acid solution as hardeners: A comparative study. *Applied Clay Science*, 140, 81–87.
- [34] Kovtun, M., Kearsley, E. P., Shekhovtsova, J. (2015). Dry powder alkali-activated slag cements. *Advances in Cement Research*, 27(8), 447–456.
- [35] Ma, C., Zhao, B., Guo, S. L., et al. (2019). Properties and characterization of green one-part geopolymer activated by composite activators. *Journal of Cleaner Production*, 220, 188–199.
- [36] Velandia, D. F., Lynsdale, C. J., Provis, J. L., et al. (2016). Evaluation of activated high volume fly ash systems using Na₂SO₄, lime and quicklime in mortars with high loss on ignition fly ashes. *Construction and Building Materials*, 128, 248–255.
- [37] Helmy, A. I. I. (2016). Intermittent curing of fly ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 110, 54–64.
- [38] Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, 85, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>.
- [39] Askarian, M., Tao, Z., Adam, G., et al. (2018). Mechanical properties of ambient cured one-part hybrid OPC-geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 330–337.
- [40] Alrefaei, Y., Wang, Y., & Dai, J. (2019). The effectiveness of different superplasticizers in ambient cured one-part alkali activated pastes. *Cement and Concrete Composites*, 97, 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.01.019>.
- [41] Dong, M. H., Elchalakani, M., & Karrech, A. (2020). Development of high strength one-part geopolymer mortar using sodium metasilicate. *Construction and Building Materials*, 236, 117611. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117611>.