

Polymerization
Quarterly, 2023
Volume 13, Number 1
Pages 65-77
ISSN: 2252-0449

Investigation the Properties of Geopolymers for Use as Sustainable Materials

Alireza Esparham

Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran,
Postal Code 1417853111, Tehran, Iran

Received: 12 Jan 2022, Accepted: 24 April 2022

Abstract

The further development of environmentally friendly materials requires the knowledge of environmental stimuli, new materials, as well as the assessment of environmental impacts, and the conventional materials in construction. According to the definitions of sustainable development and materials, it is necessary to use materials that have low energy consumption and properties such as sufficient durability, appropriate physical and chemical properties, and at the same time reduce environmental pollution. Geopolymer materials can be a suitable answer for this problem. Geopolymers are ceramic-like mineral polymers that expand with polycompact structures in three dimensions. Geopolymers are formed by the chemical activation of solid materials containing aluminum and silica at relatively low temperature. In recent years, geopolymer has emerged as a sustainable, environmentally friendly material and an alternative to Portland cement. Geopolymers are ceramic-like materials with three-dimensional polycompact structures that are formed by the chemical activation of solids containing aluminum and silica at relatively low temperatures. In recent years, geopolymers have been proposed as a sustainable, environmentally friendly material and an alternative to concretes made of Portland cement. For the production of geopolymer concrete and use in buildings, waste or by-products from industries can be used. In this article, the synthesis method and properties of geopolymers for use in construction as sustainable materials and as a suitable alternative to Portland cement, in order to reduce the emission of environmental pollutants with the approach of life cycle assessment, are briefly reviewed. Findings and results show that geopolymer concretes have much better mechanical properties and chemical performance than hardened concretes with Portland cement and show significant environmental benefits.

Key Words

geopolymer,
sustainable materials,
life cycle assessment,
greenhouse gases,
sustainable development

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: alireza.esparham@ut.ac.ir

بررسی خواص ژئوپلیمرها برای استفاده به عنوان مصالح پایدار

علیرضا اسپرهم

تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست، گروه مهندسی محیط زیست، کد پستی ۱۴۱۷۸۵۳۱۱۱

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۴

برای توسعه بیشتر مواد سازگار با محیط زیست، شناخت محرک‌های محیطی، مواد جدید و همچنین ارزیابی آثار محیطی، مواد مرسوم در ساخت و ساز، لازم است. با توجه به تعاریف توسعه پایدار و مصالح پایدار، باید از مصالحی استفاده کرد که به لحاظ مصرف انرژی کم مصرف و دارای خواصی چون دوام کافی، خواص فیزیکی و شیمیایی مناسب باشند، در عین حال موجب کاهش آلاینده‌های محیط زیست شوند. مصالح ژئوپلیمری می‌تواند پاسخ مناسبی برای این مسئله باشد. ژئوپلیمرها، پلیمرهای معدنی سرامیک‌مانندی هستند که با ساختارهای چندتراکمی در سه بعد گسترش می‌یابند. ژئوپلیمرها بر اثر فعال شدن شیمیایی مواد جامد دارای آلومینیم و سیلیس در دمای نسبتاً کم ایجاد می‌شوند. در سال‌های اخیر، ژئوپلیمرها به عنوان نوعی مصالح پایدار، دوست‌دار محیط زیست و جایگزینی برای سیمان پرتلند مطرح شده‌اند. برای تولید بتن ژئوپلیمری و استفاده در ساختمان می‌توان از پسماندها یا محصولات جانبی حاصل از صنایع استفاده کرد. در مقاله حاضر، روش سنتز و خواص ژئوپلیمرها برای استفاده در ساخت و ساز به عنوان مصالح پایدار و جایگزین مناسبی برای سیمان پرتلند، به منظور کاهش انتشار آلاینده‌های محیط زیستی با رویکرد ارزیابی چرخه عمر به طور خلاصه بررسی می‌شود. یافته‌ها و نتایج نشان می‌دهد، بتن‌های ژئوپلیمری خواص مکانیکی و عملکرد شیمیایی بسیار مطلوب‌تری نسبت به بتن‌های ساخته شده از سیمان پرتلند دارند و مزایای محیط زیستی درخور توجهی نشان می‌دهند.

چکیده



علیرضا اسپرهم

واژگان کلیدی

ژئوپلیمر،
مصالح پایدار،
ارزیابی چرخه عمر،
گازهای گلخانه‌ای،
توسعه پایدار

توسعه پایدار، مفهومی است که تعاریف مختلفی دارد. یکی از رایج‌ترین آن‌ها بیان می‌کند که نسل امروز نباید توانایی نسل‌های آینده را در تأمین نیازهای خود به خطر اندازد [۱]. چهار رکن توسعه پایدار حمایت‌های اقتصادی، محیط زیستی، حقوقی و توسعه اجتماعی هستند [۲]. تجلی توسعه پایدار در محیطی است که معماری پایدار گفته می‌شود. هر چند که جداکردن این موضوع از سایر جنبه‌های اقتصادی، فرهنگی و اجتماعی کار دشواری است. هدف از طراحی پایدار، روبه‌روشدن با نیازهای آینده بدون از بین بردن منابع طبیعی باقی‌مانده برای نسل آینده است. طراحی پایدار برای ساختمان‌ها به کارایی منابع، حداقل انرژی، انعطاف‌پذیری و عمر طولانی اشاره دارد. مباحث معماری پایدار سه اصل صرفه‌جویی در مصرف منابع، طراحی براساس چرخه حیات و طراحی انسانی را شامل می‌شود [۳]. از راه‌حل‌های کاهش بار آلاینده‌گی محیط زیستی و ایجاد توسعه پایدار، استفاده از پسماند و ضایعات به‌عنوان مصالح پایدار یا مواد بازیافتی در معماری پایا، مسکن و سازه‌های شهری است.

معماری پایا یا معماری پایدار به‌دنبال به‌حداقل‌رساندن آثار منفی محیط زیستی ساختمان‌ها از طریق افزایش بهره‌وری و اعتدال در استفاده از مصالح، انرژی، فضای ساخت و به‌طور کلی بوم‌سازگان در ابعاد وسیع است. معماری پایدار در طراحی محیط، از رویکرد آگاهانه‌ای درباره انرژی و حفاظت از محیط زیست بهره می‌برد [۴]. در بحث معماری پایدار، ویژگی‌هایی برای مصالح پایدار برشمرده می‌شود، از جمله مصرف انرژی و میزان تولید آلودگی محیط زیستی آن کمینه و نیز دارای دوام و استحکام کافی باشد [۵]. شهرهای سبز باید به تدریج اصل بدون پسماند را در نظر گیرند. بر این اساس، مصالح ساختمانی پایدار شامل مصالح تهیه‌شده از پسماندهای بازیافتی یا بی‌ضرر پس از مصرف هستند و بر مدیریت استفاده در محل از پسماند متمرکز است. این بدان معنی است، بیشتر پسماندهای شهری یا مربوط به مناطق گسترده‌تر (مناطق صنعتی حاشیه شهرها) هستند که برای تولید مواد جانبی بازیافت‌پذیر می‌توانند در کاربردهای مختلف از جمله ساخت و ساز استفاده شوند. این روش قطعاً به توسعه پایدار و کاهش اثر گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند. کیفیت و هزینه مصالح پایدار از جمله مواردی است که باید به آن توجه شود.

مصالح پایدار با تکیه بر اقتصاد، محیط زیست و انرژی به‌عنوان مصالح تجدیدپذیر تعریف می‌شوند [۶، ۴]. از طرفی، تولید سیمان پرتلند و استفاده از آن در مصالح ساختمانی مانند بتن، باعث

رهاسازی مقادیر زیادی کربن دی‌اکسید به محیط زیست می‌شود. به‌طوری که تولید یک تن سیمان پرتلند سبب تولید تقریباً یک تن کربن دی‌اکسید می‌شود [۷]. از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی ناشی از پدیده گرمایش جهانی به یکی از جدی‌ترین نگرانی‌های محیط زیستی در سراسر جهان تبدیل شده است. علت اصلی پدیده گرمایش جهانی، انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) است. از میان گازهای گلخانه‌ای، کربن دی‌اکسید با میزان انتشار ۶۵٪، بیشترین نقش را در پدیده گرمایش جهانی دارد. همچنین، فرایند تولید سیمان پرتلند عامل تولید ۵٪ تا ۷٪ از کل میزان انتشار جهانی گاز کربن دی‌اکسید است [۸]. از این رو، نیاز به استفاده از جایگزین برای سیمان پرتلند ضروری به نظر می‌رسد. امروزه در اکثر کشورها، طراحی و ساخت ساختمان‌های سبز روند رو به رشدی دارد. ساختمان سبز باید ویژگی‌های منحصر به فرد خاصی داشته باشد و در طول چرخه عمر خود باید به حفظ منابع (انرژی، زمین، آب و مواد) و کاهش آلاینده‌گی به حفاظت از محیط زیست کمک کند [۹]. راهبردهای مدرن طراحی ساختمان سبز باید از فنون طراحی و ساخت سازگار با محیط زیست استفاده کنند که هنوز با موانع اقتصادی روبه‌رو هستند. تاکنون، پژوهش‌های مربوط به بهره‌وری انرژی سبز عمدتاً به سمت استفاده از شبکه‌های هوشمند، توسعه مواد عایق اثربخش‌تر و به حداقل‌رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای رفته است. ژئوپلیمرها به‌عنوان جایگزین مناسبی برای سیمان پرتلند در راستای تولید مصالح پایدار (با توجه به ویژگی آن‌ها) می‌توانند پاسخ مناسبی برای این مسئله باشند. هدف از کار حاضر، بررسی روش‌های سنتز و خواص ژئوپلیمرها در راستای توسعه پایدار با استفاده از محصولات جانبی و پسماندها برای تولید بتن و مصالح ساختمانی پایدار (سبز) به‌منظور کاهش آثار آلاینده‌گی محیط زیستی با رویکرد ارزیابی چرخه عمر براساس مطالعات انجام شده است.

ژئوپلیمرها

برای نخستین بار، Davidovits شیمیدان برجسته فرانسوی، ژئوپلیمرها را به‌عنوان پیوندهای جدیدی از خانواده پلیمرهای معدنی معرفی کرد. همچنین، وی استفاده از نام پلی‌سیالات را برای شناسایی شیمیایی ژئوپلیمرها پیشنهاد کرد که پلی پیشوند پلیمری و سیالات (sialate) نیز عبارت اختصاری برای زنجیر سیلیکواکسوالومینات است. در شکل ۱، انواع مختلف پلی‌سیالات) نشان داده شده است [۱۰].

ژئوپلیمرها، پلیمرهای معدنی سرامیک‌مانندی هستند که در دمای کم عموماً زیر ۱۰۰ °C تولید می‌شوند. ژئوپلیمرها، زنجیرها یا

دارد. در میان این عوامل، ویژگی‌های منبع آلومینوسیلیکاتی و غلظت محلول قلیایی اهمیت بیشتری دارد. پس از حل شدن ذرات آلومینوسیلیکاتی، جوانه‌زنی ژل از سطح آن‌ها آغاز می‌شود و کمپلکس‌های Si و Al به داخل فاز ژل نفوذ می‌کنند. بدین ترتیب، غلظت این کمپلکس‌ها در سطح ذرات آلومینوسیلیکاتی کاهش می‌یابد و حل شدن Al و Si بیشتر می‌شود. طی مرحله نفوذ، زمان و شدت هم‌زدن از عوامل اثرگذارند. به طوری که هر قدر زمان حل شدن طولانی‌تر و هم‌زدن شدیدتر باشد، حل شدن کمپلکس‌های Al و Si از سطح شکست سد سیستیکی میان ذرات مواد اولیه و فاز ژل بیشتر می‌شود و نفوذ آن‌ها نسبت به پلیمر شدن کمپلکس‌های Si و Al راجحیت می‌یابد. بنابراین، تراکم کمپلکس‌های Al و Si و حل شدن و نفوذ این کمپلکس‌ها از منبع آلومینوسیلیکاتی به طور هم‌زمان انجام می‌گیرد.

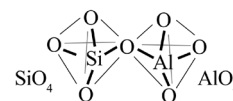
عوامل مؤثر بر مرحله تراکم، دما، pH و اندازه کاتیون هستند. دما و pH یا غلظت بیشتر محلول قلیایی و کاتیون فلز قلیایی با اندازه اتمی بزرگ‌تر، تراکم را سریع‌تر می‌کند. در مرحله سخت شدن، با وجود اینکه میان ذرات هیچ نوع تحرکی وجود ندارد، ولی حل شدن و نفوذ میان سطح ذرات و فاز ژل می‌تواند رخ دهد. به معنای گسترده‌تر، ژئوپلیمرها نشانگر تبدیل ژئومولکول‌ها به کمک فرایندهای زمین‌شیمیایی هستند. اصطلاح ژئوپلیمر همان‌طور که در ابتدا مطرح شد، عمدتاً به مواد غیرآلی (معدنی) اشاره دارد، اما می‌تواند توسعه داده شده و شامل موادی با محتوای آلی شود. معروف است که مصریان باستان از کاه و گل رودخانه، حاوی مواد آلی (به‌عنوان مثال مواد هیومیک) برای تولید اجزای ساختمانی با مقاومت و دوام درخور توجه استفاده می‌کردند. بنابراین مهم است که در طول ژئوپلیمر شدن، برهم‌کنش گونه‌های غیرآلی و آلی در نظر گرفته شود.

ژئوپلیمرها پس از سازوکار گیرش، واحدهای مولکولی (یا گروه‌های شیمیایی) زیر را تشکیل می‌دهند که در حال حاضر در تحولات صنعتی بی‌شماری مطالعه و اجرا شده‌اند:

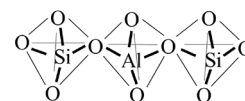
-Si-O-Si-O- سیلوکسو، پلی(سیلوکسو)، -Si-O-Al-O- سیلات، پلی سیلات، -Si-O-Al-O-Si-O- سیلات-سیلوکسو، پلی(سیلات-سیلوکسو)، -Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- سیلات-دی سیلوکسو، پلی(سیلات-دی سیلوکسو)، -R-Si-O-Si-O-R- آلی-سیلوکسو، پلی سیلیکون، -Al-O-P-O- آلومینو-فسفو و پلی(آلومینو-فسفو)، -Fe-O-Si-O-Al-O-Si-O- فروسیلات، (پلی فروسیلات).

سخت شدن، جای‌گذاری یا ژئوپلیمر شدن در دمای کم یعنی کمتر از ۱۰۰ °C یا در دمای محیط رخ می‌دهد. در برابر تابش ایکس،

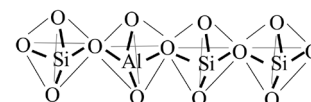
پلی(سیلات)
(-Si-O-Al-O-)



پلی(سیلات-سیلوکسو)
(-Si-O-Al-O-Si-O-)

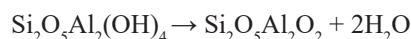


پلی(سیلات-دی سیلوکسو)
(-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)



شکل ۱- ساختار شیمیایی سیلات پلیمری [۱۰].

شبکه‌هایی از مولکول‌های معدنی هستند که با پیوندهای کووالانسی متصل شده‌اند. از نقطه نظر ژئوپلیمر، $[≡Si-O-Al-(OH)_2]_n$ به صورت گروه‌های جانبی هیدروکسیل آلومینیم کووالانسی نوشته می‌شود که از درشت مولکول پلی(سیلوکسو)ی شش گوشه $[≡Si-O-]_n$ منشعب شده است. این رویکرد پلیمری، پیامدهای عمیقی با در نظر گرفتن درک بهتری از سازوکارهای ژئوپلیمر شدن دارد. به طور خاص، متاکائولن در نتیجه هیدروکسیل زدایی گروه‌های OH- کائولینیت مطابق واکنش زیر حاصل می‌شود:



مولکول واکنش پذیر شامل دو اکسید آلومینوسیلیکات ($Si_2O_3Al_2O_2$) است که عبارتند از: $[≡Si-O-Al=O]_n$ و $[≡Si-O-Al-O-]_n$. این موضوع نشانگر واکنش پذیری قوی است که برخلاف روش نوشتاری مرسوم به صورت $2SiO_2 \cdot Al_2O_3$ است. برای سنتز ژئوپلیمر به مواد خام اولیه به‌عنوان منبع آلومیناسیلیکاتی نیاز است که این مواد خام اولیه به صورت شیمیایی از طریق دو روش سنتزی متفاوت واکنش دهند. روش اول در محیط قلیایی با هیدروکسیدهای (K و Na) سیلیکات‌های قلیایی محلول انجام می‌شود که انواع پلی(سیلیکات‌ها)، پلی(سیلوکسو)، پلی(سیلیکواتومینات‌ها) و پلی(سیلات) را به دست می‌دهد. روش دیگر در محیط اسیدی (با فسفریک اسید) انجام می‌گیرد که انواع پلی(آلومینو فسفو) حاصل می‌شود [۱۱].

سازوکار گیرش و سخت شدن ژئوپلیمرها

منبع آلومینوسیلیکاتی در تماس با محلول قلیایی حل شده و کمپلکس‌های Si و Al ایجاد می‌شود. مقدار حل شدن به غلظت محلول قلیایی، کاتیون فلز قلیایی، سرعت هم‌زدن، مدت زمان حل شدن، ساختار و تجزیه شیمیایی منبع آلومینوسیلیکاتی بستگی



شکل ۲- میسل نانوذره‌ای یا ژئوپلیمری که با پیکان مشخص شده است [۱۴].

ماهیت ژئوپلیمر سخت‌شده در دمای محیط و معتدل، بی‌شکل است. گونه‌های دارای Na در دمای بیش از 500°C و گونه‌های دارای پتاسیم در بیش از 1000°C بلوری هستند [۱۱، ۱۲].

ژئوپلیمر نوعی درشت‌مولکول با ابعاد و وزن مولکولی مشخص است. این دو مقدار کلیدی به کمک چند روش فیزیکی مکمل در حالت جامد (میکروسکوپ الکترونی) یا محلول (پراکندگی نور) تعیین می‌شوند. از سوی دیگر، مقدار ژل را تعیین می‌کند که ترکیبی بی‌شکل با ابعاد نامشخص است.

در سال ۲۰۰۳، Kriven و همکاران برای بررسی میکروساختار ژئوپلیمرهای از نوع پتاسیم-پلی(سیلات-سیلوکسو) کاملاً واکنش‌یافته از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) استفاده کردند. این ساختارها شامل نانوذرات با ابعاد ۵-۱۵ nm بود که با نانوحفره‌ها جدا شده‌اند، ویژگی که نظم ساختاری آن در اندازه ۳-۱۰ nm است (شکل ۲). این پژوهشگران به ویژگی‌های نانوتخلخل و میکروساختار اسفنج‌مانند در ناحیه‌ای از ژئوپلیمر کاملاً واکنش‌یافته دست یافتند. آزمون‌های TEM-طیف‌سنجی تابش ایکس پاشنده انرژی (EDS) از این نواحی کاملاً واکنش‌یافته نشان داد، میکروشیمی پلی(سیلات-سیلوکسو) با نسبت Si/Al برابر ۲:۱، از نظم تکراری برخوردار است. سپس، نمونه‌ها در دمای محیط به آرامی به مدت ۴ h تا دمای 1000°C گرم شدند. نانساختار پس از رسیدن به دمای 1000°C و تثبیت بعدی در کوره تا تقریباً 990°C ، همچنان پایدار است. پراکندگی ناحیه انتخاب‌شده نشان داد، نواحی کاملاً واکنش‌یافته همچنان بی‌شکل هستند. هیچ شاهدهی مبنی بر سخت‌شدن (رسوب‌دهی) و رشد دانه‌ای مشاهده نشد. نانوذرات، ویژگی خاصی از ماتریس ژئوپلیمر را نشان می‌دهند و ابعاد آن‌ها، وجود درشت‌مولکول با اندازه و وزن مولکولی مشخص را نشان می‌دهد.

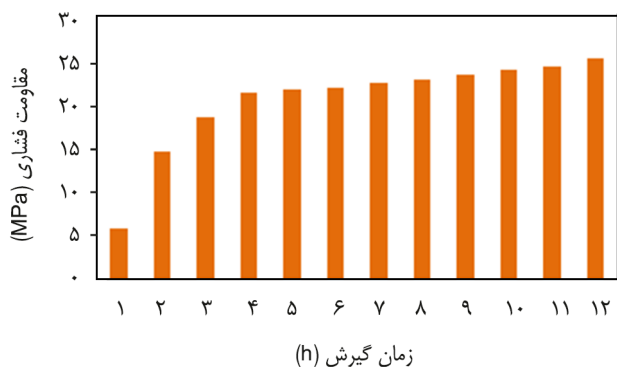
Sindhunata و همکاران در سال ۲۰۰۶، میکروساختار ماتریس ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند، ساختار آن مشابه نانوذرات آلومینوسیلیکات با ابعاد ۲۰-۵ nm است که به هم متصل شده‌اند و حفره‌ها و کانال‌هایی در مقیاس نانو تشکیل داده‌اند. همان گونه که Kriven و همکاران در سال ۲۰۰۳ برای ژئوپلیمر پتاسیم-پلی(سیلات-سیلوکسو) گزارش دادند. تجمع این نانوذرات یا ذرات منفرد، ماتریس ژئوپلیمر را تشکیل می‌دهد که گاهی اوقات تحت عنوان ذرات رسوب‌یافته نامیده می‌شوند. ابعاد این ذرات مشابه میسل‌های تشکیل‌شده از مولکول‌های سطح‌فعال؛ از خودگردایش مولکول‌های سطح‌فعال کوچک در آب ناشی می‌شود. با این حال، پایداری گرمایی نانوذرات ژئوپلیمر به شدت از وجود ابرمولکول‌ها پشتیبانی می‌کند. به عبارت دیگر، این به نفع مدل پلیمری است [۱۳، ۱۴].

کاربردها و خواص مکانیکی و شیمیایی ژئوپلیمرها

هر منبع سیلیس و آلومینا که بتواند در محلول قلیایی حل شود، می‌تواند به‌عنوان پیش‌ماده ژئوپلیمر و پلیمرشدن تراکمی عمل کند. متاکائولن (MK) تولیدی از کائولن کلسینه‌شده در دمای 750°C ، پسماند کشاورزی مانند باگاس، کاه کلش، شلتوک برنج، اغلب می‌تواند برای تولید ژئوپلیمرها استفاده شود [۱۵]. Thomas و همکاران، قابلیت بالقوه تعداد زیادی از پسماندهای کشاورزی مانند خاکسترهای شلتوک برنج، چوب ذرت، نخل خرما، پوسته درخت چنار، برگ بامبو را به‌منظور ژئوپلیمرشدن و ساخت بتن ژئوپلیمری یا مصرف به‌عنوان پوزولان در سیمان بررسی کردند. بتن‌های ژئوپلیمری ساخته‌شده از این ضایعات کشاورزی خواص فیزیکی (مقاومت فشاری) مطلوبی را نشان دادند [۱۶].

بتن ساخته‌شده با ژئوپلیمر با توجه به ویژگی‌های ارزنده آن می‌تواند از بهترین مصالح برای جایگزینی بتن معمولی باشد. بتن ژئوپلیمر هنوز به‌طور گسترده استفاده نشده، اما استفاده از این نوع بتن یا مشتقات آن در جهان به‌سرعت در حال رشد است. استفاده عمده از این مواد برای ساخت بتن، ترمیم روسازی راه‌ها و نیز باندهای فرودگاهی است. همچنین، هدف‌گذاری کوتاه‌مدت استفاده از این بتن در پل‌سازی، به‌ویژه برای قطعات پیش‌ساخته بوده است. استفاده از این نوع مواد برای ساخت بتن در قطعات پیش‌ساخته با توجه به شرایط عمل‌آوری آن تحت گرما منطقی‌تر به‌نظر می‌رسد.

با این حال، مهم‌ترین مزیت بتن ساخته‌شده از ژئوپلیمر بر بتن معمولی پایایی و دوام زیاد آن است. به‌طوری که استفاده از این



شکل ۳- گیرش سیمان ساخته شده از پلی (سیلان-سیلوکسو) پتاسیم در دمای محیط [۲۳].

[۲۲]. سیمان ژئوپلیمری در دمای محیط خیلی سریع سخت می شود. مطابق شکل ۳، مقاومت فشاری آن پس از ۴ h معادل ۲۰ MPa و مقاومت فشاری نهایی پس از ۲۸ روز به ۷۰-۱۰۰ MPa در دمای ۲۰ °C می رسد یا از آن فراتر می رود [۲۳]. تخلخل آن می تواند از سیمان ها یا ملات ها کمتر باشد. بنابراین خواص مکانیکی برتری به دست می آید. در شکل ۴، مقاومت سیمان پرتلند با سیمان ژئوپلیمری مقایسه شده است [۲۴].

ساختار نهایی و خواص فیزیکی آن ها به چند پارامتر، از جمله محتوای آب، اندازه ذرات، تاریخچه گرمایی، مقدار فلزات قلیایی و درجه شکل گیری بستگی دارد. سولفات و واکنش های تراکم قلیایی با تولید محصولات خیلی بادوام ژئوپلیمرها با مقدار آهن کم، دوام خود را پس از گرمادهی تا دمای ۱۰۰۰ °C حفظ می کنند. شکل ۵، مقایسه بتن پرتلند با نمونه ای از بتن ژئوپلیمری را در دماهای مختلف نشان می دهد که هر دو در سن ۲۸ شکسته شده اند [۲۵]. ژئوپلیمرها نفوذپذیری مشابه سیمان پرتلند (10^{-9} cm/s)، انبساط کم مواد قلیایی، انقباض کم، مقاومت عالی در برابر اسیدها، سولفات ها و خوردگی و چرخه های ذوب شدگی و یخ زدگی نشان می دهند [۲۶-۲۸]. Davidovits، مقاومت فشاری نمونه های بتنی ژئوپلیمری عمل آوری شده در دمای محیط و نمونه های بتنی

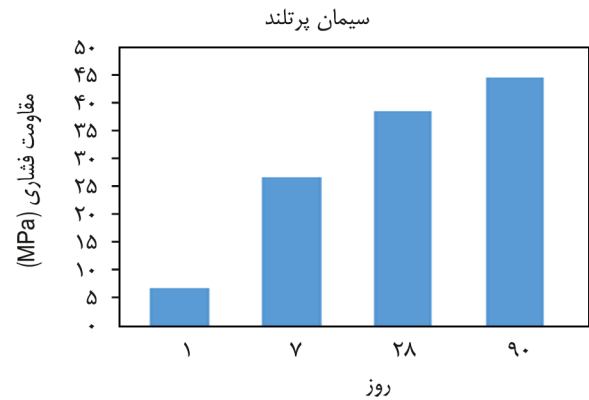
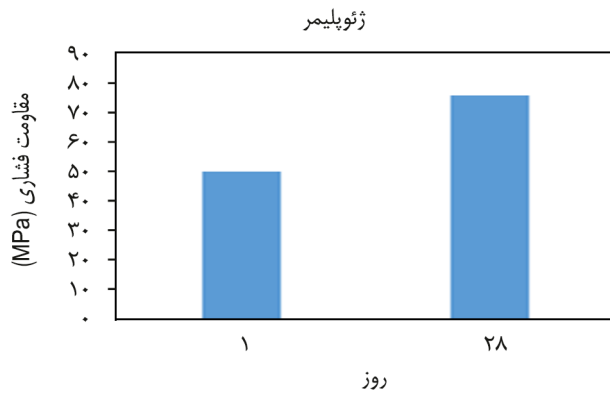
نوع بتن در قطعاتی مانند کالورت ها، سازه های دریایی و کلیه قطعات بتنی قرار گرفته در شرایط خورنده مانند حمله سولفات ها یا محیط های با کربن دی اکسید زیاد، مناسب به نظر می رسد. با این حال، محدودیت هایی همچون ساخت و دشواری کار با این نوع از بتن ها و حساسیت زیاد آن به دمای عمل آوری وجود دارد. با وجود ویژگی های مثبت زیاد بتن ژئوپلیمری از جمله پایایی بیشتر و انرژی تولید، آلاینده گی زیست محیطی و خزش و انقباض کمتر نسبت به بتن معمولی، استفاده از این بتن در همه سازه های بتنی ممکن نیست. ولی با توجه به سوق یافتن روزافزون جهان به سمت استفاده از مصالح نوین، بررسی بیشتر برای استفاده از بتن ژئوپلیمر در سازه های خاص لازم به نظر می رسد [۱۹-۱۷].

امروزه، تعداد زیادی از پسماندها از جمله پسماندهای معادن، نیروگاه های شهری، کشاورزی، ساختمانی و هر منبع آلومیناسیلیکاتی در کشورها به مقدار زیاد تولید می شوند که می توانند برای تولید ژئوپلیمرها و در ساخت بتن، اجزای ساختمان، پوشش های مقاوم در برابر آتش و عایق ها نیز استفاده شوند. امروزه، برخی از این پسماندها (به عنوان مثال خاکستر بادی، سرباره کوره آهن گدازی) فقط به صورت پوزولان در تولید سیمان پرتلند استفاده می شوند [۲۰]. در جدول ۱، کاربردهای ژئوپلیمرها با توجه به نسبت SI به Al مشاهده می شود.

ژئوپلیمرها با مخلوط کردن یک ماده اولیه پودر شده با محلول های قلیایی (KOH یا NaOH) و سیلیکات سدیم تولید می شوند. به عنوان مثال، زمانی که سرباره فرونیکل به عنوان ماده خام استفاده می شود، ترکیب ۸۲٪ سرباره، ۶٪ H_2O ، ۳٪ KOH و ۹٪ Na_2SiO_3 برای تولید ملات همگن پیشنهاد می شود. سپس، خمیر همگن به دست آمده در قالب ریخته می شود. در بیشتر موارد، نمونه ها به مدت کوتاهی در دمای محیط پیش از عمل آوری قرار می دهند. عمل آوری در صورت لزوم، تا دمای حداکثر ۸۰ °C به مدت ۱ یا ۲ روز انجام می شود. سپس نمونه ها به منظور توسعه و افزایش پیوندهای ساختاری به مدت ۷ روز یا ۲۸ روز در قالب می مانند

جدول ۱- کاربردهای ژئوپلیمرها با نسبت های مختلف Si/Al [۲۱].

کاربرد	Si/Al
آجرها، سرامیک ها و مواد ضد آتش	۱
سیمان های کربن دی اکسید کم، نگهدارنده های پسماندهای سمی و مواد رادیواکتیو	۲
کامپوزیت های مقاوم در برابر گرما، تجهیزات ریخته گری و کامپوزیت های الیاف شیشه	۳
آب بندهای صنعتی	۳ <



شکل ۴- مقایسه استحکام بتن ژئوپلیمری و پرتلند [۲۴].

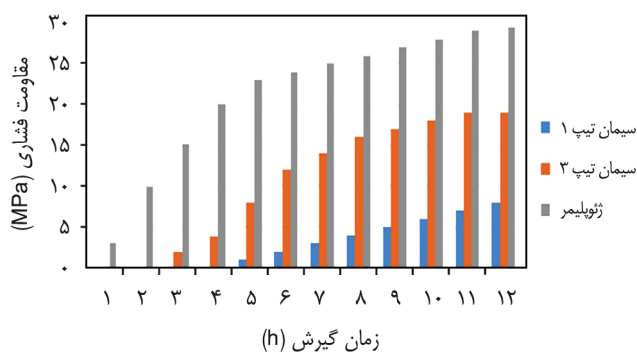
جلوگیری و اجتناب از هرگونه افزودن قلیا در سیمان پرتلند معمولی وجود دارد. معمولاً از کارخانه‌های سیمان، سیمانی با مقدار قلیای کمتر درخواست می‌شود. اما سیمان ژئوپلیمری، حتی با دارا بودن ۹/۲٪ قلیا، هیچ‌گونه خطر واکنش قلیایی-سنگ‌دانه ایجاد نمی‌کند [۳۱]. عامل مهم در طول ژئوپلیمرشدن، آب است که کارایی خمیر اولیه را تسهیل می‌کند، اما در ساختار ژئوپلیمر حاصل گنجانده نشده است.

برخلاف واکنش‌های آبدار کردن بتن معمولی، آب در واکنش‌های اصلی شیمیایی ژئوپلیمرشدن، نقش چندانی ندارد. آب طی عمل‌آوری گرمایی و خشک‌شدن پس از آن دفع می‌شود که این عمل اثر درخور توجهی بر خواص مکانیکی و شیمیایی بتن ژئوپلیمری دارد. در بتن معمولی برخلاف بتن ژئوپلیمری، سیمان پرتلند با آب مخلوط می‌شود و به تولید سیلیکات کلسیم آبدار و هیدروکسید کلسیم منجر می‌شود. به این فرایند، آبدار کردن گفته می‌شود [۳۲]. شکل ۷ تصویر الکترون برگشتی (BSI) از ریزساختار یک ژئوپلیمر شیشه‌ای سرباره FeNi با مقاومت فشاری بیش از ۷۰ MPa را نشان

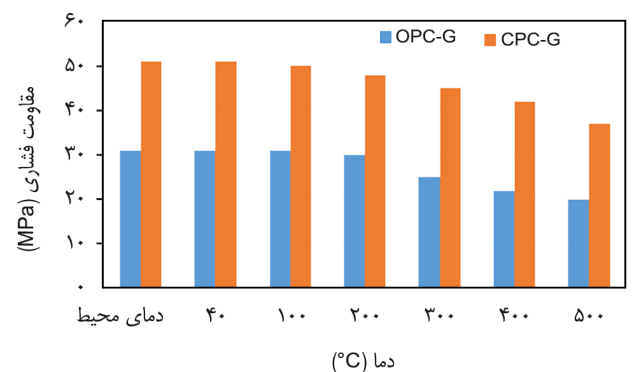
ساخته‌شده از سیمان پرتلند تیپ ۱ و تیپ ۳ را مقایسه کرد. نتایج حاکی از گیرش سریع و مقاومت زیاد بتن‌های ژئوپلیمری بود که در شکل ۶ نشان داده شده است [۲۹].

دو سازوکار تخریب بتن، حملات سولفاتی و کلریدی هستند. بتن‌های ژئوپلیمری، مقاومت زیادی در برابر حملات شیمیایی دارند. طبق پژوهش‌های انجام‌گرفته، مقدار کم کلسیم در ژئوپلیمرها در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی، سبب شده است تا در کل در برابر سولفات مقاومت آن‌ها بیشتر باشد. زیرا تشکیل ترکیباتی که مسئول تخریب سولفاتی سیمان پرتلند معمولی هستند، نیازمند وجود مقدار مشخصی کلسیم است. مقدار نفوذپذیری فاز چسبی ژئوپلیمر کمتر از سیمان پرتلند است. مزیت عمده این نفوذپذیری کم، کاهش نفوذپذیری کلرید است که سرعت حمله کلرید موجود روی فولاد را در بتن تقویت‌شده کاهش می‌دهد و باعث افزایش طول عمر آن می‌شود [۳۰].

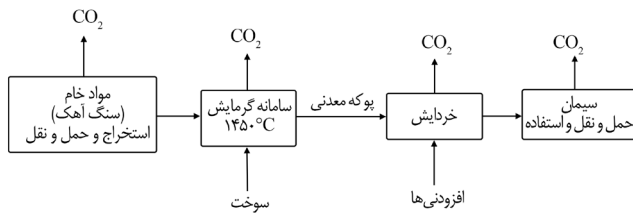
تصور بر این است، قلیاها عامل زیان‌آوری برای واکنش قلیایی-سنگ‌دانه (aggregate) در برخی بتن‌ها هستند. در نتیجه، تمایل به



شکل ۶- مقایسه عمل‌آوری بتن‌های معمولی با سیمان تیپ‌های ۱ و ۳ با بتن‌های ساخته‌شده از ژئوپلیمر [۲۹].



شکل ۵- مقایسه بتن پرتلند با یک نمونه بتن ژئوپلیمری در دماهای مختلف [۲۵].



شکل ۸- فرایند ساده تولید سیمان که نشانگر انتشار CO_2 است [۳۴].

حیات محصول یا فرایند انجام می‌شود.

ارزیابی چرخه حیات دارای چهار مرحله اصلی است [۳۶]:
تعریف اهداف و مرزهای سامانه، تهیه فهرست چرخه عمر،
ارزیابی آثار و تفسیر نتایج.

فهرست برداری چرخه عمر (life cycle inventory, LCI)
ارزیابی آثار بالقوه مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های محیط
زیست تعریف شده را می‌سنجد. با اعمال مدل‌های مختلف برای
سازوکارهای محیط زیستی (مانند گرمایش جهانی ناشی از انتشار
گازهای گلخانه‌ای)، LCI تعبیری از آثار محیط زیستی بالقوه است.
برای تعبیر روش‌های مختلف با نقاط قوت و ضعف گوناگون
وجود دارد [۳۷].

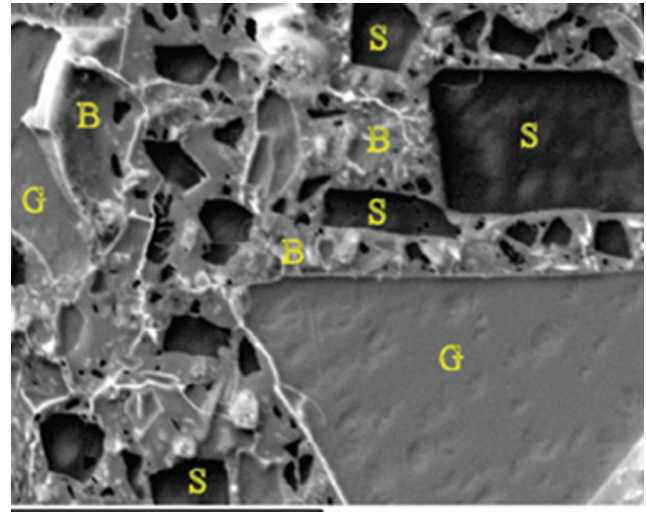
مجموعه‌ای از انواع آثار پرکاربرد (و شاخص‌ها) در زیر آورده
شده است:

- تخریب منابع غیرزیستی، پتانسیل تخریب منابع غیرزنده
(abiotic resource depletion potential, ADP)؛
- تغییر آب و هوا، پتانسیل گرمایش جهانی (global warming
potential, GWP)؛
- غیرقابل زیست شدن، پتانسیل غیرقابل زیست شدن
(Eutrophication Potential, EP)؛
- سمیت انسان، پتانسیل سمیت انسان (human toxicity po-
tential, HTT) و
- تخریب لایه ازن، پتانسیل تخریب لایه ازن (ozon deple-
tion potential, ODP)

به منظور ارزیابی آثار محیط زیستی روش‌های گوناگونی مانند
کمی‌سازی ارزیابی آثار محیط زیستی توسعه داده شده است که
به چرخه حیات می‌پردازد. تفاوت این روش‌ها در طبقه‌بندی آثار،
مدل‌های محیط زیستی و عوامل ویژه است [۳۸].

نقش ترکیب ژئوپلیمری بر آثار محیط زیستی

مشخصات محیط زیستی و مصرف انرژی چه مستقیم و چه
غیرمستقیم تا اندازه زیادی به مواد اولیه به کاررفته بستگی دارند.



شکل ۷- تصویر الکترونی برگشتی (BSI) که ریزساختار ژئوپلیمر
شیشه سرباره (سرباره S، شیشه G و چسب B) را نشان می‌دهد [۳۳].

می‌دهد [۳۳].

روند فعلی در تولید سیمان

بخش مصالح ساختمانی، سومین بخش بزرگ صنعتی تولیدکننده
 CO_2 در سراسر جهان است که تقریباً ۱۰٪ از کل انتشار CO_2 انسانی
را تشکیل می‌دهد و بیشتر آن‌ها مربوط به ساخت بتن است. حدود
۸۵٪ از این انتشار CO_2 از طریق تهیه سیمان حاصل می‌شود. تقریباً
۹۵٪ از CO_2 در حین تولید و تنها ۵٪ در هنگام حمل مواد اولیه و
محصولات نهایی آزاد می‌شود.

آثار زیست‌محیطی سیمان با انتشار آلاینده درخور توجهی از سه
منبع مجزا به خوبی شناخته و تأیید شده است. این سه منبع عبارتند از:
۱- انتشارهایی که از طریق گرمادهی مواد اولیه در دمای زیاد
برای تشکیل کلینکر تولید می‌شوند؛

۲- انتشارهای مربوط به احتراق سوخت در کوره سیمان و

۳- انتشارهای مربوط به انرژی به کاررفته برای فعالیت کارخانه سیمان.
شکل ۸ فرایند ساده تولید سیمان را نشان می‌دهد که نمایانگر
انتشار CO_2 است [۳۴، ۳۵].

ارزیابی چرخه عمر (روش‌شناسی)

ارزیابی چرخه عمر (life cycle assessment, LCA)، فنی
برای ارزیابی همه ورودی‌ها و خروجی‌های محصول (داده‌ها و
سنداده‌ها)، فرایند یا خدمات (فهرست موجودی چرخه حیات)،
ارزیابی زائادات، آثار بر بهداشت انسان و آثار بوم‌شناختی (ارزیابی
اثر) و تفسیر نتایج ارزیابی (تفسیر چرخه حیات) در کل چرخه

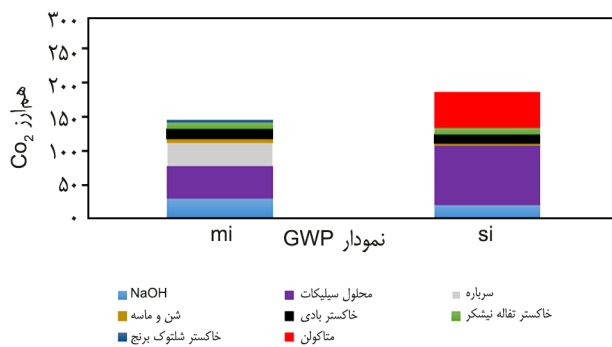
• خاکستر تفرقه نیشکر اثر اندکی بر GWP دارد. استفاده از محلول سیلیکات و هیدروکسید سدیم تا جایی که امکان دارد باید به حداقل کاهش یابد یا این مواد باید با نوعی فعال‌ساز سازگارتر با محیط زیست جایگزین شوند. این مسئله برای متاکائولن که باید برای کاهش دغدغه‌های زیست‌محیطی با گزینه‌های دیگر جایگزین شود، نیز صدق می‌کند. یادآور می‌شود، کیفیت کاربردی (عموماً در دسترس بودن) متاکائولن از نظر خلوص بسیار زیاد است. از این رو باید سنجیده شود، آیا نوع کم‌کیفیت برای کاربردهای گسترده سامانه‌های ژئوپلیمری مناسب‌تر است؟ مصرف مواد اولیه فرعی مانند خاکسترهای بادی (بدون نیاز به آسیاب کردن و عمل‌آوری گرمایی) یا سرباره کوره آهن‌گدازی (فقط نیازمند آسیاب کردن) مطلوب‌تر هستند، مشروط بر اینکه این منابع ثانویه (پسماندها) موجود باشند و مقدار محدودیت‌های محیط زیستی از حد خود فراتر نروند [۳۹]. برای بتن ژئوپلیمر برپایه متاکائولن نشان داده شده است، به دلیل نسبت Si/Al کم در متاکائولن، مقدار زیادی سیلیکات سدیم مورد نیاز است که باعث آثار زیست‌محیطی زیادی می‌شود [۴۱].

بتن ژئوپلیمری در برابر بتن معمولی

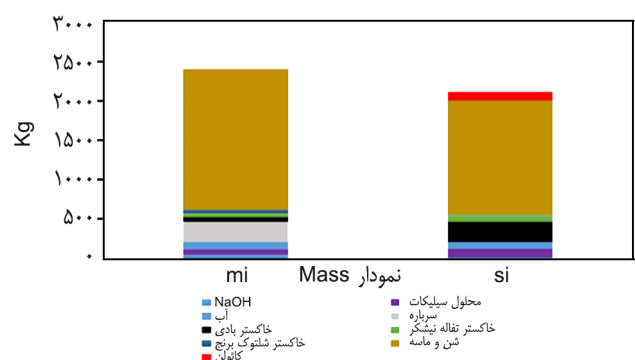
ژئوپلیمرها قابلیت بالقوه خوبی برای تولید بتن سبز و مصالح ساختمانی پایدار با اثر کربن کم دارند. به منظور ارزیابی دقیق این قابلیت، آثار محیطی ژئوپلیمرها باید با در نظر گرفتن اثر محصولات (یا پسماند) فرعی استفاده‌شده در مطالعات ارزیابی چرخه حیات (LCA) مشخص شوند. به علت عملکرد کربناتی شدن متفاوت،

میان مواد اولیه جامد اصلی با منابع پرمصرف (خاکستر کوره آهن‌گدازی) و مواد اولیه جامد فرعی با منابع کم‌مصرف (مانند خاکستر زغال سنگ) و همچنین میان مواد خام سیال اصلی با منابع پرمصرف (مانند محلول NaOH، محلول سیلیکات) و مواد خام سیال فرعی با منابع کم‌مصرف (مانند آب) تفاوت درخور توجهی وجود دارد. مقایسه نسبت جرم مواد خام (شکل ۹الف) به سهم آثار محیط زیستی با شاخص پتانسیل گرمایش جهانی (انتشار CO₂) و (شکل ۹ب) برای دو ترکیب ژئوپلیمری مختلف، جنبه‌های مهم زیر را بیان می‌کند [۳۹]:

- ماسه و شن با وجود دارابودن جرم زیاد، سهم ناچیزی در GWP (پتانسیل گرمایش جهانی) دارند.
- خاکستر بادی (نوع سخت یا نرم زغال سنگ) بر GWP اثر اندکی دارد.
- سرباره (فقط در اختلاط MI) به طرز درخور ملاحظه‌ای در GWP سهم دارند.
- تأمین آب اثر چندانی بر GWP ندارد.
- محلول سیلیکاتی به‌طور درخور توجهی در GWP سهم دارد و بر مشخصات زیست‌محیطی هر دو اختلاط اثرگذار است.
- استفاده متعادل از محلول NaOH (۵۰٪) در هر دو اختلاط باعث تأثیر درخور توجهی بر GWP می‌شود.
- استفاده متعادل از متاکائولن (فقط در اختلاط SI) به طرز چشمگیری بر GWP اثر دارد.
- خاکستر شلتوک برنج (فقط در اختلاط MI) اثر ناچیزی بر GWP دارد.



(ب)



(الف)

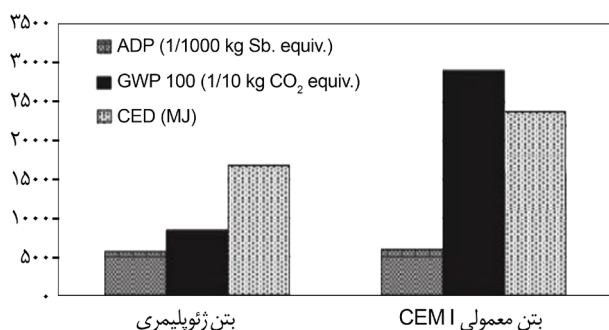
شکل ۹- مقایسه نتایج: (الف) جرم متعادل‌شده (Mass) و (ب) پتانسیل گرمایش جهانی (GWP) برای دو ترکیب مختلف ژئوپلیمری (mi, si) از روش کاربردی و فراگیر CML (Centrum voor Milieukunde Leiden) برای کمی‌سازی و ارزیابی اثر شاخص GWP (هم‌ارز kgCO₂) توسط گروهی از دانشمندان مرکز علوم محیط زیست دانشگاه لیدن در سال ۲۰۰۱ برای کمی‌سازی ارزیابی آثار محیط زیستی چرخه حیات استفاده شده است [۳۹].

جدول ۲- مقایسه بتن ژئوپلیمری و بتن سیمانی [۳۹].

مقدار در بتن (kg/m ³)		مواد
سیمانی	ژئوپلیمری	
۳۴۰		سیمان CEM I 32.5R
	۲۳۰	سرباره
	۵۷	خاکستر بادی
	۸۳	پسماند واکنشی
	۳۳	محلول سیلیکات-سدیم سیلیکات ۳۷٪
	۲۴	NaOH (۵۰٪)
	۹۹	آب یون زدوده
۱۸۷۸	۱۸۷۸	شن-ماسه (۱۶-۰ mm)
۲۳۸۸	۲۴۰۴	مجموع

بادی تقریباً ۸۰ به ۲۰، به هیچ گونه عمل آوری گرمایی و سخت شد در دمای محیط (۲۰ °C) نیاز ندارد. در حالی که مرحله بهره‌برداری و بازیافت-دفع یکسان در نظر گرفته می‌شوند، نتایج در شکل ۱۰، محیط زیست مشابهی را برحسب ADP و تقاضای تجمعی انرژی (cumulative energy demand, CED) سامانه ژئوپلیمری، برای این کاربرد خاص نشان می‌دهد (بتن مقاوم در برابر یخ‌زدگی-ذوب). در مقابل این، بتن ژئوپلیمری سهم خیلی کمتری در پتانسیل گرمایش جهانی دارد. GWP بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن سیمان پرتلند، تقریباً ۷۰٪ کمتر بوده و از نظر مصرف تجمعی انرژی، بتن سیمان پرتلند تقریباً ۲۱٪ بیش از بتن ژئوپلیمری است [۳۹].

مطالعات نشان می‌دهند، که بتن ژئوپلیمر ساخته شده از خاکستر



شکل ۱۰- نتایج LCA برای بتن‌های ژئوپلیمری و معمولی. از روش CED برای محاسبه مصرف انرژی استفاده شده که نوعی روش تک‌منظوره برای محاسبه مصرف انرژی یک محصول به‌طور تجمعی مستقیم و غیرمستقیم در ارزیابی چرخه عمر است [۳۹].

تغییرات دوام سیمان تقویت شده و بتن ژئوپلیمری، باید از دیدگاه فنی بررسی شود. با کمک مدل دوام و در نظرگیری شرایط محیط زیست، طول عمر هر سامانه با جزئیات بیشتری می‌تواند ارزیابی شود. پژوهش‌ها نشان داده است، تولید اکثر انواع استاندارد بتن ژئوپلیمر تأثیر کمتری نسبت به بتن معمولی (استاندارد) در گرم شدن کره زمین دارد [۴۱].

در کشورهای صنعتی، سیمان می‌تواند محصولی ارزان برای تولید انبوه بتن در نظر گرفته شود. برای رقابت با چنین سامانه بهینه‌شده‌ای، مواد اولیه ارزان مانند سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی زغال‌سنگ می‌توانند برای تولید ژئوپلیمر استفاده شوند. همچنین، استفاده از مواد خام ثانویه اثر محیط زیستی سامانه ژئوپلیمری را کاهش می‌دهد. با وجود این، پرسشی مطرح می‌شود که آیا سامانه ژئوپلیمری با یک سامانه برپایه سیمان‌های مرسوم از منظر زیست‌محیطی و مصرف انرژی قابل رقابت است یا خیر؟ برای مقایسه پتانسیل مصرف انرژی و گرمایش جهانی ترکیبات سامانه‌های ژئوپلیمری و بتن معمولی، طرح اختلاط جدول ۲ به منظور ارزیابی چرخه عمر در نظر گرفته می‌شود. مرحله‌ای از چرخه عمر که برای هر دو ماده مشابه است، ممکن است در یک LCA مقایسه‌ای حذف شود.

در این جدول در ترکیبات سامانه‌های مقایسه شده، همه مخلوط‌ها دارای مقدار شن و ماسه برابر بوده و بتن بدون هیچ افزودنی شیمیایی (مانند ابرروان‌کننده‌ها) تولید شده است. مخلوط بتن سیمان پرتلند شامل ۳۴۰ kg/m³ سیمان است. بتن ژئوپلیمری بهینه‌سازی شده فعلی با نسبت سرباره به خاکستر

بادی به انتشار CO_2 کمتری نسبت به بتن معمولی منجر می‌شود. بهترین راه برای دستیابی صنعت بتن به اهداف فعلی کاهش CO_2 ، تولید بتن ژئوپلیمر از ماده خام با نسبت مولی مناسب Si/Al است که به عنوان ضایعات صنعتی شناخته می‌شود و اثر ویژه‌ای ندارد. در واقع، فناوری ژئوپلیمر این امکان را فراهم می‌سازد تا با توجه به نقطه نظر LCA، به جای محصول فرعی از پسماندها استفاده شود. سرباره آهن و فرونیکل منیزیم نمی‌تواند با فناوری سیمان مخلوط استفاده شود، اما می‌تواند به عنوان اتصال‌دهنده‌های ژئوپلیمر به کار برده شود. استفاده از خاک رس‌های فعال شده با گرما با نسبت Si/Al بیش از متاکائولن یا خاکستر بادی همراه با متاکائولن برای کاهش سیلیکات مصرفی نیز می‌تواند در نظر گرفته شود [۴۴-۴۲].

نتیجه‌گیری

با توجه به سند چشم‌انداز جمهوری اسلامی ایران که در آن ایران کشوری توسعه‌یافته با جایگاه اول اقتصادی، علمی و فناوری در سطح منطقه با هویت الهام‌بخش و تعامل سازنده و مؤثر در روابط بین‌المللی است، لزوم توجه به توسعه پایدار در صنعت ساخت‌وساز، به‌ویژه صنعت بتن را بیش از پیش مشخص می‌کند. براساس مفاهیم توسعه پایدار برای گسترش بیشتر مواد سازگار با محیط زیست، طراح مواد به دانش محرک‌های محیط زیستی مواد جدید و همچنین دانش آثار محیط زیستی مواد رایج در ساخت‌وساز نیاز دارد. بهره‌وری انرژی و به‌حداقل رساندن آثار منفی محیط زیستی مصالح در کل چرخه عمر یک ساختمان یا سازه، مهم‌ترین هدف مصالح پایدار است. از این رو در کار حاضر، قابلیت بالقوه استفاده از فناوری ژئوپلیمر برای تبدیل مواد خام به مصالح سبز و پایدار با رویکرد ارزیابی چرخه عمر، بررسی شد. ژئوپلیمرها را می‌توان از مواد خام گوناگون یا پسماندها طی فرایندهای مختلف برای دستیابی به ویژگی‌های متفاوت تولید کرد که آن‌ها را برای کاربردهای متنوع مناسب می‌سازد. ژئوپلیمر نوعی درشت‌مولکول معدنی با اندازه و ساختار مولکولی مشخص

است. ژئوپلیمرهای نوع (سدیم، پتاسیم)-پلی(سیلات) و (سدیم و پتاسیم)-پلی(سیلات-سیلوکسو) شامل نانوذرات ابتدایی منحصر به فردی با ابعاد ۵ nm تا ۱۵ nm هستند که با نانوحفره‌ها جدا شده‌اند. نانوذراتی با اندازه ۵ nm تا ۲۰ nm نیز در سیمان ژئوپلیمری برپایه خاکستر سبک یافت می‌شود. ژئوپلیمرشدن، نتیجه یک سازوکار شیمیایی بسیار دقیق است که شامل پیوند کووالانسی و ترویج تشکیل و تولید مواد سرامیک‌مانند است. با این حال، نظم این نانوذرات متنوع تشکیل‌دهنده ماتریس ژئوپلیمر خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی را کنترل می‌کند. اکثر سامانه‌های ژئوپلیمری برپایه مواد معدنی طبیعی فراوری شده، پسماندها و محصولات فرعی صنعتی هستند تا عوامل اتصال‌دهنده را فراهم کنند. بنابراین، ژئوپلیمرها می‌توانند باعث کاهش درخور توجه CO_2 در بخش ساخت‌وساز شوند و نیز مزایای محیط زیستی درخور توجهی را ارائه کنند. با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی بسیار مطلوب مصالح ژئوپلیمری، می‌توان از آن در سازه‌هایی استفاده کرد که نیاز به دوام و عملکرد شیمیایی زیادی دارند (مانند سازه‌هایی که تحت حملات سولفاتی یا کلریدی شدید هستند). با توجه به بررسی مطالعات گردآوری شده، برای کاهش بار آلاینده‌ی زیست‌محیطی تولید بتن موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- ۱- استفاده کردن از سیمان ژئوپلیمری به‌عنوان جایگزین مناسب سیمان پرتلند در صنعت ساخت‌وساز؛
 - ۲- ترکیب مواد آلومیناسیلیکاتی مختلف برای کاهش مصرف سدیم سیلیکات (به‌عنوان عامل افزایش گازهای گلخانه‌ای و تولید CO_2) در طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری (مانند ترکیب متاکائولن و خاکستر بادی برای افزایش نسبت Si/Al) و
 - ۳- از روش سنتز سدیم سیلیکات از پسماند کشاورزی به‌منظور کاهش مصرف انرژی و بار آلاینده‌ی زیست‌محیطی بتن ژئوپلیمری استفاده شود.
- با وجود مزایای مصالح ژئوپلیمری نسبت به مصالح رایج برای بهبود فناوری و تقویت پتانسیل سامانه‌های ژئوپلیمری در کاربردهای تجاری به‌منظور کاهش آثار زیست‌محیطی، به مطالعات بیشتری نیاز است.

مراجع

- Omer A.M., Energy, Environment and Sustainable Development, *Renew. Susst. Energ.*, **12**, 2265-2300, 2008.
- Dickens C., Smakhtin V., McCartney M., O'Brien G., and Dahir L., Defining and Quantifying National-Level Targets, Indicators and Benchmarks for Management of Natural Resources to Achieve the Sustainable Development Goals, *Sustainability*, **11**, 462, 2019.
- Mahdi Nejad J.-e.-D., Sadeghi Habib Abad A., and Lotfi Zadeh G., The Necessity of Revitalizing the Traditional Elements Effective on Economic Sustainability and Cost Management (Case Study of Tabatabai's House), *Procedia Econ. Finance*, **36**, 81-88, 2016.
- Bielek B., Green Building—Towards Sustainable Architecture, *Appl. Mech. Mater.*, **824**, 751–760, 2016.
- Florez L. and Castro-Lacouture D., Optimization Model for Sustainable Materials Selection Using Objective and Subjective Factors, *Mater. Des.*, **46**, 310-321, 2013.
- Sagbansua L. and Balo F., A Novel Simulation Model for Development of Renewable Materials with Waste-Natural Substance in Sustainable Buildings, *J. Clean. Prod.*, **158**, 245-260, 2017.
- Malhotra V.M., Reducing CO₂ Emissions, *ACI Concrete Int.*, **28**, 42-45, 2006.
- García-Gusano D., Herrera I., Garraín D., Lechón Y., and Cabal H., Life Cycle Assessment of the Spanish Cement Industry: Implementation of Environmental-Friendly Solutions, *Clean. Technol. Environ.*, **17**, 59-73, 2015.
- Jingwei C., Ping Z., and Xue W., The Research on Sino-US Green Building Rating System, *Energ Procedia*, **5**, 1205-1209, 2011.
- Davidovits J., Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials, *J. Therm. Anal.*, **37**, 1633-1656, 1991.
- Davidovits J., Geopolymers: Ceramic-Like Inorganic Polymers, *J. Ceram. Sci. Technol.*, **8**, 335-350, 2017.
- Sakulich A.R., Miller S., and Barsoum M.W., Chemical and Microstructural Characterization of 20 Month Old Alkali Activated Slag Cement, *J. Am. Ceram. Soc.*, **93**, 1741-1748, 2010.
- Sindhunata J.S.J., Lukey G.C., and Xu H., Effect of Curing Temperature and Silicate Concentration on Fly-Ash-Based Geopolymerization, *Ind. Eng. Chem.*, **45**, 3559-3568, 2006.
- Kriven W.M., Bell J.L., and Gordon M., Microstructure and Microchemistry of Fully-Reacted Geopolymers and Geopolymer Matrix Composites, *Ceram. Trans.*, **153**, 227-250, 2003.
- Esparham A., Factors Influencing Compressive Strength of Metakaolin-Based Geopolymer Concrete, *Modares Civil Eng. J. (Persian)*, **20**, 53-66, 2020.
- Thomas B.S., Yang J., Mo K.H., Abdalla J.A., Hawileh R.A., and Ariyachandra E., Biomass Ashes From Agricultural Wastes as Supplementary Cementitious Materials or Aggregate Replacement in Cement/Geopolymer Concrete: A Comprehensive Review, *J. Build. Eng.*, **40**, 102332, 2021.
- Almutairi A.L., Tayeh B.A., Adesina A., Islam H.F. and Zeyad A.M., Potential Applications of Geopolymer Concrete in Construction: A Review, *Case Stud. Constr. Mater.*, **15**, e00733, 2021.
- Albitar M., Ali M.M., Visintin P., and Drechsler M., Durability Evaluation of Geopolymer and Conventional Concretes, *Constr. Build. Mater.*, **136**, 374-385, 2017.
- Esparham A., Moradikhou A.B., and Mehrdadi N., Introduction to Synthesis Method of Geopolymer Concrete and Corresponding Properties, *J. Iran. Chem. Soc. (Persian)*, **4**, 13-24, 2020.
- Esparham A. and Moradikhou A.B., A Novel Type of Alkaline Activator for Geopolymer Concrete Based on Class C Fly Ash, *Adv. Civ. Eng.*, **3**, 1-13, 2021.
- Davidovits J., Geopolymers: Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement, *J. Mater. Educ.*, **16**, 91-91, 1994.
- Esparham A., Moradikhou A.B., Andalib F.K., and Avanaki M.J., Strength Characteristics of Granulated Ground Blast Furnace Slag-Based Geopolymer Concrete, *Adv. Concr. Constr.*, **11**, 219-229, 2021.
- Neupane K., Chalmers D., and Kidd P., High-Strength Geopolymer Concrete-Properties, Advantages and Challenges, *Adv. Mater.*, **7**, 15-25, 2018.
- Singh N.B., Fly Ash-Based Geopolymer Binder: A Future Construction Material, *Minerals*, **8**, 299, 2018.
- Mane S. and Jadhav H., Investigation of Geopolymer Mortar and Concrete under High Temperature, *Mater. Sci. Eng.*, **1**, 384-390, 2012.
- Moradikhou A.B., Esparham A., and Avanaki M.J., Effect of Hybrid Fibers on Water Absorption and Mechanical Strengths of Geopolymer Concrete Based on Blast Furnace Slag, *J. Mater. Civ. Eng.*, **3**, 195-211, 2019.
- Moradikhou A.B., Hosseini M.H., Mousavi Kashi A., Emami F., and Esparham A., Effect of Simple and Hybrid Polymer Fibers on Mechanical Strengths and High-Temperature Resistance of Metakaolin-Based Geopolymer Concrete, *Modares Civil Eng. J. (Persian)*, **20**, 147-161, 2020.
- Esparham A., Hosseini M.H., Mousavi Kashi A., Emami F., and Moradikhou A.B., Impact of Replacing Kaolinite with Slag, Fly Ash and Zeolite on the Mechanical Strengths of Geo-

- polymer Concrete Based on Kaolinite, *Build. Eng. Hous. Sci. (Persian)*, **13**, 9-15, 2020.
29. Davidovits J., Geopolymers: Ceramic-Like Inorganic Polymers, *J. Ceram. Sci. Technol.*, **8**, 335-350, 2017.
 30. Lyon R.E., Foden A.J., Balaguru P., Davidovits J., and Davidovics M., Properties of Geopolymer Matrix-Carbon Fiber Composites, *Fire. Mater.*, **21**, 67-73, 1997.
 31. Davidovits J., Geopolymers Based on Natural and Synthetic Metakaolin: A Critical Review, *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, **38**, 201-214, 2018.
 32. Esparham A. and Moradikhoh A.B., Factors Influencing Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *Amirkabir J. Civil Eng. (Persian)*, **53**, 21-21, 2021.
 33. Komnitsas K., Zaharaki D., and Perdikatsis V., Effect of Synthesis Parameters on the Compressive Strength of Low-Calcium Ferronickel Slag Inorganic Polymers, *J. Hazard. Mater.*, **161**, 760-768, 2009.
 34. Van den Heede P. and de Belie N., Environmental Impact and Life Cycle Assessment (LCA) of Traditional and 'Green' Concretes: Literature Review and Theoretical Calculations, *Cem. Concr. Compos.*, **34**, 431-442, 2012.
 35. Nabi Javid M. and Esparham A., A Review of Life Cycle Assessment (LCA) in Quantifying Environmental Impacts of OPC and PFA Concrete Products, *Civil. Project. J. (Persian)*, **3**, 22-31, 2021.
 36. Chevalier B., Reyes T., and Laratte B., Methodology for Choosing Life Cycle Impact Assessment Sector-Specific Indicators. Paper Presented at the DS 68-5: *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11)*, Impacting Society through Engineering Design, Vol. 5: Design for X/Design to X, Lyngby/Copenhagen, Denmark, 15.-19.08, 2011.
 37. Dreyer L.C., Niemann A.L., and Hauschild M.Z., Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99—Does It Matter Which One You Choose, *Int. J. Life. Cycle. Assess.*, **8**, 191–200, 2003.
 38. Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., de Schryver A., Struijs J., and Van Zelm R., ReCiPe 2008, A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level, 1st ed., Report I: Characterization, The Netherlands: Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 1-126, 2009.
 39. Weil M., Dombrowski K., and Buchwald A., Life-Cycle Analysis of Geopolymers, In *Geopolymers*, Woodhead, 194-210, 2009.
 40. Esparham A., Investigation of the Effects of Nano Silica Particles and Zeolite on the Mechanical Strengths of Metakaolin-Based Geopolymer Concrete, *Int. J. Innov.*, **1**, 82-95, 2021.
 41. Esparham A. and Moradikhoh A.B., A Novel Type of Alkaline Activator for Geopolymer Concrete Based on Metakaolin, *J. Civ. Eng. Mater. Appl.*, **2**, 57-65, 2021.
 42. Rajan H.S. and Kathirvel P., Sustainable Development of Geopolymer Binder Using Sodium Silicate Synthesized from Agricultural Waste, *J. Clean. Prod.*, **286**, 124959, 2021.
 43. Esparham A., Moradikhoh A.B., and Jamshidi Avanaki M., Effect of Various Alkaline Activator Solutions on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *J. Civ. Eng. Mater. Appl.*, **4**, 115-123, 2020.