Journal of
Urban & Regional Policy
ISSN Online: 2821-0921

Geopolymer Concrete, a Way for Green Construction and Sustainable Urban Development

Alireza Esparham
Department of Environmental Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: alireza.esparham@ut.ac.ir

Abstract

Due to its unique qualities, concrete is the second most extensively utilized material in the construction sector after water. However, the Portland cement manufacturing method has significant downsides, as one ton of Portland cement produces approximately one ton of carbon dioxide. As a result, it appears that an alternative to Portland cement is required. The notion of "waste-free" development and the manufacturing of new materials with a lower environmental impact than the priorities, on the other hand, will be the aims of future cities' sustainable development. To continue developing environmentally friendly materials, it is vital to understand the environmental stimuli of new materials as well as assess the environmental effects of traditional building materials. Geopolymer has recently gained popularity as a sustainable, environmentally acceptable substance that can be used instead of Portland cement. Geopolymers are ceramic-like materials with three-dimensional poly-compact structures that are made by chemically activating aluminum and silica-containing solids at low temperatures. Trash or by-products from industry can be used to make geopolymer concrete for use in building, such as coal combustion ash, smelting furnace slag, construction waste, or agricultural waste such as rice paddy. The purpose of this article is to look at the viability of using geopolymer technology in sustainable materials for sustainable urban development in order to reduce pollution and analyze the life cycle. Based on research findings, geopolymer concretes have much better mechanical and chemical quality and also much less energy consumption than conventional concrete and have significant environmental benefits.

Keywords: Geopolymer, Sustainable Development, Life cycle assessment, Sustainable Materials.

Citation: Esparham, Alireza (2023). Geopolymer Concrete, a Way for Green Construction and Sustainable Urban Development. *Urban and Regional Policy*, 2(1), 85- 101.

Urban and Regional Policy, 2023, Vol. 2, No.1, pp. 85- 101
Published by Ahvaz Branch, Islamic Azad University
Article Type: Review
© Authors
Received: August 03, 2022
Received in revised form: September 28, 2022
Accepted: January 05, 2023
Published online: April 02, 2023

سیاستگذاری شهری و منطقه‌ای
شاپا الکترونیکی: ۰۹۲۱-۲۸۲۱

بتن ژئوپلیمری، راهی برای ساخت‌وساز سبز و توسعه پایدار شهری

علیرضا اسپرهم
گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: alireza.esparham@ut.ac.ir

چکیده

بتن به علت دارا بودن ویژگی‌های خاص پرمصرف ترین مصالح در صنعت ساخت وساز، بعد از آب است. اما فرآیند تولید سیمان پرتلند معایب عمده ای نیز به دنبال دارد به طوری که تولید یک تن سیمان پرتلند سبب تولید تقریبا یک تن دی اکسید کربن می‌شود. از این رو نیاز به استفاده از یک جایگزین برای سیمان پرتلند ضروری به نظر می‌رسد. از طرفی اصل "بدون پسماند" و تولید مواد جدید با اثر محیط زیستی کمتر از اولویت‌ها از اهداف توسعه پایدار درشهرهای آینده خواهد بود. برای توسعه‌ی بیشتر مواد سازگار با محیط‌زیست، به شناختی در مورد محرک‌های محیط زیستی مواد جدید و همچنین ارزیابی اثرات محیط زیستی مواد مرسوم درساخت ساز، نیاز می‌باشد. در سال‌های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک مصالح پایدار ، دوستدار محیط زیست و جایگزینی برای سیمان پرتلند مطرح شده است. ژئوپلیمرها موادی سرامیک مانندی با ساختارهای پلی تراکمی درسه بعد هستند که در اثر فعال شدن شیمیایی مواد جامد حاوی آلومینیوم و سیلیس در دمای نسبتاً پایین ایجاد می‌شوند. برای تولید بتن ژئوپلیمری واستفاده در ساختمان می‌توان از پسماندها یا محصولات جانبی حاصل از صنایع ، مانند : خاکستر احتراق ذغال سنگ، سرباره‌های کوره آهن گدازی، ضایعات ساختمانی و یا پسماند کشاوزی مانند شلتوک برنج استفاده کرد. مقاله حاضر به طور خلاصه مطالعات انجام شده را در زمینه استفاده از فناوری ژئوپلیمر در مصالح پایدار به منظور توسعه پایدارشهری بارویکرد کاهش انتشار آلایندگی‌های زیست محیطی و ارزیابی چرخه عمر بررسی می‌کند . یافته‌ها و نتایج مطالعات نشان می‌دهند که بتن‌های ژئوپلیمری خصوصیات مکانیکی ، شیمیایی بالاتری و مصرف انرژی خیلی کمتری نسبت به بتن‌های معمولی دارند و مزایای محیط زیستی قابل‌توجهی را ارائه می‌کنند.

کلیدواژه‌ها: ژئوپلیمر، توسعه پایدار، ارزیابی چرخه عمر، مصالح پایدار.

استناد: اسپرهم، علیرضا (۱۴۰۲). بتن ژئوپلیمری، راهی برای ساخت‌وساز سبز و توسعه پایدار شهری. *سیاستگذاری شهری و منطقه‌ای*، ۲(۱)، ۸۵- ۱۰۱.

سیاستگذاری شهری و منطقه‌ای، ۱۴۰۲، دوره ۲، شماره ۱، صص. ۸۵- ۱۰۱
نوع مقاله: مروری
ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز
© نویسندگان
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۲
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۱۳

مقدمه

توسعه پایدار مفهومی است که تعاریف مختلفی دارد ، یکی از رایج ترین آنها بیان میکند کـه نسـل امـروز نبایـد توانـایی نسل‌های آینده در تأمین نیازهای خود را به خطـر بینـدازد (Finlayson, 2001). چهـار رکـن توسـعه پایدارعبارتنـد از : حمایت اقتصادی ، زیست محیطی ،حقوقی و همچنین توسعه اجتماعی(Dickens, et al., 2019) . مشخص شده اسـت که ظرفیت زمین برای حمایت از مردم از طریق محدودیت‌های منابع طبیعی و اولویت‌های انسانی تعیین می‌شود . امروزه شهرها سه چهارم انرژی جهان را مصرف می‌کنند و همچنین مسئول هفتادو پنج درصد آلودگی جهانی هستند .علاوه بـر این ، سازمان ملل متحد پیش بینی کرده است که ۶۸٪ جمعیت جهان تا سـال ۲۰۵۰ در شـهرها زنـدگی خواهنـد کـرد (UN_DESA,2018).

بنابراین لازم است هنگام بحث در موردتوسعه پایدار ، سلطه روزافزون شهرها را در نظر بگیریم و تاثیرات مستقیم و جانبی آن را معین کنیم. شهرهای بزرگ گره‌هایی هستند که شبکه‌های بزرگـی از خـدمات مهـم زیرسـاختی را بـه هـم متصل می‌کننـد. بنـابراین انعطـاف پـذیری و اسـتحکام زیرسـاخت‌هـای شـهری جهـت توسـعه پایـدار ضـروری اسـت (Branscomb LM,2006).

در چند دهه اخیر، همواره توسعه پایدارشهری و روستایی از دغدغه‌های اصلی توسعه در ایـران و اکثـر کشـورهای در حال توسعه بوده است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷).

در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، روشهای گوناگونی برای نیل به توسعه اقتصادی و اجتماعی به خصـوص در نواحی شهری آزموده شده است که آنها را راهبردهای توسعه می‌نامند .یکی از راهبردهای مهم توسعه، صـنعتی سـازی و ایجاد صنایع در مناطق پیرامونی است .یکی از مهم ترین ابعاد تأثیرات این قبیل صنایع بر محیط زیست اسـت کـه گاهـا برگشت ناپذیر و توام با خساراتی جبران ناپذیر است که این اثرات زیست محیطـی بـه جهـت ارتبـاط عمیـق و مسـتقیم اجتماعات شهری و فعالیتهای صنعتی -معدنی انجام شده در آن با محـیط پیرامـون، بـیش از پـیش مهـم اسـت؛ چراکـه نمونه‌های عینی نظیر تأسیسات صنایع سنگ آهن گل گهر سیرجان، ذوب آهن کردسـتان، ذوب آهـن اصـفهان و نظـایر آن‌ها از جمله تجاربی هستند که حاکی از دگرگونی‌های زیست محیطی در همچنین زیست محیطی در مقیـاس محلـی و منطق‌های برای این صنایع است (امین نژاد وهمکاران، ۱۳۹۷) .

یکی از راه حل‌های کاهش بارآلایندگی زیست محیطی این قبیل صـنایع و همزمـان ایجـاد توسـعه پایداردرشـهر و روستاهای پیرامونی ،استفاده ازپسماند حاصل ازاین صنایع بعنوان مصالح پایدار یا موادبازیافت شده در معماری پایا مسکن و سازه‌های روستاها می‌باشد. معماری پایا یا معماری پایدار[1]به دنبـال بـه حـداقل رسـاندن اثـرات منفـی زیسـت‌محیطی ساختمان‌ها از طریق افزایش بهره‌وری و اعتدال در استفاده از مصالح، انرژی، فضای ساخت و به‌طور کلـی اکوسیسـتم در ابعاد وسیع است. معماری پایدار در طراحی محیط ساخته شده، از یک رویکرد آگاهانه در مورد انرژی و حفاظت از محـیط زیست استفاده می‌کند (اسپرهم، ۱۴۰۱ و Beattie, 2017).

عوامل موثر بر مسائل محیط زیستی مرتبط با انرژی به واسطه نوآوری تکنولوژیکی و الگوهای رفتـاری از مـواردی

1. Sustainable architecture

است که باید در شهرهای پایدار به طور جدی مورد توجه قرار گیرد (Yasnolob, I,2018). پسماند تولید شده ، فرآیندهای ساخت و ساز و تخریب، صنایع تولیدی و کشاورزی هستند. این مواد معمولاً به عنوان پسماند جامد شهری، پسماند ساختمانی و تخریب و محصولات جانبی صنعتی یا کشاورزی طبقه‌بندی می‌شوند. معماری پایدار بر استفاده در محل از مدیریت پسماند متمرکز است (Bielek, B,2016). این بدان معنا است که بیشتر پسماند وزباله‌های تولید شده در صنایع تولیدی و کشاورزی نزدیک مناطق روستایی باید برای تولید مواد جانبی، قابل بازیافت باشند که می‌توانند در کاربردهای مختلف از جمله ساخت و ساز استفاده شوند. کیفیت و هزینه این مواد ازجمله مواردی هستند که باید مورد توجه قرار گیرند. مصالح پایدار با تکیه بر اقتصاد ،محیط زیست و انرژی به عنوان یک مصالح تجدید پذیر تعریف می‌شود و منابع آن تاثیر مثبتی بر اشتغال داشته و به فعالیت‌های اقتصادی کمک می‌کنند (Esparham et al., 2023).

مصالح ساختمانی پایدار شامل مصالح از منابع مصالح بازیافت شده،دوباره استفاده شده یا بی ضرر در پایان استفاده می‌باشد(Sagbansua, L and Balo, F, 2017) . امروزه در اکثر کشورها روند رو به رشدی نسبت به طراحی و ساخت ساختمانهای سبز وجود دارد. یک 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 آلایندگی به حفاظت از محیط زیست کمک کند (Jingwei et al.,2011)

استراتژی‌های مدرن طراحی ساختمان سبز باید از تکنیک‌های طراحی و ساخت سازگار با محیط زیست استفاده کنند که هنوز با موانع اقتصادی روبرو هستند .

تاکنون، تحقیقات مربوط به بهره وری انرژی سبز عمدتا به سمت استفاده از شبکه‌های هوشمند،توسعه مواد عایق اثربخش تر و به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه ای (GHG) رفته است.

شهرهای سبز باید به تدریج اصل "بدون پسماند" را درنظربگیرند. این روش قطعاً به توسعه پایدار و کاهش اثر گازهای گلخانه ای کمک خواهد کرد . این بدان معنی است که بیشتر زباله‌های تولید شده در شهر یا در منطقه گسترده تر باید برای تولید مواد جانبی، قابل بازیافت باشند که می‌توانند در کاربردهای مختلف از جمله ساخت و ساز استفاده شوند. کیفیت و هزینه این مواد ازجمله مواردی هستند که باید مورد توجه قرار گیرند. هدف این مقاله بررسی خواص ژئوپلیمرها[2]درراستای توسعه پایدار، با استفاده از محصولات جانبی وپسماندها برای تولید بتن و مصالح ساختمانی پایدار (سبز) به منظور استفاده در ساختمان‌های شهری و کاهش اثر آلایندگی زیست محیطی بارویکرد ارزیابی چرخه عمر می‌باشد.

ژئوپلیمرها

ژئوپلیمرها مواد آلومینوسیلیکات سه بعدی بی شکل با خاصیت‌های سرامیکی هستند که در دمای محیط تولید و سخت می‌شوند . در شرایط بسیار قلیایی، با وجود محلول هیدروکسید قلیایی و سیلیکات، هنگامی که آلومینوسیلیکات‌های واکنش پذیر به سرعت حل می‌شوند و واحدهای چهار وجهی [SiO4] و [AlO4] آزاد می‌شوند، پلیمریزاسیون صورت

1. Greenhouse gas
2. Geopolymer

می‌گیرد. واحدهای چهار وجهی به طور متناوب با تقسیم اتم‌های اکسیژن و تشکیل ژئوپلیمرهای بی شکل، با سایر آلوگومرها پیوند برقرار می‌کنند . یونهای مثبت مانند پتاسیم یا سدیم که در حفره‌های چارچوبی وجود دارند، بار منفی را متعادل می‌کنند(Esparham et al., 2021). به معنای وسیعتر ژئوپلیمرها نشانگر تبدیل ژئومولکولها از طریق فرآیندهای ژئوشیمیایی هستند .

اصطلاح ژئوپلیمر همانطور که در ابتدا مطرح شد عمدتا به مواد غیر آلی (معدنی) اشاره دارد اما می‌تواند توسعه داده شود و شامل موادی با محتوای آلی شود . از مصریان باستان معروف است که از کاه و گل رودخانه حاوی مواد آلی (به عنوان مثال مواد هیومیک) برای تولید اجزای ساختمانی با مقاومت و دوام قابل توجه استفاده می‌کردند . بنابراین مهم است که در طول ژئوپلیمری شدن،برهمکنش بین گونه‌های غیر آلی و آلی در نظر گرفته شوند (Davidovits,1993: Esparham & Moradikhou, 2021).

کاربردها و خواص ژئوپلیمر

هر منبع سیلیس و آلومینا که بتواند در یک محلول قلیایی حل شود، می‌تواند به عنوان پیش ماده ژئوپلیمر و پلی تراکمی عمل کند. متاکائولین[1](MK)، تولید شده توسط کلسیون کائولن در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد، اغلب برای تولید ژئوپلیمرها استفاده می‌شود (اسپرهم و همکاران، ۲۰۲۰). شیو و ونجرسا ۱۶ ماده معدنی طبیعی Al-Si را به عنوان مواد منبع بالقوه برای تولید ژئوپلیمرها مورد مطالعه قرار دادند(Xu, H and Van Deventer, J. S. J,2000) تعدادی زیادی از پسماندها از جمله پسماند معادن ،نیروگاه‌ها، ، شهری ، ساختمانی وهرمنبع آلومیناسیلیکاتی که امروزه در هر کشور به مقدار زیاد تولید می‌شود، می‌توان برای تولید مواد ژئوپلیمر واستفاده درساخت بتن،روسازی راه (اجزای ساختمان، پوشش‌های مقاوم در برابر آتش و عایق‌ها نیز استفاده گردد. برخی از این پسماندها (به عنوان مثال خاکستر بادی، سرباره کوره آهن گدازی) امروزه فقط به صورت پوزولان در تولید سیمان پرتلند استفاده می‌شود (Esparham & Moradikhou, 2021). سایر کاربردهای بالقوه ژئوپلیمرها عبارتند از: تثبیت پسماندهای خطرناک ،پوشش سطحی و تثبیت زباله دانی‌ها ،ساخت آسترهای پایه با نفوذپذیری کم در محل‌های دفن زباله، سازه‌های کنترل آب و ساخت فروشویی توده ای در بخش معدن، عایق حرارتی و همچنین از سیمان ژئوپلیمری می‌توان بعنوان جایگزین سیمان پرتلند در ساخت سازهای شهری مانند: روسازی باند فرودگاه BWWA کوئینزلند و دانشگاه کرتین کشور استرالیا ،استفاده نمود (شکل‌های ۱و۲). ژئوپلیمریزاسیون به دلیل گیرش سریع و مقاومت اولیه خمیر ، ممکن است در عملیات خاکبرداری و خاکریزی و پرسازی در نظر گرفته شوند (Esparham et al., 2020).

ژئوپلیمرها به سرعت سخت می‌شوند و مقاومت اولیه بالایی دارند در حالی که مقاومت فشاری ۲۸ روزه نهایی ممکن است به ۱۰۰ مگاپاسکال برسد یا از آن فراتر رود. تخلخل آنها می‌تواند از سیمان‌ها یا ملات‌ها کمتر باشد و بنابراین خصوصیات مکانیکی برتری به دست می‌آید . ساختار نهایی و خصوصیات فیزیکی آنها به چندین پارامترها مانند محتوای آب، اندازه ذرات، تاریخچه حرارتی، محتوای فلزات قلیایی و درجه شکل گیری بستگی دارد. ژئوپلیمرها

1. Makaolin

نفوذپذیری مشابه سیمان پرتلند ۹-۱۰سانتی متر بر ثانیه، انبساط کم مواد قلیایی، انقباض کم، مقاومت عالی در برابر اسیدها، سولفاتها، خوردگی و چرخهای ذوب شدگی ویخ زدگی را نشان می‌دهند (Esparham, A et al.,2020: Hosseini, M. H et al.,2020: Moradikhou, A. B et al.,2019).

یک جنبه مهم در طول ژئوپلیمریزاسیون ، آب است که کارایی خمیر اولیه را تسهیل می‌کند اما در ساختار ژئوپلیمر حاصل گنجانده نشده است. برخلاف واکنش‌های هیدراتاسیون دربتن معمولی ، آب در واکنشهای اصلی شیمیایی ژئوپلیمری شدن ،نقش چندانی ندارد و در طی عمل آوری حرارتی و خشک شدن پس از آن دفع می‌گردد ،که این عمل تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی و شیمیایی بتن ژئوپلیمری دارد. است .دربتن معمولی برخلاف بتن ژئوپلیمری، سیمان پرتلند با آب مخلوط می‌شود و منجر به تولید سیلیکات کلسیم هیدراته و هیدروکسید کلسیم می‌شود که به این فرایند هیدراته شدن ،گفته می‌شود(Esparham, A,2020:Davidovits, J,2008).

شکل ۱. فرودگاه BWWA[1] کوئینزلند استرالیا

(بزرگترین پروژه بتن ژئوپلیمری مدرن که مطلقا فاقد سیمان پرتلند است)

1. Brisbane West Wellcamp Airpor

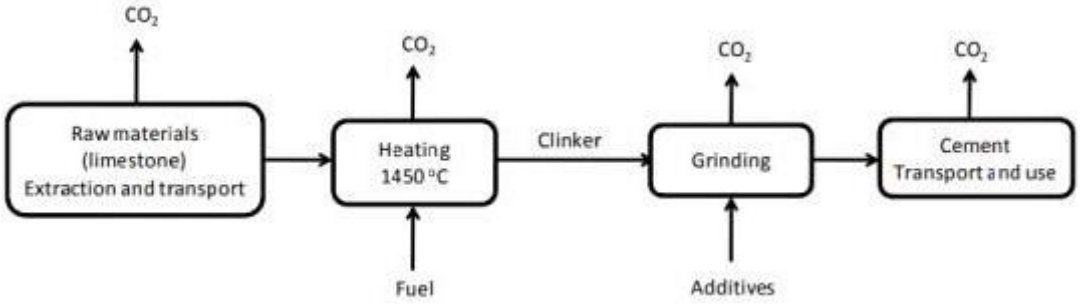
شکل۲. دانشگاه کرتین استرالیا

روند فعلی در تولید سیمان

بخش مصالح ساختمانی سومین بخش بزرگ صنعتی تولید کننده CO2 در سراسر جهان است که تقریباً ۱۰ درصد از کل انتشار CO2 انسانی را نشان می‌دهد، بیشتر آنها مربوط به ساخت بتن است . حدود ۸۵ درصد از این انتشار CO2 از طریق تهیه سیمان حاصل می‌شود. تقریباً ۹۵درصد این CO2 در حین تولید و تنها ۵ درصد در هنگام حمل مواد اولیه و محصولات نهایی آزاد می‌شود. تأثیرات زیست محیطی سیمان با انتشارآلاینده قابل توجهی از سه منبع مجزا به خوبی شناخته و تأیید شده است. این سه منبع شامل موارد زیر می‌باشند (Van den Heede & De Belie, 2012 ; اسپرهم و همکاران, ۱۳۹۹):

۱. انتشاراتی که ازطریق حرارت دادن مواد اولیه در دمای بالا برای تشکیل کلینکر, تولید میشوند،
۲. انتشار ات مربوط به احتراق سوخت در کوره سیمان،
۳. انتشارات مربوط به انرژی بکاررفته جهت فعالیت کارخانه سیمان

شکل ۳ یک فرآیند ساده تولید سیمان را نشان می‌دهد که نمایانگر انتشار CO2 است . مواد اولیه مورد استفاده در تولید سیمان سرشار از کربنات کلسیم می‌باشد و ممکن است از سنگ آهک ، گچ یا رسوبات شیل[1] استخراج شوند .بسته به مکان ، فرآیندکلسینه شدن شامل مراحلی همچون حفاری ، انفجار و خرد کردن می‌باشد .فرآیند کلسیناسیون ، که تقریباً عامل ۵۰٪ ازانتشار CO2 سیمان می‌باشد ، به سوختن کربنات کلسیم نیاز دارد ، و اکسید کلسیم و دی اکسید کربن را ایجاد می‌کند .بنابراین در حالی که امکان کاهش انتشارات زیست محیطی مرتبط با استفاده از سوخت و انرژی وجود دارد ، ماهیت فرآیند کلسینه شدن به معنی آن است که کاهش بالقوه اثرات زیست محیطی سیمان محدود شده است (Suhr, M et al.,2015).



شکل ۳. فرآیند ساده تولید سیمان که نشان دهنده انتشار CO2 است.

ارزیابی چرخه‌ی عمر (روش‌شناسی)

1. Shale

ارزیابی چرخه عمر (LCA)[1]یک تکنیک برای ارزیابی همه ورودی‌ها و خروجی‌های محصول (داده‌ها و ستانده‌ها)، فرآیند یا خدمات (فهرست موجودی چرخه حیات)، ارزیابی زائدات، اثرات بر بهداشت انسان و اثرات اکولوژیکی (ارزیابی اثر) و تفسیر نتایج ارزیابی (تفسیر چرخه حیات) در کل چرخه حیات محصول یا فرآیند مورد بررسی می‌باشد. ارزیابی چرخه حیات از چهار مرحله ی اصلی تشکیل شده است(Chevalier, Reyes, & Laratte, 2011):

- تعریف اهداف و مرزهای سیستم
- تهیه ی فهرست چرخه ی عمر
- ارزیابی اثرات
- تفسیر نتایج

ارزیابی تاثیر، اثرات محیط زیستی بالقوه‌ی مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های محیط زیستی تعریف‌شده در LCI[2] را مورد سنجش قرار می‌دهد. با اعمال مدل‌های مختلف برای مکانیزم‌های محیط زیستی (مانند گرمایش جهانی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای)، فهرست (LCI) به صورت اثرات محیط زیستی بالقوه تعبیر شده است. برای «تعبیر» روش‌های مختلف با نقاط قوت و ضعف گوناگونی وجود دارد (Esparham, A., & Ghalatian, F, 2022; Dreyer et al., 2003). مجموعه‌ای از انواع تاثیر پرکاربرد (و شاخص‌ها) در زیر آورده شده است:

- تخریب منابع غیرزیستی(پتانسیل تخریب منابع غیرزنده ـ ADP[3])
- تغییر آب‌وهوا (پتانسیل گرمایش جهانی و انتشار گاز گلخانه ای ـ GWP[4])
- اسیدیته شدن (پتانسیل اسیدیته شدن ـ AP[5])
- غیرقابل زیست شدن (پتانسیل غیرقابل زیست شدن ـ EP[6])
- سمیت انسان (پتانسیل سمیت انسان ـ HTP[7])
- تخریب لایه‌ی اوزون (پتانسیل تخریب لایه‌ی اوزون ـ ODP[8])

در فرایند ارزیابی فرایندهای محیط زیستی ناشی از اثرات چرخه حیات یک محصول، ارزیابی می‌تواند در مراحل ابتدایی یک فرایند محیط زیستی انجام شود که به آن ارزیابی واسطه یا نگرش (نقطه میانی) می‌گویند. در ادامه این اثرات باعث بروز آسیب دریکی از سه بخش حفاظت شده (سلامت انسان، منابع و کیفیت اکوسیستم) در (نقطه پایانی) مکانیزم‌های محیط زیستی می‌شوند(Consultant, 2013). به منظور ارزیابی اثرات محیط زیستی روش‌های گوناگونی توسعه داده شده است که در ادامه به چند روش کاربردی و فراگیر در کمی سازی ارزیابی اثرات محیط زیستی چرخه

1. Life Cycle Assessment
2. life Cycle Inventor
3. Abiotic Resource Depletion Potential
4. Global Warming Potential
5. Acidification Potential
6. Eutrophication Potential
7. Human Toxicity Potential
8. Ozon Depletion Potentia

حیات پرداخته می‌شود. تفاوت این روش‌ها در طبقه بندی اثرات، مدل‌های محیط زیستی و فاکتورهای ویژگی سازی است.

روش CML[1]

در سال ۲۰۰۱ مجموعه ای از دسته‌های اثر و روش‌های توصیف برای مراحل ارزیابی اثرات پتانسیل گرمایش جهانی یا انتشار گاز گاخانه ای که توسط گروهی از دانشمندان تحت رهبری CML (مرکز علوم محیط زیست از دانشگاه لیدن) ارائه گردید. روش ارزیابی اثرات با استفاده از روش CML-IAبرای رویکرد نقطه میانی تعریف شده است. دو نسخه از این روش CML-IA در نرم افزار SimaPro وجود دارد: نسخه ای با ده دسته اثر؛ و یک نسخه توسعه یافته شامل سایر تغییرات دسته اثر برای دوره‌های زمانی مختلف (Consultant, 2013).

روش CED[2]

روشی تک منظوره که انرژی مصرفی یک محصول را به طور تجمعی (مستقیم وغیر مسقیم) بررسی می‌کند (VDI-Richtlinie, V. D. I, 1997).

نقش ترکیب ژئوپلیمری بر اثرات محیط زیستی

مشخصات محیط زیستی به مقدار زیادی به مواد اولیه‌ی به کار رفته بستگی دارند. میان مواد اولیه‌ی جامد اصلی با منابع پرمصرف (مانند متاکائولن) و مواد اولیه‌ی جامد فرعی با منابع کم‌مصرف (مانند خاکستر بادی) 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 قابل توجهی وجود دارد. مرزهای سیستم برای مقایسه‌ی ارزیابی چرخه حیات ترکیبات ژئوپلیمرهای مختلف (مواد اولیه) در شکل ۵ نشان داده شده است که شامل فرآیندهای حمل‌ونقل نمی‌باشد (اسپرهم ونبی جاوید،۲۰۲۰).

به عنوان نمونه روش CML و جهت کمی سازی وارزیابی تاثیر دراین مقاله به کار رفته و تقاضای تصاعدی انرژی (CED،[MJ]) نیز در نظر گرفته می‌شود. جدول ۱ نتایج به دست آمده از نتایج ارزیابی چرخه حیات یک متر مکعب بتن ژئوپلیمری ، با استفاده از روش CML را نشان می‌دهد (Guinée et al., 2001) ، همچنین در جدول شماره ۱ نتایج حاصله جهت مقایسه هر کدام از دسته اثرهای تخریب محیط زیستی با یکدیگر ، نرمال‌سازی گردیده است. روش CML از چندین جزء محیط زیستی با شاخص‌های مربوط تشکیل می‌شود. دو شاخص محیط زیستی مهم تحلیل می‌شوند:

۱. پتانسیل گرمایش جهانی و انتشار گازهای گلخانه ای GWP، ([kg CO2 equivalent])
۲. پتانسیل تخریب منابع غیرزنده ADP، ([kg antimony equivalent])

در یک LCA مقایسه ای فرایند تولید یک متر مکعب بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی با مقاومت فشاری تقریبا یکسان ۳۳ مگاپاسکال (Esparham, A and Moradikhou, A. B, 2021)،میتوان دریافت که بتن ژئوپلیمری سهم خیلی

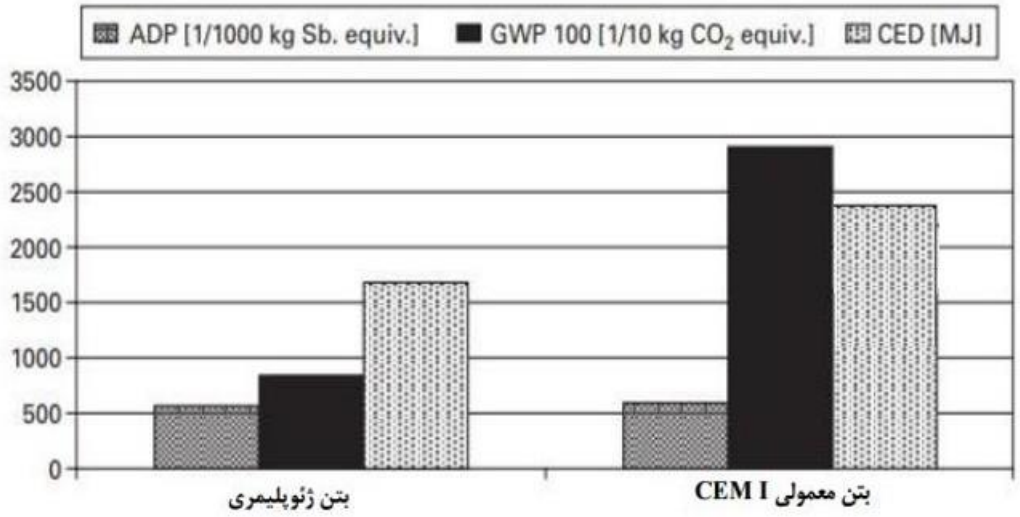
1. Center of Environmental Science of Leiden University
2. Cumulative Exergy Demand

کمتری در پتانسیل گرمایش جهانی وانتشار گازهای گلخانـه ای دارد. GWP بـتن ژئـوپلیمری نسـبت بـه بـتن سـیمان پرتلندی، تقریبا ۷۰% کمتر است و از نظر مصرف تجمعی انرژی (CED) بتن سیمان پرتلندی تقریبا ۲۱ ٪ بیشتر از بـتن ژئوپلیمری است(شکل ۴)، (Weil, M et al.,2009).

جدول ۱. نتایج ارزیابی چرخه حیات مرحلهٔ نرمال سازی تولید یک مترمکعب بتن ژئوپلیمری با استفاده از روش CML

طبقات اثر	مقدار
تخریب منابع غیرزنده	$۱,۳۱\times۱۰^{-۱۱}$
تخریب منابع غیرزیستی (سوخت فسیلی)	$۱,۳۸\times۱۰^{-۱۱}$
گرمایش جهانی(GWP)	$۱,۲۷\times۱۰^{-۱۱}$
تخریب لایه ازن(ODP)	$۱,۲۷\times۱۰^{-۱۴}$
سمیت انسان	$۹,۸\times۱۰^{-۱۱}$
سمیت رسوبات آب شیرین [1]	$۷,۰۷\times۱۰^{-۱۱}$
سمیت رسوبات دریایی[2]	$۲,۲۷\times۱۰^{-۹}$
سمیت زمین[3]	$۵,۹۱\times۱۰^{-۱۳}$
اکسیداسیون فتوشیمیایی[4]	$۳,۵۷\times۱۰^{-۱۲}$
اسیدیته شدن	$۸,۶۳\times۱۰^{-۱۲}$
اورتوفیکاسیون (غیرقابل زیست شدن)	$۵,۶۹\times۱۰^{-۱۲}$

1. Fresh water aquatic ecotax
2. Marine aquatic ecotoxicity
3. Terrestrial ecotoxicity
4. Photochemical oxidation

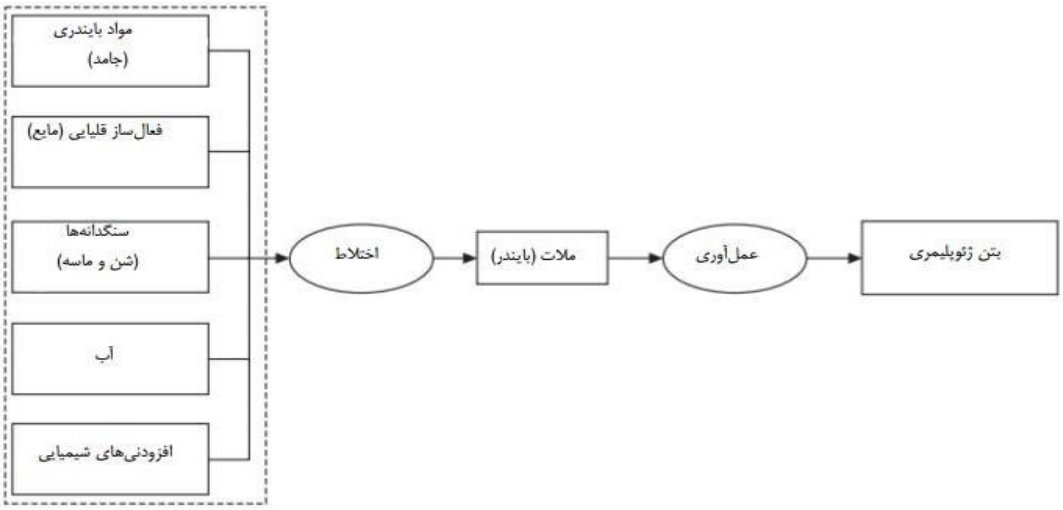


شکل٤. نتایج LCA برای بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی

مقایسه‌ی نسبت جرم مواد خام (شکل ۶، چپ) به سهم اثرات محیط زیستی با شاخص GWP 100 (شکل ۶، راست) برای دو ترکیب ژئوپلیمری مختلف، جنبه‌های مهم زیر را بیان می‌کند(Habert, G et al., 2011) :

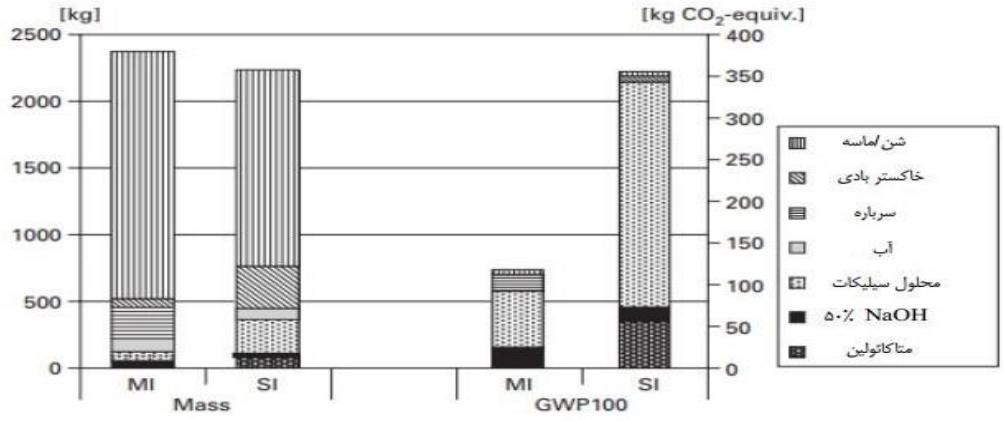
- ماسه و شن علی‌رغم مقدار بالای جرم خود، تنها اندکی درGWP (پتانسیل گرمایش جهانی و یا انتشار گازهای گلخانه ای) سهم دارند.
- خاکستر بادی (خاکستر بادی سخت یا نرم زغال سنگ) به طور قابل توجهی در GWP تاثیر ندارد.
- سرباره (فقط ترکیبی در اختلاط MI، شکل ۶) به طرز قابل ملاحظه‌ای در GWP سهم دارند.
- تامین آب تاثیر چندانی در GWP ندارد.
- محلول سیلیکاتی به طور قابل توجهی در GWP سهم دارد و مشخصات زیست‌محیطی را در هر دو اختلاط تحت تاثیر قرار می‌دهد.
- استفاده‌ی متعادل از محلول NaOH (۵۰٪) در هر دو اختلاط باعث تاثیر قابل توجهی بر GWP می‌شود.
- استفاده‌ی متعادل از متاکائولن (فقط در اختلاط SI) به طرز چشمگیری تاثیر بر GWP دارد.

استفاده از محلول سیلیکات و هیدروکسیدسدیم تا جایی که امکان دارد باید به حداقل کاهش یابد یا این مواد باید با یک فعال‌ساز سازگارتر با محیط‌زیست جایگزین شوند. این مسئله همچنین برای متاکائولن که باید برای کاهش دغدغه‌های زیست‌محیطی با گزینه‌هایی جایگزین شود، نیز صدق می‌کند. لازم به ذکر است که کیفیت کاربردی (عموما در دسترس بودن) متاکائولن از نظر خلوص بسیار بالا می‌باشد. از این رو باید سنجیده شود که آیا یک کیفیت پایین برای کاربردهای گسترده‌ی سیستم‌های ژئوپلیمری مناسب‌تر هست یا خیر. مصرف مواد اولیه‌ی فرعی مانند خاکسترهای بادی (بدون آسیاب و بدون نیاز به عمل آوری حرارتی) یا سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی (فقط نیازمند آسیاب)، مطلوب‌تر هستند، مشروط به اینکه این منابع ثانویه (پسماندها) موجود باشند و مقدار محدودیت‌های محیط زیستی از حد خود فراتر نروند.



شکل۵.مرزهای سیستم برای مقایسهٔ ترکیبات ژئوپلیمری مختلف

منبع: (Weil, M et al., 2009).



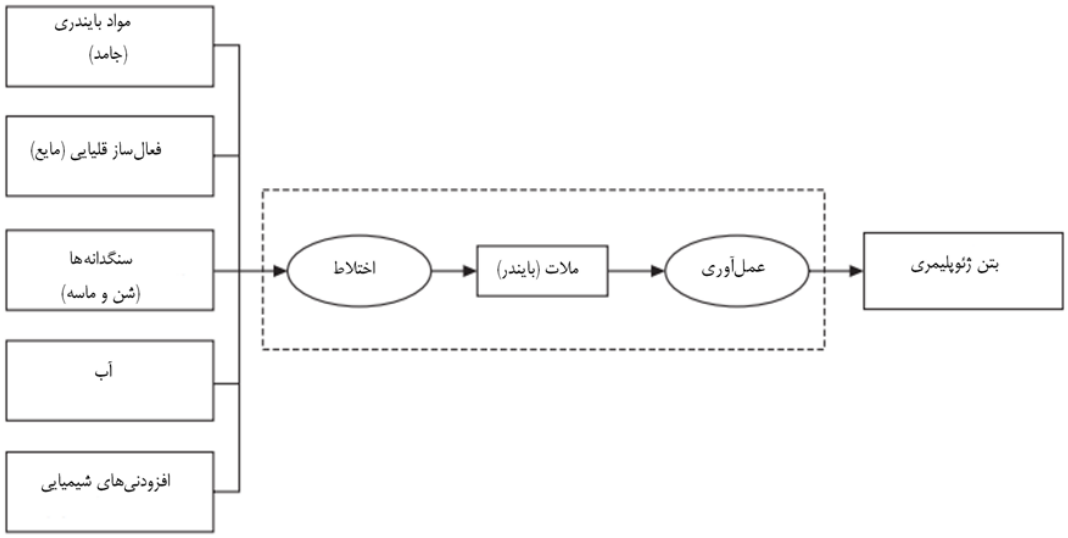
شکل ٦. مقایسهٔ نتایج جرم متعادل شده و GWP (پتانسیل گرمایش جهانی و انتشار گازهای گلخانه ای) برای دو ترکیب مختلف ژئوپلیمری (SI,MI)

نقش فرایند تولید ژئوپلیمر بر اثرات محیط زیستی

فرآیند تولید ژئوپلیمر (شکل ۷) را می‌توان به مراحل اصلی زیر تقسیم کرد (Weil, M et al., 2009):

- مخلوط کردن اجزا
- عمل‌آوری حرارتی

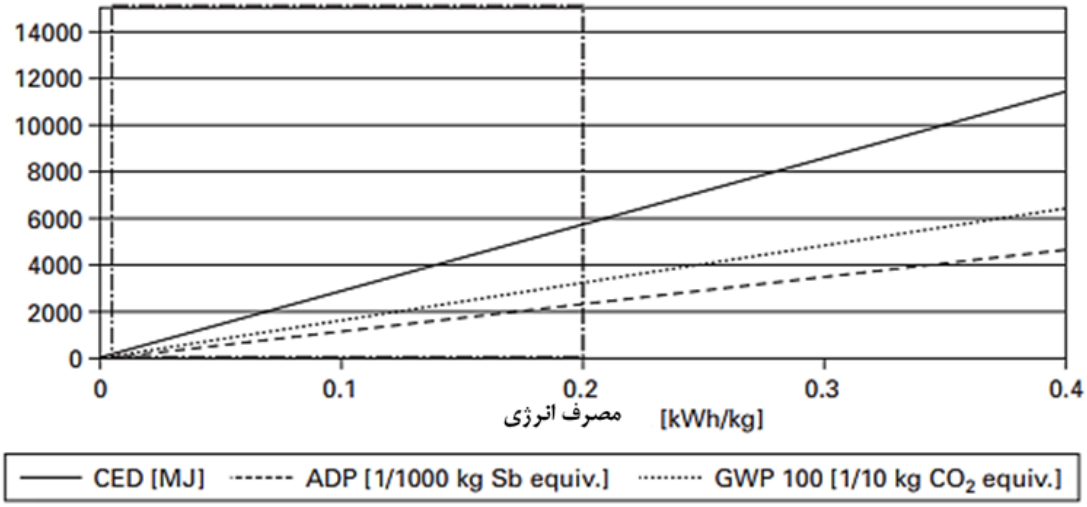
در حین قالب‌ریزی، فرآیند تراکم اضافی (با استفاده از میز ارتعاش) در ارزیابی چرخه حیات تولید ژئوپلیمردرنظر گرفته نشده است، اما سهم آن در اثرات محیط زیستی در موارد دیگر ناچیز درنظرگرفته می‌شود. این مورد برای فرآیند اختلاط نیز صدق می‌کند که کمتر از ۱٪ در اثرات محیط زیستی (تولید ژئوپلیمر) سهم دارد.



شکل۷. مرز سیستم برای شناخت فرآیندهای مربوط به تولید

در مقابل این مساله، فرآیند عمل‌آوری حرارتی ممکن است مشخصات محیط زیستی ژئوپلیمر را به طور قابل‌توجهی تغییر دهد. لازم به ذکر است که همه‌ی ترکیبات ژئوپلیمری به مرحله عمل‌آوری حرارتی نیاز ندارند. به ویژه ترکیبات ژئوپلیمری غنی از سرباره، در عرض چند ساعت یا چند روز در دمای اتاق بدون هیچ عمل‌آوری حرارتی به ویژگی‌های فنی مورد نظر می‌رسند (Duxson et al., 2007b; Bakharev et al., 1999).

مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی غالب (یا سایر مواد اولیه‌ی کند واکنش‌دهنده) به عمل‌آوری حرارتی نیاز دارند تا عمل آوری حرارتی ژئوپلیمرها افزایش یابد. محدوده‌ی دمایی متوسط معمولا بین ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد است. فرآیند عمل‌آوری حرارتی در محدوده دمایی مشابه، در صنعت بتن پیش‌ساخته که در آن بهبود مقاومت اعضای بتنی تسریع می-شود، نیز بسیار رایج می‌باشد. مصرف انرژی برای تولید محصول در شرکت‌های تولید کننده قطعات پیش‌ساخته‌ی بتنی، بین ۲۰ تا ۵۰۰ کیلو وات ساعت بر مترمکعب ، یا حدودا ۰,۰۱ تا ۰,۲ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم مورد نیاز ست. با فرض استفاده از یک اتاقک الکتریکی (<۱۰۰ کیلووات)، اثرات مصرف انرژی بر شاخص‌های محیط زیستی CED ، GWP و ADP در شکل ۸ مورد توجه قرار گرفته است(Menzel, 1991). بین مصرف انرژی و شاخص‌های محیط زیستی یک رابطه‌ی ساده‌ی خطی پیدا می‌شود. به علاوه محدوده‌ی مصرف انرژی برای عمل‌آوری حرارتی نشان داده شده است (خط نقطه‌چین، شکل ۸).



شکل ۸. تاثیر عمل‌آوری حرارتی (مصرف انرژی الکتریکی) بر اثرات شاخص‌های محیط زیستی(CED (تقاضای تصاعدی انرژی)، GWP (پتاسیل گرمایش جهانی)، ADP (پتانسیل تخریب منابع غیرزیستی))

بتن ژئوپلیمری در مقابل بتن معمولی

ژئوپلیمرها پتانسیل خوبی برای تولید بتن "سبز" و مصالح ساختمانی با اثر کربن پایین دارند. به منظور ارزیابی دقیق این پتانسیل، تأثیر محیطی ژئوپلیمرها باید با در نظر گرفتن تأثیر محصولات (یا پسماند)فرعی مورد استفاده در مطالعات ارزیابی چرخه حیات (LCA) مشخص شوند .

به علت عملکرد کربناسیونی متفاوت ،تغییرات دوام سیمان تقویت‌شده و بتن ژئوپلیمری، باید از دیدگاه فنی مورد بررسی قرار گیرد. با کمک یک مدل دوام با در نظرگیری شرایط محیط زیستی ، طول عمر هر سیستم با جزییات بیشتری می‌تواند ارزیابی شود. تحقیقات تاکنون نشان داده است که تولید اکثر انواع استاندارد بتن ژئوپلیمر تأثیر کمتری نسبت به بتن معمولی(استاندارد) در گرم شدن کره زمین دارد (Damineli, B. L et al.,2010; Duxson, P et al.,2007; Esparham, A., 2022).

مطالعات نشان می‌دهند که بتن ژئوپلیمر ساخته شده از خاکستر بادی منجر به انتشار CO2 کمتری نسبت به بتن معمولی می‌شود. بهترین راه برای رسیدن صنعت بتن به اهداف فعلی CO2، تولید بتن ژئوپلیمر از ماده خام با نسبت مولی مناسب Si / Al است که به عنوان ضایعات صنعتی شناخته می‌شود و تأثیراختصاصی ندارد. در واقع، فناوری ژئوپلیمر این امکان را فراهم میسازد که با توجه به نقطه نظر LCA ،به جای محصول فرعی ازپسماندها استفاده شود. سرباره آهن و فرونیکل منیزیم نمی تواند با فناوری سیمان مخلوط استفاده شود، اما می‌تواند به عنوان اتصال دهنده‌های ژئوپلیمربه کار برده شود.

در مورد بتن ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن نشان داده شده است که به دلیل نسبت Si / Al کم در متاکائولن ، مقدار زیادی سیلیکات سدیم مورد نیاز است که باعث تأثیرات زیست محیطی زیادی می‌شود. (Esparham, A et al.,2020).

نتیجه‌گیری

شهر پایدار آینده باید نیازهای انسان را پوشش دهد و کیفیت زندگی برتر را حفظ کند. با پرسیدن این سوال که ، تعریف پایداری در آینده چه خواهد بود ،تقریباً می‌توان فهمید که اصل "بدون پسماند" و تولید مواد جدید با اثر محیط زیستی کمتر از اولویت‌ها خواهد بود.از طرفی دیگر صنعتی سازی برای مناطق شهری بعنوان یک رویکرد اساسی در توسعه پایدار اقتصادی مطرح است . تداخل صنعتی سازی و آسیب‌های محیط زیستی از مشکلات مطرح در زمینه توسعه پایدار می‌باشد . بعنوان مثال فرایندهای تولید و پسماند حاصل از صنایعی همچون تولید سیمان ، ذوب آهن ،معادن استخراج زغال سنگ ، ویا پسماندهای کشاورزی (باگاس ، شلتوک برنج ، گل آهک ...) باعث انتشار آلایندگی زیست محیطی به آب ،خاک و هوای مناطق پیرامونی مانند شهرها می‌شود. برای توسعه‌ی بیشتر مواد سازگار با محیط‌زیست، طراح مواد به دانشی در مورد محرک‌های محیط زیستی مواد جدید و همچنین دانش اثرات محیط زیستی مواد مرسوم درساخت ساز، نیاز دارد. ازاین رو در این مقاله سعی بر این شده است که به طور خلاصه مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از فناوری ژئوپلیمر در مصالح پایدار در تبدیل مواد خام گوناگون یا پسماندها به مصالح سبز و پایدار به منظور توسعه پایدارشهری بارویکرد کاهش انتشار آلایندگی‌های زیست محیطی و ارزیابی چرخه عمر بررسی گردد . مطالعات نشان دادندکه فرایند تولید ژئوپلیمری برخلاف تولید سیمان پرتلند، به مواد معدنی طبیعی پردازش شده ، پسماندها و محصولات فرعی صنعتی تکیه می‌کنند ، تا عوامل اتصال دهنده را فراهم کنند. از طرفی بتن ژئوپلیمری علاوه بر کاهش انتشارات زیست محیطی و مصرف انرژی،خواص شیمیایی و فیزیکی مطلوبی نسبت به بتن معمولی (سیمان پرتلند) نشان می‌دهند ، درنتیجه می‌توان مصالح ژئوپلیمر بعنوان مصالحی سبز و پایدار جهت استفاده در ساختمان‌های سبز شهرهای آینده در نظر گرفت. لازم به ذکر ست با توجه به مقالات و مطالعات انجام شده ارزیابی چرخه عمر بتن ژئوپلیمری ،جهت مقایسه کردن دسته اثرهای تخریب محیط زیستی می‌توان از نرمال‌سازی نتایج استفاده کرد که البته مرحله نرمال‌سازی بر اساس استانداردهای ISOدر بخش ارزیابی اثرات زیست محیطی چرخه عمر ، اختیاری می‌باشد. با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی بسیار مطلوب مصالح ژئوپلیمری، می‌توان از آن بعنوان جایگزین مناسب مصالح رایج در سازه‌هایی که نیاز به دوام و عملکرد شیمیایی بالایی دارند (مانند سازه‌هایی که تحت حملات سولفاتی یا کلرایدی شدید هستند)، استفاده کرد.

با توجه به بررسی مطالعات گردآوری شده در این مقاله جهت کاهش بیشتر بار آلایندگی زیست محیطی و مصرف انرژی صنعت ساخت ساز وتولید مصالح پایدار، لیستی از موارد زیرجهت تحقیقات در آینده پیشنهاد می‌گردد :

۱. استفاده از روش سنتز سدیم سیلیکات از پسماند کشاورزی در تحقیقات آینده به منظور کاهش مصرف انرژی و بار آلایندگی زیست محیطی بتن ژئوپلیمری .
۲. ترکیب مواد آلومیناسیلیکاتی مختلف جهت کاهش مصرف سدیم سیلیکات در طرح اختلاط (مانند ترکیب متاکائولن و خاکستر بادی جهت افزایش نسبت SI/AL) .
۳. استفاد کردن از سیمان ژئوپلیمری بعنوان جایگزین مناسب سیمان پرتلند در صنعت ساخت ساز ، (خصوصا مواردی که نیاز به پایداری شیمیایی وخواص فیزیکی بسیار مطلوبی می‌باشد) .
۴. استفاده از منابع آلومینا سیلیکاتی بومی هر منطقه بعنوان موضوعی بدیع درپژوهش‌های آتی.
۵. علی‌رغم مزایای مصالح ژئوپلیری نسبت به مصالح رایج ، برای بهبود فناوری و تقویت پتانسیل سیستم‌های

ژئوپلیمری در کاربردهای تجاری، به منظور کاهش اثرات زیست محیطی در شـهر پایـدار آینـده، بـه مطالعـات بیشتری نیاز است.

References

Amininejad, G., Beikmohammadi, H., Hosseini Abari, S. (2018). Analyzing the Level of Development in Subdistricts of South Pars Installations Region in Bushehr Province of Iran. *Village and Development*, 11(3), 143-172. (*in Persian*)

Bakharev, T., Sanjayan, J.G., and Cheng, Y.-B. (1999). Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 29(10), 1619–1625.

Beattie, K. (2017). Sustainable Architecture and Simulation Modelling. *Dublin Institute of Technology Dublin Ireland*.

Bielek, B. (2016). Green building–towards sustainable architecture. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 824, pp. 751-760). Trans Tech Publications Ltd.

Branscomb, L. M. (2006). Sustainable cities: Safety and security. *Technology in Society*, *28*(1-2), 225-234.

Chevalier, B., Reyes, T., & Laratte, B. (2011). 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.

Consultant, P. E. (2013). SimaPro Database Manual Methods Library. Netherlands: Product Ecology Consultant's Report, Version, 2.

Damineli, B. L., Kemeid, F. M., Aguiar, P. S., & John, V. M. (2010). Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites*, *32*(8), 555-562.

Davidovits, J. (1993). From ancient concrete to geopolymers. *Arts Metiers Mag*, *180*, 8-16.

Davidovits, J. (2008). They Built the Pyramids, published by Institute Geopolymer. *Saint Quentin, France*.

DESA, U. (2018). Population Division. 2016. *International Migration Report 2015: A Global Assessment*.

Dickens, C., Smakhtin, V., McCartney, M., O'Brien, G., & Dahir, L. (2019). Defining and quantifying national-level targets, indicators and benchmarks for management of natural resources to achieve the sustainable development goals. *Sustainability*, *11*(2), 462.

Dreyer, L.C., Niemann, A.L., and Hauschild, M.Z. (2003). Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99 – Does it matter which one you choose? *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(4), 191–200.

Duxson, P., Mallicoat, S.W., Lukey, G.C., Kriven, W.M., and van Deventer, J.S.J. (2007b). The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 292(1), 8–20.

Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *cement and concrete research*, *37*(12), 1590-1597.

Esparham, A. (2022). Synthesis of Environmentally Friendly Activated Alkali Concrete (Geopolymer) Based on Bentonite. *Journal of Environmental Friendly Materials*, *6*(2), 1-8.

Esparham, A. (2022). A review of the features of geopolymer cementitious composites for use in green construction and sustainable urban development. *Central Asian Journal of Environmental Science and Technology Innovation*, *3*(3), 64-74.

Esparham, A. (2021). Investigation of the Effects of Nano Silica Particles and Zeolite on the Mechanical Strengths of Metakaolin-Based Geopolymer Concrete. *International Journal of Innovation in Engineering*, *1*(4), 82-95.

Esparham, A. (2020). Factors Influencing Compressive Strength of Metakaolin-based Geopolymer Concrete. *Modares Civil Engineering journal*, *20*(1), 53-66. (*in Persian*)

Esparham, A. (2022). Investigation of properties of geopolymers for use in sustainable materials. *Basparesh*, (*in Persian*).

Esparham, A., & Moradikhou, A. B. (2021). A Novel Type of Alkaline Activator for Geopolymer Concrete Based on Class C Fly Ash. *Advance Researches in Civil Engineering*, *3*(1), 1-13.

Esparham, A., & Moradikhou, A. B. (2021). A Novel Type of Alkaline Activator for Geopolymer Concrete Based on Metakaolin. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, *5*(2).

Esparham, A., & Moradikhou, A. B. (2021). Factors Influencing Compressive Strength of Fly Ash-based Geopolymer Concrete. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, *53*(3), 21-21.

Esparham, A., & Ghalatian, F. (2022). The features of geopolymer concrete as a novel approach for utilization in green urban structures. *Journal of Composites and Compounds*, *4*(11), 89-96.

Esparham, A., Hosseni, M. H., Mousavi Kashi, A., Emami, F., & Moradikhou, A. B. (2020). Impact of Replacing Kaolinite with Slag, Fly Ash and Zeolite on the Mechanical Strengths of Geopolymer Concrete Based on Kaolinite. *Building Engineering & Housing Science*, *13*(24), 9-15.

Esparham, A., Moradikhou, A. B., & Jamshidi Avanaki, M. (2020). Effect of Various Alkaline Activator Solutions on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, *4*(2), 115-123.

Esparham, A., Moradikhou, A. B., & Mehrdadi, N. (2020). Introduction to synthesise method of Geopolymer concrete and corresponding properties. *Journal of Iranian Ceramic Society*, *4*(64), 13-24. (*in Persian*)

Esparham, A., Moradikhou, A. B., Andalib, F. K., & Avanaki, M. J. (2021). Strength characteristics of granulated ground blast furnace slag-based geopolymer concrete. *Advances in concrete construction*, *11*(3), 219-229.

Esparham, A., Vatin, N. I., Kharun, M., & Hematibahar, M. (2023). A Study of Modern Eco-Friendly Composite (Geopolymer) Based on Blast Furnace Slag Compared to

Conventional Concrete Using the Life Cycle Assessment Approach. *Infrastructures*, *8*(3), 58.

Finlayson, D. (2001). Sustainable development: Economics and policy.

Guinée *et al*. (2001). Life cycle assessment. An operational guide to the ISO standards. Part1: LCA in perspective. Part 2a: Guide. Part 2b: Operational annex. Part 3: Scientific background. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM) and Centre of Environmental Science, Leiden Niederlande.

Habert, G., De Lacaillerie, J. D. E., & Roussel, N. (2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of cleaner production*, *19*(11), 1229-1238.

Hosseini, M. H., Mousavi Kashi, A., Emami, F., & Esparham, A. (2020). Effect of Simple and Hybrid Polymer Fibers on Mechanical Strengths and High-temperature Resistance of Metakaolin-based Geopolymer Concrete. *Modares Civil Engineering journal*, *20*(2), 0-0.

Menzel, U. (1991). Heat treatment of concrete. *Concrete plant + precast technology*, 12, 92–96.

Mohammadi ASHNANI, M., MOHAMMADI ASHNANI, A., HASANI, E. (2018). A p roposal for a c omparative assessment p rocess and e nvironmental p lanning for s ustainable r ural d evelopment in Iran. *Village and Development*, 11(1), 77-100. (*in Persian*)

Moradikhou, A. B., Esparham, A., & Avanaki, M. J. (2019). Effect of Hybrid Fibers on Water absorption and Mechanical Strengths of Geopolymer Concrete based on Blast Furnace Slag. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, *3*(4), 195-211.

Nabi Javid, M., & Esparham, A. (2021). A review of life cycle assessment (LCA) in quantifying environmental impacts of OPC and PFA concrete products. *Civil and Project Journal*, *3*(2), 22-31. (*in Persian*)

Richtlinie, V. D. I. (1997). 2222: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. *Berlin–Wien–Zürich: Beuth-Verlag*.

Sagbansua, L., & Balo, F. (2017). A novel simulation model for development of renewable materials with waste-natural substance in sustainable buildings. *Journal of Cleaner Production*, *158*, 245-260.

Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Gonzalo, M. R., Santonja, G. G., Roudier, S., & Sancho, L. D. (2015). Best available techniques (BAT) reference document for the production of pulp, paper and board. *Eur. Comm*, *906*.

Van den Heede, P., & De Belie, N. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites*, *34*(4), 431-442.

Weil, M., Dombrowski, K., & Buchwald, A. (2009). Life-cycle analysis of geopolymers. In *Geopolymers* (pp. 194-210). Woodhead Publishing.

Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International journal of mineral processing*, *59*(3), 247-266.

Yasnolob, I., Chayka, T., Gorb, O., Demianenko, N., Protas, N., & Halinska, T. (2018). The innovative model of energy efficient village under the conditions of sustainable development of ecological territories.