

مروری بر ارزیابی چرخه عمر (LCA) جهت اندازه‌گیری تأثیرات محیط‌زیستی بتن ژئوپلیمری

علیرضا اسپرهم^{۱*}، مسعود نبی جاوید^۲، ناصر مهرداد^۳

۲۰۱ دکترای مهندسی سیستم‌های انرژی _ انرژی و محیط زیست، گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳ استاد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۳ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۰۴/۲۸)

چکیده

بتن به علت دارا بودن ویژگی‌های خاص، پرمصرف‌ترین ماده در صنعت ساخت و ساز بعد از آب است. اما فرآیند تولید سیمان پرتلند معایب عمده محیط‌زیستی به دنبال دارد که این مورد ۸ درصد از انتشار CO_2 جهانی (۴ میلیارد تن در سال) را تشکیل می‌دهد. از این رو نیاز به استفاده از یک جایگزین برای سیمان‌های رایج (پرتلند) ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک عامل سیمانی جدید و دوستدار محیط‌زیست، جهت جایگزینی برای سیمان پرتلند مطرح شده است. ژئوپلیمرها، زنجیره‌ها یا شبکه‌هایی از مولکول‌های معدنی هستند که با پیوندهای کووالانسی اتصال یافته‌اند و از ترکیب دو بخش اصلی منبع آلومیناسیلیکاتی (مواد خام ثانویه) و محلول فعال‌کننده قلیایی، تشکیل می‌شوند. آن‌ها می‌توانند ویژگی‌های فنی برجسته‌ای همچون مقاومت مکانیکی بالا، مقاومت شیمیایی مناسب و یا مقاومت حرارتی بالایی را از خود نشان دهند. این مساله توسط تحقیقات مختلفی مستند شده است که عملکرد خوب ژئوپلیمرها، می‌تواند با استفاده از مواد خام ثانویه نظیر پسماندهای صنعتی مانند خاکستر بادی یا سرباره به دست آید. این موضوع، بیانگر توجه فراوان به این فناوری می‌باشد. استفاده از پسماند برای تولید ژئوپلیمر، نه تنها می‌تواند مشکل از بین بردن ضایعات را حل کند، بلکه مصرف مواد خام ثانویه را نیز کاهش می‌دهد. در این مقاله، مروری بر اثرات تولید ژئوپلیمر از دیدگاه محیط‌زیستی انجام می‌شود. علاوه بر این، محرک‌های حاکم بر اثرات اکولوژیکی ژئوپلیمرها، جهت ارائه راهنما برای توسعه ترکیبات ژئوپلیمری برای کاربردهای مختلف مورد بحث قرار می‌گیرد.

کلید واژه‌ها: ارزیابی چرخه عمر، ژئوپلیمر، بتن، سیمان، پسماند

سرآغاز

در سال‌های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک عامل سیمانی جدید و دوستدار محیط‌زیست، به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند مطرح شده است. ژئوپلیمرها به سرعت سخت می‌شوند و مقاومت اولیه بالایی دارند. مقاومت فشاری به عنوان یکی از مشخصه‌های مهم بتن، متأثر از پارامترهای مختلفی است. در بتن ژئوپلیمری 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 را دارا می‌باشند. ساختار نهایی و خصوصیات فیزیکی آنها به چندین پارامتر، مانند محتوای آب، اندازه ذرات، تاریخچه حرارتی، محتوای فلزات قلیایی و درجه شکل‌گیری بستگی دارد. ژئوپلیمرها همچنین ویژگی‌هایی همچون، نفوذپذیری مشابه سیمان پرتلند ^{۹-۱۰} سانتی‌متر بر ثانیه، انبساط کم مواد قلیایی، انقباض کم، مقاومت حرارتی بسیار بالا و مقاومت شیمیایی بسیار مناسبی را از خود نشان می‌دهند (Esparham & Moradikhou., 2021; Moradikhou et al., 2019; Esparham et al., 2020). به دلیل افزایش نگرانی‌های محیط‌زیستی و هزینه‌های مواد اولیه، باید به دنبال یک روش بازیافت برای مقادیر روبه افزایش پسماندهای صنعتی بود تا از تخلیه‌ی گسترده‌ی پسماند جلوگیری شود و مساله کمبود سیمان را نیز بتوان بهبود بخشید. به همین جهت، تحقیق و توسعه در زمینه‌ی ژئوپلیمرها در حال حاضر تولد دوباره‌ی را تجربه می‌کند. سیستم‌های ژئوپلیمری در اصل برای استفاده از پسماندهای صنعتی (مانند خاکستر بادی سخت یا نرم زغال‌سنگ، سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی، گل‌سرخ) به عنوان منبع ثانویه مناسب می‌باشند. اگر چه تولید ژئوپلیمر مناسب بر پایه‌ی منابع ثانویه، در مقیاس‌های آزمایشگاهی و شبه صنعتی انجام شده است، اما در مورد اثرات اکولوژیکی تولید ژئوپلیمر، به ویژه در مقایسه با سیستم‌های مقرون به صرفه، دانش بسیار اندکی موجود است. با یک دید کمی، در ادبیات فنی می‌توان به برخی تخمین‌ها یا محاسبات تقریبی از جنبه‌های محیط‌زیستی واحد (بدون مرزهای سیستمی واضح) دست یافت. اغلب آن‌ها به انتشار گاز کربن دی‌اکسید اشاره کرده و تولید ژئوپلیمر (بتن) را با تولید سیمان پرتلند (بتن) مقایسه می‌کنند. کاهش بالقوه‌ی تخمینی پتانسیل کاهش انتشارات دی اکسید کربن توسط سیستم‌های ژئوپلیمری از مقدار متوسط ۲۰٪ تا مقدار بلند پروازانه ۸۰٪ تخمین زده

می‌شود (Duxson et al., 2007c; Esparham & Moradikhou., 2021; Nowak, 2008).

اما ارزیابی مواد جدید، تنها بر اساس انتشار گاز کربن دی‌اکسید کافی نیست. انتشار سایر گازها و مصرف منابع نیز باید برای دستیابی به درک جزئیات بیشتر، در نظر گرفته شوند. رایج‌ترین رویکرد برای برآورد اثرات محیط‌زیستی بالقوه، روش ارزیابی چرخه‌ی عمر LCA (Life Cycle Assessment) می‌باشد. LCA یک رویکرد چند جانبه است و امکان بررسی کل گریانه تولیدات و خدمات را فراهم می‌کند.

ارزیابی چرخه‌ی عمر

• روش‌شناسی ارزیابی چرخه‌ی عمر

ارزیابی چرخه عمر (LCA) 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 اصلی تشکیل شده است:

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

بر اساس استاندارد، ایزو ۱۴۰۴۰ اولین مرحله تعریف اهداف و قلمرو مطالعات است. موارد عمده‌ای که در این مرحله بدان پرداخته می‌شود، شامل تعریف اهداف اصلی، انتخاب واحد عملیاتی، تشریح آن و تعیین قلمرو مطالعات است. در این گام اثرات بالقوه ناشی از مصرف منابع محیطی و تولید آلاینده‌ها بر انسان و طبیعت ارزیابی می‌گردد. مقایسه محدوده کاملی از تأثیرات محیط‌زیستی مرتبط با محصولات و خدمات و کمی‌سازی تمامی نهاده‌ها و خروجی‌های جریان مواد و ارزیابی این مساله که چگونه جریان این مواد می‌تواند بر محیط تأثیر گذارد (Chevalier, Reyes, & Laratte, 2011). این اطلاعات برای بهبود فرایندها، پشتیبانی از سیاست‌ها و ارایه مبانی مناسب برای اتخاذ تصمیمات آگاهانه مفید خواهد بود:

- شناسایی فرصت‌ها به منظور بهبود عملکرد محیط‌زیستی

در طول هر پروژه ارزیابی اثرات محیط‌زیستی چرخه حیات مرحله اول (طبقه‌بندی و ویژگی‌سازی) اجباری است و مرحله دوم (نرمال‌سازی و وزن‌دهی) اختیاری است.

• طبقه‌بندی

در این مرحله، مداخلات محیط‌زیستی توصیف شده و کمی شده در تجزیه و تحلیل فهرست موجودی بر یک اساس کمی خالص به طبقات اثر پیش انتخاب شده اختصاص می‌یابد. همان‌طور که ذکر شد در طبقه‌بندی اثرات، مداخلات محیط‌زیستی به طبقه اثرات پیشنهادی اختصاص می‌یابد.

• ویژگی‌سازی

در مرحله تعیین ویژگی ارزیابی اثر مداخلات محیط‌زیستی تخصیص داده شده به یک طبقه اثر مشخص در بخش طبقه‌بندی بر اساس واحد متعارف برای همان طبقه کمی می‌شوند و مجموع به صورت یک نمره (نتیجه شاخص) ارایه می‌شود. نتیجه برای هر طبقه اثر مشخص به یک نتیجه شاخص طبقه اشاره داشته و مجموعه کامل نتایج شاخص طبقه به عنوان پروفایل محیط‌زیستی مطرح می‌شود.

• نرمال‌سازی

براساس استاندارد ایزو ۱۴۰۴۲ نرمال‌سازی نتایج ارزیابی چرخه حیات یک محصول به عنوان «محاسبه دامنه نتایج شاخص نسبت به اطلاعات مرجع» تعریف می‌کند. اطلاعات مرجع ممکن است با جامعه ارایه شده (مانند اروپا یا جهان)، فرد (مانند شهروند) یا سایر سیستم‌ها در دوره زمانی ارایه شده، مرتبط باشد. هدف اصلی نرمال‌سازی، درک بهتر از اهمیت و دامنه نسبی نتایج برای هر سیستم محصول در مطالعه می‌باشد. نتیجه مرحله نرمال‌سازی نشان می‌دهد که چرخه حیات محصول در کدام گروه به هر حال اثر (مانند گرم شدن زمین یا اسیدسازی) بار محیط‌زیستی بیشتری تولید می‌کند.

• وزن‌دهی

وزن‌دهی یک گام از ارزیابی اثر است که در آن طبقات اثر در یک یا چند مجموعه جمع می‌شود. گروه‌بندی طبقات اثر برای تسهیل تفسیر نتایج انجام می‌شود که انجام آن اختیاری است که دو رویکرد برای آن در دسترس است: دسته‌بندی کردن و رتبه‌بندی

- محصولات در نقاط مختلف چرخه حیات آنها.
- آگاهی دادن به تصمیم‌گیرندگان در صنایع، سازمان‌های دولتی یا غیردولتی (به عنوان مثال، به منظور برنامه‌ریزی راهبردی، اولویت‌بندی، طراحی یا طراحی مجدد محصول یا فرآیند).
- انتخاب شاخص‌های مرتبط با عملکرد محیط‌زیستی، از جمله فنون اندازه‌گیری بازاریابی (مانند اجرای یک طرح برچسب‌گذاری محیط‌زیستی، ادعای محیط‌زیستی، یا ایجاد اعلامیه محیط‌زیستی محصول).
- پشتیبانی از استراتژی‌های تجاری و R&D برای تولید یا طراحی فرآوری و بیان جنبه‌های محیط‌زیستی تولید.
- کاربرد فزاینده LCA برای برچسب‌ها محیط‌زیستی (برچسب‌هایی بر مبنای LCA تعریف شده است که نشان‌دهنده مبانی حایز اهمیت بیشتر برای ارزیابی جنبه‌های محیط‌زیستی نسبی محصولات رقابتی می‌باشد).
- گواهی‌های مستقل نشان‌دهنده فعالیت‌های شرکت برای تولید محصولات مطلوب‌تر از نظر محیط‌زیستی و ایمن‌تر برای مصرف‌کنندگان می‌باشد.
- فرآیند LCA می‌تواند به تصمیم‌گیران در انتخاب محصول یا فرآیند با کمترین اثرات محیط‌زیستی کمک کند.
- بررسی اثرات محیط‌زیستی همراه با یک یا چند محصول یا فرآیند.
- کمک به دریافت پذیرش افراد ذی‌نفع (جامعه و غیره) برای یک برنامه طرح ریزی شده.
- کمی کردن اثرات انتشار به هوا، آب و زمین را در هر مرحله از چرخه حیات.
- نشان دادن داده‌های انتقال جریان‌ات محیط‌زیستی، از یک محیط به محیط دیگر.
- ارزیابی سیستماتیک پیامدهای محیط‌زیستی یک محصول.
- کمک به شناسایی تغییرات مهم ناشی از اثرات محیط‌زیستی در میان مراحل چرخه حیات و محیط‌های هوا، آب، زمین.
- شناسایی اثرات بر یک یا چند حوزه محیط‌زیستی ویژه (هوا، آب، زمین).
- استانداردهای ISO در بخش ارزیابی اثرات محیط‌زیستی چرخه حیات چهار فرایند زیر را به منظور دسته‌بندی اطلاعات سیاهه توصیه کرده است:

• طبقه‌بندی^(۱) و ویژگی‌سازی^(۲)

• نرمال‌سازی^(۳) و وزن‌دهی^(۴)

کردن که بر اساس ISO به صورت زیر تعریف می‌شود:
دسته‌بندی کردن شاخص‌های طبقه بر اساس عددی مانند تعیین ویژگی مثل انتشار یا منابع یا مقیاس‌های فضایی جهانی، منطقه‌ای و محلی.

رتبه‌بندی کردن شاخص‌های طبقه بر اساس مقیاس ترتیبی مانند روش سلسله مراتبی مثل اولویت زیاد، متوسط و کم (رتبه‌بندی بر اساس انتخاب‌های ارزشی است).

برای گروه‌بندی اثر تغییر اقلیم در نیروگاه اتمی بوشهر، از دو روش مقیاس‌های فضایی و تعیین ویژگی (محل پذیرنده یا استخراج) استفاده شده است. علت این انتخاب این است که نظر کارشناسی در گروه‌بندی به حداقل برسد. به این ترتیب در مقیاس فضایی طبقه اثر تغییر اقلیم دارای مقیاس جهانی است و در تعیین ویژگی انتشار، انتشار به هوا در نظر گرفته می‌شود.

• تفسیر چرخه حیات

تفسیر چرخه حیات مرحله‌ای است که در آن نتایج تجزیه و تحلیل ارزشیابی شده و نتیجه‌گیری کلی انجام می‌شود. براساس استاندارد ایزو ۱۴۰۴۳ تفسیر نتایج براساس دو هدف انجام می‌گیرد:

- تحلیل و تفسیر روشن نتایج، توضیح محدودیت‌ها، ارایه توصیه‌هایی بر اساس مراحل گذشته
- ارایه‌های کامل و قابل فهم از نتایج بررسی چرخه حیات مطابق باهدف و برد مطالعه

• روش‌های کمی ارزیابی اثرات چرخه حیات

ارزیابی تاثیر، اثرات محیط‌زیستی بالقوه مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های محیط‌زیستی تعریف شده در LCI را مورد سنجش قرار می‌دهد. با اعمال مدل‌های مختلف برای مکانیزم‌های محیط‌زیستی (مانند گرمایش جهانی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای)، فهرست (LCI) به صورت اثرات محیط‌زیستی بالقوه تعبیر شده است. برای «تعبیر» روش‌های مختلف با نقاط قوت و ضعف گوناگونی وجود دارد (Dreyer et al., 2003). مجموعه‌ای از انواع تاثیر پرکاربرد (و شاخص‌ها) در زیر آورده شده است:

- تخریب منابع غیرزیستی (پتانسیل تخریب منابع غیرزنده-ADP^(۵))

- تغییر آب‌وهوا (پتانسیل گرمایش جهانی-GWP^(۶))

- اسیدیته شدن (پتانسیل اسیدیته شدن-AP^(۷))

- غیرقابل زیست شدن (پتانسیل غیرقابل زیست شدن-EP^(۸))

- مسمومیت انسان (پتانسیل مسمومیت انسان-HTP^(۹))
- تخریب لایه‌ی اوزون (پتانسیل تخریب لایه‌ی اوزون-ODP^(۱۰))

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

• روش ReCiPe

این روش جانشین روش‌های سازگار 99 Eco-indicator و CML-IA می‌باشد که تاثیرات محیط‌زیستی موثر بر انسان و مصرف منابع را کمی می‌کند. هدف در آغاز توسعه، تکمیل رویکرد مشکل‌گرا در CML-IA و رویکرد آسیب‌گرا 99 Eco-indicator می‌باشد. رویکرد آسیب‌گرا، دسته‌های اثر را هم در سطح نقطه میانی و هم نقطه پایانی تعریف می‌کند. در سطح نقطه میانی به هجده دسته اثر می‌پردازد و در سطح نقطه پایانی، بسیاری از دسته‌های اثر نقطه میانی توسط ضرب و جمع عوامل خسارت‌ها به سه دسته نقطه پایانی شامل سلامت انسان، اکوسیستم و هزینه‌های مازاد منابع تقسیم می‌شود (Goedkoop et al., 2009).

• روش IPCC

روش IPCC این امکان را می‌دهد که ارزیابی کمی از تاثیرات گازهای گلخانه‌ای با توجه به عملکرد CO₂ آزاد شده، در افق زمانی ۱۰۰ ساله ارایه شود (Goedkoop et al., 2009; Solomon, 2007; Manning, Marquis, & Qin, 2007).

• روش CML

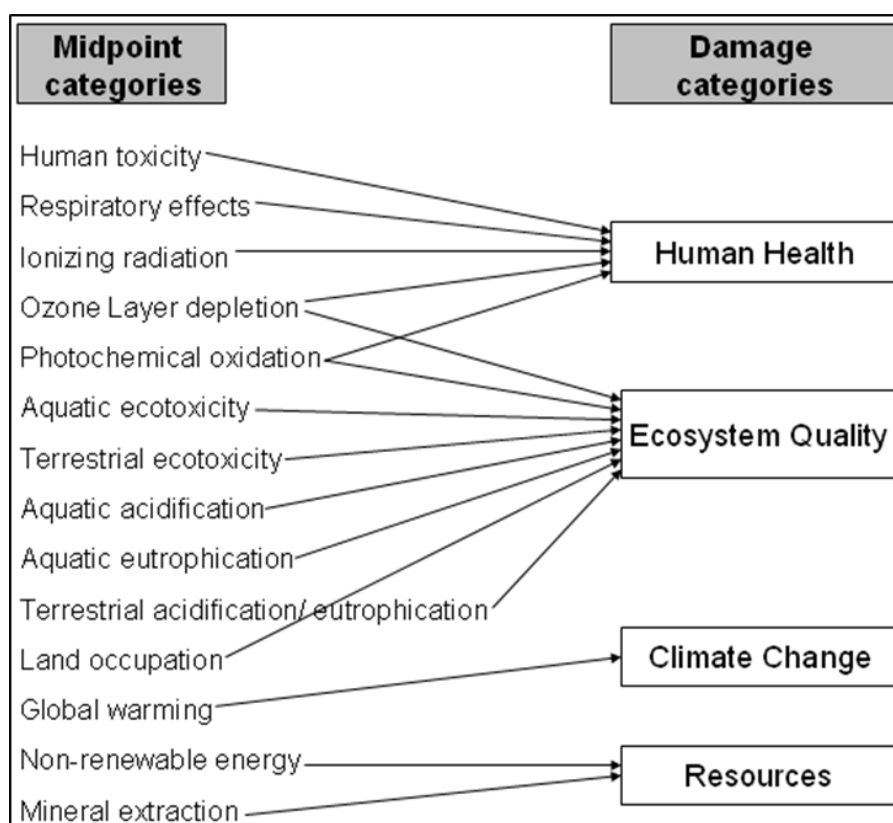
در سال ۲۰۰۱ مجموعه‌ای از دسته‌های اثر و روش‌های توصیف برای مراحل ارزیابی اثرات توسط گروهی از دانشمندان تحت رهبری CML^(۱۱) (مرکز علوم محیط زیست از دانشگاه لیدن)

شده، ترکیبی از روش‌های Eco-indicator، CML و IPCC است که نتایج مرحله سیاهه نویسی چرخه حیات را در قالب سلامتی انسانی، کیفیت اکوسیستم، تغییرات اقلیم و منابع طبیعی مورد ارزیابی قرار می‌دهد (Consultant, 2013). براساس شکل (۱) در این روش نتایج سیاهه چرخه حیات را به وسیله ۱۴ گروه اثر نقطه میانی به ۴ گروه آسیب متصل می‌کند.

ارایه گردید. روش ارزیابی اثرات با استفاده از روش CML-IA برای رویکرد نقطه میانی تعریف شده است. دو نسخه از این روش 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 IMPACT

این روش که توسط موسسه تکنولوژی فدرال سوئیس توسعه داده



شکل (۱): نتایج سیاهه چرخه حیات براساس روش IMPACT

نرم افزارهای ارزیابی چرخه حیات

ارزیابی چرخه حیات با اهداف تجاری برای بررسی اثرات محیط‌زیستی احتمالی محصولات، معرفی محصولات دوستدار محیط‌زیست و همچنین با اهداف آموزشی کاربرد بسیاری پیدا کرده است و برای انجام آن نرم‌افزارهای متعددی ایجاد شده و توسعه یافته‌اند. در جدول (۱) خصوصیات برخی از نرم‌افزارهای ارزیابی چرخه حیات گردآوری شده است.

• روش BEES

این روش براساس اطلاعات و استانداردهای ایالات متحده آمریکا طراحی شده است و ارزیابی چرخه حیات را بر مبنای ترکیب هزینه‌های مواد ساختمانی و ساختمان‌سازی به منظور ایجاد یک محصول متعادل و بهترین بازده اقتصادی و محیط‌زیستی فراهم می‌کند. به عبارتی معیار اصلی ارزیابی چرخه حیات براساس این روش وزندهی اثرات محیط‌زیستی و اقتصادی است (Consultant, 2013).

جدول (۱): خصوصیات برخی از نرم‌افزارهای ارزیابی چرخه‌ی حیات

نام نرم‌افزار	پایگاه‌های داده	روش‌های ارزیابی اثرات	مزایا و برخی خصوصیات	معایب
Simapro	ecoinvent v.3, Agri-Foodprint, US LCI, ELCD, US Input Output, EU and Danish Input Output, Swiss Input Output, LCA food, Industry data v.2. IVAM, Japanese Input-Output	ReCipe, ILCD 2011, Setox, IPCC 2007, EPD 2013, Impact 2002, CML-IA, Traci 2.1, BEES+, Ecological footprint, EDIP 2003, Ecological scarcity 2013, EPS 2000, Greenhouse Gas protocol and others, including 9 water footprint Methods	از نمونه‌های برجسته و پرکاربرد با پایگاه داده غنی شده و گسترده. کاملاً تست شده و قوی با قابلیت مدل‌سازی تعداد زیادی از متغیرها، از جمله کاربردها: محاسبه ردپای کربن (Eco-design)، طراحی محصولات و طراحی اکولوژیکی (Environmental Product Declarations) و اظهارنامه محصول (Environmental Product Declarations) هستند.	فقط در سیستم عامل ویندوز قابل اجرا است. (http://simapro.co.za) (http://www.linkcycle.com)
openLCA	پایگاه‌های داده مورد نیاز باید از سایت https://nexus.openlca.org که در آن بسیاری از پایگاه‌های داده وجود دارند بارگیری شوند. برخی از این پایگاه‌های داده رایگان هستند.	CML 2001, Eco-indicator 99, Ecological Scarcity Method, EDIP 2003, ILCD 2011, ReCipe 8, TRACI 2.1, US EPA-default LCIA methods, USEtox	رایگان است از جمله کاربردها : محاسبه ردپای آب و کربن، هزینه‌ی چرخه‌ی حیات، طراحی برای محیط زیست و اظهار نامه محصول محیط‌زیستی هستند.	در حال تکامل و یادگیری آن تا حدودی دشوار است. پایگاه داده‌ی این نرم افزار بسیار ابتدایی است و داده‌های مورد نیاز را باید از پایگاه‌های داده‌ی متاناسب با موضوع تهیه نمود. (http://www.openlca.org)
Earth smart	ecoinvent and US-EI	ReCipe	به کاربر اجازه می‌دهد که بعد از پرداخت هزینه اولیه از تمام داده‌ها و روش‌های ارزیابی اثرات simapro استفاده کند. مدل سازی اسان شده که نتیجه‌ی ایجاد تغییرات کوچک در آن سریع قابل مشاهده است. این نرم افزار مبتنی بر وب است.	در حال تکامل است و گاهی خطاهای سرور دارد و کار با برخی از بخش‌های آن هنوز دشوار است. برخلاف بسیاری از نرم افزارها نمودار شبکه‌ای یا شمای کلی مدل را نشان نمی‌دهد و آنالیز عدم قطعیت نیز ندارد (https://www.earthshiftglobal.com)
GaBi	GaBi databases, ecoinvent, US.LCA	TRACI 2.0, CML (1996, 2001, and 2007), Ecoindicator 95 and 99, Ecological Scarcity Method (UBP), Impact 2002, EDIP, USEtox and ReCiPe	بسیار قوی و شناخته شده، در طراحی محصولات کاربر را در کمتر کردن یک اثر محیطی خاص برای مثال گازهای گلخانه‌ای راهنمایی می‌کند. از جمله کاربردها : طراحی محصول پایدار و نو، بهینه سازی انرژی و کارایی منبع برای کاهش هزینه نیز مشخص کردن اثرات اجتماعی در چرخه حیات محصول هستند.	تا حدودی سنگین و یادگیری آن زمانبر است. بصورت کدنویسی شده است و کار با آن دشوار است. با گذشت یک دهه هنوز بروزرسانی نشده است. (http://www.gabi-software.com)
Umberto	ecoinvent and GaBi databases	ReCiPe, Impact 2002, Eco-Indicator 99, IPCC, TRACI, USEtox	برای چند دهه در صنعت استفاده شده است. دارای رابط کاربر گرافیکی مدرن است که استفاده از آن را تسهیل می‌دهد از جمله کاربردها : محاسبه ردپای کربن و اظهارنامه محصول محیط‌زیستی هستند.	برای سیستم عامل‌های غیر ویندوز نیاز به نمونه ساز دارد که سرعت آن را کم خواهد کرد. یادگیری آن زمانبر است. (http://www.umberto.de)

• پایگاه داده‌ها

رسیده است. رایج‌ترین داده‌های اصلی برای مواد اولیه، مواد کمکی، و محصولات نیمه‌آماده از پایگاه داده‌های اکوینونت^(۱۲) در

در تحقیق حاضر، LCIها بر پایه‌ی داده‌ها از منابع مختلف به انجام

برای هر مورد اثبات شود. برای برخی فهرست ها از مواد اولیه ی خاص (مانند متاکائولین)، باید مجموعه داده هایی جدید و محصول محور ارایه شود. در مورد متاکائولین، داده های اصلی (مانند مصرف انرژی) در اروپا از طریق تولیدکننده یا فروشنده ی متاکائولین به دست آمده اند. در جدول (۲)، تمام مواد و فرآیندهای به کار گرفته شده، همراه با منبع و کیفیت داده ها نشان داده می شود. کیفیت تخمینی از داده های به کار برده، از خیلی خوب تا قابل قبول درجه بندی می شود. کیفیت قابل قبول داده ها یعنی محدودیت هایی وجود دارد (مثل به شکل از قلم افتادن داده ها، یا زمینه های محلی مختلف)، اما داده ها همچنان برای انجام تحقیقات قابل قبول می باشند.

دسترس نرم افزار SimaPro به دست آورده شده اند. این پایگاه داده که توسط مرکز سیاهه نویسی چرخه حیات سوئیس با همکاری موسسه فدرال فناوری زوریخ تهیه شده، از جمله جامع ترین پایگاه های داده ای به شمار می رود. این پایگاه داده ای بیش از ۱۰ هزار فرایند عمومی را پوشش می دهد که صنایع انرژی، حمل و نقل، ساختمان، مواد شیمیایی، کشاورزی، مقوا، عامل های شستشو و مدیریت پسماند را در بر می گیرد (Calderón, Iglesias, Laca, Herrero, & Díaz, 2010). اکوینونت مجموعه داده هایی از نظر علمی معتبر، شفاف، و با کیفیت تضمین شده ارایه می کند. با این وجود، مناسب بودن فهرستی مشخص از پایگاه داده ها برای یک تحقیق برنامه ریزی شده باید

جدول (۲): فهرست های به کار گرفته شده با منبع داده ها و کیفیت تخمینی داده ها

فرآیند	منبع داده ها	کیفیت داده ها
محلول سیلیکات	اکوینونت	خیلی خوب
محلول NaOH	اکوینونت	خوب
سرباره ی کوره ی آهن گدازی	صنعت، اکوینونت	قابل قبول (انتشار ذرات در هوا از ساییدن در نظر گرفته نشده است.)
متاکائولین	صنعت	خوب (انتشار ذرات در هوا در نظر گرفته نشده است.)
خاکستر بادی سخت / نرم زغال سنگ	اکوینونت	قابل قبول
سیمان پرتلند	اکوینونت	خوب
شن / ماسه	اکوینونت	خوب
آب	اکوینونت	خوب
HDPE	اکوینونت	خوب (ارزیابی انسان و مسمویت از محیط زیست بسیار محدود است.)
مواد کمکی	اکوینونت	خوب
اختلاط	صنعت	قابل قبول (انتشار ذرات در هوا در نظر گرفته نشده است.)
تشکیل پلاستیک	اکوینونت	خوب
کامیون / کشتی حمل و نقل	اکوینونت	خیلی خوب

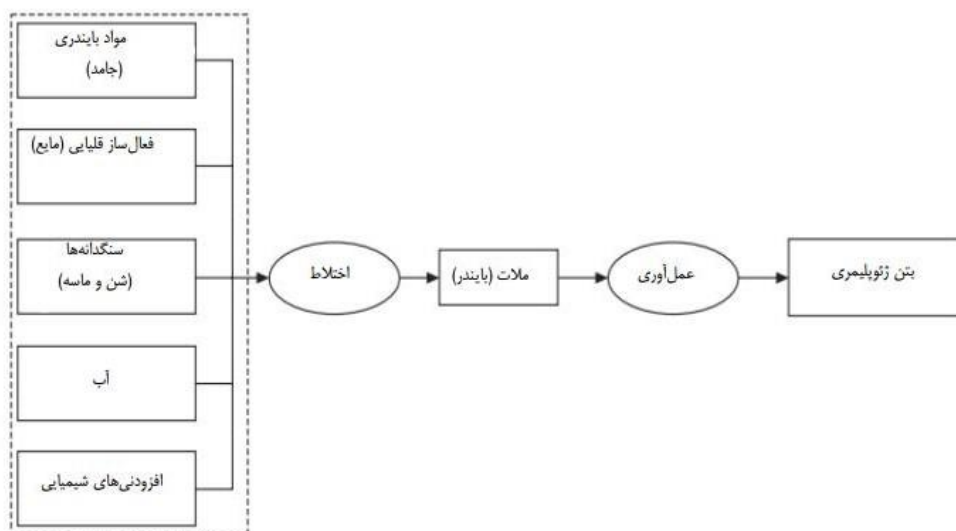
نقش ترکیب ژئوپلیمری بر اثرات محیط زیستی

ژئوپلیمرها را می توان از طیف گسترده ای از مواد خام جامد و سیال با کیفیت های بسیار متفاوتی تولید کرد. به جز شرایط فرآوری، مواد خام انتخابی از پارامترهای مهمی می باشند که زمان گیرش، کارایی، و ویژگی های شیمیایی و همچنین فیزیکی محصولات ژئوپلیمری را تعیین می کنند (Duxson et al., 2007a). به علاوه مشخصات محیط زیستی به مقدار زیادی به مواد اولیه ی به کار رفته بستگی دارند. میان مواد اولیه ی جامد اصلی با منابع پرمصرف (مانند متاکائولین) و مواد اولیه ی جامد فرعی با منابع کم مصرف (مانند خاکستر بادی) و همچنین میان مواد خام سیال

به عنوان نمونه روش CML جهت کمی سازی و ارزیابی تأثیر در این مقاله به کار رفته و تقاضای تصاعدی انرژی (CED) ^(۱۳) [MJ]، نیز در نظر گرفته می شود. جدول (۳) نتایج به دست آمده از نتایج ارزیابی چرخه حیات در مرحله ی نرمال سازی با استفاده از روش CML را نشان می دهد (Guinée et al., 2001). روش CML از چندین جز محیط زیستی با شاخص های مربوط ^(۱۴) تشکیل می شود. دو شاخص محیط زیستی مهم تحلیل می شوند:

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

که شامل فرآیندهای حمل‌ونقل نمی‌باشد. مقایسه‌ی نسبت جرم مواد خام (شکل ۳، چپ) به سهم اثرات محیط‌زیستی با شاخص GWP 100 (شکل ۳، راست) برای دو ترکیب ژئوپلیمری مختلف، جنبه‌های مهم زیر را بیان می‌کند:



شکل (۲): مرزهای سیستم برای مقایسه ترکیبات ژئوپلیمری مختلف

- خاکستر بادی (خاکستر بادی سخت یا نرم زغال سنگ) به طور قابل توجهی در GWP (پتانسیل گرمایش جهانی) تاثیر ندارد.
- سرباره (فقط ترکیبی در اختلاط MI، شکل ۳) به طرز قابل ملاحظه‌ای در GWP (پتانسیل گرمایش جهانی) سهم دارند.
- تامین آب تاثیر چندانی در GWP (پتانسیل گرمایش جهانی) ندارد.
- محلول سیلیکاتی به طور قابل توجهی در GWP (پتانسیل گرمایش جهانی) سهم دارد و مشخصات محیط‌زیستی 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 (پتانسیل گرمایش جهانی) می‌شود.
- استفاده‌ی متعادل از متاکائولن (فقط در اختلاط SI) به طرز چشمگیری تاثیر بر GWP (پتانسیل گرمایش جهانی) دارد.
- کاربرد محلول سیلیکات و محلول NaOH 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 محیط‌زیستی با گزینه‌هایی جایگزین شود، نیز صدق می‌کند. لازم به ذکر است که

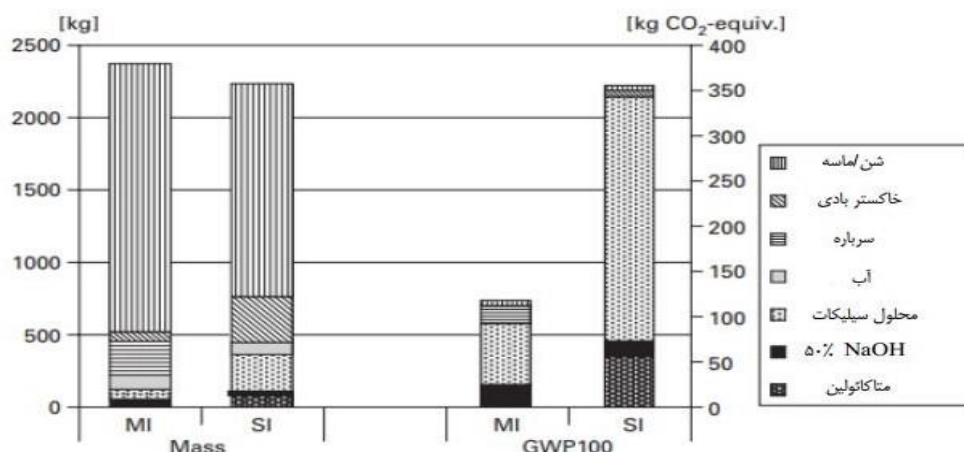
جدول (۳): نتایج ارزیابی چرخه حیات مرحله نرمال‌سازی تولید یک مترمکعب بتن ژئوپلیمری با استفاده از روش CML

مقدار	طبقات اثر
$1/31 \times 10^{-11}$	تخریب منابع غیرزنده
$1/38 \times 10^{-11}$	تخریب منابع غیرزیستی (سوخت فسیلی)
$1/27 \times 10^{-11}$	گرمایش جهانی (GWP100a)
$1/27 \times 10^{-14}$	تخریب لایه ازن (ODP)
$9/8 \times 10^{-11}$	سمیت انسان
$7/07 \times 10^{-11}$	سمیت رسوبات آب شیرین (۱۵)
$2/27 \times 10^{-9}$	سمیت رسوبات دریایی (۱۶)
$5/91 \times 10^{-13}$	سمیت زمین (۱۷)
$3/57 \times 10^{-12}$	اکسیداسیون فتوشیمیایی (۱۸)
$8/63 \times 10^{-12}$	اسیدیته شدن
$5/69 \times 10^{-12}$	اورتوفیکاسیون (غیرقابل زیست شدن)

- ماسه و شن با وجود مقدار بالای جرم خود، تنها اندکی در GWP (پتانسیل گرمایش جهانی) سهم دارند.

(بدون آسیاب و بدون نیاز به عمل آوری حرارتی) یا سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی (فقط نیازمند آسیاب)، مطلوب‌تر هستند، مشروط به این که این منابع ثانویه (پسماندها) موجود باشند و مقدار محدودیت‌های محیط‌زیستی از حد خود فراتر نروند.

کیفیت کاربردی (عموما در دسترس) 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



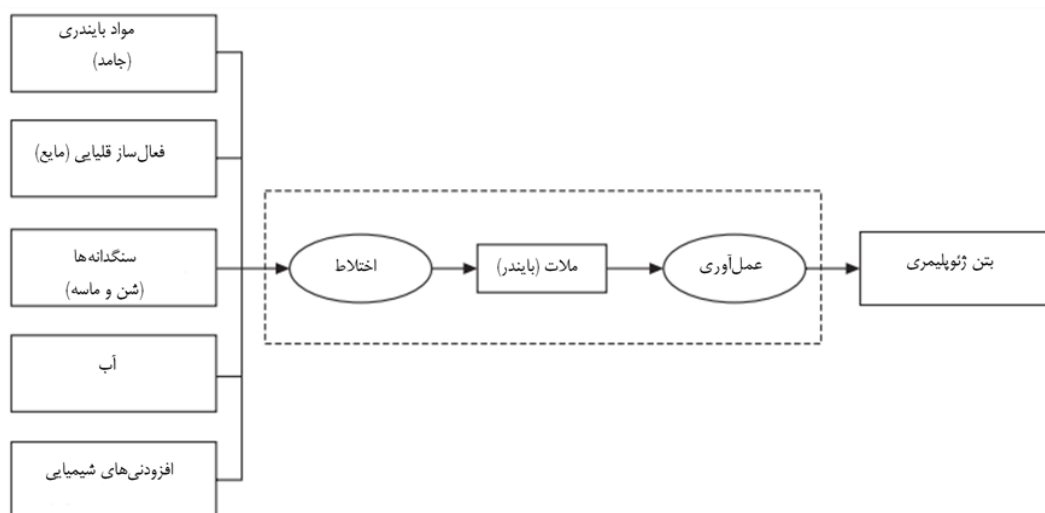
شکل (۳): مقایسه نتایج جرم متعادل شده و GWP (پتانسیل گرمایش جهانی) برای دو ترکیب مختلف ژئوپلیمری (SI, MI)

در حین قالب‌ریزی، فرآیند تراکم اضافی (با استفاده از میز ارتعاش) در نظر گرفته نشده است، اما سهم آن در اثرات محیط‌زیستی در موارد دیگر (استفاده‌ی رایج) ناچیز در نظر گرفته می‌شود. این مورد برای فرآیند اختلاط نیز صدق می‌کند که کمتر از ۱٪ در اثرات محیط‌زیستی (تولید ژئوپلیمر) سهم دارد.

نقش فرایند تولید ژئوپلیمر بر اثرات محیط زیستی

فرآیند تولید ژئوپلیمر (شکل ۴) را می‌توان به مراحل اصلی زیر تقسیم کرد:

- مخلوط کردن اجزا
- عمل آوری حرارتی



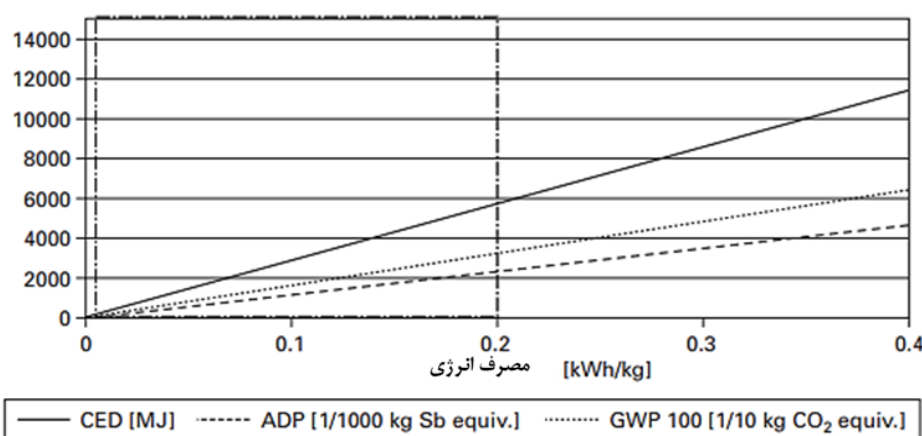
شکل (۴): مرز سیستم برای شناخت فرآیندهای مربوط به تولید

لازم به ذکر است که همه‌ی ترکیبات ژئوپلیمری به مرحله عمل آوری حرارتی نیاز ندارند. به ویژه ترکیبات ژئوپلیمری غنی از

در مقابل این مساله، فرآیند عمل آوری حرارتی ممکن است مشخصات محیط‌زیستی ژئوپلیمر را به طور قابل توجهی تغییر دهد.

قطعات پیش‌ساخته‌ی بتنی، بین ۲۰ تا ۵۰۰ کیلو وات ساعت بر مترمکعب (Menzel, 1991)، یا حدوداً ۰/۱ 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 محیط‌زیستی (CED (تقاضای تصاعدی انرژی)، GWP (پتانسیل گرمایش جهانی)، ADP (پتانسیل کاهش منابع غیرزنده)) در شکل (۵) مورد توجه قرار گرفته است. بین مصرف انرژی و شاخص‌های محیط‌زیستی یک رابطه‌ی ساده‌ی خطی پیدا می‌شود. به علاوه محدوده‌ی مصرف انرژی برای عمل‌آوری حرارتی نشان داده شده است (خط نقطه‌چین، شکل ۵).

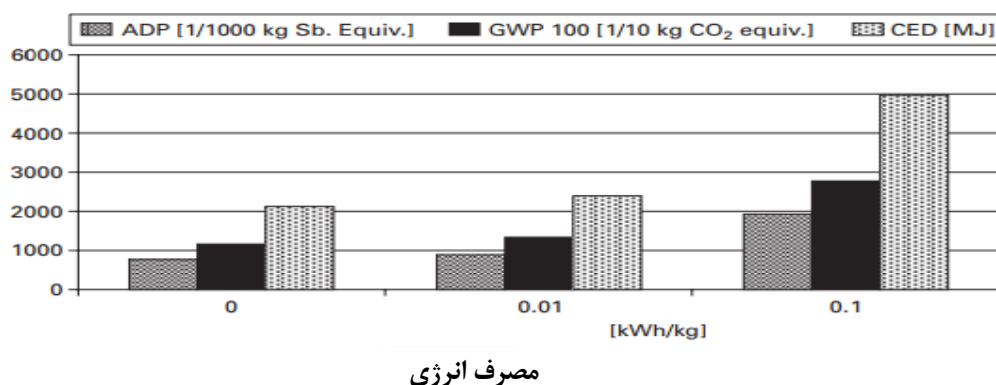
سرباره، در عرض چند ساعت یا چند روز در دمای اتاق بدون هیچ عمل‌آوری حرارتی به ویژگی‌های فنی موردنظر می‌رسند (Duxson et al., 2007b; Bakharev et al., 1999). مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی غالب (یا سایر مواد اولیه‌ی کند واکنش‌دهنده) به عمل‌آوری حرارتی نیاز دارند تا پختگی ژئوپلیمرها افزایش یابد. محدوده‌ی دمایی متوسط معمولاً 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 می‌شود، نیز بسیار رایج می‌باشد. مصرف انرژی برای تولید محصول در شرکت‌های تولیدکننده



شکل (۵): تاثیر عمل‌آوری حرارتی (مصرف انرژی الکتریکی) بر اثرات شاخص‌های محیط زیستی CED (تقاضای تصاعدی انرژی)، GWP (پتانسیل گرمایش جهانی)، ADP (پتانسیل تخریب منابع غیرزیستی)

استفاده شود، افزایش مقادیر شاخص محیط‌زیستی کمتر خواهد بود، اما هنوز قابل توجه می‌باشد. بنابراین از منظر فرآیندی، کاربرد عمل‌آوری حرارتی باید به حداقل کاهش پیدا کند. یک گزینه دیگر برای کاهش اثر، محیط‌زیستی می‌تواند استفاده از حرارت پسماند از سایر فرآیندها باشد.

تاثیر عمل‌آوری حرارتی بر اثرات محیط‌زیستی تولید ژئوپلیمر در شکل (۶) نشان داده شده است. در این مورد به خصوص، اگر عمل‌آوری حرارتی مقدار متوسطی انرژی مصرف کند، مقدار تمام شاخص‌ها بیشتر از دو برابر می‌شوند (۰/۱ کیلو وات ساعت بر کیلوگرم). اگر به جای اتاقک الکتریکی از یک مشعل بادزن گازی



شکل (۶): تاثیر عمل‌آوری حرارتی بر محیط‌زیستی اثرات تولید ژئوپلیمر

قرار گیرند. بنابراین تا جایی که به مرحله‌ی بازیافت یا دفع مربوط می‌شود، هیچ مدرکی مبنی بر این وجود ندارد که بتن ژئوپلیمری در مقایسه با بتن سیمانی دارای مزایا یا معایبی می‌باشد. از این رو هر دوی این مراحل پس از استفاده می‌توانند قابل مقایسه در نظر گرفته شوند.

مقایسه مرحله بهره‌برداری از هر دو ماده، با برآورده کردن الزامات حداقلی واحد عملکردی ممکن می‌شود. تحقیقات لازم شامل آزمایش‌های بهبود مقاومت و یخ‌زدگی-ذوب -CDF- می‌باشند (Dombrowski et al., 2008). تا آنجا که به ویژگی‌های فنی عمده مربوط می‌باشد، بتن ژئوپلیمری مشابه با بتن معمولی یا حتی بهتر از آن است (Esparham & Moradikhou, 2021).

مرحله‌ی چرخه‌ی عمر که برای هر دو ماده مشابه است، ممکن است در یک LCA مقایسه‌ای حذف شود. بنابراین تحقیقات بر روی مرحله‌ی تولید و زنجیره‌های مربوط به استخراج منابع متمرکز خواهد بود (شکل ۷). اگرچه حمل مواد خام حداقل در مشخصات محیط‌زیستی به طور قابل توجهی سهم دارد اما شامل مرزهای سیستم نشده است. زیرا، تلاش‌های لازم برای انتقال مواد خام مورد نیاز در سرتاسر جهان کاملاً متفاوت است. تأثیر فرآیندهای حمل‌ونقل باید فقط در یک زمینه‌ی خاص منطقه‌ای ارزیابی شود. ترکیبات سیستم‌های مقایسه شده، در جدول (۴) نشان داده شده است. همه مخلوط‌ها دارای میزان برابری از شن، ماسه بوده و بتن بدون هیچ افزودنی شیمیایی (مانند فوق روان‌کننده‌ها) تولید شده است. مخلوط بتن سیمان پرتلند شامل ۳۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان است که مطابق DIN EN 206-1/DIN 1045-2. ۲۰ کیلوگرم بالاتر از حداقل مقدار سیمان برای بتن مقاوم در برابر یخ‌زدگی-ذوب (XF2-XF4) می‌باشد. بتن ژئوپلیمری بهینه‌سازی شده‌ی فعلی (Dombrowski et al., 2008) با نسبت سرباره به خاکستر بادی تقریباً ۸۰ به ۲۰، به هیچ گونه عمل‌آوری حرارتی و سخت کردن در دمای اتاق (۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) نیاز ندارد.

در حالی که مرحله‌ی بهره‌برداری و بازیافت/ دفع یکسان در نظر گرفته می‌شوند، نتایج در شکل (۸) محیط‌زیستی مشابه را بر حسب ADP (پتانسیل کاهش منابع غیرزنده) و CED (تقاضای تصاعدی انرژی) سیستم 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). GWP بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن سیمان پرتلندی، تقریباً ۷۰٪ کمتر است.

• **مقایسه‌ی LCA ژئوپلیمرها با سایر سیستم‌های محصول**
درک وابستگی متقابل ترکیب کردن، فرآوری، عملکرد فنی و اثرات اکولوژیکی، اقتصادی، برای توسعه‌ی رقابتی ژئوپلیمرها در کاربردهای مختلف ضروری می‌باشد (Weil et al., 2006; Dombrowski et al., 2008). تحقیقات رو به سویی دارند که بر روی بهبود یک یا دو ویژگی برای تولید مواد به اصطلاح با کارایی بالا تمرکز کنند. در حقیقت، بازار به محصولی مناسب از نظر عملکرد فنی نیاز دارد (حداقل ویژگی‌های تعیین‌شده در راهنماها یا استانداردها) با هزینه‌های متوسط (قابل رقابت با فناوری‌های موجود) که ترجیحاً اثرات محیط‌زیستی کمی داشته باشند. از آنجا که ژئوپلیمرها در بسیاری از زمینه‌های کاربردی هنوز به ماهیت یک محصول نرسیده‌اند، مقایسه با سیستم‌های رایج مشمول برخی محدودیت‌ها می‌باشد. در حالی که آزمایش بلندمدت (مانند دوام) برای سیستم‌های رایج وجود دارد، اطلاعات در مورد ژئوپلیمرها غالباً محدود هستند (Gruskovnjak et al., 2006). با این وجود، مدت زمان استفاده از مواد (شامل نگهداری) تأثیر قابل توجهی بر عملکرد محیط‌زیستی کلی دارد. برای پرداختن به این مساله، فرضیات قابل درکی باید اعمال شوند یا نتایج به‌دست آمده باید با توجه به محدودیت‌های شناخته شده مورد بحث قرار گیرند.

• **بتن ژئوپلیمری در مقابل بتن معمولی**

در کشورهای صنعتی، سیمان می‌تواند محصولی ارزان برای تولید انبوه بتن در نظر گرفته شود. برای رقابت با چنین سیستم بهینه شده‌ای، مواد اولیه‌ی ارزان مانند سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی و خاکستر بادی زغال‌سنگ می‌توانند برای تولید ژئوپلیمر مورد استفاده قرار گیرند.

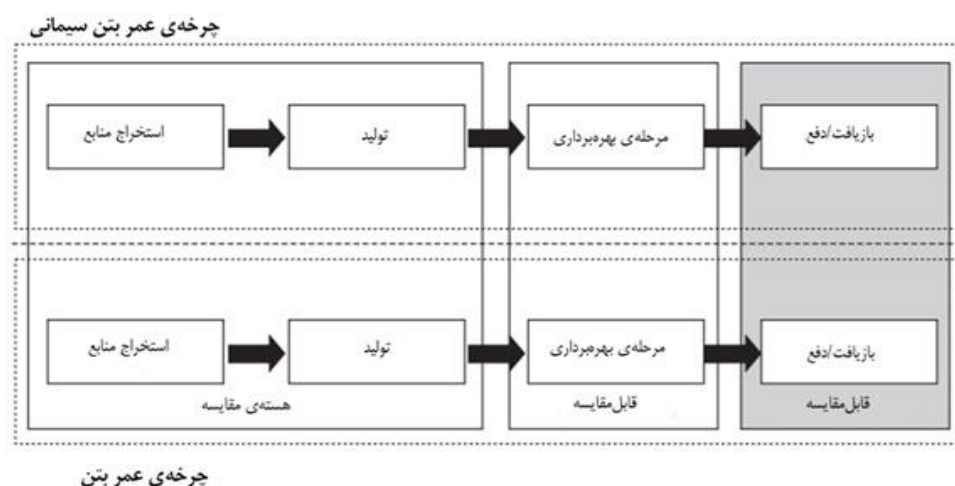
استفاده از مواد خام ثانویه همچنین تأثیر محیط‌زیستی سیستم ژئوپلیمری را کاهش می‌دهد. با این وجود سوالی مطرح می‌شود که آیا سیستم ژئوپلیمری با یک سیستم برپایه سیمان‌های مرسوم از منظر محیط‌زیستی قابل رقابت می‌باشد یا خیر. برای مقایسه، بتنی مطابق با الزامات اضافی (واحد عملکردی) در نظر گرفته می‌شود: بتنی مقاوم در برابر یخ‌زدگی و ذوب از گروه XF2 و XF4 مطابق با استاندارد DIN EN 206-1/DIN 1045-2. مرزهای سیستم در شکل (۷) نشان داده شده است.

بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی پس از استفاده ممکن است خرد شوند و برای کاربردهای مختلف در مهندسی عمران مورد استفاده

همه‌ی انواع سیمان شناخته‌شده) به جای سیمان‌های آمیخته مانند CEM II یا حتی CEM III که می‌توانند مطابق DIN EN 206-1/DIN 1045-2 برای گروه‌های XF2_ XF4 به کار برده شوند، استفاده می‌شود.

در مقایسه با بتن معمولی دو جنبه، بحرانی در نظر گرفته می‌شود:

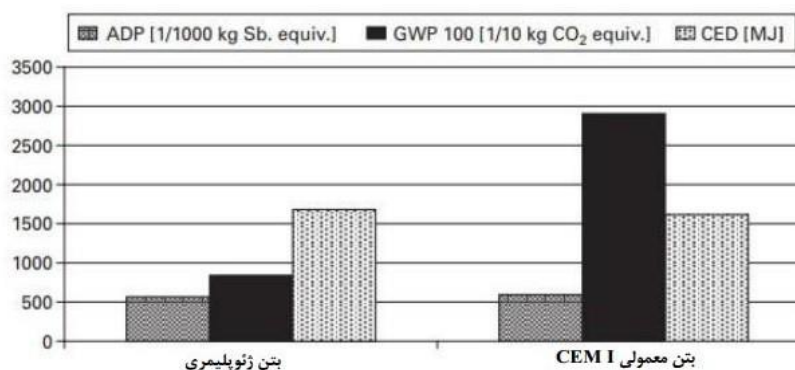
- مقدار سیمان مورد استفاده ۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب بیشتر از حد توصیه‌شده برای حداقل مقدار سیمان باشد (DIN EN 206-1/DIN 1045-2).
- سیمان پرتلند (با بالاترین نیاز به انرژی و منابع نسبت به



شکل (۷): مرزهای سیستم برای مقایسه تولید بتن ژئوپلیمری و بتن سیمانی

جدول (۴): مقایسه‌ی بتن ژئوپلیمری و بتن سیمانی (kg/m^3)

مواد	بتن سیمانی	بتن ژئوپلیمری
سیمان CEM I 32.5R	۳۴۰	
سرباره		۲۳۰
خاکستر بادی		۵۷
پسماند واکنشی		۸۳
محلول سیلیکات/سدیم سیلیکات ۳۷٪		۳۳
NaOH (۵۰٪)		۲۴
آب یونیزه‌شده	۱۷۰	۹۹
شن/ماسه (۰-۱۶ میلیمتر)	۱۸۷۸	۱۸۷۸
kg/m^3	۲۳۸۸	۲۴۰۴



شکل (۸): نتایج LCA برای بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی

چرخه‌ی عمر طولانی‌تر موردنظر باشد، لوله‌های بتنی غالباً با پلی‌اتیلن با چگالی بالا پوشش داده می‌شوند (HDPE). لوله‌های فاضلاب با پوشش HDPE به خوبی در برابر خوردگی شیمیایی و مکانیکی محافظت می‌شوند (Guermazi et al., 2008). در اصل، پوشش‌های ژئوپلیمری می‌توانند از سطح بتن در برابر حمله شیمیایی (Bakharev, 2005; Bakharev et al., 2003) و خراش مکانیکی محافظت کنند.

مرزهای سیستم برای یک تحقیق مقایسه‌ای بین هر دو سیستم حفاظتی در شکل (۹) نشان داده شده است. لوله‌ی بتنی (حفاظت شده) می‌تواند یکنواخت فرض شود و در مرزهای سیستم در نظر گرفته نشود. لوله‌ی HDPE (به صورت فرم داده شده) در قسمت داخلی لوله، مستقیماً بعد از برداشتن قالب‌ها از لوله‌ی بتنی بدون استفاده از ترکیبات چسبی اضافی قرار داده می‌شود. در مقابل، پوشش ژئوپلیمری باید با تکنیک اسپری به کار گرفته شود. هیچ مدرکی مبنی بر این که هر یک از تکنیک‌های به کار برده شده، اثرات محیط‌زیستی قابل‌توجهی به همراه دارند، وجود ندارد.

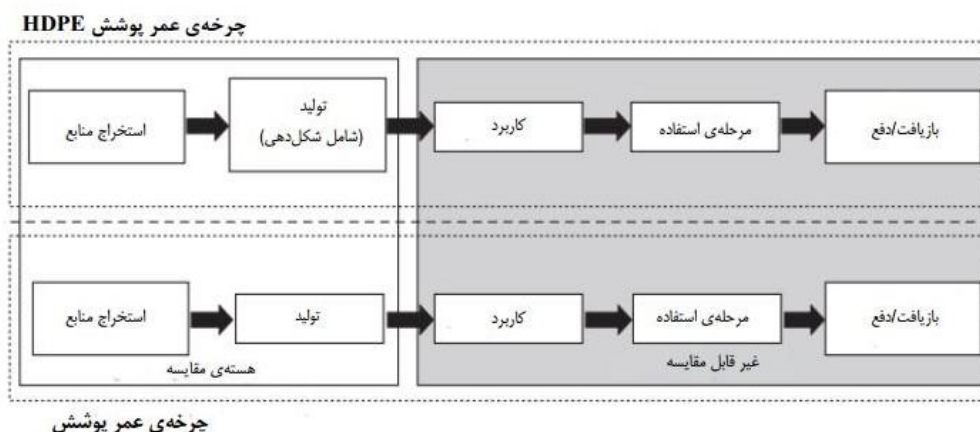
به علت استفاده از مواد مختلف در هر دو سیستم (شکل ۹)، مرحله‌ی بهره‌برداری و همچنین مرحله‌ی بازیافت/دفع نیز می‌توانند متفاوت باشند. در این مورد، مرحله‌ی بهره‌برداری (شامل نگهداری) احتمالاً در مشخصات محیط‌زیستی سهم به سزایی دارد. احتمالاً مرحله‌ی بازیافت و دفع از اهمیت کمی برخوردار باشد. از آنجایی که در مورد کاربرد، مراحل استفاده، بازیافت و دفع داده‌ای وجود ندارد، با ساده‌سازی، تحقیقات فقط بر روی مرحله‌ی تولید متمرکز می‌شود. اما باید به یاد داشت که اهمیت نتایج بدست‌آمده مخصوصاً به دلیل حذف مرحله‌ی بهره‌برداری، محدود است.

در حقیقت هر دوی این جنبه‌های یادشده، مشخصات محیط‌زیستی بتن معمولی را بهبود می‌بخشند. کاهش میزان سیمان به حداقل مورد نیاز (۳۲۰ کیلوگرم)، مقادیر شاخص را به اندازه‌ی ۳ تا ۵ درصد کاهش خواهد داد، استفاده از سیمان سرباره‌ای CEM II، مقادیر شاخص را ۱۱ تا ۱۶ درصد کاهش خواهد داد. در بهترین حالت و در شرایطی که چنین مخلوط‌هایی عملکرد فنی لازم را داشته باشند، مخلوط بتن معمولی از نظر ADP (پتانسیل تخریب منابع غیرزنده) و CED (تقاضای تصاعدی انرژی) مزایای قابل‌توجهی خواهند داشت. اما هنوز ژئوپلیمر به طور قابل ملاحظه‌ای تأثیر کمتری بر پتانسیل گرمایش جهانی دارد (شاخص GWP، پتانسیل گرمایش جهانی).

به علت عملکرد کربناسیونی متفاوت، تغییرات دوام سیمان تقویت شده و بتن ژئوپلیمری، باید از دیدگاه فنی مورد بررسی قرار گیرد. با کمک یک مدل دوام با در نظرگیری شرایط محیط‌زیستی پیچیده، طول عمر هر سیستم با جزییات بیشتری می‌تواند ارزیابی شود. چنین پیش‌بینی‌های طول عمری، یک ورودی مهم برای مقایسه‌ی همه جانبه‌تری از بتن ژئوپلیمری و بتن معمولی می‌باشد.

• مقایسه‌ی پوشش ژئوپلیمری با سیستم‌های پوششی (آستر) HDPE^(۹) در لوله‌های فاضلاب

ژئوپلیمرها می‌توانند عملکرد فنی قابل‌توجهی مانند مقاومت بالا، مقاومت حرارتی بالا، و مقاومت بالا در برابر اسید از خود نشان دهند. این ویژگی آخر، برای طراحی یک پوشش مقاوم در برابر اسید برای لوله‌های فاضلاب استفاده می‌شود. لوله‌های بتنی محافظت نشده، معمولاً برای حمل فاضلاب خانگی استفاده می‌شوند. اگر مقاومت بیشتری در برابر اسید خواسته شود و یا یک



شکل (۹): مرزهای سیستم برای مقایسه‌ی پوشش ژئوپلیمری و پوشش (آستر) HDPE

در کلیه شاخص‌های تاثیر محیط‌زیستی، پوشش ژئوپلیمری مقادیر بسیار کمتری به خود اختصاص می‌دهد. این مورد برای پوشش ژئوپلیمری چه با و چه بدون در نظر گرفتن انتقال مواد خام صدق می‌کند.

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، مرحله‌ی بهره‌برداری احتمالا سهم بسزایی در مشخصات محیط‌زیستی دارد. بنابراین نتایج ارایه شده یک گزینه را تایید نمی‌کند، مگر این که برای هر دو سیستم اطلاعات قابل مقایسه‌ای با توجه به دوام وجود داشته باشد. به هر حال این بحث می‌تواند معکوس شود. اگر چه پوشش ژئوپلیمری فقط به نیمی از عمر پوشش HDPE می‌رسد و از این رو به نگهداری در محل (پوشش‌دهی مجدد با ژئوپلیمر) نیاز دارد، اما ممکن است مزیت‌های محیط‌زیستی به همراه داشته باشد. پوشش ژئوپلیمری نیز می‌تواند راه حل مناسبی بین یک لوله‌ی بتنی بدون پوشش و یک لوله‌ی بتنی با محاط HDPE گران قیمت برای یک محیط نسبتاً مهاجم باشد.

به هر حال این بحث می‌تواند معکوس شود. اگر چه پوشش ژئوپلیمری فقط به نیمی از عمر پوشش HDPE می‌رسد و از این رو به نگهداری در محل (پوشش‌دهی مجدد با ژئوپلیمر) نیاز دارد، اما ممکن است مزیت‌های محیط‌زیستی به همراه داشته باشد. پوشش ژئوپلیمری نیز می‌تواند راه حل مناسبی بین یک لوله‌ی بتنی بدون پوشش و یک لوله‌ی بتنی با محاط HDPE گران قیمت برای یک محیط نسبتاً مهاجم باشد.

واحد عملکردی برای ارزیابی مقایسه‌ای لایه‌ی محافظ ۱۰۰ مترمربعی شامل این موارد می‌باشد:

- آستر HDPE با ضخامت ۵ میلی‌متر (چگالی ۰/۹۷ کیلوگرم بر دسی‌مترمکعب)

- پوشش ژئوپلیمری با ضخامت ۱۰ میلی‌متر (چگالی ۲/۲۳ کیلوگرم بر دسی‌مترمکعب).

بدین‌منظور، یک ترکیب ژئوپلیمری با ویژگی‌های فنی بسیار مناسب توسط آنیا بوخوالد^(۲۰) طراحی شده‌است. این ترکیب حاوی موارد زیر می‌باشد:

۱۴/۳٪ خاکستر بادی نرم زغال‌سنگ (فاصله‌ی انتقال با کامیون ۳۰۰ کیلومتر)

۶/۱٪ متاکائولن (فاصله‌ی انتقال با کامیون ۳۰۰ کیلومتر، فاصله‌ی حمل‌ونقل با کامیون ۶۰۰۰ کیلومتر)

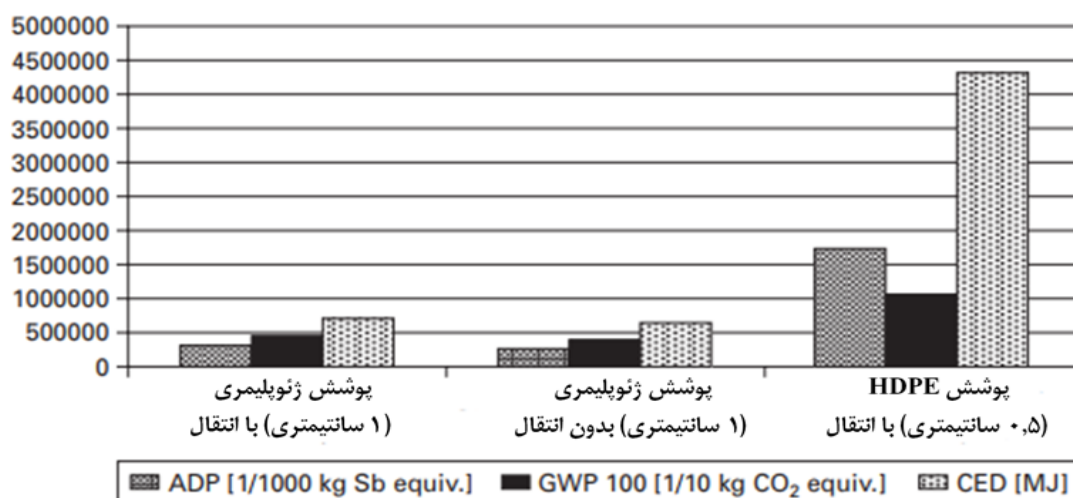
۱۱/۸٪ محلول سیلیکات (فاصله‌ی انتقال با کامیون ۳۰۰ کیلومتر)

۲/۲٪ محلول NaOH (فاصله‌ی انتقال با کامیون ۳۰۰ کیلومتر)

۳/۹٪ آب (بدون انتقال)

۶۱/۷٪ شن / ماسه سنگی (فاصله‌ی انتقال با کامیون ۱۰ کیلومتر).

ضمناً یک سناریوی انتقال برای سیستم مبتنی بر ژئوپلیمر (باتمرکز در اروپای مرکزی)، برای مقایسه‌ی پوشش HDPE (که شامل انتقال مواد خام می‌باشد) و سیستم پوشش ژئوپلیمری به روشی منسجم در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱۰). فاصله‌های مفروض برای انتقال مواد خام به شرح فوق آورده شده است (فرض در بدترین حالت).



شکل (۱۰): نتایج LCA برای پوشش ژئوپلیمری (با و بدون حمل‌ونقل) و پوشش HDPE (تقاضای تصاعدی انرژی)، GWP (پتانسیل گرمایش جهانی)، ADP (پتانسیل تخریب منابع غیرزنده))

ژئوپلیمرها و استفاده از منابع ثانویه

یک ترکیب ژئوپلیمری می‌تواند از نظر اثرات محیط‌زیستی (و هزینه‌ها) با جایگزین کردن مواد خام اصلی با منابع ثانویه، بهینه‌سازی شود. این نوع بهینه‌سازی توسط نتایج LCA توصیه شده است، اما در عمل، وقتی که عملکرد خوب فنی مورد نظر باشد با برخی مشکلات همراه است. مواد خام ثانویه در مقایسه با مواد خام اولیه، دارای تنوع بیشتری در ترکیبات شیمیایی هستند. بعضی از مواد خام ثانویه حاوی فلزات سنگین نیز هستند، از این رو استفاده از چنین موادی برای تولید صنعتی ممکن است به مقادیر آستانه‌ی محیط‌زیستی محدود شوند. مسئله‌ی دیگر، در دسترس بودن منابع ثانویه، به ویژه با تنوع کم در ترکیب شیمیایی و محتوای کم فلزات سنگین یا ناخالصی می‌باشد. حتی اگر دسترسی در سرتاسر جهان بسیار متفاوت باشد، مشکل همچنان باقی می‌ماند. زیرا، سیستم‌های مرسوم یا جدید دیگر، برای این منابع ثانویه رقابت می‌کنند. برای مثال در کشور آلمان سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی، از قبل در سیستم‌های سنتی مبتنی بر سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. رقابت با یک کاربرد مرسوم از همان منبع ثانویه، ارایه یک تکنولوژی جدید را تسهیل نمی‌کند. بنابراین، توسعه ترکیبات ژئوپلیمری برای کاربردهای مختلف باید ترجیحاً استفاده از منابع ثانویه ای را مورد توجه قرار دهد که تاکنون در سایر بخش‌های صنعتی به عنوان مواد خام به طور گسترده مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.

نتیجه‌گیری

اثر محیط‌زیستی محصولات باید به حداقل مقدار کاهش یابد. برای توسعه‌ی بیشتر مواد سازگار با محیط‌زیست، طراح مواد به دانشی در مورد محرک‌های محیط‌زیستی سیستم‌های مواد جدید و همچنین دانش اثرات محیط‌زیستی سیستم‌های مواد سنتی مرسوم رقیب نیاز دارد. ژئوپلیمرها را می‌توان از مواد خام گوناگون در شرایط مختلف فرآیند برای رسیدن به ویژگی‌های متفاوتی که آن‌ها را برای کاربردهای متنوع مناسب می‌سازد، تولید کرد. بنابراین، موضوع اثرات محیط‌زیستی ژئوپلیمرها موضوع نسبتاً پیچیده‌ای می‌باشد.

این مقاله نشان می‌دهد که انتخاب دقیق مواد خام، باید بر هر دو اجزای جامد و سیال تمرکز داشته باشد. جایگزینی محلول سیلیکات و محلول NaOH، پتانسیل بالایی را برای بهبود

مشخصات محیط‌زیستی ژئوپلیمرها از خود نشان می‌دهد. به علاوه کاربرد عمل‌آوری حرارتی برای تولید ژئوپلیمر باید به حداقل مقدار کاهش یابد، یا به منظور کاهش بارهای محیط‌زیستی، گرمای هدر رفته در سایر فرآیندها مورد استفاده قرار گیرد. یک ارزیابی مقایسه‌ای رقابت بین سیستم‌های ژئوپلیمری و سیستم‌های مبتنی بر سیمان‌های مرسوم را از دیدگاه محیط‌زیستی نشان می‌دهد. در یک زمینه‌ی کاربردی مشخص، جهت تایید یک گزینه، این کار به ترکیب دقیق در هر دو سیستم بستگی دارد، (با فرض این که عملکرد فنی مشابه است). مقایسه‌ی پوشش ژئوپلیمری لوله‌ها با پوشش HDPE تصویر کاملاً متفاوتی را نشان می‌دهد. در این مورد به خصوص، تا آنجایی که مرحله‌ی تولید در نظر گرفته می‌شود، سیستم ژئوپلیمری مزایای محیط‌زیستی قابل توجهی را ارایه می‌کند. به‌طور کلی نیاز شدیدی به شناخت دوام و عملکرد مادام‌العمر سیستم‌های ژئوپلیمری در مقایسه با سیستم‌های سنتی وجود دارد. تنها با این اطلاعات مهم می‌توان در مورد اثرات محیط‌زیستی محصولات ژئوپلیمری، نتیجه‌گیری نهایی را به دست آورد.

یادداشت‌ها

1. Classification
2. Characterization
3. Normalization
4. Weighting
5. Abiotic Resource Depletion Potential
6. Global Warming Potential
7. Acidification Potential
8. Eutrophication Potential
9. Human Toxicity Potential
10. Ozon Depletion Potential
11. Center of Environmental Science of Leiden University (Centrum voor Milieukunde Leiden)
12. Ecoinvent
13. Cumulative Energy Demand
14. Indicator
15. Fresh water aquatic ecotox
16. Marine aquatic ecotoxicity
17. Terrestrial ecotoxicity
18. Photochemical oxidation
19. High Density Poly Ethylene
20. Anja Buchwald

فهرست منابع

- Bakharev, T. 2005. Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 658–670.
- Bakharev, T.; Sanjayan, J.G. & Cheng, Y.-B. 1999. Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 29(10), 1619–1625.
- Bakharev, T.; Sanjayan, J.G. & Cheng, Y.-B. 2003. Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 33(10), 1607–1611.
- Calderón, L. A.; Iglesias, L.; Laca, A.; Herrero, M. & Díaz, M. 2010. The utility of Life Cycle Assessment in the ready meal food industry. *Resources, conservation and recycling*, 54(12), 1196-1207.
- 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.
- Dombrowski, K.; Weil, M. & Buchwald, A. 2008. Geopolymer binders. *Zkg International*, 61(3), 70–80.
- Dreyer, L.C.; Niemann, A.L. & 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.; Fernandez-Jimenez, A.; Provis, J.L.; Lukey, G.C.; Palomo, A. & van Deventer, J.S.J. 2007a. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933.
- Duxson, P.; Mallicoat, S.W.; Lukey, G.C.; Kriven, W.M. & 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.J. 2007c. The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590–1597.
- Ecoinvent. 2006. Database. Ecoinvent Version v 1.3.
- 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.; & 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.; 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.; 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. 2020. Factors Influencing Compressive Strength of Metakaolin-based Geopolymer Concrete. *Modares Civil Engineering journal*, 20(1), 53-66.
- Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; De Schryver, A.; Struijs, J. & Van Zelm, R. 2009. ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, 1, 1-126.
- Gruskovnjak, A.; Lothenbach, B.; Holzer, L.; Figi, R. & Winnefeld, F. 2006. Hydration of alkali-activated slag: comparison with ordinary Portland cement. *Advances in Cement Research*, 18(3), 119- 128.

- Guermazi, N.; Elleuch, K.; Ayedi, H.F.; Zahouani, H, & Kapsa, P. 2008. Susceptibility to scratch damage of high density polyethylene coating. *Materials Science and Engineering: A*, 492(1–2), 400–406.
- 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 Nederlande.
- ISO. 14040. 2006. Environmental management- life cycle assessment- principles and framework. International Organization for Standardization (ISO).
- Menzel, U. -1991-. Heat treatment of concrete. *Concrete plant + precast technology*, 12, 92–96.
- 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.
- Nowak, R. 2008. Geopolymer concrete opens to reduce CO2 emissions. *The New Scientist*, 197(2640), 28–29.
- Solomon, S.; Manning, M.; Marquis, M. & Qin, D. 2007. Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC (Vol. 4): Cambridge university press.
- Weil, M.; Buchwald, A. & Dombrowski, K. 2006. Sustainable Design of Geopolymers– Integration of Economic and Environmental Aspects in the Early Stages of Material Development. *GDCH-Monograph*, 36, 297–306.

A Review of Life Cycle Assessment (LCA) for Evaluating Environmental Impacts of Geopolymer Concrete

^{1*}Alireza Esparham, ²Masoud Nabi Javaid, ³Naser Mehrdadi

1,2 PhD in Energy Systems-Energy and Environment, Department of Environmental Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3 Professor, Department of Environmental Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 2021/08/14 Accepted: 2021/07/19)

Abstract

Concrete is the most commonly used material in the construction industry after water because of its special properties. However, the production process of Portland cement has major environmental drawbacks, as it is responsible for 8% of global CO₂ emissions (4 billion tons per year). Therefore, it seems necessary to use an alternative to conventional cements (Portland). In recent years, geopolymer has been introduced as a new and environmentally friendly cement agent to replace Portland cement. Geopolymers are chains or networks of mineral molecules linked by covalent bonds and consist of a combination of two main components, the aluminosilicate source (secondary raw material) and the alkaline activating solution. They can have excellent technical properties such as high mechanical strength, good chemical resistance or high thermal resistance. The fact that the good performance of geopolymers can also be achieved by using secondary raw materials such as industrial waste including fly ash or slag has been proven by various studies. This shows the great attention given to this technology. The use of waste to produce geopolymers can not only solve the problem of waste disposal, but also reduce the consumption of secondary raw materials. However, there is limited knowledge about the environmental consequences of geopolymer production. In this paper, an overview of the impacts of geopolymer production from an ecological perspective is presented. In addition, the drivers of the ecological impact of geopolymers are discussed to provide guidance for the development of geopolymer compounds for diverse applications.

Keywords: Life Cycle Assessment, Geopolymer, Concrete, Cement, Waste

*Corresponding Author: Alireza Esparham

Email: alireza.esparham@ut.ac.ir