



www.cpjournals.com

نشریه عمران و پروژه  
Civil & Project Journal (CPJ)

## A review of life cycle assessment (LCA) in quantifying environmental impacts of OPC and PFA concrete products

Masod Nabi Javid\*<sup>۱</sup>, Alireza Esparham<sup>۲</sup>

\* ۱- PhD Student in Energy Systems \_Energy and Environment, Department of Environmental Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran  
Email: mas.javid@ut.ac.ir

۲- PhD Student in Energy Systems \_Energy and Environment, Department of Environmental Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran  
Email: alireza.esparham@ut.ac.ir

### ABSTRACT

After water, concrete is the most widely used material in the construction industry due to its special properties. However, the Portland cement production process has major environmental disadvantages, resulting ۸% of global CO<sub>2</sub> emissions ( ۴ billion tons per year). Therefore, the need to use an alternative to Portland cement seems necessary. In recent years, geopolymers has been proposed as a new and environmentally friendly cement agent to replace Portland cement. Geopolymers are chains or networks of mineral molecules that are attached by covalent bonds, and are composed of a combination of two main parts, the aluminosilicate source (by-products) and the alkaline activating solution. They can exhibit outstanding technical properties such as high mechanical strength, good chemical resistance, or high thermal resistance. The use of PFA powdered fuel ash from coal-fired power plants to replace conventional OPC Portland cement has become quite common. Quantifying the environmental benefits of using these materials is difficult. The LCA life cycle assessment method, which is internationally standardized by the ISO 14040 series, can be used to quantify the environmental impacts of products and processes. In this review article, the use of LCA method for comparing the environmental impact of OPC precast concrete products with PFA precast concrete products is shown. The four stages of LCA are described in detail and the results of determining the material as a by-product or waste are discussed. An overview of other LCA studies conducted for environmental applications is also provided to determine which of the impact assessment methods is most widely used.

**Keywords:** LCA life cycle assessment method, CO<sub>2</sub> emissions, geopolymers concrete, impact assessment  
All rights reserved to Civil & Project Journal.



www.cpjournals.com

نشریه عمران و پروژه  
Civil & Project Journal (CPJ)

## مروری بر ارزیابی چرخه عمر (LCA) در کمی سازی تأثیرات زیست محیطی

### محصولات بتنی OPC و PFA

مسعود نبی جاوید<sup>۱\*</sup>، علیرضا اسپرهم<sup>۲</sup>

\*۱- دانشجوی دکتری مهندسی سیستمهای انرژی\_انرژی و محیط زیست، گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
پست الکترونیکی: mas.javid@ut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری مهندسی سیستمهای انرژی\_انرژی و محیط زیست، گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
پست الکترونیکی: alireza.esparham@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۶

### چکیده

بتن به علت دارا بودن ویژگی های خاص، پرمصرف ترین ماده در صنعت ساخت و ساز بعد از آب است. اما فرآیند تولید سیمان پرتلند معایب زیست محیطی عمده ای به دنبال دارد که این مورد ۸ درصد از انتشار CO<sub>2</sub> جهانی (۴ میلیارد تن در سال) را تشکیل می دهد. از این رو نیاز به استفاده از یک جایگزین برای سیمان پرتلند ضروری به نظر می رسد. در سال های اخیر، ژئوپلیمر به عنوان یک عامل سیمانی جدید و دوستدار محیط زیست، جهت جایگزینی برای سیمان پرتلند مطرح شده است. ژئوپلیمرها، زنجیره ها یا شبکه هایی از مولکول های معدنی هستند که با پیوندهای کووالانسی اتصال یافته اند و از ترکیب دو بخش اصلی منبع آلومیناسیلیکاتی (مواد اولیه فرعی) و محلول فعال کننده قلیایی تشکیل می شوند. ژئوپلیمرها می توانند ویژگی های فنی برجسته ای همچون مقاومت مکانیکی بالا، مقاومت شیمیایی مناسب و یا مقاومت حرارتی بالایی را از خود نشان دهند. کاربرد خاکستر سوخت پودر شده<sup>۱</sup> PFA، حاصله از نیروگاه های تولید برق با زغال سنگ، برای جایگزینی سیمان پرتلند معمولی<sup>۲</sup> یا OPC کاملاً مرسوم شده است. کمی سازی فواید زیست محیطی استفاده از این مواد دشوار می باشد. می توان از روش ارزیابی چرخه عمر LCA<sup>۳</sup> که توسط سری های ISO ۱۴۰۴۰ بصورت بین المللی استاندارد شده است، برای تعیین کمیت تأثیرات زیست محیطی محصولات و فرآیندها استفاده کرد. در این مقاله مروری، برای مقایسه تأثیرات زیست محیطی محصولات بتنی پیش ساخته OPC با محصولات بتنی پیش ساخته PFA، از روش LCA استفاده شده است. چهار مرحله LCA به تفصیل بیان شده و نتایج تعیین مواد به عنوان محصول جانبی یا پسماند مورد بحث قرار گرفته است. مروری بر سایر مطالعات LCA که جهت کاربردهای زیست محیطی انجام گرفته نیز ارائه شده است تا مشخص شود کدام روش ارزیابی پیامد<sup>۴</sup> بیشتر استفاده می شود.

کلمات کلیدی: روش ارزیابی چرخه عمر LCA، انتشار CO<sub>2</sub>، بتن ژئوپلیمری، ارزیابی پیامد

<sup>۱</sup> Pulverized Fuel Ash  
<sup>۲</sup> Ordinary Portland cement  
<sup>۳</sup> Life Cycle Assessment  
<sup>۴</sup> Impact Assessment

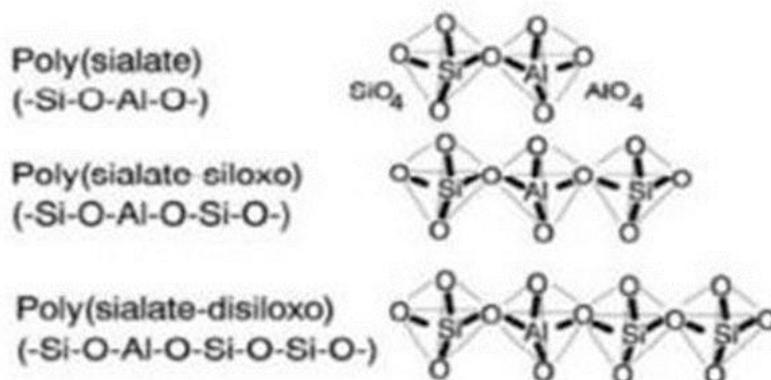
## ۱- مقدمه

تأثیرات زیست محیطی سیمان با انتشار آلاینده قابل توجهی از سه منبع مجزا به خوبی شناخته و تأیید شده است. این سه منبع شامل موارد زیر می باشند:

- انتشاراتی که از طریق حرارت دادن مواد اولیه در دمای بالا برای تشکیل کلینکر تولید می شوند،
- انتشارات مربوط به احتراق سوخت در کوره سیمان،
- انتشارات مربوط به انرژی بکاررفته جهت فعالیت کارخانه سیمان [۱].

مواد اولیه مورد استفاده در تولید سیمان سرشار از کربنات کلسیم می باشد و ممکن است از سنگ آهک، گچ یا رسوبات شیل<sup>۵</sup> استخراج شوند. بسته به مکان، فرآیند کلسیناسیون شامل مراحل همچون حفاری، انفجار و خرد کردن می باشد [۲]. فرآیند کلسیناسیون، که تقریباً عامل ۵۰٪ از انتشار CO<sub>2</sub> سیمان می باشد، به سوختن کربنات کلسیم نیاز دارد. و اکسید کلسیم و دی اکسید کربن را ایجاد می کند. بنابراین در حالی که امکان کاهش انتشارات زیست محیطی مرتبط با استفاده از سوخت و انرژی وجود دارد، ماهیت فرآیند کلسیناسیون به معنی آن است که کاهش بالقوه اثرات زیست محیطی سیمان محدود شده است.

بتن فعال شده قلیایی<sup>۶</sup> AAC یا بتن ژئوپلیمری به عنوان یک گزینه جایگزین امیدوارکننده برای بتن های مرسوم مبتنی بر سیمان پرتلند پدیدار شده است. ژئوپلیمر به عبارتی یک اصطلاح کلی است که به طیف وسیعی از مواد پلیمری آلومینوسیلیکات مصنوعی اشاره دارد که معمولاً در اصطلاح عام تری به آن بایندهای فعال شده قلیایی<sup>۷</sup> نیز گفته می شود. مواد ژئوپلیمری را میتوان از طیف وسیعی از مواد جامد طبیعی و مصنوعی پوزولانی تولید کرد که با محلول های قلیایی مانند هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم فعال می شوند. ژئوپلیمرها می توانند به عنوان بایندهایی "بدون سیمان" برای جایگزینی خمیرهای سیمان پرتلند در محصولات بتنی عمل کنند. ژئوپلیمرها مواد آلومینوسیلیکات سه بعدی بی شکل با خاصیت های سرامیکی هستند که در دمای محیط تولید و سخت می شوند. در شرایط بسیار قلیایی، با وجود محلول هیدروکسید قلیایی و سیلیکات، هنگامی که آلومینوسیلیکات های واکنش پذیر به سرعت حل می شوند و واحدهای چهار وجهی [SiO<sub>4</sub>] و [AlO<sub>4</sub>] آزاد می شوند، پلیمریزاسیون صورت می گیرد. واحدهای چهار وجهی به طور متناوب با تقسیم اتمهای اکسیژن و تشکیل ژئوپلیمرهای بی شکل، با پیش سازه های پلیمری پیوند برقرار می کند. یونهای مثبت مانند K یا Na که در حفره های چهار وجهی وجود دارند، بار منفی را متعادل می کنند حلقه ها و زنجیره ها همیشه از طریق پل Si-O-Al سیالات، شکل گرفته و به صورت صلیب متصل می شوند. بی نظمی با ساختارهای سه بعدی سیلیسی آلومینات نیمه بلوری در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. اصطلاحات ژئوپلیمر

ژئوپلیمرها به سرعت سخت می شوند 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 می تواند از سیمان‌ها یا ملات‌ها کمتر باشد و بنابراین خصوصیات مکانیکی برتری را دارا می باشند. ساختار نهایی و خصوصیات فیزیکی آنها به چندین پارامتر، مانند میزان آب، اندازه ذرات، تاریخچه حرارتی، محتوای فلزات قلیایی و درجه شکل‌گیری بستگی دارد. ژئوپلیمرها همچنین ویژگی‌هایی همچون نفوذپذیری مشابه سیمان پرتلند  $10^{-9}$  سانتی متر بر ثانیه، انبساط کم مواد قلیایی، انقباض کم، مقاومت حرارتی بسیار بالا و مقاومت شیمیایی بسیار مناسبی را از خود نشان می دهند [۶-۳]. یک ماده ژئوپلیمری PFA می باشد. PFA توسط نیروگاه‌های برقی که زغال سنگ را بعنوان سوخت به کار می برند، تولید می شود. زغال سنگ ریز پودر شده، با هوای گرم مخلوط شده و می سوزد. خاکستر حاصل توسط گازهای خروجی منتقل شده و به صورت "خاکستر بادی" با ذرات ریز بازیابی می شود. PFA ممکن است در مصالح ساختمانی بتنی مورد استفاده قرار گیرد یا در صورت وجود مازاد، در لاگون‌های مجاور نیروگاه‌ها ذخیره شود. در مطالعات قبلی، در مقایسه مواد ژئوپلیمر با سیمان گزارش شده است که میزان انتشار  $CO_2$  بین ۳۰٪ [۷] - ۸۰٪ [۸] کاهش یافته است، با مطالعات دیگر، مقادیری در این محدوده پیدا شده است [۹]، [۱۰]. روش ارزیابی چرخه عمر (LCA)، استاندارد شده طبق سری های ISO ۱۴۰۴۰ [۱۱]، می تواند برای تعیین کمیت اثرات زیست محیطی و مقایسه محصولات یا فرآیندها استفاده شود. همه محصولات یا فرآیندها در چرخه عمر خود مراحل مختلفی دارند و در هر یک از این مراحل، انرژی و منابع مصرف می شود و باعث تولید انتشارات زیست محیطی و پسماند می شوند. در یک مقایسه، این مقاله یک مرور کلی از روش LCA را ارائه می دهد و مشخص می شود که چگونه LCA در کمی سازی تأثیرات زیست محیطی محصولات بتنی پیش ساخته OPC و PFA استفاده می شود.

## ۲. ارزیابی چرخه عمر

طبق استاندارد ISO ۱۴۰۴۰، ارزیابی چرخه عمر در چهار مرحله زیر انجام می شود [۱۲]:

- تعریف هدف و دامنه
- تجزیه و تحلیل موجودی (سیاهی انتشار)
- ارزیابی پیامد (ارزیابی تأثیر)
- تفسیر نتایج

### ۲-۱. تعریف هدف و دامنه

تعریف هدف ارزیابی چرخه عمر، برنامه مورد نظر و هدف از انجام مطالعه را مشخص می کند. همچنین مخاطبان مورد نظر و اینکه آیا نتایج برای اهداف داخلی یا خارجی استفاده می شوند را شناسایی می کند. دامنه LCA محصولات یا فرآیندهایی را که در حال بررسی هستند، مشخص می کند و جزئیات انتخاب روش، فرضیات و محدودیت های کار را بیان می کند. این مقاله مروری است بر روش LCA و مشخص می کند که چگونه روش LCA در کمی سازی تأثیر زیست محیطی بتن OPC و PFA استفاده می شود.

#### ۲-۱-۱. تعریف واحد عملکردی

واحد عملکردی به عنوان "عملکرد کمی محصول یا سیستم جهت استفاده به عنوان واحد مرجع" تعریف می شود. به عنوان مثال اگر دو کیف خریداری شده؛ یکی از پلاستیک و دیگری از پارچه مقایسه شده باشد، واحد عملکردی می تواند تعداد محموله های خریدی

باشد که یک کیسه می تواند حمل کند. یک واحد عملکردی مناسب، یک مبنای مقایسه منصفانه را تضمین می کند و جنبه های کمی و کیفی یک محصول را در نظر می گیرد. در مورد محصولات بتنی، اثرات زیست محیطی به صورت حجمی در هر متر مکعب یا بر اساس اندازه واحد گزارش شده است. با این حال قابل توجه است که این واحدهای حجمی عملکرد غالب ماده را به عنوان یک عنصر سازه ای منعکس نمی کنند. بنابراین واحدی که شامل مقاومت فشاری و حجم باشد، ترجیح داده می شود [۱۲].

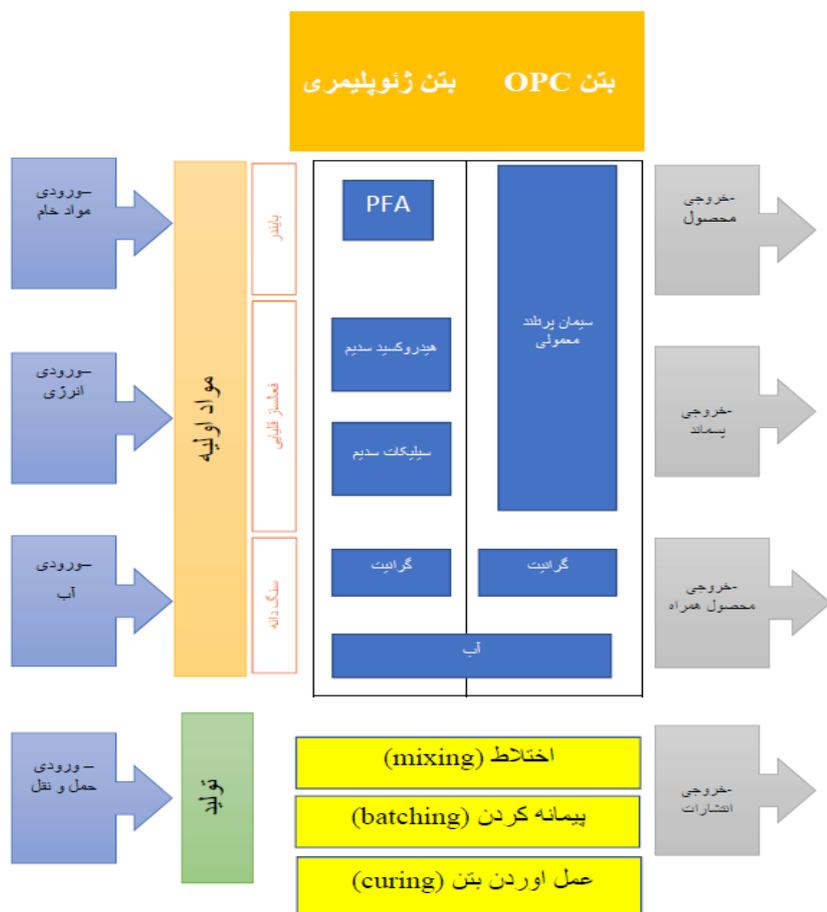
## ۲-۱-۲. مرز سیستم

مرز سیستم مشخص می کند که کدام مرحله از محصول یا چرخه عمر محصول یا فرآیند در محاسبه تأثیر زیست محیطی گنجانده خواهد شد. معمولاً سه سیستم مرزبندی پذیرفته شده است:

**Cradle to Gate**: شامل کلیه تأثیرات حاصل از استخراج مواد اولیه، فرآوری و تولید به محصول نهایی، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است.

**Cradle to Site**: شامل تمام تأثیرات مرحله حمل و نقل محصول به محل استفاده.

**Cradle to Grave (گهواره تا گور)**: شامل تمام تأثیرات مربوط به عمر کاربری مانند تعمیر و نگهداری / تعمیرات، انرژی مصرف شده و سناریوهای پایان عمر، از جمله اینکه چگونه اقلام دفع یا استفاده مجدد یا بازیافت شوند.



شکل ۲. نمونه مرز سیستم گهواره تا دروازه برای محصولات پیش ساخته ژئوپلیمر OPC

فرآیندهای زیادی وجود دارد که در آنها بیش از یک محصول تولید می شود. به عنوان مثال یک آسیاب چوبی ممکن است از همان فرآیند تخته های چوبی و خاک اره تولید کند. در شرایطی که محصولات متعددی وجود دارد، متناسب سازی تأثیرات زیست محیطی از طریق فرآیندی به نام تخصیص<sup>۱۲</sup> انجام می شود. مطابق با استاندارد ISO 14044، از تخصیص باید تا جایی که ممکن است اجتناب شود، که این کار توسط هر کدام از موارد زیر ممکن است:

- گسترش مرزهای سیستم برای دربرگرفتن توابع اضافی مرتبط با همه محصولات، یا
- تقسیم فرآیندها به زیر فرآیندها و اندازه گیری ورودهای و خروجی های این زیر فرآیندها.

در شرایطی که به راحتی نمی توان از تخصیص جلوگیری کرد، توصیه می شود بر اساس رابطه فیزیکی بین محصولات، از نظر وزن یا جرم، یا از نظر ارزش اقتصادی تقسیم شود. به عنوان مثال با استفاده از مثال قبلی آسیاب چوبی، به طور انبوه می توان تأثیرات زیست محیطی را به مقدار ۱۰٪ به گرد و غبار اره و ۹۰٪ به تخته های چوبی اختصاص داد، این رابطه تغییر نخواهد کرد. در صورت تخصیص اقتصادی، قیمت فعلی بازار برای تخته ها در برابر گرد و غبار اره استفاده می شود. از آن جا که تخته ها دارای ارزش اقتصادی بسیار بالاتری هستند، ممکن است ۹۹٪ از تأثیر در مقابل ۱٪ برای خاک اره به آنها اختصاص یابد. اگر با این وجود تغییری در بازار ایجاد می شد، جایی که به دلایلی گرد و غبار به کالایی شدیداً مورد نیاز تبدیل می شد، این مبنای تخصیص تغییر می کرد. بدین ترتیب، روش های تخصیص باید با احتیاط انجام شود. تخصیص اقتصادی به دلیل بی ثباتی قیمت، تغییرپذیری بالایی دارد [۱۱]، [۱۳]. در حالی که تخصیص جرمی پایداری بیشتری را امکان پذیر می کند، اما گاهی اوقات کمتر مناسب است.

کمی سازی تأثیرات زیست محیطی مواد چندگانه تولید شده در طی یک فرآیند واحد به این بستگی دارد که آیا آنها از نظر شکل ظاهری به عنوان "زباله" یا "محصول جانبی" تعیین می شوند. آنگونه که توسط چن و همکاران (۲۰۱۰) بحث شده است [۱۳]، تنها اثر زیست محیطی تولید پسماند در دفع آن است. با این حال، هنگامی که استفاده های مفیدی برای مواد پسماند پیداشود، ارزش اقتصادی آنها افزایش می یابد و در نتیجه آنها دیگر به عنوان مواد زائد در نظر گرفته نمی شوند، و در عوض به عنوان محصولات جانبی با ارزش فرآیند اولیه در نظر گرفته می شوند. در این حالت، برخی از تأثیرات زیست محیطی فرآیندهای تولید پسماند باید به آنها نسبت داده شود [۱۱]. بر اساس آخرین دستورالعمل چارچوب پسماند<sup>۱۳</sup> [۱۴] در اروپا، اگر ضوابط زیر رعایت شود، یک پسماند ممکن است به عنوان محصول فرعی طبقه بندی شود:

- اطمینان به استفاده از این ماده
- این ماده را بتوان بدون هیچ گونه فرآیند بیشتری استفاده کرد.
- این ماده را بتوان به عنوان بخشی جدایی ناپذیر از فرآیند تولید استفاده کرد.
- استفاده بیشتر از این ماده، بدون تأثیر بر محیط زیست یا سلامت انسان، طبق ماده ۵ دستور ۹۸/۲۰۰۸ EC مجاز است.

تحت این معیارها، PFA در اتحادیه اروپا دیگر به عنوان یک محصول پسماندی در نظر گرفته نمی شود بلکه در عوض به عنوان یک محصول فرعی بشمار می آید، بنابراین تخصیص اعمال می شود. تخصیص جرم نسبت به تخصیص ارزش اقتصادی، اثرات زیست محیطی بسیار بالاتری را به PFA نسبت می دهد؛ با مقادیر گزارش شده، به ترتیب ۲.۴۴ کیلوگرم CO<sub>2</sub> بر هر کیلوگرم CO<sub>2</sub> و ۰.۱۹۶ کیلوگرم CO<sub>2</sub> بر هر کیلوگرم [۱۱]، [۱۳].

مقادیر استفاده شده رایج در مطالعات LCA در انگلیس و اروپا در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- تأثیرات زیست محیطی PFA (به ازای هر کیلوگرم) از منابع با توجه به عدم تخصیص و تخصیصی جرم وارزش اقتصادی

واحد	براوردهای صنعتی، بدون تخصیص [۱۱]	بدون تخصیص [۱۲] (EU)	تخصیص اقتصادی [۱۲] (EU)	تخصیص جرمی [۱] (EU)	تخصیص اقتصادی [۱۲] (EU)
	kgCO <sub>2</sub> /kg	kgCO <sub>2</sub> eq/kg	kgCO <sub>2</sub> eq/kg *	kgCO <sub>2</sub> /kg	kgCO <sub>2</sub> /kg
PFA	۰.۰۰۴	۰.۰۰۴۸	۰.۱۹۰	۲.۴۴	۰.۱۹۶

\* اندیکاتور CO<sub>2</sub>eq معرف گازهای گلخانه‌ای "basket of ۶ greenhouse gases" پیمان کیوتو است که با استفاده از فاکتورهای ضرب مختلف، متان، اکسید نیتروژن، هیدروفلوروکربن‌ها، پرفلوئوروکربن‌ها و هگزا فلورید گوگرد را به مقدار CO<sub>2</sub> معادل تبدیل می‌کند.

## ۲-۲. تحلیل موجودی

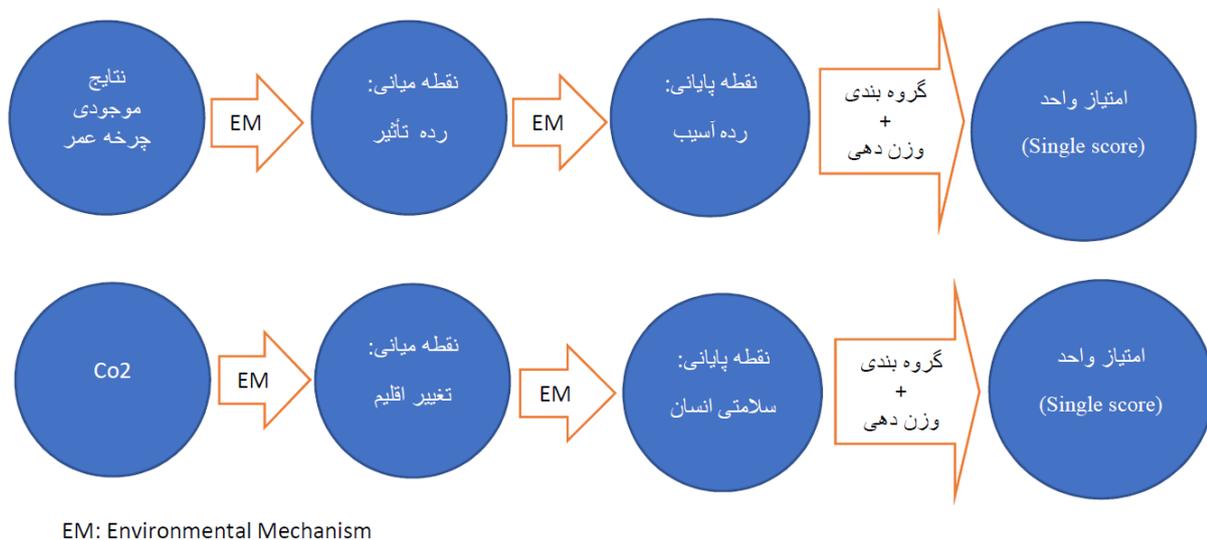
تحلیل موجودی تمام ورودی‌ها (انرژی، منابع مادی و غیره) و خروجی‌ها (انتشارات، پسماندها و غیره) موجود در یک سیستم را شناسایی و تعیین می‌کند. در صورت امکان، اطلاعات باید از فرآیند بررسی شده مانند انرژی مصرفی جهت اختلاط<sup>۱۵</sup>، پیمان کردن<sup>۱۶</sup> و عمل آوری<sup>۱۷</sup> محصولات بتنی جمع آوری شود (داده‌های اولیه). همچنین میزان مواد خام مانند سنگدانه‌ها، آب، بایندها باید اندازه‌گیری و شیوه حمل و نقل و مسافت پیموده شده نیز باید ثبت شود. هنگامی که داده‌ها از منابع ثانویه در تحلیل موجودی جمع آوری می‌شوند، در این حالت قوانین کیفیت داده‌ها در مورد اطلاعات جمع آوری شده وجود دارد، از جمله:

- اطلاعات حساس به زمان هستند - ۵ سال گذشته ترجیح داده می‌شوند.
- اطلاعات بر مبنای جغرافیایی منطقه کاربرد دارند.
- فناوری مورد استفاده همانند یا مشابه فرآیند مورد بررسی باشد.
- داده‌ها نماینده جمعیت مورد بررسی باشند.
- داده‌ها دارای سازگاری<sup>۱۸</sup> باشند و با فرایندها و رویه‌های بررسی شده مطابقت داشته باشند.
- اطلاعات قابل بازتولید<sup>۱۹</sup> باشند - شخص دیگری بتواند آن را پیدا کند و از آن استفاده کند تا به همان راه حل برسد.

## ۲-۳. ارزیابی پیامد

در این مرحله، داده‌های مرحله موجودی مرتب و سامان بندی می‌شوند و تأثیر بالقوه زیست محیطی محاسبه می‌گردد. طبق استاندارد ISO ۱۴۰۴۰، ارزیابی تأثیر چرخه عمر شامل دو مرحله اجباری - انتخاب رده‌های پیامد<sup>۲۱</sup>، طبقه بندی کردن<sup>۲۲</sup> و ویژه سازی<sup>۲۳</sup> و دو مرحله اختیاری - نرمال سازی و وزن دهی است. همه آسیب‌های زیست محیطی را می‌توان به دسته بندی اثر در سطح نقطه میانی<sup>۲۴</sup> یا سطح نقطه انتهایی<sup>۲۵</sup> درجه بندی کرد. فرآیندی که در آن یک انتشار<sup>۲۶</sup> به پیامد های زیست محیطی تبدیل می‌شود، به عنوان یک مکانیسم زیست محیطی<sup>۲۷</sup> شناخته می‌شود [۱۸]. تأثیر نقطه میانی در برخی از نقاط در طول مکانیسم زیست محیطی رخ می‌دهد و نشان دهنده تأثیر منفی مستقیم بر محیط زیست است، مانند اوتروفیکاسیون و تغییرات آب و هوا. تأثیر نقطه پایانی در انتهای مکانیسم رخ می‌دهد و برای آن از اندیکاتورهای آسیب‌گرا<sup>۲۸</sup> مرتبط با آسیب به سلامت انسان یا اکوسیستم استفاده می‌شود [۱۹]. استفاده از چندین

دسته اثر از نقطه میانی امکان جزئیات بیشتر در مورد آسیب های زیست محیطی را فراهم می کند، اما اندیکاتورهای آسیب گرای نقطه پایانی ممکن است در امتیازهای واحد<sup>۲۹</sup> تجمیع شوند که تفسیر و درک آن برای افراد غیر متخصص آسان تر است. نمایش ساده و مثالی از یک مسیر انتشار در مرحله ارزیابی تأثیر چرخه عمر در شکل ۲ نشان داده شده است.



EM: Environmental Mechanism

شکل ۳. رابطه بین نتایج موجودی چرخه عمر، نقطه میانی، نقطه پایان و امتیاز واحد.

بسیاری از روشهای ارزیابی نقطه میانه و نقطه پایانی، مانند CML، Impact ۲۰۰۲+، TRACI و Eco-indicator ۹۹ وجود دارد. جمعی از خبرگان LCA در سال ۲۰۰۰ به این نتیجه رسیدند که یک چارچوب مشترک ارزیابی تأثیر که معرف نتایج در سطح نقطه میانی و نقطه پایانی باشد، لازم بوده است. روش ReCiPe، با استفاده از روش های ۹۹ Eco-indicator و CML ارائه گردید. این روش اصول های مدل سازی و گزینش ها را باهم هماهنگ می کند [۱۹].

#### ۲-۴. تفسیر نتایج

در مرحله نهایی LCA، نتایج، پیش فرض ها و کل انتخاب های انجام شده بررسی می شود و سنجش صحت و پایداری توسط تحلیل های حساسیت و عدم قطعیت انجام می شود. سپس نتیجه گیری کلی انجام شده و توصیه هایی با خلاصه ای از موضوعات اصلی، محدودیت ها و توجیه نتیجه گیری بر اساس یافته های فرایند LCA ارائه می شود [۱۸]. پس از اتمام مرحله ارزیابی تأثیر چرخه عمر، کلیه نتایج بررسی و یافته های کلیدی ارائه می شود.

#### ۳. نتیجه گیری

در این مقاله نحوه استفاده از روش LCA برای ارزیابی تأثیرات زیست محیطی محصولات ژئوپلیمری و بتنی ارائه شده است. بررسی پژوهش های قبلی اهمیت تعیین ماده به عنوان پسماند یا محصول جانبی و این که چگونگی تخصیص بر مبنای جرمی یا اقتصادی

می تواند به طور قابل توجهی محاسبات اثرات زیست محیطی تغییر دهد را نشان می دهد. همچنین انواع داده های مورد نیاز برای مرحله موجودی چرخه عمر و قوانین مربوط به کیفیت داده ها بیان شد.

## مراجع

- [۱] P. Van Den Heede and N. De Belie, "Cement & Concrete Composites Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations," *Cem. Concr. Compos.*, vol. ۳۴, no. ۴, pp. ۴۳۱-۴۴۲, ۲۰۱۲.
- [۲] M. Suhr et al., Best Available Techniques (BAT). Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. ۲۰۱۵.
- [۳] A. Esparham, A. B. Moradikhou, F. K. Andalib, and M. J. Avanaki, "Strength characteristics of granulated ground blast furnace slag-based geopolymer concrete," *Advances in concrete construction*, vol. ۱۱, no. ۳, pp. ۲۱۹-۲۲۹, Mar. ۲۰۲۱.
- [۴] A. Esparham, A. B. Moradikhou, M. J. Jamshidi Avanaki, "Effect of Various Alkaline Activator Solutions on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete," *Journal of civil Engineering and Materials Application*, vol. ۴, no. ۲, pp. ۱۱۵-۱۲۳, ۲۰۲۰.
- [۵] A. B. Moradikhou, A. Esparham, M. J. Jamshidi Avanaki, "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*, vol. ۳, no. ۴, pp. ۱۹۳-۲۰۱, ۲۰۱۹.
- [۶] A. Esparham, A. B. Moradikhou, "A Novel Type of Alkaline Activator for Geopolymer Concrete Based on Class C Fly Ash," *Advance Researches in Civil Engineering*, vol. ۳, no. ۱, pp. ۱-۱۳, ۲۰۲۱.
- [۷] B. Tempest, O. Sanusi, J. Gergely, V. Ogunro, and D. Weggel, "Compressive Strength and Embodied Energy Optimization of Fly Ash Based Geopolymer Concrete," ۲۰۰۹ World Coal Ash Conf., pp. ۱-۱۷, ۲۰۰۹.
- [۸] E. Von Weizsacker, K. Hargroves, M. Smith, C. Desha, and P. Stasinopoulos, *Factor Five: Transforming the Global Economy through ۸۰% Improvements in Resource Productivity*. London: Earthscan/Routledge, ۲۰۰۹.
- [۹] B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. Van Riessen, and G. D. Corder, "Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement," *J. Clean. Prod.*, vol. ۱۹, no. ۹-۱۰, pp. ۱۰۸۰-۱۰۹۰, ۲۰۱۱.
- [۱۰] D. Stengel, T., Reger, T., Heinz, "Life Cycle Assessment of Geopolymer Concrete – What is the Environmental Benefit?" CIA.
- [۱۱] BS EN ISO ۱۴۰۴۰, *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles an Framework*, vol. ۳. ۲۰۰۶.
- [۱۲] P. Purnell and L. Black, "Embodied carbon dioxide in concrete: Variation with common mix design parameters," *Cem. Concr. Res.*, vol. ۴۲, no. ۶, pp. ۸۷۴-۸۷۷, Jun. ۲۰۱۲.
- [۱۳] C. Chen, G. Habert, Y. Bouzidi, A. Jullien, and A. Ventura, "Resources, Conservation and Recycling LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete" *Resources, Conserv. Recycl.*, vol. ۵۴, no. ۱۲, pp. ۱۲۳۱-۱۲۴۰, ۲۰۱۰.
- [۱۴] Directive ۲۰۰۸/۹۸/EC, "Waste Framework Directive," *Off. J. Eur. Union*, vol. ۳۱۲, pp. ۳-۳۰, ۲۰۰۸.
- [۱۵] MPA, "Fact Sheet ۱۸ Embodied CO<sub>2</sub>e of UK cement, additions and cementitious material," pp. ۱-۸, ۲۰۱۵.
- [۱۶] G. Habert and C. Ouellet-Plamondon, "Recent update on the environmental impact of geopolymers," *RILEM Tech. Lett.*, vol. ۱, pp. ۱۷-۲۳, ۲۰۱۶.
- [۱۷] SIRIM, "Malaysia Life Cycle Inventory Database," ۲۰۱۸. [Online]. Available: <http://lcamalaysia.sirim.my/>. [Accessed: ۲۳-Mar-۲۰۱۸].

- [۱۸] J. Guinée, Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards, 1<sup>st</sup> ed. Springer Netherlands, ۲۰۰۲.
- [۱۹] M. Goedkoop, R. Heijungs, M. Huijbregts, A. De Schryver, J. Struijs, and R. Van Zelm, "ReCiPe ۲۰۰۸," Potentials, pp. ۱-۴۴, ۲۰۰۹.