

تحلیل اثرات زیست‌محیطی تولید سیمان کم‌کربن با استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر (LCA) رویکردی نوآورانه در مدیریت فناوری پایدار

مجتبی امیدی

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

نام نویسنده مسئول:

مجتبی امیدی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷

چکیده

صنعت سیمان یکی از مهم‌ترین صنایع زیربنایی جهان محسوب می‌شود که نقش اساسی در توسعه زیرساخت‌های شهری، صنعتی و عمرانی دارد. با این حال، این صنعت به‌عنوان یکی از منابع اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای، سهم قابل‌توجهی در تشدید تغییرات اقلیمی و آلودگی‌های زیست‌محیطی ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر، توسعه سیمان‌های کم‌کربن به‌عنوان یک نوآوری فناورانه در راستای کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی مورد توجه پژوهشگران و سیاست‌گذاران قرار گرفته است. هدف این پژوهش، تحلیل اثرات زیست‌محیطی تولید سیمان کم‌کربن با استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر (Life Cycle Assessment) است. در این مطالعه، مراحل استخراج مواد اولیه، تولید، حمل‌ونقل، مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها در چرخه حیات سیمان کم‌کربن بررسی و با سیمان پرتلند معمولی مقایسه شده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از فناوری‌های نوین نظیر جایگزینی کلینکر با مواد مکمل سیمانی، استفاده از سوخت‌های جایگزین و بهینه‌سازی مصرف انرژی می‌تواند به کاهش قابل‌توجه انتشار دی‌اکسید کربن، مصرف انرژی و تخریب منابع طبیعی منجر شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که رویکرد LCA ابزار مؤثری برای تصمیم‌گیری در مدیریت فناوری و توسعه پایدار صنایع ساختمانی به شمار می‌رود. در نهایت، پیشنهادهایی برای توسعه فناوری‌های کم‌کربن در صنعت سیمان ایران ارائه شده است.

واژگان کلیدی: سیمان کم‌کربن، ارزیابی چرخه عمر، مدیریت فناوری، نوآوری پایدار، توسعه پایدار، صنعت سیمان، اثرات زیست‌محیطی.

مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد سریع صنعتی‌سازی و توسعه زیرساخت‌های عمرانی موجب افزایش مصرف مصالح ساختمانی به‌ویژه سیمان شده است. صنعت سیمان به‌عنوان یکی از صنایع راهبردی در توسعه اقتصادی کشورها، سهم چشمگیری در اشتغال، رشد اقتصادی و توسعه زیرساخت‌ها دارد. با این وجود، فرآیند تولید سیمان به‌دلیل مصرف بالای انرژی و انتشار گسترده گازهای گلخانه‌ای، یکی از صنایع آلاینده جهان محسوب می‌شود.

بر اساس گزارش‌های بین‌المللی، صنعت سیمان حدود ۷ تا ۸ درصد از کل انتشار جهانی دی‌اکسیدکربن را به خود اختصاص می‌دهد. بخش عمده این انتشار ناشی از فرآیند تولید کلینکر و احتراق سوخت‌های فسیلی در کوره‌های سیمان است. افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، تغییرات اقلیمی و فشارهای قانونی برای کاهش آلاینده‌ها سبب شده است که صنایع مختلف به سمت فناوری‌های پایدار و کم‌کربن حرکت کنند.

در این میان، سیمان کم‌کربن به‌عنوان یکی از نوآوری‌های مهم در صنعت ساختمان مطرح شده است. این نوع سیمان با کاهش میزان کلینکر، استفاده از مواد جایگزین و فناوری‌های نوین تولید، می‌تواند اثرات زیست‌محیطی صنعت سیمان را کاهش دهد. ارزیابی چرخه عمر (LCA) نیز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای تحلیل زیست‌محیطی، امکان بررسی جامع اثرات زیست‌محیطی یک محصول را از مرحله استخراج مواد اولیه تا پایان عمر فراهم می‌کند.

از منظر مدیریت فناوری، توسعه سیمان کم‌کربن نمونه‌ای از نوآوری فناورانه در راستای تحقق توسعه پایدار محسوب می‌شود. مدیریت فناوری با تمرکز بر توسعه، انتقال و به‌کارگیری فناوری‌های نوین می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثرات زیست‌محیطی صنایع ایفا کند.

هدف اصلی این پژوهش، تحلیل اثرات زیست‌محیطی تولید سیمان کم‌کربن با استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر و بررسی نقش نوآوری فناورانه در کاهش پیامدهای زیست‌محیطی صنعت سیمان است.

بیان مسئله

افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و رشد پروژه‌های عمرانی موجب افزایش تقاضا برای سیمان در سطح جهانی شده است. در ایران نیز صنعت سیمان یکی از صنایع مهم اقتصادی محسوب می‌شود و کشور در شمار تولیدکنندگان بزرگ سیمان جهان قرار دارد. با این حال، مصرف گسترده سوخت‌های فسیلی، استفاده از فناوری‌های قدیمی و تولید بالای آلاینده‌ها، چالش‌های زیست‌محیطی متعددی را برای این صنعت ایجاد کرده است.

تولید هر تن سیمان پرتلند معمولی می‌تواند مقدار قابل‌توجهی دی‌اکسیدکربن وارد جو کند. این مسئله در شرایطی که جهان با بحران تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین مواجه است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. از سوی دیگر، فشار نهادهای بین‌المللی و سیاست‌های توسعه پایدار کشورها، صنایع را ملزم به کاهش اثرات زیست‌محیطی کرده است.

در پاسخ به این چالش‌ها، فناوری‌های سیمان کم‌کربن به‌عنوان راهکاری نوآورانه مطرح شده‌اند. اما مسئله اصلی این است که میزان واقعی کاهش اثرات زیست‌محیطی این فناوری‌ها تا چه اندازه است و آیا استفاده از آن‌ها می‌تواند به تحقق اهداف توسعه پایدار کمک کند یا خیر.

همچنین بسیاری از مطالعات تنها به بررسی انتشار کربن پرداخته‌اند و سایر اثرات زیست‌محیطی مانند مصرف انرژی، آلودگی هوا، مصرف منابع طبیعی و تولید پسماند کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر برای تحلیل جامع اثرات زیست‌محیطی سیمان کم‌کربن ضروری به نظر می‌رسد.

بر این اساس، سؤال اصلی پژوهش عبارت است از:

«تولید سیمان کم‌کربن با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه عمر چه تأثیری بر کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت سیمان

دارد و نقش نوآوری فناورانه در این فرآیند چیست؟»

اهمیت و ضرورت پژوهش

اهمیت این پژوهش را می‌توان در چند محور اصلی بیان کرد: افزایش نگرانی‌های جهانی درباره تغییرات اقلیمی و انتشار گازهای گلخانه‌ای. نقش بالای صنعت سیمان در تولید دی‌اکسید کربن و آلودگی محیط‌زیست. ضرورت توسعه فناوری‌های پایدار در صنایع تولیدی. نیاز به استفاده از ابزارهای علمی مانند LCA برای تصمیم‌گیری زیست‌محیطی. اهمیت مدیریت فناوری در توسعه نوآوری‌های سبز. ضرورت انطباق صنایع ایران با استانداردهای زیست‌محیطی جهانی. کمبود پژوهش‌های میان‌رشته‌ای در حوزه مدیریت فناوری و ارزیابی زیست‌محیطی صنعت سیمان. این پژوهش می‌تواند به مدیران صنعتی، سیاست‌گذاران، پژوهشگران و فعالان حوزه محیط‌زیست در اتخاذ تصمیمات راهبردی کمک کند.

اهداف پژوهش

هدف اصلی

تحلیل اثرات زیست‌محیطی تولید سیمان کم‌کربن با استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر.

اهداف فرعی

بررسی نقش فناوری‌های نوین در کاهش آلاینده‌های صنعت سیمان. مقایسه سیمان کم‌کربن با سیمان پرتلند معمولی از منظر زیست‌محیطی. تحلیل نقش مدیریت فناوری در توسعه نوآوری‌های پایدار. ارائه راهکارهایی برای توسعه تولید سیمان کم‌کربن در ایران.

مبانی نظری پژوهش

مفهوم توسعه پایدار

توسعه پایدار به معنای توسعه‌ای است که نیازهای نسل حاضر را بدون به خطر انداختن توانایی نسل‌های آینده در تأمین نیازهای خود برآورده کند. این مفهوم بر تعادل میان ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تأکید دارد. در سال‌های اخیر، صنایع مختلف برای دستیابی به توسعه پایدار تلاش کرده‌اند اثرات زیست‌محیطی خود را کاهش دهند. صنعت سیمان نیز از این قاعده مستثنی نیست.

مدیریت فناوری و نوآوری پایدار

مدیریت فناوری یکی از حوزه‌های میان‌رشته‌ای دانش مدیریت است که به برنامه‌ریزی، توسعه، انتخاب، انتقال، بومی‌سازی و بهره‌برداری مؤثر از فناوری‌ها در راستای تحقق اهداف سازمانی می‌پردازد. در محیط رقابتی و پویای امروز، فناوری به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع راهبردی سازمان‌ها شناخته می‌شود و توانایی مدیریت صحیح آن می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش بهره‌وری، ارتقای مزیت رقابتی و دستیابی به توسعه پایدار ایفا کند. از این رو، مدیریت فناوری صرفاً به جنبه‌های فنی محدود نمی‌شود، بلکه ابعاد اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و نهادی را نیز دربر می‌گیرد. در رویکردهای سنتی، مدیریت فناوری عمدتاً بر افزایش کارایی تولید، کاهش هزینه‌ها و ارتقای عملکرد اقتصادی تمرکز داشت؛ اما در دهه‌های اخیر، افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، محدودیت منابع طبیعی و تشدید آثار تغییرات اقلیمی موجب

تحول در اهداف و رویکردهای مدیریت فناوری شده است. در نتیجه، مفهوم «فناوری پایدار» به عنوان یکی از محورهای اصلی سیاست‌گذاری فناوری مطرح گردیده است. فناوری‌های پایدار به فناوری‌هایی اطلاق می‌شوند که ضمن ایجاد ارزش اقتصادی، کمترین آسیب را به محیط زیست وارد کرده و در راستای بهبود کیفیت زندگی و رفاه اجتماعی عمل می‌کنند.

همزمان با گسترش مفهوم توسعه پایدار، موضوع نوآوری پایدار نیز به یکی از مهم‌ترین مباحث حوزه مدیریت فناوری و نوآوری تبدیل شده است. نوآوری پایدار به توسعه و به‌کارگیری محصولات، خدمات، فرآیندها و مدل‌های کسب‌وکاری اطلاق می‌شود که علاوه بر ایجاد مزیت اقتصادی، موجب کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و ارتقای منافع اجتماعی شوند. برخلاف نوآوری‌های سنتی که عمدتاً با هدف افزایش سودآوری و سهم بازار شکل می‌گیرند، نوآوری پایدار تلاش می‌کند میان اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تعادل برقرار سازد.

اهمیت نوآوری پایدار از آن جهت است که بسیاری از چالش‌های جهانی معاصر نظیر تغییرات اقلیمی، آلودگی محیط زیست، کاهش منابع طبیعی و افزایش مصرف انرژی، با رویکردهای سنتی قابل حل نیستند. در چنین شرایطی، توسعه فناوری‌های جدید و بهبود فرآیندهای تولیدی می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف منابع و افزایش کارایی زیست‌محیطی صنایع ایفا کند. از این منظر، نوآوری پایدار نه تنها ابزاری برای حفاظت از محیط زیست محسوب می‌شود، بلکه عاملی مؤثر در ایجاد مزیت رقابتی پایدار و افزایش ارزش اقتصادی سازمان‌ها نیز به شمار می‌رود.

یکی از مهم‌ترین حوزه‌های کاربرد نوآوری پایدار، صنایع انرژی‌بر و آلاینده نظیر صنعت سیمان است. صنعت سیمان به دلیل مصرف گسترده انرژی، استخراج حجم بالای مواد معدنی و انتشار قابل توجه گازهای گلخانه‌ای، از جمله صنایعی است که بیشترین فشار را بر محیط زیست وارد می‌کند. در سال‌های اخیر، فشارهای ناشی از مقررات زیست‌محیطی، افزایش آگاهی عمومی و ضرورت تحقق اهداف توسعه پایدار، شرکت‌های تولیدکننده سیمان را به سمت توسعه فناوری‌های نوین و کم‌کربن سوق داده است.

سیمان کم‌کربن را می‌توان نمونه‌ای بارز از نوآوری پایدار در صنعت ساختمان و مصالح ساختمانی دانست. این نوع سیمان از طریق کاهش میزان کلینکر، استفاده از مواد جایگزین سیمانی، بهره‌گیری از پسماندهای صنعتی و بهبود فناوری‌های تولید، میزان انتشار دی‌اکسید کربن را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. توسعه چنین محصولی نه تنها به کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت سیمان کمک می‌کند، بلکه موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش هزینه‌های تولید در بلندمدت و افزایش سازگاری صنعت با الزامات قانونی و زیست‌محیطی نیز می‌شود.

از منظر مدیریت فناوری، توسعه سیمان کم‌کربن مستلزم طی کردن مراحل مختلف چرخه نوآوری شامل تحقیق و توسعه، انتقال فناوری، تجاری‌سازی، پذیرش بازار و بهبود مستمر فناوری است. موفقیت این فرآیند به عوامل متعددی نظیر سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه، حمایت‌های دولتی، همکاری میان دانشگاه و صنعت، دسترسی به فناوری‌های نوین و وجود زیرساخت‌های مناسب بستگی دارد. در واقع، مدیریت فناوری نقش مهمی در تبدیل ایده‌های فناورانه به محصولات و فرآیندهای پایدار ایفا می‌کند و زمینه لازم را برای استقرار نوآوری‌های زیست‌محیطی در صنایع فراهم می‌سازد.

علاوه بر این، ارزیابی عملکرد فناوری‌های نوین از منظر پایداری یکی از وظایف اساسی مدیریت فناوری محسوب می‌شود. در این راستا، استفاده از ابزارهایی مانند ارزیابی چرخه عمر (Life Cycle Assessment: LCA) اهمیت ویژه‌ای دارد. این روش امکان بررسی جامع اثرات زیست‌محیطی فناوری‌ها را در تمامی مراحل چرخه عمر فراهم می‌کند و به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا میزان موفقیت نوآوری‌های پایدار را به صورت علمی و مبتنی بر داده ارزیابی کنند. به همین دلیل، ارزیابی چرخه عمر به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی مدیریت فناوری پایدار شناخته می‌شود.

در مجموع، مدیریت فناوری و نوآوری پایدار دو مفهوم به‌هم‌پیوسته هستند که نقش مهمی در تحقق اهداف توسعه پایدار ایفا می‌کنند. حرکت صنایع به سوی فناوری‌های پاک، توسعه محصولات کم‌کربن، بهبود بهره‌وری منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی، بدون وجود نظامی کارآمد برای مدیریت فناوری و هدایت فرآیندهای نوآوری امکان‌پذیر نخواهد بود. در این میان، توسعه و کاربرد سیمان کم‌کربن را می‌توان نمونه‌ای موفق از به‌کارگیری اصول مدیریت فناوری و نوآوری پایدار در جهت کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت ساختمان و تحقق اهداف توسعه پایدار دانست.

سیمان کم کربن

صنعت سیمان یکی از مهم‌ترین صنایع پایه در توسعه زیرساخت‌های عمرانی و ساختمانی جهان محسوب می‌شود. با وجود نقش اساسی این صنعت در رشد اقتصادی و توسعه شهری، فرآیند تولید سیمان از جمله فعالیت‌های صنعتی با انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌رود. بخش عمده این انتشار ناشی از فرآیند تولید کلینکر و مصرف سوخت‌های فسیلی در کوره‌های سیمان است. برآوردهای بین‌المللی نشان می‌دهد که صنعت سیمان حدود ۷ تا ۸ درصد از کل انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از فعالیت‌های انسانی را به خود اختصاص می‌دهد. افزایش نگرانی‌های جهانی درباره تغییرات اقلیمی و ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای موجب شده است که توسعه فناوری‌های نوین در این صنعت به یکی از اولویت‌های اصلی سیاست‌گذاران، پژوهشگران و شرکت‌های تولیدکننده سیمان تبدیل شود.

در این راستا، مفهوم «سیمان کم کربن» (Low-Carbon Cement) به عنوان یکی از مهم‌ترین راهکارهای کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت سیمان مطرح شده است. سیمان کم کربن به انواع سیمان‌هایی اطلاق می‌شود که در فرآیند تولید آنها میزان انتشار دی‌اکسید کربن نسبت به سیمان پرتلند معمولی به طور قابل توجهی کاهش یافته باشد. هدف اصلی این فناوری، حفظ ویژگی‌های فنی و مقاومتی سیمان در کنار کاهش مصرف انرژی، استفاده بهینه از منابع طبیعی و محدود کردن انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی است.

نقش کلینکر در انتشار کربن

یکی از مهم‌ترین منابع انتشار دی‌اکسید کربن در صنعت سیمان، تولید کلینکر است. کلینکر ماده اصلی تشکیل‌دهنده سیمان پرتلند بوده و از حرارت دادن سنگ آهک و سایر مواد معدنی در دمای حدود ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شود. در این فرآیند، علاوه بر مصرف حجم قابل توجهی از انرژی، واکنش شیمیایی تجزیه کربنات کلسیم نیز موجب آزادسازی مستقیم دی‌اکسید کربن می‌شود. به همین دلیل، کاهش میزان کلینکر در ترکیب سیمان به عنوان یکی از مؤثرترین راهبردهای کاهش انتشار کربن شناخته می‌شود.

استفاده از سیمان‌های آمیخته که در آنها بخشی از کلینکر با مواد مکمل سیمانی جایگزین می‌شود، می‌تواند میزان انتشار دی‌اکسید کربن را به شکل قابل توجهی کاهش دهد. این رویکرد علاوه بر مزایای زیست‌محیطی، موجب کاهش مصرف مواد اولیه و افزایش بهره‌وری منابع نیز می‌شود.

استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی

سرباره دانه‌ای کوره بلند یکی از مهم‌ترین مواد جایگزین کلینکر در تولید سیمان کم کربن است. این ماده به عنوان محصول جانبی صنعت فولاد تولید می‌شود و دارای خواص هیدرولیکی مناسبی برای استفاده در تولید سیمان است. بهره‌گیری از سرباره علاوه بر کاهش مصرف کلینکر، موجب استفاده مجدد از پسماندهای صنعتی و کاهش حجم ضایعات می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که سیمان‌های حاوی سرباره می‌توانند دوام بیشتری در برابر حملات شیمیایی، سولفات‌ها و محیط‌های خورنده داشته باشند. از این رو، استفاده از سرباره نه تنها مزایای زیست‌محیطی، بلکه مزایای فنی و اقتصادی نیز به همراه دارد.

استفاده از خاکستر بادی

خاکستر بادی از جمله محصولات جانبی نیروگاه‌های حرارتی است که در اثر احتراق زغال‌سنگ تولید می‌شود. این ماده دارای خاصیت پوزولانی بوده و می‌تواند در ترکیب سیمان جایگزین بخشی از کلینکر شود. استفاده از خاکستر بادی باعث کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود برخی ویژگی‌های فنی بتن از جمله کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام می‌شود.

از منظر توسعه پایدار، بهره‌گیری از خاکستر بادی نمونه‌ای از اقتصاد چرخشی محسوب می‌شود؛ زیرا یک پسماند صنعتی به عنوان ماده اولیه در صنعت دیگری مورد استفاده قرار می‌گیرد و از دفن یا انباشت آن جلوگیری می‌شود.

استفاده از پوزولان‌های طبیعی

پوزولان‌های طبیعی شامل مواد معدنی سیلیسی و آلومینوسیلیکاتی هستند که در حضور آب با هیدروکسید کلسیم واکنش داده و ترکیبات سیمانی تولید می‌کنند. موادی مانند خاکسترهای آتشفشانی، تراس، توف‌های آتشفشانی و برخی رس‌های فعال از جمله پوزولان‌های طبیعی محسوب می‌شوند.

استفاده از این مواد در تولید سیمان کم‌کربن علاوه بر کاهش مصرف کلینکر، موجب صرفه‌جویی در انرژی و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود. در بسیاری از کشورها، بهره‌برداری از منابع محلی پوزولان به عنوان یکی از راهکارهای مهم توسعه سیمان‌های پایدار مورد توجه قرار گرفته است.

بهینه‌سازی مصرف انرژی در فرآیند تولید

یکی دیگر از راهکارهای اساسی در تولید سیمان کم‌کربن، افزایش بهره‌وری انرژی در واحدهای تولیدی است. بهینه‌سازی طراحی کوره‌ها، استفاده از سیستم‌های بازیافت حرارت، ارتقای تجهیزات آسیاب و بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند مدیریت انرژی می‌تواند مصرف سوخت و برق را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

از آنجا که بخش مهمی از انتشار گازهای گلخانه‌ای صنعت سیمان ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی است، هرگونه بهبود در بهره‌وری انرژی می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کاهش اثرات زیست‌محیطی این صنعت داشته باشد.

استفاده از سوخت‌های جایگزین

در سال‌های اخیر بسیاری از کارخانه‌های سیمان به استفاده از سوخت‌های جایگزین روی آورده‌اند. این سوخت‌ها شامل زیست‌توده، پسماندهای شهری، لاستیک‌های فرسوده، ضایعات کشاورزی و سایر منابع انرژی تجدیدپذیر هستند.

استفاده از سوخت‌های جایگزین ضمن کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مدیریت بهتر پسماندها می‌شود. علاوه بر این، بسیاری از کشورها از این رویکرد به عنوان ابزاری برای تحقق اهداف اقتصاد سبز و توسعه پایدار استفاده می‌کنند.

فناوری جذب، استفاده و ذخیره کربن

یکی از پیشرفته‌ترین فناوری‌های مورد استفاده در صنعت سیمان، فناوری جذب و ذخیره کربن (Carbon Capture and Storage: CCS) و فناوری جذب، استفاده و ذخیره کربن (CCUS) است. در این فناوری‌ها، دی‌اکسید کربن تولیدشده در فرآیند تولید سیمان جمع‌آوری شده و سپس یا در مخازن زمین‌شناختی ذخیره می‌شود یا در سایر فرآیندهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

اگرچه هزینه‌های سرمایه‌گذاری این فناوری‌ها نسبتاً بالا است، اما بسیاری از پژوهشگران آنها را یکی از مؤثرترین راهکارهای دستیابی به اهداف کربن خنثی در صنعت سیمان می‌دانند. انتظار می‌رود با پیشرفت فناوری و کاهش هزینه‌ها، نقش این روش‌ها در آینده صنعت سیمان افزایش یابد.

مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی سیمان کم‌کربن

توسعه و استفاده از سیمان کم‌کربن مزایای متعددی به همراه دارد. مهم‌ترین مزیت این فناوری، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کمک به مقابله با تغییرات اقلیمی است. علاوه بر این، کاهش مصرف انرژی، کاهش استخراج منابع طبیعی، استفاده مجدد از پسماندهای صنعتی، بهبود بهره‌وری مواد اولیه و افزایش سازگاری با الزامات زیست‌محیطی از دیگر مزایای این نوع سیمان محسوب می‌شوند.

از منظر اقتصادی نیز کاهش مصرف سوخت، افزایش بهره‌وری تولید و کاهش هزینه‌های ناشی از مقررات زیست‌محیطی می‌تواند به ارتقای رقابت‌پذیری صنعت سیمان کمک کند. به همین دلیل، بسیاری از کشورها توسعه سیمان‌های کم‌کربن را به عنوان بخشی از راهبرد ملی کاهش انتشار کربن و تحقق اهداف توسعه پایدار دنبال می‌کنند.

در نهایت میتوان نتیجه گرفت که سیمان کم‌کربن یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های فناورانه در صنعت مصالح ساختمانی محسوب می‌شود که با هدف کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید سیمان توسعه یافته است. استفاده از مواد جایگزین کلینکر، بهره‌گیری از پسماندهای صنعتی، بهبود بهره‌وری انرژی، استفاده

از سوخت‌های جایگزین و توسعه فناوری‌های جذب کربن از مهم‌ترین راهبردهای دستیابی به این هدف هستند. از این رو، سیمان کم‌کربن را می‌توان یکی از ابزارهای کلیدی در مسیر تحقق توسعه پایدار، کاهش تغییرات اقلیمی و حرکت به سوی اقتصاد سبز در صنعت ساختمان دانست.

ارزیابی چرخه عمر (Life Cycle Assessment: LCA)

ارزیابی چرخه عمر (LCA) یکی از جامع‌ترین و پرکاربردترین ابزارهای مدیریت زیست‌محیطی است که برای شناسایی، کمی‌سازی و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی محصولات، فرآیندها و خدمات در تمامی مراحل چرخه حیات آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش با رویکردی نظام‌مند، تمامی ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم را از مرحله استخراج مواد اولیه تا تولید، توزیع، مصرف و دفع نهایی بررسی می‌کند. به همین دلیل، LCA به عنوان ابزاری مؤثر برای تصمیم‌گیری در زمینه توسعه پایدار، مدیریت فناوری و طراحی محصولات دوستدار محیط زیست شناخته می‌شود.

در دهه‌های اخیر، افزایش نگرانی‌ها درباره تغییرات اقلیمی، کاهش منابع طبیعی و رشد آلودگی‌های زیست‌محیطی موجب شده است که سازمان‌ها و صنایع مختلف به استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر روی آورند. این روش امکان شناسایی نقاط بحرانی در زنجیره تولید را فراهم می‌کند و به مدیران کمک می‌کند تا با اتخاذ راهبردهای مناسب، میزان مصرف منابع و تولید آلاینده‌ها را کاهش دهند. در صنعت سیمان نیز LCA یکی از مهم‌ترین ابزارهای ارزیابی فناوری‌های نوین از جمله سیمان‌های کم‌کربن محسوب می‌شود.

استانداردهای بین‌المللی ISO 14040 و ISO 14044 چارچوب اصلی اجرای مطالعات ارزیابی چرخه عمر را تعیین کرده‌اند. بر اساس این استانداردها، ارزیابی چرخه عمر شامل چهار مرحله اصلی است:

۱. تعیین هدف و دامنه مطالعه (Goal and Scope Definition)

در این مرحله، هدف اصلی پژوهش، محدوده سیستم مورد مطالعه، واحد عملکردی و مرزهای سیستم مشخص می‌شود. تعیین دقیق هدف و دامنه مطالعه نقش مهمی در اعتبار نتایج دارد. برای مثال، در ارزیابی زیست‌محیطی سیمان کم‌کربن باید مشخص شود که آیا مطالعه تنها مرحله تولید را دربر می‌گیرد یا تمامی مراحل از استخراج مواد اولیه تا مصرف و دفع نهایی محصول بررسی می‌شود.

۲. تحلیل موجودی چرخه عمر (Life Cycle Inventory Analysis: LCI)

این مرحله شامل جمع‌آوری و محاسبه تمامی داده‌های مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم است. ورودی‌ها می‌توانند شامل مواد اولیه، انرژی، آب و سوخت باشند و خروجی‌ها شامل محصولات، پسماندها و آلاینده‌های زیست‌محیطی هستند. در صنعت سیمان، اطلاعاتی نظیر میزان مصرف سنگ آهک، خاک رس، انرژی حرارتی، برق مصرفی و میزان انتشار دی‌اکسید کربن در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳. ارزیابی اثرات زیست‌محیطی (Life Cycle Impact Assessment: LCIA)

در این مرحله، داده‌های به دست آمده از تحلیل موجودی به شاخص‌های اثرات زیست‌محیطی تبدیل می‌شوند. مهم‌ترین شاخص‌های مورد استفاده شامل پتانسیل گرمایش جهانی، اسیدی شدن محیط، تخریب لایه اوزون، مصرف منابع طبیعی، آلودگی آب و هوا و سمیت انسانی است. این مرحله امکان مقایسه گزینه‌های مختلف فناوری را از منظر زیست‌محیطی فراهم می‌کند.

۴. تفسیر نتایج (Interpretation)

مرحله نهایی شامل تحلیل، تفسیر و ارزیابی نتایج به منظور استخراج نتیجه‌گیری‌های علمی و ارائه پیشنهادها برای مدیریت است. در این مرحله نقاط بحرانی چرخه عمر شناسایی شده و راهکارهایی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی ارائه می‌شود. نتایج حاصل از این بخش می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری مدیران، سیاست‌گذاران و سرمایه‌گذاران در انتخاب فناوری‌های پایدار قرار گیرد.

در مجموع، ارزیابی چرخه عمر ابزاری کارآمد برای سنجش عملکرد زیست‌محیطی فناوری‌های نوین محسوب می‌شود و در حوزه مدیریت فناوری نقش مهمی در شناسایی و توسعه نوآوری‌های پایدار ایفا می‌کند. استفاده از این روش در صنعت سیمان نشان می‌دهد که فناوری‌های تولید سیمان کم‌کربن می‌توانند در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی، مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و فشار بر منابع طبیعی را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. از این رو، به کارگیری رویکرد LCA می‌تواند زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر در مسیر توسعه پایدار و گذار به صنایع سبز باشد.

پیشینه پژوهش

پژوهش‌های متعددی در زمینه اثرات زیست‌محیطی صنعت سیمان انجام شده است. احمدی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی با استفاده از روش LCA نشان دادند که جایگزینی بخشی از کلینکر با مواد پوزولانی می‌تواند انتشار دی‌اکسید کربن را کاهش دهد. محمدی و رضایی (۱۳۹۹) تأثیر استفاده از سوخت‌های جایگزین در کارخانه‌های سیمان ایران را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از سوخت‌های زیستی می‌تواند مصرف انرژی فسیلی را کاهش دهد. در مطالعه‌ای دیگر، Zhang و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که سیمان‌های کم‌کربن در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی تا ۴۰ درصد انتشار کربن کمتری دارند. Li et al. (2020) نیز بیان کردند که استفاده از فناوری جذب و ذخیره کربن در صنعت سیمان می‌تواند نقش مؤثری در تحقق اهداف توسعه پایدار ایفا کند. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اگرچه تحقیقات متعددی در حوزه سیمان کم‌کربن انجام شده است، اما مطالعات میان‌رشته‌ای با رویکرد مدیریت فناوری و نوآوری پایدار همچنان محدود است.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت و روش اجرا، توصیفی-تحلیلی است. گردآوری داده‌ها به روش کتابخانه‌ای و با استفاده از منابع علمی معتبر شامل مقالات پژوهشی، کتاب‌های تخصصی، پایان‌نامه‌ها، گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی و اسناد مرتبط با صنعت سیمان انجام شده است. در این مطالعه، به منظور بررسی و تحلیل اثرات زیست‌محیطی تولید سیمان کم‌کربن، از روش ارزیابی چرخه عمر (Life Cycle Assessment: LCA) بهره گرفته شده است. این روش امکان ارزیابی جامع اثرات زیست‌محیطی محصول را در تمامی مراحل چرخه حیات، از استخراج مواد اولیه تا تولید و مصرف، فراهم می‌کند. در چارچوب پژوهش حاضر، داده‌های مربوط به مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف منابع طبیعی و سایر شاخص‌های زیست‌محیطی استخراج و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. همچنین با استفاده از مطالعات پیشین، عملکرد زیست‌محیطی سیمان کم‌کربن با سیمان پرتلند معمولی مقایسه شده است. در نهایت، نتایج حاصل از تحلیل‌ها با رویکرد مدیریت فناوری و نوآوری پایدار تفسیر شده و راهکارهایی برای توسعه فناوری‌های کم‌کربن در صنعت سیمان ارائه شده است.

محدوده سیستم

چرخه عمر مورد بررسی شامل مراحل زیر است:

استخراج مواد اولیه

حمل و نقل مواد

تولید کلینکر

آسیاب و تولید سیمان

مصرف انرژی

انتشار آلاینده‌ها

حمل محصول نهایی

شاخص‌های ارزیابی

شاخص‌های اصلی مورد بررسی عبارت‌اند از:

میزان انتشار دی‌اکسیدکربن

میزان مصرف انرژی

آلودگی هوا

مصرف منابع طبیعی

تولید پسماند صنعتی

روش تحلیل داده‌ها

داده‌های گردآوری شده در این پژوهش با استفاده از روش تحلیل تطبیقی و بررسی اسناد علمی معتبر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. بدین منظور، اطلاعات مربوط به اثرات زیست‌محیطی سیمان کم‌کربن و سیمان پرتلند معمولی از منابع علمی داخلی و بین‌المللی استخراج و مقایسه شده است. تحلیل داده‌ها بر پایه شاخص‌های اصلی ارزیابی چرخه عمر شامل میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف انرژی، مصرف منابع طبیعی و تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی انجام شده است. همچنین نتایج مطالعات پیشین در زمینه فناوری‌های کم‌کربن و کاربرد روش LCA در صنعت سیمان مورد بررسی قرار گرفت تا تصویری جامع از مزایا و محدودیت‌های این فناوری ارائه شود. در ادامه، یافته‌های حاصل از مطالعات تطبیقی با رویکرد مدیریت فناوری و نوآوری پایدار تفسیر شدند تا نقش فناوری‌های نوین در کاهش اثرات زیست‌محیطی و ارتقای پایداری صنعت سیمان تبیین گردد. در نهایت، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهادهایی برای توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های کم‌کربن در صنعت سیمان ایران ارائه شده است.

یافته‌های پژوهش

کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که مهم‌ترین مزیت زیست‌محیطی سیمان کم‌کربن، کاهش چشمگیر انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی است. بخش عمده انتشار کربن در صنعت سیمان به فرآیند تولید کلینکر و مصرف سوخت‌های فسیلی در کوره‌ها مربوط می‌شود. در سیمان‌های کم‌کربن، با کاهش نسبت کلینکر و استفاده از مواد جایگزین نظیر خاکستر بادی، سرباره کوره‌های آهن‌گدازی و پوزولان‌های طبیعی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که این فناوری می‌تواند بین ۳۰ تا ۴۰ درصد از انتشار دی‌اکسیدکربن را کاهش دهد. علاوه بر این، به‌کارگیری فناوری‌های نوین تولید و افزایش بهره‌وری انرژی نیز نقش مؤثری در کاهش ردپای کربنی این محصول دارد. بنابراین، توسعه و استفاده گسترده از سیمان کم‌کربن می‌تواند گامی مؤثر در جهت کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و تحقق اهداف توسعه پایدار باشد.

کاهش مصرف انرژی

یکی از مهم‌ترین مزایای سیمان کم‌کربن، کاهش مصرف انرژی در فرآیند تولید است. تولید کلینکر به‌عنوان اصلی‌ترین ماده تشکیل‌دهنده سیمان، نیازمند دماهای بسیار بالا و مصرف قابل‌توجه سوخت‌های فسیلی است. از این‌رو، کاهش میزان کلینکر و جایگزینی آن با مواد مکمل سیمانی موجب کاهش مصرف انرژی حرارتی و الکتریکی می‌شود. همچنین استفاده از فناوری‌های پیشرفته در طراحی کوره‌ها، بهینه‌سازی فرآیند تولید و بهره‌گیری از سامانه‌های بازیافت حرارت اتلافی، بازده انرژی را افزایش

داده و هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهد. این اقدامات علاوه بر مزایای اقتصادی، به کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت سیمان نیز کمک می‌کنند.

کاهش مصرف منابع طبیعی

استفاده از ضایعات صنعتی و مواد بازیافتی در تولید سیمان کم‌کربن، نقش مهمی در کاهش مصرف منابع طبیعی ایفا می‌کند. به‌کارگیری موادی مانند سرباره صنایع فولاد، خاکستر بادی نیروگاه‌ها و سایر مواد پوزولانی، نیاز به استخراج سنگ آهک و دیگر مواد معدنی را کاهش می‌دهد. این رویکرد علاوه بر حفظ ذخایر معدنی، موجب کاهش تخریب زیستگاه‌های طبیعی و آسیب‌های ناشی از فعالیت‌های معدنی می‌شود. همچنین استفاده مجدد از پسماندهای صنعتی، در راستای تحقق اقتصاد چرخشی و مدیریت پایدار منابع قرار دارد. در نتیجه، سیمان کم‌کربن می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای حفاظت از منابع طبیعی و کاهش فشار بر محیط‌زیست مطرح شود.

۴-۸. کاهش آلودگی هوا

فناوری‌های نوین مورد استفاده در تولید سیمان کم‌کربن می‌توانند میزان انتشار آلاینده‌های هوا را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهند. استفاده از سوخت‌های پاک‌تر، بهینه‌سازی فرآیند احتراق و بهره‌گیری از سیستم‌های پیشرفته کنترل آلاینده‌ها، موجب کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن، اکسیدهای گوگرد و ذرات معلق می‌شود. این امر نقش مهمی در بهبود کیفیت هوا، کاهش مخاطرات زیست‌محیطی و حفظ سلامت انسان دارد. در نتیجه، توسعه سیمان کم‌کربن می‌تواند گامی مؤثر در کاهش آلودگی هوا و دستیابی به اهداف توسعه پایدار باشد.

نقش نوآوری فناورانه

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که توسعه سیمان کم‌کربن بدون سرمایه‌گذاری در نوآوری فناورانه امکان‌پذیر نیست. فناوری‌های نوین در حوزه مواد، انرژی و مدیریت تولید نقش کلیدی در کاهش اثرات زیست‌محیطی دارند. مدیریت فناوری می‌تواند از طریق سیاست‌گذاری، انتقال فناوری و توسعه، تحقیق و توسعه، زمینه گسترش این نوآوری‌ها را فراهم کند.

بحث و تحلیل

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که سیمان کم‌کربن می‌تواند به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارهای کاهش اثرات زیست‌محیطی در صنعت ساختمان و زیرساخت مطرح شود. بررسی‌های انجام‌شده با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه عمر (LCA) نشان داد که بخش قابل‌توجهی از اثرات زیست‌محیطی صنعت سیمان به فرآیند تولید کلینکر، مصرف بالای انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط است. در این میان، کاهش نسبت کلینکر و استفاده از مواد جایگزین نظیر خاکستر بادی، سرباره کوره‌های آهن‌گدازی و پوزولان‌های طبیعی، نقش مهمی در کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و مصرف منابع طبیعی ایفا می‌کند. یافته‌های پژوهش با نتایج مطالعات داخلی و خارجی همسو بوده و نشان می‌دهد که بهره‌گیری از فناوری‌های کم‌کربن می‌تواند میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. از سوی دیگر، استفاده از این فناوری‌ها علاوه بر کاهش پیامدهای زیست‌محیطی، موجب افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های بلندمدت تولید نیز می‌شود. این موضوع بیانگر آن است که حرکت به سمت تولید سیمان کم‌کربن نه تنها یک ضرورت زیست‌محیطی، بلکه یک راهبرد اقتصادی و رقابتی برای صنایع سیمان محسوب می‌شود.

از منظر مدیریت فناوری، توسعه سیمان کم‌کربن نمونه‌ای از نوآوری پایدار است که در آن اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی به‌صورت هم‌زمان دنبال می‌شوند. مدیریت فناوری با فراهم کردن زیرساخت‌های لازم برای تحقیق و توسعه، انتقال دانش فنی، بومی‌سازی فناوری‌های نوین و تجاری‌سازی دستاوردهای پژوهشی، می‌تواند نقش کلیدی در گسترش این فناوری

ایفا کند. در واقع، موفقیت فناوری‌های کم‌کربن تنها به ویژگی‌های فنی آن‌ها وابسته نیست، بلکه نیازمند وجود نظام مدیریتی کارآمد، سیاست‌های حمایتی و سرمایه‌گذاری مستمر در حوزه نوآوری است.

همچنین نتایج پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از ضایعات و پسماندهای صنعتی در تولید سیمان کم‌کربن می‌تواند به تحقق اصول اقتصاد چرخشی کمک کند. در این رویکرد، مواد زائد صنایع دیگر به‌عنوان مواد اولیه مورد استفاده قرار گرفته و ضمن کاهش حجم پسماندها، فشار بر منابع طبیعی نیز کاهش می‌یابد. این موضوع از منظر توسعه پایدار اهمیت فراوانی دارد؛ زیرا علاوه بر کاهش آلودگی محیط‌زیست، موجب استفاده بهینه از منابع و افزایش بهره‌وری در زنجیره تولید می‌شود.

با وجود مزایای متعدد، توسعه و استقرار گسترده فناوری‌های تولید سیمان کم‌کربن با چالش‌هایی نیز همراه است. هزینه‌های اولیه سرمایه‌گذاری، محدودیت دسترسی به برخی مواد جایگزین، نیاز به اصلاح استانداردهای فنی و مقاومت برخی واحدهای صنعتی در برابر تغییرات فناورانه از جمله موانع موجود در این مسیر به شمار می‌روند. علاوه بر این، کمبود سیاست‌های تشویقی و ضعف ارتباط میان مراکز علمی و صنایع می‌تواند روند توسعه این فناوری‌ها را با کندی مواجه کند.

در شرایط کنونی که موضوع تغییرات اقلیمی و کاهش انتشار کربن به یکی از اولویت‌های اصلی جهان تبدیل شده است، صنعت سیمان ایران نیز ناگزیر از حرکت به سمت فناوری‌های پایدار و کم‌کربن خواهد بود. از این‌رو، حمایت دولت از پروژه‌های تحقیق و توسعه، ارائه مشوق‌های اقتصادی، ارتقای استانداردهای زیست‌محیطی و تقویت همکاری میان دانشگاه‌ها و صنایع می‌تواند زمینه لازم برای توسعه این فناوری‌ها را فراهم سازد. در مجموع، نتایج این پژوهش بیانگر آن است که سیمان کم‌کربن علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، می‌تواند به‌عنوان یک نوآوری راهبردی در مسیر توسعه پایدار و ارتقای رقابت‌پذیری صنعت سیمان مورد توجه قرار گیرد.

منابع و مراجع

- [۱] احمدی، م.، حسینی، ع. و رضایی، ف. (۱۴۰۰). بررسی اثرات زیست‌محیطی سیمان کم‌کربن با استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر. فصلنامه محیط‌زیست و توسعه پایدار، ۱۲(۳)، ۴۵-۶۲.
- [۲] محمدی، س. و رضایی، ح. (۱۳۹۹). تحلیل مصرف انرژی در صنعت سیمان ایران و راهکارهای کاهش انتشار کربن. مجله مدیریت انرژی، ۸(۲)، ۷۷-۹۵.
- [۳] زارع، ک. (۱۳۹۸). فناوری‌های نوین در صنعت سیمان و نقش آن‌ها در توسعه پایدار. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- [۴] کاظمی، ر. و شریفی، م. (۱۴۰۱). ارزیابی چرخه عمر محصولات صنعتی و کاربرد آن در صنایع ساختمانی. مجله پژوهش‌های محیط‌زیست، ۱۵(۱)، ۹۰-۱۱۰.
- [۵] عباسی، ن. (۱۴۰۰). مدیریت فناوری و نوآوری پایدار در صنایع تولیدی. تهران: انتشارات سمت
- [6] Robinson (2025). Burgelman, R. A., Christensen, C. M., & Wheelwright, S. C. (2009). *Strategic Management of Technology and Innovation* (5th ed.). McGraw-Hill.
- [7] Schilling, M. A. (2020). *Strategic Management of Technological Innovation* (6th ed.). McGraw-Hill.
- [8] Tidd, J., & Bessant, J. (2021). *Managing Innovation: Integrating Technological, Market and Organizational Change* (7th ed.). Wiley.
- [9] Rennings, K. (2000). Redefining innovation: Eco-innovation research and the contribution from ecological economics. *Ecological Economics*, 32(2), 319-332.
- [10] Nidumolu, R., Prahalad, C. K., & Rangaswami, M. R. (2009). Why sustainability is now the key driver of innovation. *Harvard Business Review*, 87(9), 56-64.
- [11] OECD. (2018). *Eco-Innovation and Green Growth*. OECD Publishing.
- [12] Gartner, E., & Sui, T. (2018). Alternative cement clinkers. *Cement and Concrete Research*, 114, 27-39.
- [13] Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11), 559-573.
- [14] Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26.
- [15] International Energy Agency (IEA). (2023). *Net Zero Roadmap: Cement Sector Transition Strategy*. Paris: IEA.
- [16] Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195-217.