



نقش سیمان در تولید اقتصادی کم کربن

داود امینی، گلرخ شهمرادزاده، ابراهیم رحیمی، فروغ انصاری

- 1- داود امینی کارشناس آزمایشگاه سیمان شهرکرد
- 2- گلرخ شهمرادزاده سرپرست آزمایشگاه سیمان شهرکرد
- 3- ابراهیم رحیمی کارمند آزمایشگاه سیمان شهرکرد
- 4- فروغ انصاری کارمند آزمایشگاه سیمان شهرکرد

خلاصه

این مقاله به آنچه می‌توان برای کاهش CO_2 در تولید سیمان با استفاده از فن آوری امروزی انجام داد، تمرکز می‌کند و آنچه را می‌توان تا سال 2050 به دست آورد، ارائه می‌دهد. اختراع بتن یک واقعه اساسی در تکامل بوده است. سادگی، دوام، استحکام، قیمت مناسب و توانایی بینهایت در قالب بندی، پایه‌های محکم و محیطی اساسی را برای جامعه فراهم می‌کند. برخی آن را "سنگ مایع" میدانند که به معماران، برنامه ریزان جامعه و سازندگان خانه می‌تواند کمک کنند رویاهای خود را تحقق بخشند، از جمله ایجاد فضاهای زیبایی و نور. بتن به طور مساوی در زیر آب، زیر زمین، در شرایط قطب شمال و در طبقه فوقانی آسمان خراش‌ها کارایی دارد. از مقاومت بالایی در برابر آتش برخوردار است. گرما را جذب و آزاد می‌کند، به عنوان یک تهویه مطبوع طبیعی به دلیل "عدم تحرک حرارتی" عمل می‌کند. نتیجه همه اینها این است که بتن پس از هوا و آب سومین ماده پرکاربرد در جهان است که جزء اصلی زندگی و جامعه مدرن است.

کلمات کلیدی: سیمان، دی اکسید کربن، آینده، اقتصاد

1. مقدمه

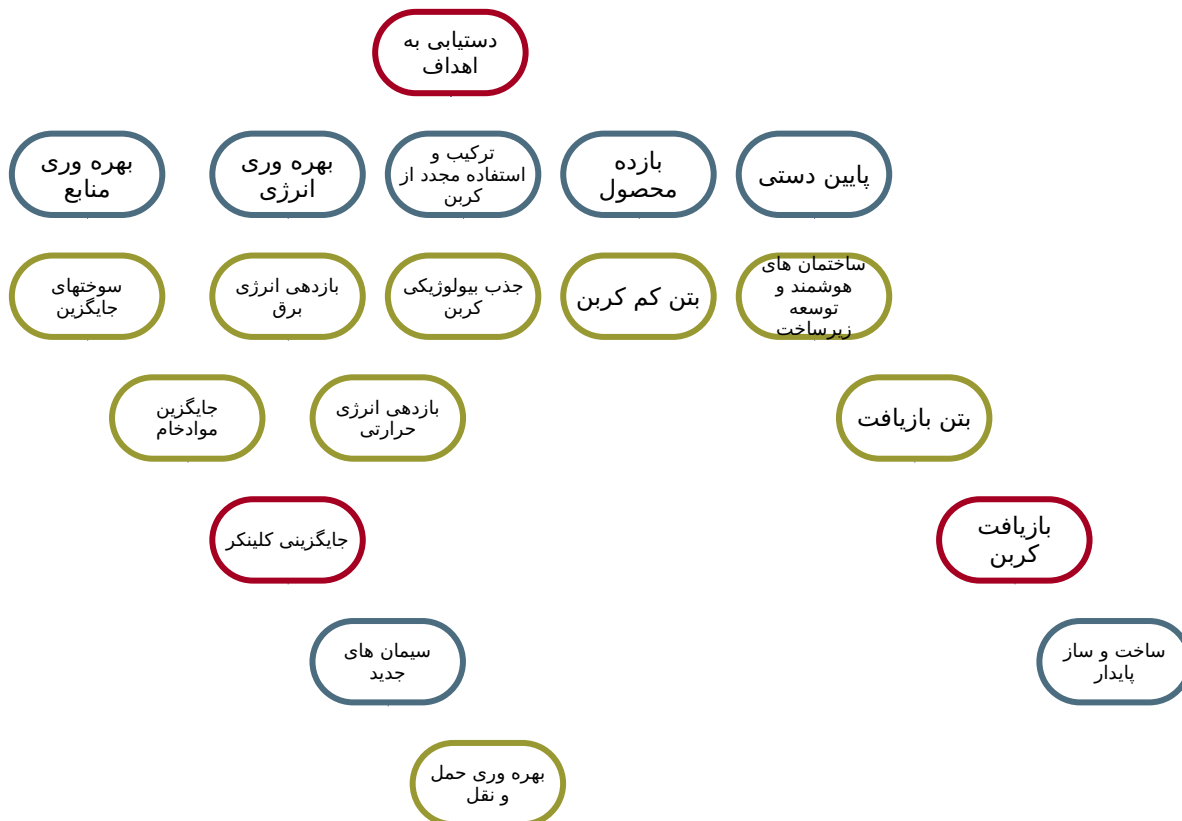
این مقاله به آنچه می‌توان برای کاهش CO_2 در تولید سیمان با استفاده از فن آوری امروزی انجام داد، تمرکز می‌کند و آنچه را می‌توان تا سال 2050 به دست آورد، گمانه زنی می‌کند. ماده یا چسب مخصوصی که، یک پودر خاکستری نسبتاً معمولی به نام سیمان است که تولید آن به طور معمول 600-700 کیلوگرم CO_2 در هر تن تولید می‌کند. تولید سیمان حدود 5٪ از انتشار CO_2 ساخته شده توسط انسان را تشکیل می‌دهد. این صنعت مسئولیت را به رسمیت می‌شناسد و تعهد خود را برای کاهش چشمگیر این مسئله بخصوص با مشارکت در گردش اقتصادی پذیرفته است. اما یک مسئولیت ثانویه برای صنعت وجود دارد. به عنوان مثال، حدود 18٪ از انرژی جهانی (با CO_2 حاصل) توسط ساختمانهای معمولی در طول زندگی مصرف میشود بسته به طراحی، ساختمانها و سازههای بتونی میتوانند بسیار ظریف باشند. همین امر در مورد بهره‌وری انرژی، جایی که بتن نقش اصلی را ایفا میکند، نیز در کار است اینرسی حرارتی آن بدان معنی است که ساختمانهای بتنی مدرن با تصور هوشمندانه می‌توانند 75٪ انرژی کمتری را در چرخه تمام زندگی خود استفاده کنند. بنابراین، چگونگی و زمان استفاده بتن میتواند تأثیر عمیقی بر میزان انتشار جهانی داشته باشد صنعت سیمان پیشگام در تحقیقات بتن، توسعه، تولید و فناوری است. از طریق کاربردهای نوآورانه و محصولات بتونی، سهم این صنعت در اقتصاد کم کربن در سال 2050 است پیش بینی آینده نوعی فعالیت خطرناک است. آنچه مسلم است این است که جهان در سال 2050 میلادی مکانی بسیار متفاوت از امروز خواهد بود. امروز، ما تقریباً به همه دانشهای جهانی با استفاده از Adevice که در جیب ما جای می‌گیرد، دسترسی داریم، حتی اگر بیشترین



کاربرد آن، به اشتراک گذاشتن زندگی شخص با 500 دوست باشد. با این وجود، چند روند متمایز وجود دارد: بین سالهای 2011 تا 2050، جمعیت جهان از 7.0 میلیارد به 9.3 میلیارد افزایش مییابد در همین زمان، جمعیت شهری از 3.6 میلیارد در سال 2011 به احتمالاً بیش از 6 میلیارد در سال 2050 افزایش می یابد پیش بینی می شود اقتصاد جهانی چهار برابر بزرگتر از امروز به 80٪ انرژی بیشتری نیاز دارد پیش بینی میشود حجم مسافرت در مناطق شهری تا سال 2050 به سه برابر افزایش یابد و تعداد اتومبیل در سراسر جهان به بیش از 2 میلیارد برسد. نوآوری در ساخت و ساز باعث میشود ساختمانها از انرژی بیشتری برخوردار شوند و میتوانند آنها را از مصرف کنندگان انرژی به تولیدکننده انرژی تبدیل کنند. افزایش جمعیت و رشد اقتصادی باعث افزایش فشار در منابع خواهد شد و نیاز به تلاشهای مداوم برای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی ایجاد میشود. سیمان به عنوان یک مؤلفه اصلی بتن نقش بسیار مهمی در مدیریت منابع و ارائه راه حلهایی برای مقابله با افزایش جمعیت و شهرنشینی دارد، با وجود اهرمهای احتمالی از جمله: ساختمانهای نوآورانه برای ارائه راه حل های مسکن انرژیزا یا فضای کار که به عنوان سیستم برای تولید انرژی تجدید پذیر دو برابر خواهند شد راهحلهای جدید حمل و نقل برای به حداقل رساندن اثرات محیطی و ساختمانهای عمودی جهت کاهش فضا. بتن ماده اصلی انتخاب اکثر این راه حلها خواهد بود. با این وجود، به عنوان یک صنعت، ما فقط به راه حلهایی که ارائه میدهیم متمرکز نخواهیم شد، بلکه همچنان به تولید مسئولیت پذیر با تولید حداکثر ادامه خواهیم داد.

2. تحلیل و بررسی

صنعت برای دستیابی به این اهداف در پنج مسیر متمرکز شده است، سه مورد از آنها "تحت کنترل" در نظر گرفته شده است. پس انداز بالقوه از دو مسیر دیگر بیان شده (بهره‌وری محصول و پایین دست) به طور مستقیم به تولید سیمان مربوط نمی شود، بنابراین گنجانده نشده است. با این وجود، این بخش متعهد به سرمایه‌گذاری در نوآوری است که روشهای جدیدی برای سیمان و بتن برای کمک به اقتصاد کم کربن و دایره‌های را بررسی میکند، به ویژه در مواردی که با استفاده هوشمندانه از بتن میتوان انتشار سیکل زندگی ساختمانها و سازه‌ها را بطور معناداری کاهش داد. هیچ انتخاب و فناوری واحدی وجود ندارد که بخواهند منجر به کاهش 80 درصدی تولید گازهای گلخانه‌ای شوند. استفاده از سوختهای جایگزین در دهه‌های گذشته به طور پیوسته افزایش یافته است و این افزایش همچنان ادامه دارد. ما محاسبات خود را بر اساس مخلوط سوخت متشکل از 60٪ سوختهای جایگزین انجام میدهیم. فرض بر این است که سیمان ساخته شده در سال 2050 حاوی 70٪ کلینکر خواهد بود. علاوه بر این، سیمانهای جدید (انتشار CO2 که از آن تخمین زده می-شود 50 درصد پایین تر از سیمانهای معمولی) می توانند 5 درصد از کل تولید سیمان را تشکیل دهند.



شکل 1 - مسیرهای دستیابی به اهداف در صنعت

اقدامات برای کاهش مصرف انرژی و بهبود بهره‌وری منابع، به طور واقعی، باعث کاهش انتشار CO_2 خواهد شد، از این رو تمرکز بر انتشار گازهای CO_2 است. ترکیبی از انتشار فرآیند (انهایی که در هنگام فرآیند تولید به سنگ آهک تبدیل میشوند) و تولید گازهای گلخانه‌ای از انرژی حرارتی مورد نیاز به این معنی است که انتشار CO_2 معمولی برای هر تن کلینکر در سال 1990، 912 کیلوگرم بود. کاهش انتشار CO_2 تلاش زیادی را در بسیاری از مسیرهای موازی انجام میدهد. در طول 20 سال گذشته صنعت سیمان اروپا با اجرای اقدامات از جمله موارد زیر، میزان انتشار CO_2 در هر تن سیمان را از 719 کیلوگرم در 1990 به 660 کیلوگرم در سال 2010 رسانده است.

جایگزین کوره‌های فن آوری مرطوب قدیمی با کوره‌های فن آوری خشک بسیار کارآمد- تر. امروزه بیش از 90٪ کلینکر تولید شده در اروپا مبتنی بر این فناوری است. بهبود فن آوریهای خردایش، منجر به کاهش مصرف برق و در نتیجه کاهش انتشار توسط بخش انرژی میشود افزایش مصرف انرژی حرارتی منجر به راندمان انرژی حرارتی بسیار بالا در فرآیند تولید کلینکر میشود. بهینه سازی و نوسازی کارخانجات موجود با نصب پیشرفته اتوماسیون، فناوری کنترل فرآیند و تجهیزات کمکی. استفاده از مقادیر بیشتر سوختهای جایگزین (افزایش هفت برابر از سال 1990)، متشکل از مواد زاید یا زیست توده. استفاده از مواد زائد مانند خاکهای آلوده، زباله‌های ساختمانی، قالبهای سرامیکی از این طریق نیاز به سنگ آهک و سایر مواد را کاهش میدهد

پنج مسیر موازی اثربخشی منابع

1.1 سوختهای جایگزین

سوختهای جایگزین، از جمله بخش زیادی از مواد زاید، به طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار میگیرند و اکنون تقریباً یک سوم کل سوختهای صنعت سیمان اتحادیه اروپا را تشکیل می‌دهند. تولید سیمان برای جذب ضایعات مانند لاستیک، لجن، خاک اره و سایر انواع زباله



ایده‌آل است. صنعت سیمان اروپا به طور پیوسته استفاده خود از سوخت‌های جایگزین (افزایش هفت برابر از سال 1990) را به بیش از 7 میلیون تن در سال 2010 افزایش داده است. همراه با بازیابی انرژی، خاکستر سوخت کاملاً به عنوان ماده اولیه در تولید سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای افزایش استفاده از سوخت‌های جایگزین، دسترسی به زباله و زیست توده نیز باید افزایش یابد. این امر به شما در ارتقاء درک بهتر فرصت‌ها و مزایای فراوری مشترک کمک می‌کند. تصویب قوانینی برای ترویج فرایند پردازش مواد زائد مناسب. تولید سیمان پرانرژی است و در حال حاضر ترکیبی از زغال سنگ، زیست توده و مواد زائد به عنوان منبع سوخت استفاده می‌شود. استفاده از سوخت‌های جایگزین مانند زیست توده یا مواد زائد تأثیر فوری بر مشخصات کرین صنعت دارد و اگرچه صنعت از مقادیر زیادی از این مواد استفاده می‌کند، این احتمالاً در آینده افزایش می‌یابد. فرایند و الزامات انرژی منحصراً به فرد صنعت سیمان، استفاده از مخلوط‌های سوخت را که برای بسیاری از صنایع دیگر مناسب نیست، امکان پذیر می‌سازد. این توانایی برای مخلوط کردن سوخت‌های فسیلی مانند زغال سنگ یا گاز با مواد زائد، زیست توده و فراورده‌های فرعی صنعتی هم از نظر بهره‌وری منابع و هم از نظر امنیت منابع سودمند است.

در اروپا، صنعت سیمان بخش عمده‌ای از منابع سوخت سنتی خود را با زیست توده یا زباله جایگزین کرده است. از نظر فنی، میزان تعویض بسیار بالاتری امکان پذیر است، که برخی از کارخانجات از 80 درصد سوخت جایگزین استفاده می‌کنند.

برای استفاده از زیست توده به عنوان سوخت، باید مقرون به صرفه، ایمن و به طور مداوم در دسترس باشد. با تلاش صنایع برای کاهش انتشار CO_2 و افزایش تقاضای انرژی سبز، رقابت با سایر بخش‌های صنعت (نیروگاه‌ها، صنعت فولاد، دیگ‌های زیست توده) در مورد دسترسی به زیست توده افزایش خواهد یافت. اگر قوانین زباله، در اتحادیه اروپا و کشورهای عضو آن، زباله‌ها را محدود کرده و امکان جمع‌آوری زباله‌های کنترل شده، تصفیه و تولید جایگزین سوخت را فراهم می‌کند، نرخ جایگزینی بیشتر سوخت‌های فسیلی توسط سوخت‌های جایگزین تسهیل می‌شود. درک بهتر و پذیرش اجتماعی استفاده از ضایعات به عنوان یک کارخانه جایگزین سوخت رسانی نیز مهم است. تخمین زده شده است که تا سال 2050، 40٪ از انرژی کوره به طور بالقوه می‌تواند از منابع سنتی، یعنی زغال سنگ (30٪) و کک (10٪) حاصل شود، در حالی که 60٪ از انرژی کوره به طور بالقوه می‌تواند توسط سوخت‌های جایگزین تأمین شود که 40٪ می‌تواند زیست توده باشد. این ترکیب سوخت منجر به کاهش کلی 27 درصدی انتشار CO_2 سوخت می‌شود. برای دستیابی به این سطح از کاهش، تعدادی از اصلاحات سیاست لازم است که در زیر آمده است. یک سیاست زباله را اجرا کنید که مزایای پردازش و ادغام نزدیک آن با سایر صنایع را به رسمیت به شناسد و به آنها پاداش دهد. با از بین بردن یارانه‌هایی که به نفع یک صنعت نسبت به صنعت دیگر است، زمینه بازی برای استفاده از ضایعات زیست توده را فراهم کنید. قانون زباله را برای جلوگیری از دفع زباله‌هایی که دارای ارزش کالری هستند یا دارای منابع قابل بازیابی دیگری هستند، اعمال کنید. تدوین یک سیاست تحقیق و توسعه برای ترویج بازیابی مواد با پتانسیل کالری حاصل از زباله

1.2 جایگزینی مواد خام

60٪ از آلاینده‌های این صنعت "تولید گازهای گلخانه‌ای فرایند" ناشی از دفع گاز سنگ آهک در طی فرایند تولید است.

سنگ آهک مورد نیاز برای ساختن کلینکر می‌تواند تا حدی با ایجاد مواد جایگزین کلسیم حاوی کلسیم، از جمله فراورده‌های فرعی صنعتی که در حال حاضر به طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، جایگزین شود. بسیاری از مواد جایگزین خاکستر هستند که با احتراق سوخت‌های جایگزین تهیه می‌شوند. تحقیقات بیشتر در مورد استفاده از مواد اولیه جایگزین و اطمینان از دسترسی به این مواد باید پشتیبانی شود. مواد اولیه اصلی مورد استفاده در تولید سیمان به طور سنتی سنگ آهک بوده است. سنگ آهک به وفور در دسترس است، اما بیش از 60٪ از انتشار CO_2 صنعت در اثر تبدیل سنگ آهک به آهک به نام "دکربن



زدایی ایجاد می شود. بر این اساس، بخشی از مسیر به سمت بتن ریزی با بتن کم کربن می تواند جایگزین سنگ آهک باشد. صنعت سیمان در حال حاضر بخشی از منابع طبیعی خام خود را جایگزین زباله و فرآورده‌های فرعی سایر فرایندهای صنعتی میکند. زباله های منتخب و فرآورده‌های حاوی عناصر مفید مانند **اسکلسیم**، سیلیس، آلومینا و آهن می توانند به عنوان مواد اولیه در کوره استفاده شوند و جایگزین مواد طبیعی مانند خاک رس، شیل و سنگ آهک می شوند. برخی از مواد زائد هم از لحاظ معدنی مفید و هم از نظر کالری قابل بازیافت هستند. به عنوان مثال، لجن فاضلاب از کالری کم اما قابل توجهی برخوردار است و خاکستر را به همراه می‌آورد که به عنوان ماده خام برای تهیه کلینکر تبدیل میشود. در سالهای اخیر، حدود 3-4٪ از مواد اولیه مورد استفاده در تولید کلینکر در اروپا شامل مواد اولیه جایگزین و خاکستر سوخت بوده و در کل حدود 14.5 میلیون تن در سال است. استفاده از مواد اولیه جایگزین مزایای بسیاری را ارائه میدهد، از جمله کاهش نیاز به معدن و کاهش انتشار CO₂ در صورتی که مواد جایگزین قبلاً دفع گاز شده باشد. از نظر حجم، زباله های ساختمانی و تخریب بزرگترین گروه واحد از انواع زباله‌ها را در اروپا نشان میدهد و بخش قابل توجهی از این زباله ها بتونی است. تولید سیمان می تواند با استفاده مجدد از بتن خرد شده به عنوان جایگزینی برای سنگ آهک، فراهم کند.

1.3 جایگزینی کلینکر

کلینکر را می توان با طیف وسیعی از مواد جایگزین، از جمله پوزولان، سنگ آهک ریز و مواد زاید یا مواد فرعی صنعتی مخلوط کرد. نسبت کلینکر به سیمان (درصد کلینکر نسبت به سایر اجزای کلینکر) تأثیر بر خواص سیمان دارد بنابراین استاندارد ها نوع و نسبت مواد تشکیل دهنده جایگزین را که میتوانند مورد استفاده قرار گیرند تعیین میکنند. تولید سیمان پراثرتری است و در حال حاضر ترکیبی از زغال سنگ، زیست توده و مواد زاید به عنوان منبع سوخت استفاده میشود. استفاده از سوختهای جایگزین مانند زیست توده یا مواد زائد تأثیر فوری بر مشخصات کربن صنعت دارد و در حالی که صنعت از مقادیر زیادی از این مواد استفاده می کند، این ممکن است در آینده افزایش یابد. فرآیند و الزامات انرژی منحصراً به فرد صنعت سیمان، استفاده از مخلوطهای سوخت را که برای بسیاری از صنایع مناسب نیست، امکان پذیر میسازد. توانایی در مخلوط کردن سوخت های فسیلی مانند زغال سنگ یا گاز با مواد زائد، زیست توده و فرآورده‌های فرآورده‌های صنعتی از نظر ضریب منابع و هم از نظر امنیت تأمین کننده سودمند است. استفاده از سایر ترکیبات موجود در سیمان و کاهش نسبت کلینکر به سیمان به معنای پایین آمدن انتشار و مصرف انرژی کمتر است. سیمان پرتلند معمولی می تواند حاوی حداکثر 95٪ کلینکر (5٪ دیگر آن گچ باشد). نسبت فعلی کلینکر به سیمان نسبت به انواع سیمان موجود در 73.7٪ EU27 است. انواع مختلف سیمان دارای خصوصیات مختلفی از جمله زمان سخت شدن، مقاومت زود هنگام و دیررس، مقاومت در برابر شرایط شور و محیط های شیمیایی تهاجمی، رهاسازی گرما در حین پخت، رنگ، ویسکوزیته و کارایی است. اهمیت و ارتباط این خصوصیات به کاربرد مطلوب سیمان و بتن بستگی دارد. سیمان در اروپا باید مطابق استاندارد هماهنگ اروپایی EN 197-1 تولید شود که 27 سیمان مشترک را با توجه به ترکیبات اصلی آنها لیست میکند. مقدار کلینکرتئوری این سیمان ها در استاندارد اروپا میتواند بین 5 تا 95 درصد متغیر باشد. مقدار کلینکر متغیر بر نوع کاربردهایی که سیمان برای آنها استفاده میشود تأثیر دارد. سایر مواد قابل استفاده: پوزولانهای طبیعی، مانند خاک رس، شیل و انواع خاصی از سنگهای رسوبی. سنگ آهک (نرم) که می تواند به کلینکر اضافه شود (بدون اینکه گرم شود و به آهک تبدیل شود). دود سیلیس، یک ماده پوزولانیک و فرعی در تولید آلیاژهای سیلیکون یا فروسیلیکون است. سرباره (GBFS)، محصول جانبی فرایند تولید آهن / فولاد است. خاکستر بادی، ذرات شبیه به گرد و غبار را از گازهای دودکش نیروگاه زغال سنگ بدست می‌آورند در دسترس بودن مواد جایگزین که می توانند از دیگر عناصر تشکیل دهنده آن استفاده شوند، بسیار متفاوت است. نسبت کلینکر به سیمان به میزان 78٪ در سال 2006 به این معنی بود که در حدود 550-600 میلیون تن مواد تشکیل دهنده غیر از کلینکر مورد استفاده قرار گرفت. آژانس بین المللی انرژی (IEA) پیش بینی کرد که در سال 2005، 1215 میلیون تن



ماده مناسب برای جایگزینی کلینکر در سطح جهان (به استثنای پوزولان) کشف شد. بر این اساس، به نظر می‌رسد که استفاده از سایر ترکیبات می‌تواند دوبرابر شود. با این حال، این سناریو فقط فرضیه است زیرا توجه نمیکند که این مقادیر لزوماً از کیفیت مورد نیاز یا وضعیت بازار محلی منعکس نمیشوند. همچنین در مورد در دسترس بودن آینده جایگزینهای کلینکر و همچنین تأثیر سیاست و تنظیم محیط زیست عدم اطمینان وجود دارد. به عنوان مثال، احتراق آبی بخش انرژی میتواند در دسترس بودن خاکستر بادی را محدود کند، یا استفاده از تکنیکهای کاهش اکسید نیتروژن (اکسید) در نیروگاه‌های دارای زغال سنگ می‌تواند به معنای این باشد که خاکستر بادی به عنوان ماده سازنده سیمان قابل استفاده نیست. علاوه بر این، برخی از این مواد در ساخت بتن به جای سیمان از قبل استفاده می‌شوند. سرانجام، برای اطمینان از اینکه سیاستها بر اساس کل چرخه عمر تأمین میشوند، باید یک تحلیل هزینه چرخه عمر انجام شود تا از تمرکز صرفاً بر تأثیر مواد واسطه جلوگیری شود. در سطح اروپا، تخمین زده می‌شود که نسبت کلینکر به سیمان را می‌توان به 70٪ کاهش داد، و در نتیجه باعث کاهش 4٪ CO₂ می‌شود.

1.4 سیمانهای جدید

انواع مختلفی از کلینکرهای جدید و فرآورده‌های تولید جدید سیمان در حال توسعه هستند. صنعت سیمان اروپا با مراکز تحقیقاتی گسترده در چندین کشور و صدها اختراع ثبت شده در هر سال بسیار نوآورانه است. در حال حاضر تعدادی سیمان کم کربن یا کربن بسیار کم تولید میشود. چندین نوع سیمان جدید موازی در حال توسعه هستند از جمله: سیلیکات منیزیم به جای سنگ آهک (کربنات کلسیم) است. اتصال دهنده‌های کلسیم سولفوآلومینات کلسیم. ترکیبی از کربنات کلسیم و منیزیم و هیدروکسیدهای کلسیم و منیزیم. تکنیکهای جدید تولید، استفاده از اتوکلاو به جای کوره و خردایش ویژه‌ای که نیاز به گرمای بسیار کمتری دارد و باعث کاهش انتشار فرایند میشود. ژئوپلیمرهای با استفاده از فرآورده‌های فرعی از صنعت (خاکستر بادی، صنعت فولاد (سرباره) و بتن برای ساخت سیمان فعال شده قلیایی. سیمان‌های ژئوپلیمر در مقیاس کوچک تجاری شده‌اند، اما هنوز برای کاربردهای در مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. ماده اولیه اصلی سیمان پرتلند معمولی، سنگ آهک، به وفور در سراسر جهان موجود است. با این حال، برخی از مواد مورد نیاز برای سیمان‌های جدید ممکن است در مقادیر کافی یا در مکان‌های مناسب در دسترس نباشند، به این معنی که مواد اولیه باید در مسافت‌های طولانی ارسال شوند.

آینده‌های برای انواع سیمان جدید وجود دارد، اما اگر در مرحله اولیه توسعه آنها قرار داشته باشد، مدتی قبل از تولید مقیاس بزرگ به واقعیت می‌رسد. علاوه بر این، آنها به احتمال زیاد در برنامه‌های غیر سازه‌ای برای آینده قابل پیش بینی استفاده میشوند. با این وجود، سهم 5٪ از کل تولید سیمان برای سیمانهای جدید شامل 11 میلیون تن است. سیمان‌های جدید هنوز هم برای تولید خود به انرژی نیاز دارند و محصولات کربن صفر نخواهند بود. کاهش دقیق کربن بالقوه در حال حاضر مشخص نیست، اما برای بسیاری از فن‌آوری‌های امیدوارکننده، حدود 50٪ تخمین زده میشود، که در مدل سازی برای 5٪ مورد انتظار از کل تولید سیمان اعمال شده است.

1.5 راندمان حمل و نقل

سیمان محصولی فله است و حمل و نقل جاده‌های مسافت‌های طولانی از نظر اقتصادی مناسب نیست. حمل و نقل فله‌ای دریایی و رودخانه‌های بسیار مقرون به صرفه است، که بسیاری از کارخانجات اروپایی را در نزدیکی بنادر دریا و دریایی می‌سازند تا در معرض رقابت صادراتی قرار گیرند افزایش استفاده از آب راه‌های داخلی و شبکه‌های ریلی باعث کاهش انتشار گازهای حمل و نقل خواهد شد. سیمان محصولی سنگین است حمل و نقل می‌تواند نشان دهنده بخش فزاینده‌ای از تأثیر گازهای گلخانه‌ای (GHG) در صنعت سیمان باشد. با این حال، این صنعت به طور مداوم در حال کار بر روی راه‌حلهایی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با حمل و نقل است و انتظار دارد که با مخلوط کردن حالت‌های حمل و نقل مبتنی بر سرزمینهای آبی و همچنین بهبود بازده حمل و نقل، باعث کاهش قابل توجه تولید گازهای گلخانه‌ای مرتبط با حمل و نقل سنگین شود. می‌توان طیف



وسیع‌تری از اقدامات را برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفت: در بیشتر موارد، سیمان را می‌توان با استفاده از راه‌های حمل و نقل موثر و کم‌انتشار، که باید مورد تشویق قرار گیرد، حمل کرد. ساخت کارخانه‌های جدید در نزدیکی آبراه‌ها یا شبکه‌های ریلی می‌تواند سهم حمل و نقل جاده‌ای را کاهش دهد. اگر میزان سوخت‌های جایگزین و جایگزین‌های کلینکر افزایش یابد، باید راه‌های حمل و نقل انتشار کم و کارآمد برای حمل مواد جایگزین به کارخانه سیمان در نظر گرفته شود. سهم آبراه‌های داخلی و حمل و نقل ریلی در برخی از کارخانه‌ها با دسترسی آسان به آبراه‌ها یا مراکز ریلی قابل افزایش است. اگر سهم حمل و نقل جاده‌ای تا سال 2050 به 50٪ کاهش یابد، در حالی که هر دو راه آهن و آب 23٪ در بخش حمل و نقل همراه است، تخمین زده می‌شود که تولید گازهای گلخانه‌ای مرتبط با حمل و نقل به نصف کاهش یابد.

بهره‌وری انرژی

2.1 بهره‌وری انرژی الکتریکی

در تولید سیمان عمدتاً از برق برای خردایش مواد اولیه استفاده می‌کنند بهبود مداوم فرآیند تولید، میزان مصرف برق را کاهش می‌دهد به کارگیری فناوری جذب کربن می‌تواند مصرف برق را بین 50 تا 120 درصد افزایش دهد. تولید سیمان در چند مرحله به برق نیاز دارد، از خرد کردن مواد اولیه تا تولید کلینکر و پودر کردن سیمان. 5٪ برای استخراج و ترکیب مواد اولیه 24 درصد برای خردایش مواد اولیه 6٪ برای همگن سازی مواد اولیه 22٪ برای تولید کلینکر 38٪ برای تولید سیمان 5٪ برای انتقال، بسته بندی و بارگیری. جایگزینی کارخانه‌های قدیمیتر با فناوریهای نوین و کارآمدتر و نوسازی مداوم کارخانه‌های موجود منجر به بهبود عملکرد الکتریکی خواهد شد. به عنوان مثال، استفاده از تکنیکهای خردایش پیشرفته و فرآیندهای بازیابی گرمای زباله و همچنین استفاده از فناوری مدرن کولر کلینکر و درایوهای با سرعت متغیر، سطح انرژی الکتریکی مورد نیاز را کاهش می‌دهد. تجهیزات موجود در کارخانجات سیمانی موجود به طور قطع به طور متناوب تغییر یافته است، به این معنی که بعد از یک دوره 20-30 ساله، بیشتر تجهیزات اصلی جایگزین شده یا اصلاح شده-اند (به عنوان مثال، سیکلونهای پیش گرمکن، کولر کلینکر). اقداماتی که راندمان حرارتی را افزایش می‌دهد اغلب به نیروی الکتریکی بیشتری نیاز دارند. به عنوان مثال، نصب کولرهای مدرن باعث کاهش مصرف انرژی حرارتی می‌شود، اما مصرف انرژی الکتریکی را افزایش می‌دهد. کمترین مقادیر میزان انتشار آلاینده‌های گرد و غبار، انرژی بیشتری را برای جداسازی گرد و غبار، مصرف می‌کند. کاهش آلاینده‌های مانند NO_x یا SO_2 نیاز به استفاده از تجهیزات اضافی مصرف برق دارد.

2.2 راندمان انرژی حرارتی

تولید سیمان نیاز به مواد اولیه را تا 1450 درجه سانتیگراد گرم می‌کند و بنابراین انرژی بیشتری دارد، حتی اگر انرژی حرارتی فقط حدود 35٪ از انتشار CO_2 صنعت سیمان را تشکیل دهد. پیشرفتهای مداوم در تجهیزات تولید تقریباً نصف مصرف انرژی ما از دهه 1960 است. سیستمهای بازیابی حرارت زباله مورد بررسی قرار گرفته و باید مورد تشویق قرار بگیرند. بر اساس داده‌های GNR برای سال 2010، میانگین انرژی حرارتی اروپا که برای تولید یک تن کلینکر مورد نیاز است 3730 MJ بود. طول عمر کوره‌های سیمانی معمولاً 30-50 سال است. بنابراین کوره‌های جدید عمدتاً در جاهایی ساخته می‌شوند که پتانسیل رشد بازار قابل توجه است. اغلب بعد از 20-30 سال، بیشتر تجهیزات اصلی (مانند سیکلونهای پیش گرمکن، کولر کلینکر، مشعلها و غیره) جایگزین شده متوسط اندازه کوره-ها در اروپا و آمریکای شمالی حدود 9/0 تا 1/1 میلیون تن تولید کلینکر در هر پیش گرمکن کوره پیش گرمکن (PH-PC) است، در مقایسه با 1.9 میلیون تن تولید در هر سایت در سال در آسیا. در شرایط بهینه و منظم، بهترین راندمان انرژی در حدود 3,300 MJ/tclinker3 می‌تواند با کوره‌های پیش گرمکن با پیش سازندها (PH-PC) حاصل شود کوره‌های مدرن PH-PC از ظرفیت تولید بالاتری نسبت به تاسیسات قدیمی برخوردار هستند، که همچنین باعث افزایش بهره‌وری بیشتر انرژی در این بخش می‌شود. کوره‌های خشک و بدون برج‌های پیش گرمکن حدود 33٪ انرژی حرارتی بیشتری مصرف می‌کنند و کوره‌های مرطوب قدیمی 85٪



انرژی بیشتری نسبت به کوره‌های PH-PC مصرف میکنند. منطقه دیگری که در آن میتوان پیشرفت کرد، بازیابی گرمای زیاله (WHR) است. محدودیت اصلی استفاده از WHR سرمایه گذاری اولیه و مدت طولانی بازپرداخت است بسیاری از اقدامات کاهش دهنده انرژی حرارتی باعث افزایش مصرف انرژی می شود.

3.1 ترسیب کردن و استفاده مجدد از کربن

حتی با کارآمدترین فرایندها، نمی توان از بخشی از انتشار CO_2 مرتبط با تولید سیمان اجتناب کرد. احتمال جذب کربن در حال حاضر در چندین پروژه بزرگ جذب و ذخیره سازی کربن (مقیاس بزرگ) در بخش انرژی مورد بررسی قرار میگیرد. نتایج اولیه نشان میدهد که فناوریهای موجود در حال حاضر میتوانند 90٪ از انتشار CO_2 را جذب کنند. کربن جذب شده میتواند به یک محل ذخیره منتقل شود یا در سایر فرایندهای تولید / پایین دستی به عنوان مثال برای رشد جلبکها به عنوان زیست توده که می تواند به عنوان سوخت مورد استفاده قرار گیرد. جذب کربن باعث افزایش هزینههای تولید 25 تا 100٪ می شود، به سرمایه گذاری قابل توجهی و به استفاده از برق اضافی نیاز دارد. تنها در صورتی واقع بینانه است که زیرساختهای حمل و نقل CO_2 و مکانهای ذخیرهسازی مناسب برای آن منظور تأیید شده باشد. چندین پروژه تحقیقاتی در حال انجام وجود دارد که امکان سنجی استفاده از جذب کربن در صنعت سیمان و کاوش روشهای مختلف جذب CO_2 را بررسی میکنند.

فن آوریهای جذب پس از احتراق: ضبط CO_2 پس از احتراق مکانیسم انتهایی لوله است که نیازی به تغییرات اساسی در فرایند پخت کوره ندارد امیدوار کنندهترین فناوری پس از احتراق، جذب شیمیایی است. نرخ جذب بالا در صنایع دیگر با استفاده از آمینها و سایر محلولهای شیمیایی به دست آمده است. در صورت توسعه مواد مناسب و فن آوریهای تمیز کردن، فناوریهای غشایی نیز ممکن است پاسخگو باشند. حلقه کربنات، یک فرایند جذب که در آن اکسید کلسیم با گاز احتراق حاوی CO_2 برای تولید کربنات کلسیم در تماس است. تکنولوژی که هم اکنون توسط صنعت سیمان به عنوان یک گزینه بالقوه مقاوم سازی برای کورههای موجود مورد ارزیابی قرار گرفته و برای توسعه کورههای جدید شلیک اکسی مورد ارزیابی قرار میگیرد. علاوه بر این، هم افزایشی با نیروگاهها نیز ایجاد میشود (جاذبهای غیرفعال شده نیروگاهها میتوانند به عنوان ماده اولیه جایگزین در کورههای سیمانی مورد استفاده مجدد قرار گیرند).

احتراق Oxyfuel

استفاده از اکسیژن به جای هوا در کورههای سیمانی باعث ایجاد جریان نسبتاً خالص CO_2 می شود. این فناوری هنوز در مراحل ابتدایی خود است و به تحقیقات گستردهای نیاز دارد. احتراق Oxyfuel باعث تغییر جو در کوره میشود و به طور بالقوه بر تولید کلینکر تأثیر میگذارد. مطالعات آزمایشگاهی کنونی نشان داد که خصوصیات سیمان از تولید oxyfuel سوخت بدون تغییر مانده است. یک کوره oxyfuel می تواند یک تغییر قابل توجه در تولید کلینکر باشد. پس از گرفتن CO_2 می توان در یک سری فرایندها و صنایع مانند تولید نوشیدنیهای گازدار استفاده کرد. با این حال، این با توجه به حجم CO_2 که توسط صنعت سیمان ساطع میشود، پتانسیل بسیار محدودی را ارائه میدهد و این واقعیت است که فقط مقدار بسیار کمی از این CO_2 توسط چنین صنایع و فرایندهایی قابل استفاده است. CO_2 همچنین میتواند به عنوان ماده اولیه در طیف وسیعی از فرایندهای مورد استفاده در حال حاضر از جمله استفاده شود: مصالح ساختمانی با استفاده از یک کاتالیزور آنزیم، CO_2 را به کربناتها و بیکربناتها تبدیل میکنند پلیمرهای کربنات (پلاستیکهای زیستی) مواد اولیه برای تولید حلال ضبط و ذخیره سازی کربن، یا CCS، اصطلاح رایجی است که در آن CO_2 جذب شده به یک محل ذخیره زیرزمینی منتقل می شود ساخت کارخانجات جدید مجهز به فناوری جذب کربن، هزینههای قابل توجهی سرمایه و همچنین هزینههای عملیاتی قابل توجهی را به همراه خواهد داشت.



4.1 بتن کم کربن

پس از ساخت سیمان، چندین روش و فرآیند استفاده می‌شود که بیشتر باعث بهبود عملکرد محیطی بتن می‌شود. تکنیکها شامل استفاده از سیمانهای با کارایی بالا برای بهینه سازی مصرف سیمان در هر تن بتن، تهیه محلی از سنگدانهها، بهینه سازی مواد افزودنی و ترکیب بتن در مرحله اختلاط بتن است. بتن های مدرن با مقاومت بالا میتوانند حجم بتن مورد نیاز برای ایجاد یک ساختار خاص را کاهش دهند. هیچکدام از اینها در مدل کاهش CO_2 قرار نگرفتهاند زیرا این امر به کاهش تأثیرات خود تولید سیمان مربوط نمیشود. بتن در حال حاضر یک محصول کم کربن در مقایسه با بسیاری دیگر از مواد ساخت و ساز رایج است. روشهای مختلفی برای کاهش ردپای محیط زیست بتن وجود دارد:

منابع مواد:

مصالح جمع آوری شده و مواد بازیافت شده از زباله‌های ساختمانی و تخریب محصولات نسبتاً کم هزینه بوده و میانگین تحویل آن کمتر از 40 کیلومتر است. از نظر زیست محیطی و اقتصادی، سایت‌های محلی در خدمت بازارهای محلی هستند. علاوه بر این، قیمت تمایل دارد تا از شعاع تحویل حدود 40 کیلومتر دو برابر شود. به منظور پایین آمدن انتشار گازهای حمل و نقل، باید مصالح جمع آوری شده به طور محلی انجام شود.

سیمانهای با کارایی بالا منجر به کاهش مقدار سیمان در بتن میشوند یک امکان نظری برای کاهش CO_2 در ساختمانهای بتونی، استفاده از سیمانهای با کارایی بالا به جای سیمانهای معمولی است استفاده از سیمانهای با استحکام بالا میتواند، مقدار سیمان مورد نیاز برای تهیه همان مقدار بتن را کاهش دهد. تحقیقات گستردهای برای آزمایش ترکیبات جدید سنگدانههای سیمان با استحکام بالا انجام میشود، اما مقدار سیمان به خودی خود تأثیر زیادی در کارایی و دوام بتن دارد. جزء خمیر سیمان باعث ایجاد ساختار متراکم میشود و قلیایی بتن را تضمین میکند، که از خوردگی فولاد تقویت شده جلوگیری میکند. علاوه بر سیمان، شن، شن و ماسه هوا، بتن مدرن حاوی یک یا چند ماده افزودنی است. مواد افزودنی مواد شیمیایی هستند که در مقادیر خیلی کم به بتن اضافه میشوند تا خصوصیات ترکیب را در حالت پلاستیک و یا سخت شده آن تغییر دهند. تقریباً 80٪ از تولید بتن آماده و مخلوط آماده با افزودنی بتن اصلاح می‌شود. مقدار مواد افزودنی موجود در آن معمولاً براساس میزان سیمان است و برای بیشتر مواد افزودنی در محدوده 0.2-2.0٪ وزن دارند.

مزایای اصلی پایداری مصرف مواد افزودنی عبارتند از:

طراحی بهینه شده مخلوط - کاهش CO_2 ، میزان آب و انرژی

افزایش سیالیت - باعث کاهش صدا و لرزش میشود.

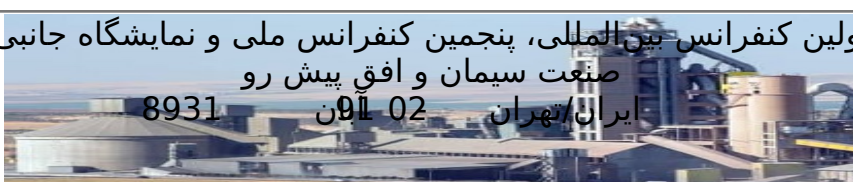
کاهش نفوذ پذیری - باعث افزایش ماندگاری بتن میشود.

آسیب کمتری از محیط های سخت - از جمله شرایط دریایی، یخ زدایی و شرایط زیر

صفر - به وجود می‌آید.

ظاهر بهبود یافته - باعث بهتر شدن و کاهش نیاز به تعمیر میشود.

با استفاده از مواد افزودنی برای بهینه سازی ترکیبات مخلوط، بهبود خالص در مصرف آب و کاهش پتانسیل گرمایش جهانی بتن میتواند در حدود 10-20٪ باشد. علاوه بر این، برخی مواد افزودنی از منابع خام تجدید پذیر مانند ذرت یا چوب به دست می‌آیند. در حالت دوم، مواد شیمیایی از یک محصول فرعی تولید کاغذ تولید میشوند که در گذشته ماده زاید به عنوان مواد دفع شده تلقی میشد. آزمایش دقیق نشان داده‌است که مواد افزودنی به بتن متصل شده و در طول عمر بتن به داخل محیط نمیریزند. آزمایش مواد افزودنی در سناریوهای پایان عمر نشان داده‌است که حتی هنگامی که بتن قدیمی خرد شود، میزان شستشوی مواد افزودنی آنقدر آهسته است که مقادیر زیست تخریب مواد افزودنی را سریع قبل از رسیدن به غلظتهای قابل توجه در محیط طبیعی نشان میدهند. از مواد کاملاً تقسیم شده میتوان در داخل بتن برای بهبود یا دستیابی به خاصیت خاصی استفاده کرد این مواد شامل موارد اضافی بی اثر نوع I و افزودنیهای هیدرولیکی پوزولانی یا پنهان نوع II هستند. مواد افزودنی به بتن طبقهای از مواد است که می‌تواند در ساخت بتن مورد توجه قرار گیرد



اگرچه این بسیار بستگی به نوع سیمانی مورد استفاده دارد. موادی که می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند، گاه با مواد مورد استفاده در ساخت سیمان مشابه هستند.

3. نتیجه‌گیری

استفاده از مواد زاید و فرآورده‌های جانبی وضعیت برنده و برنده را ایجاد میکند. بخش سیمان به سایر صنایع یا شهرداریها کمک میکند تا زباله‌های خود را دفع کنند و در عوض، به منابع سوخت مقرون به صرفه یا مواد اولیه دسترسی پیدا کنند. علاوه بر این، فراوری همزمان، وابستگی به سوختهای فسیلی را کاهش میدهد، نیاز به استخراج معادن را کاهش میدهد و از خاتمه زباله در محل دفن زباله جلوگیری میکند. این ماده همچنین تأثیر مستقیمی در کاهش انتشار CO_2 دارد، زیرا باعث کاهش مقدار مواد اولیه طبیعی مورد نیاز برای تولید کلینکر میشود. کارخانه‌های معدنی بخش مهمی از منظر صنعتی اروپا است و به طور فزاینده‌ای در راه حل‌های نوآورانه در زمینه مدیریت پسماند، هستند.

12. مراجع

1.THEE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION