

## تأثیر افزودنی‌های دوستدار محیط زیست بر کاهش انرژی مصرفی و پایداری زیست‌محیطی در سیمان‌های آمیخته نسل جدید

محسن اعظمی وفا<sup>۱\*</sup>، محنا عزتی<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد رشته مدیریت بازرگانی (کارآفرینی)، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمانشاه، ایران .

۲- دانشجوی دکتری شیمی، گرایش شیمی تجزیه، دانشکده شیمی، دانشگاه رازی، استان کرمانشاه، ایران .

### چکیده

صنعت سیمان به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین صنایع در حوزه انرژی و یکی از بزرگ‌ترین عوامل انتشار گازهای گلخانه‌ای شناخته می‌شود. تولید سیمان پرتلند معمولی (OPC) به دلیل فرآیندهای انرژی‌بر، انتشار زیاد دی‌اکسید کربن، و استفاده از منابع طبیعی غیرقابل تجدید، اثرات زیست‌محیطی قابل توجهی دارد. این در حالی است که توسعه پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی در حوزه ساخت‌وساز به یک ضرورت جهانی تبدیل شده است. یکی از راهکارهای موثر برای مقابله با این چالش‌ها، استفاده از افزودنی‌های دوستدار محیط زیست در سیمان‌های آمیخته نسل جدید است. هدف این پژوهش بررسی تأثیر افزودنی‌های پایدار نظیر گرافن، خاکستر بادی (Fly Ash)، سرباره کوره بلند (GGBFS) و مواد ژئوپلیمری بر کاهش انرژی مصرفی، کاهش تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی، و افزایش پایداری سیمان‌های آمیخته نسل جدید است. این افزودنی‌ها با جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند و تغییر ترکیبات شیمیایی و خواص فیزیکی سیمان، می‌توانند نیاز به کلینکر مصرفی را کاهش دهند و در نتیجه مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به شکل قابل توجهی کم کنند. علاوه بر این، خواص مکانیکی و شیمیایی سیمان نیز بهبود می‌یابد و باعث افزایش دوام و مقاومت ساختارهای ساخته شده با این سیمان‌ها می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از مواد پایدار، علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، منجر به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش کارایی سازه‌ها می‌شود. از سوی دیگر، بهبود عملکرد بلندمدت سازه‌ها نیز از جمله فواید این افزودنی‌ها محسوب می‌شود. این پژوهش مروری با جمع‌آوری و تحلیل تحقیقات پیشین، جایگاه افزودنی‌های پایدار در صنعت سیمان را مشخص می‌کند و به بیان مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی استفاده از این فناوری‌های نوین می‌پردازد. در این میان، بررسی جامع اثرات افزودنی‌های مختلف و مقایسه ترکیبات پایدار در شرایط واقعی تصویری دقیق‌تر از تأثیر آن‌ها ارائه می‌دهد. نتایج پژوهش نشان داد که افزودنی‌هایی مانند ژئوپلیمرها و نانومواد می‌توانند نقش کلیدی در کاهش وابستگی به کلینکر ایفا کنند. از سوی دیگر، نقش سیاست‌گذاری‌های کلان در توسعه و گسترش فناوری‌های پایدار نقش بسیار مؤثری خواهد داشت، که نیازمند همکاری نزدیک بخش صنعت، دانشگاه و دولت است. این پژوهش قدمی مؤثر برای حرکت به سوی توسعه فناوری‌های سبز و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود.

**کلمات کلیدی:** افزودنی‌های دوستدار محیط زیست، سیمان آمیخته نسل جدید، کاهش مصرف انرژی، پایداری زیست‌محیطی، خاکستر بادی

## مقدمه

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، گرمایش جهانی، و کاهش منابع طبیعی، جامعه بشری را به مواجهه با یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی سوق داده است. یکی از عمده‌ترین عوامل این بحران، صنعت ساخت‌وساز و به طور خاص، تولید سیمان است که سهم قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی دارد. تولید سیمان پرتلند معمولی (OPC) به دلیل فرآیندهای انرژی‌بر و دمای بالای کوره کلینکر، انرژی زیادی صرف کرده و در فرآیند تولید آن، مقادیر زیادی دی‌اکسید کربن آزاد می‌شود. طبق آمار ارائه شده توسط مؤسسات بین‌المللی، صنعت سیمان به تنهایی مسئول حدود ۸ تا ۱۰ درصد از کل انتشار دی‌اکسید کربن جهانی است. این موضوع، فشار بسیاری بر صنعت ساخت‌وساز وارد کرده و ضرورت استفاده از رویکردهای پایدارتر و مصالح جدید را آشکار می‌کند. (Perera & Ranjith, ۲۰۲۴)

در همین راستا، رویکردهای نوینی همچون تولید سیمان‌های آمیخته نسل جدید پدید آمده‌اند که می‌توانند علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، خواص مکانیکی و طول عمر سازه‌ها را نیز بهبود بخشند. این سیمان‌ها شامل ترکیباتی از مواد پایدار، نظیر خاکستر بادی (Fly Ash) و سرباره کوره بلند (GGBFS)، هستند که به جای کلینکر، بخشی از سیمان پرتلند را جایگزین کرده و در نهایت انرژی مصرفی و گازهای آلاینده تولید شده در فرآیند تولید را کاهش می‌دهند. ژئوپلیمرها، مواد نانو ساختاری و افزودنی‌هایی مانند گرافن نیز به عنوان نوآوری‌های جدید معرفی شده‌اند که نه تنها به بهبود پایداری زیست‌محیطی کمک می‌کنند، بلکه عملکرد بتن در شرایط سخت محیطی را افزایش می‌دهند. (Arduany, ۲۰۱۵)

یکی دیگر از مسائل مهم مرتبط با تولید سیمان سنتی، وابستگی بالا به منابع غیرقابل تجدید نظیر آهک و شن و ماسه است. استخراج بی‌رویه این مواد علاوه بر آسیب به اکوسیستم‌ها و زیستگاه‌های طبیعی، منجر به نابودی زمین‌های زراعی و کاهش تنوع زیستی می‌شود. در مقابل، سیمان‌های آمیخته دوستدار محیط زیست با استفاده از مواد جایگزین نظیر پسماندهای صنعتی و زباله‌های کشاورزی، راهکاری مؤثر برای کاهش این تأثیرات منفی پیشنهاد می‌کنند. این نوآوری نه تنها بار زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد، بلکه امکان مدیریت زباله‌ها و جلوگیری از انباشت آن‌ها را نیز فراهم می‌آورد. (Shi et al., ۲۰۲۳)

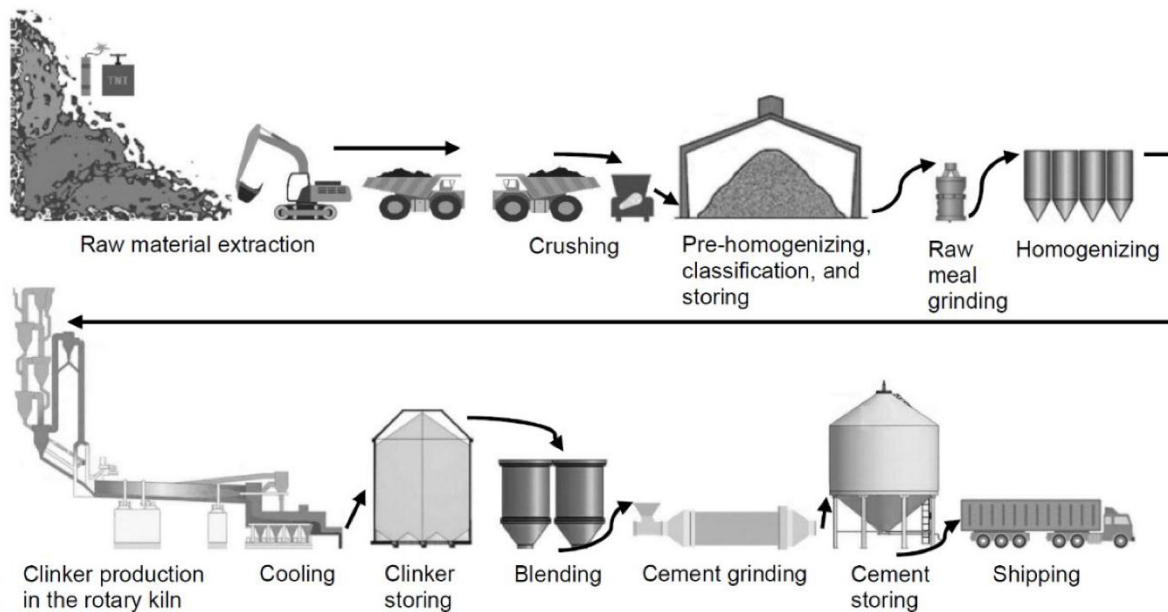
از سوی دیگر، فنون تولید مصالح پایدار، کاربردهای گسترده‌ای نه تنها در کاهش حجم گازهای گلخانه‌ای، بلکه در افزایش کارایی و دوام سازه‌ها نیز دارند. به عنوان مثال، ترکیبات ژئوپلیمری به دلیل ساختار شیمیایی پایدار و مقاومت بالا در برابر خوردگی، یک جایگزین مناسب برای سیمان پرتلند در محیط‌های سخت مانند مناطق صنعتی و دریایی هستند. در حال حاضر، تقاضا برای استفاده از این مواد در صنایع مرتبط در حال افزایش است. با این حال، چالش‌هایی نظیر هزینه‌های بالای اولیه و نبود آگاهی کافی در مورد مزایای آن‌ها، اجرای گسترده این تکنولوژی‌ها را محدود کرده است. (Shumuye et al., ۲۰۲۳)

نکته‌ای دیگر که به اهمیت این رویکرد اشاره دارد، تأثیرات اجتماعی و اقتصادی سیمان‌های دوستدار محیط زیست است. این مصالح نه تنها تأثیرات زیست‌محیطی منفی را کاهش می‌دهند، بلکه باعث کاهش هزینه‌های طولانی‌مدت ساخت و نگهداری سازه‌ها می‌شوند. مطالعه‌ها نشان داده‌اند که با دوام‌تر شدن سازه‌ها، چرخه عمر مصالح افزایش یافته و نیاز

کمتری به تعمیر و جایگزینی خواهد بود. این موضوع می‌تواند به جلوگیری از هدررفت منابع و کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز کمک کند، که برای کشورهای در حال توسعه به خصوص، یک مزیت بزرگ به شمار می‌رود.

همچنین، استفاده از مواد پایدار می‌تواند به تصویب قوانین جدید و استانداردسازی در صنعت ساخت‌وساز منجر شود. در بسیاری از کشورها، دولت‌ها و سازمان‌های زیست‌محیطی با تصویب سیاست‌هایی، تولیدکنندگان سیمان را تشویق می‌کنند تا از افزودنی‌های سازگار با محیط زیست استفاده کنند. این تغییرات قانونی، بستری برای توسعه و گسترش فناوری‌های پایدار ایجاد کرده است. به عنوان نمونه، اتحادیه اروپا با سیاست‌های کاهش کربن، تولید سیمان‌های جایگزین را به عنوان یکی از اهداف کلیدی سال‌های آینده اعلام کرده است. در پایان، نمی‌توان فراموش کرد که توسعه سیمان‌های آمیخته نسل جدید وابسته به تحقیقات مستمر و همکاری‌های چندجانبه بین دانشگاه‌ها، صنایع و سازمان‌های دولتی است. مطالعات موردی در کشورهای توسعه‌یافته نشان می‌دهد که با سرمایه‌گذاری در پروژه‌های تحقیقاتی، تغییرات چشمگیری در فرآیند تولید سیمان ایجاد شده است. این تغییرات می‌تواند الگویی برای سایر کشورها باشد که همچنان به فناوری‌های سنتی وابستگی زیادی دارند. بنابراین، مقدمه‌چینی برای دانش‌افزایی و ایجاد زیرساخت‌های لازم، نقش تعیین‌کننده‌ای در پذیرش عمومی این تکنولوژی‌ها دارد.

با توجه به تمامی موارد ذکر شده، می‌توان نتیجه گرفت که صنعت سیمان در آستانه تحولی بزرگ قرار دارد. سیمان‌های آمیخته دوستدار محیط زیست نه تنها به کاهش چشمگیر اثرات تغییرات اقلیمی کمک می‌کنند، بلکه بستری برای توسعه فناوری‌های پیشرفته، کاهش هزینه‌ها، و بهبود کیفیت سازه‌های ساخته شده فراهم می‌آورند. این موضوع در حالی است که روند گرایش به تولید و استفاده از مواد پایدار هنوز در بسیاری از مناطق، از جمله کشورهای در حال توسعه، در مراحل اولیه باقی مانده است. آینده این صنعت به میزان تلاش کشورها برای پیشرفت در این حوزه و ایجاد پل میان تحقیقات علمی و کاربردهای عملی گره خورده است.



شکل ۱. فرآیند تولید سیمان به همراه مراحل اصلی چرخه تولید

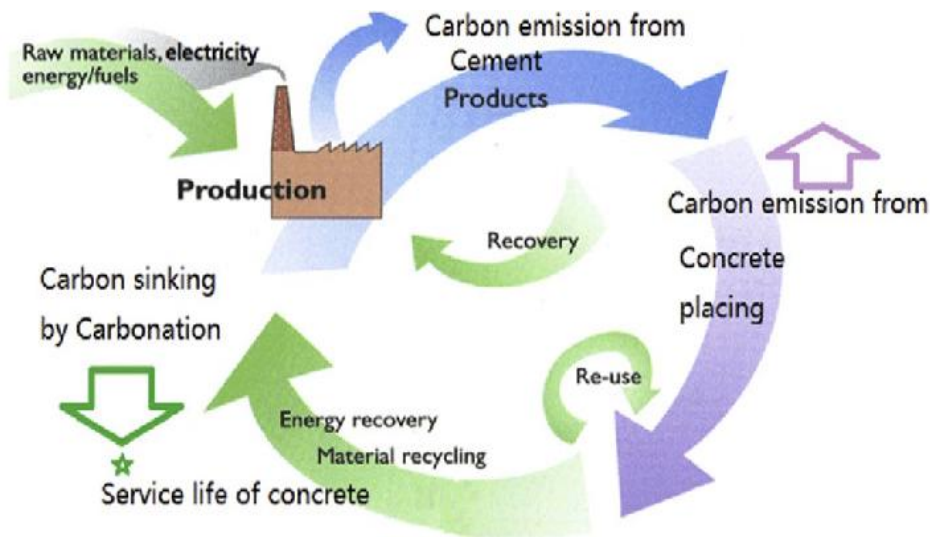
شکل ۱ فرآیند کامل تولید سیمان از استخراج مواد اولیه تا بسته‌بندی نهایی را نمایش می‌دهد. هر مرحله از این فرآیند شامل فرصت‌هایی برای به کارگیری افزودنی‌های دوستدار محیط زیست است که می‌توانند در بهبود پایداری زیست‌محیطی و کاهش مصرف انرژی مؤثر باشند.

## بیان مسئله

صنعت سیمان به دلیل فرآیندهای انرژی‌بر و سهم قابل توجه در تولید دی‌اکسید کربن به عنوان یک چالش بزرگ در مسیر توسعه پایدار شناخته می‌شود. تولید سیمان پرتلند معمولی (OPC) شامل مراحل ماندن استخراج مواد اولیه، فرآوری در دماهای بسیار بالا و تولید کلینکر است که انرژی زیادی مصرف می‌کند. در همین فرآیند، دی‌اکسید کربن به میزان قابل توجهی آزاد می‌شود که نزدیک به ۸ تا ۱۰ درصد از کل انتشار سالیانه این گاز در سطح جهان را شامل می‌شود. از سوی دیگر، تقاضای جهانی برای تولید سیمان روز به روز رو به افزایش است، چرا که این صنعت زیربنای رشد اقتصادی، توسعه زیرساخت‌ها و پیشرفت‌های عمرانی در سراسر دنیا است. این تقاضای رو به رشد، فشار بیشتری بر منابع طبیعی و انرژی جهانی وارد کرده و بحران زیست‌محیطی را تشدید می‌کند. (Shoji et al., ۲۰۲۲)

از آنجایی که اصل تولید سیمان پرتلند عمدتاً به سوخت‌های فسیلی وابسته است، وابستگی به این منابع غیرقابل تجدید نیز خطر دیگری است که صنعت سیمان را تهدید می‌کند. سوخت‌های فسیلی نه تنها منابع محدودی دارند، بلکه در فرآیند مصرفشان آلاینده‌های خطرناکی منتشر می‌شوند که اثرات آن‌ها بر محیط زیست و تغییرات اقلیمی غیرقابل انکار است. از سوی دیگر، استفاده مداوم از مواد خام طبیعی مانند آهک و خاک رس برای تولید سیمان، به فرسایش زمین، نابودی اکوسیستم‌های طبیعی و کاهش تنوع زیستی منجر شده است. این چالش‌ها، صنعت سیمان را به یکی از آلاینده‌ترین صنایع موجود در جهان تبدیل کرده و در نتیجه، نیاز به تحول در این صنعت به یک ضرورت تبدیل شده است. (Roychand, De Silva, & Setunge, ۲۰۱۸)

یکی دیگر از مسائل مهم در این حوزه، دوام و کیفیت بتن ساخته شده از OPC است. اگرچه سیمان پرتلند معمولی از نظر سازگاری و کاربرد گسترده جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساخت‌وساز دارد، اما بسیاری از مسائل، نظیر مقاومت کمتر در برابر عوامل خورنده، تخلخل بالا و کاهش طول عمر سازه‌ها، همچنان به عنوان چالش‌هایی جدی در اجرای پروژه‌های عمرانی مطرح هستند. این چالش‌ها نه تنها افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری را به دنبال دارد، بلکه به افزایش ضایعات ساختمانی و هدررفت منابع نیز منجر می‌شود. چنین چالش‌هایی ضرورت بررسی امکان جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند با افزودنی‌های پایدار و توسعه راه‌حل‌های نوآورانه را پررنگ‌تر می‌کند. (Paul et al., ۲۰۱۸)



شکل ۲. چرخه زیست محیطی سیمان با تأکید بر کاهش انتشار کربن و استفاده مجدد از منابع

شکل ۲ چرخه زیست محیطی تولید سیمان را نمایش می دهد و تأثیر فرآیندهای مختلف مرتبط با تولید، استفاده، و بازیافت سیمان بر انتشار کربن و کاهش اثرات زیست محیطی را برجسته می کند. به کارگیری افزودنی های دوستدار محیط زیست نقش مهمی در بهینه سازی این چرخه و کاهش مصرف انرژی دارد.

با توجه به اثرات فاجعه آمیز این صنعت برای محیط زیست و تغییرات آب و هوایی، تلاش های زیادی برای کاهش اثرات منفی آن انجام شده است. در این میان، افزودنی های پایدار و دوستدار محیط زیست به عنوان یک راهکار موثر مورد توجه قرار گرفته اند. این مواد، شامل ترکیباتی مانند خاکستر بادی (Fly Ash)، سرباره کوره بلند (GGBFS)، مواد ژئوپلیمری و نانومواد مانند گرافن هستند که با جایگزینی بخشی از کلینکر، می توانند مصرف انرژی و تولید دی اکسید کربن را به طور چشمگیری کاهش دهند. به علاوه، این افزودنی ها توانایی بهبود بسیاری از ویژگی های سیمان را دارند، از جمله افزایش مقاومت مکانیکی، بهبود دوام، کاهش تخلخل و ارتقای عملکرد بتن در برابر عوامل محیطی مخرب. این قابلیت ها، سیمان های آمیخته را نه تنها به عنوان یک راهکار زیست محیطی، بلکه به عنوان یک فناوری پیشرفته و کارآمد نیز مطرح کرده اند.

چالش دیگر پیش روی این صنعت، پذیرش گسترده مواد جایگزین در میان تولیدکنندگان و مصرف کنندگان است. از آنجا که صنعت سیمان یکی از صنایع سنتی با فناوری های نسبتاً قدیمی محسوب می شود، پذیرش تغییر و جایگزینی مواد جدید در این حوزه به کندی صورت می پذیرد. به علاوه، نبود استانداردهای مشخص برای تولید سیمان های پایدار، و نگرانی ها در مورد عملکرد آن ها در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی، از دیگر مواردی است که گسترش استفاده از این مواد را با محدودیت مواجه کرده است. به همین دلیل، توسعه پژوهش های متنوع برای ارزیابی و مقایسه عملکرد این مواد در شرایط مختلف و همچنین تدوین ساز و کارهای قانونی برای به کارگیری گسترده آن ها ضروری به نظر می رسد. (Makul, ۲۰۲۰)

مشکلات اقتصادی نیز نقش عمده‌ای در این مسئله دارند. تولید افزودنی‌های سازگار با محیط زیست معمولاً هزینه اولیه بالاتری نسبت به سیمان پرتلند سنتی دارد و این موضوع می‌تواند مانعی برای صنایع و زیرساخت‌های کشورهای در حال توسعه باشد. از سوی دیگر، گرچه هزینه تولید این مواد بیشتر است، اما توانایی آن‌ها در کاهش هزینه‌های بلندمدت به دلیل کاهش انرژی مصرفی و افزایش دوام سازه‌ها می‌تواند توجیه‌گر سرمایه‌گذاری اولیه باشد. نیاز است که سیاست‌گذاری‌های حمایتی و مشوق‌های اقتصادی به منظور کاهش موانع مالی و ترویج گسترده‌تر این فناوری‌ها تدوین شوند. در نهایت، شاید یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش‌روی استفاده گسترده از افزودنی‌های پایدار، کمبود آگاهی عمومی نسبت به اهمیت و پتانسیل این فناوری‌ها است. عدم آشنایی بسیاری از فعالان صنعت ساخت‌وساز با افزودنی‌های پایدار، و نبود آموزش کافی در این زمینه، موجب شده است که پذیرش این مواد در بسیاری از نقاط جهان با دشواری همراه باشد. از این رو، رویکردهای آموزشی و اطلاع‌رسانی، به همراه مشارکت جوامع علمی و صنعتی، نقش ویژه‌ای در تسریع فرآیند تغییر و پذیرش راه‌حل‌های نوین در صنعت سیمان ایفا می‌کنند.

در این پژوهش تلاش شده است تا با بررسی اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی افزودنی‌های پایدار در سیمان‌های نسل جدید، به یکی از مسائل حیاتی این دوران یعنی کاهش تأثیرات منفی صنعت سیمان بر محیط زیست پاسخ داده شود. مسئله اصلی این پژوهش، چگونگی کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، همراه با بهبود خواص مکانیکی و عملکرد درازمدت سیمان‌های آمیخته است. این تحقیق، علاوه بر روشن‌سازی جنبه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی مرتبط با این صنعت، می‌تواند به عنوان یک راهکار موثر برای توسعه استانداردهای جدید و سیاست‌گذاری‌های کلان در راستای ساخت‌وساز پایدار خدمت کند.

## ضرورت تحقیق

با توجه به بحران‌های زیست‌محیطی کنونی و افزایش نگرانی‌ها درباره آثار نامطلوب فعالیت‌های انسانی بر اکوسیستم جهانی، تحقیق درباره راهکارهایی برای کاهش اثرات منفی صنایع بزرگ مانند تولید سیمان به یک ضرورت انکارناپذیر بدل شده است. صنعت سیمان به دلیل وابستگی شدید به منابع غیرقابل تجدید، تولید مقادیر زیاد گازهای گلخانه‌ای و مصرف بالای انرژی، سهم قابل توجهی در تخریب محیط زیست و تشدید تغییرات اقلیمی دارد. در این میان، افزایش جمعیت جهانی و گسترش شهرنشینی موجب افزایش نیاز به ساخت‌وساز و به تبع آن مصرف سیمان شده است که در صورت عدم به‌کارگیری رویکردهای پایدار، می‌تواند پیامدهایی ویرانگر برای محیط زیست به همراه داشته باشد. تلاش برای کاهش مصرف منابع طبیعی و یافتن جایگزین‌های پایدار در صنعت سیمان، گامی اساسی برای جهت‌دهی این صنعت به سوی پایداری زیست‌محیطی است.

ضرورت این تحقیق را می‌توان در چندین محور اصلی بررسی کرد. نخست، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به ویژه دی‌اکسید کربن، یک چالش اساسی برای صنعت سیمان است. مطالعات نشان می‌دهند که فرآیند تولید سیمان پرتلند معمولی (OPC) به تنهایی مسئول حدود ۸ تا ۱۰ درصد از کل انتشار سالیانه دی‌اکسید کربن جهان است. این آمار قابل توجه نه تنها صنعت سیمان، بلکه کل بخش ساخت‌وساز را تحت فشار فزاینده‌ای قرار داده است تا رویکردهای جدیدی برای کاهش این آمار به کار گیرد. افزودنی‌های پایدار نظیر خاکستر بادی (Fly Ash) و سرباره کوره بلند (GGBFS) این

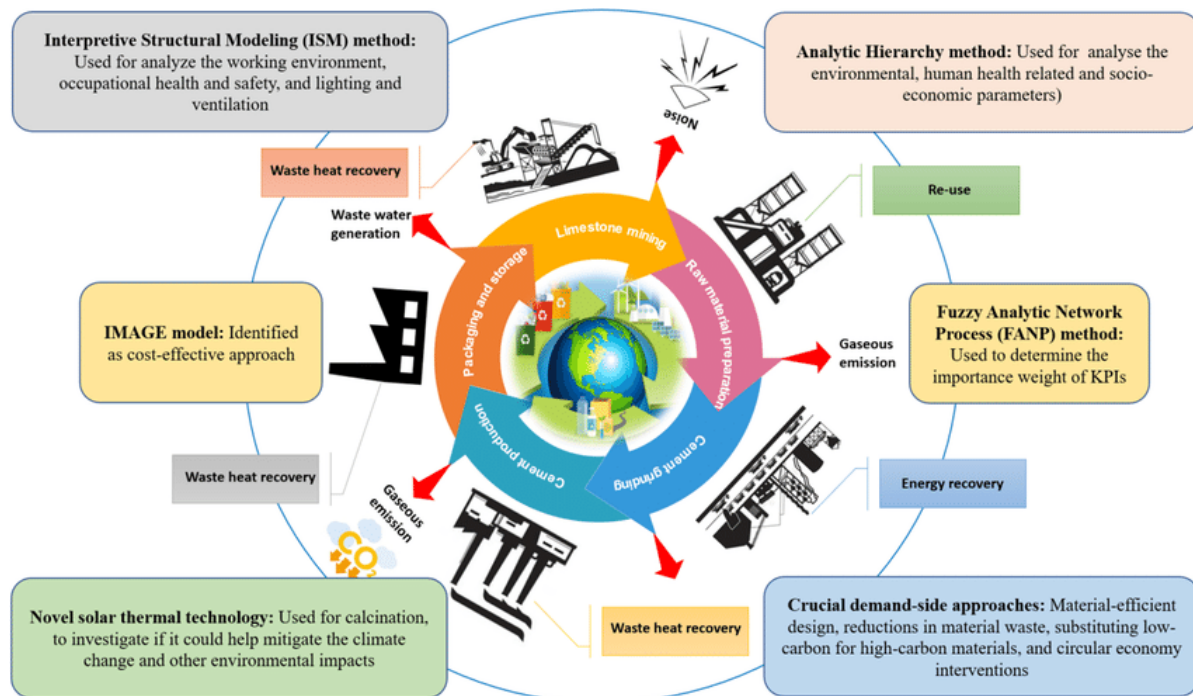
امکان را فراهم می‌کنند که بدون تأثیر منفی بر کیفیت نهایی سیمان، سهم کلینکر پرتلند که عامل اصلی تولید دی‌اکسید کربن است، کاهش پیدا کند. بنابراین، تلاش برای استفاده از این مواد می‌تواند به عنوان راهکاری کارآمد برای کاهش ردپای کربنی صنعت سیمان در نظر گرفته شود.

از سوی دیگر، کاهش مصرف منابع غیرقابل تجدید نظیر آهک، خاک رس، شن و ماسه، یکی دیگر از ضرورت‌های این تحقیق است. تولید سیمان سنتی به مقادیر عظیمی از این مواد نیاز دارد که استخراج بی‌رویه آن‌ها سبب تخریب زیستگاه‌های طبیعی، فرسایش خاک، آلودگی آب‌های زیرزمینی و نابودی زمین‌های زراعی می‌شود. علاوه بر این، بسیاری از این منابع در معرض کمبود هستند و ممکن است در آینده‌ای نزدیک دسترسی به آن‌ها با چالش مواجه شود. در مقابل، افزودنی‌های پایدار می‌توانند به عنوان جایگزین مواد خام طبیعی عمل کرده و نیاز به استخراج گسترده را کاهش دهند. به عنوان مثال، استفاده از پسماندهای صنعتی نظیر خاکستر بادی و گردوغبار سرباره کوره‌ها، نه تنها فشار بر منابع طبیعی را کاهش می‌دهد، بلکه این مواد را از زباله‌های بدون استفاده به مواد مفید و ارزشمند تبدیل می‌کند. (Akbar & Liew, ۲۰۲۱)

یکی دیگر از دلایل ضروری بودن تحقیق در این زمینه، کاهش هزینه‌های اقتصادی بلندمدت در پروژه‌های عمرانی و ساختمانی است. اگرچه استفاده از افزودنی‌های پایدار ممکن است هزینه اولیه تولید سیمان را افزایش دهد، اما این مصالح با افزایش طول عمر سازه‌ها و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، در بلندمدت به صرفه‌تر هستند. همچنین، در شرایطی که استفاده گسترده از سیمان سنتی به دلیل تولید ضایعات بالا و نیاز به تعمیر مکرر سازه‌ها پرهزینه است، به‌کارگیری سیمان‌های آمیخته و افزودنی‌های پایدار می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی در منابع مالی ایجاد کند. مطالعات همچنین نشان می‌دهند که کاهش مصرف انرژی در فرآیند تولید این مصالح، هزینه‌های تولید را نیز به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. به علاوه، تقاضا برای مصالح ساختمانی با عملکرد بالا یکی دیگر از دلایل ضرورت تحقیق در این حوزه است. سیمان‌های آمیخته که با افزودنی‌های پایدار ترکیب شده‌اند، ویژگی‌هایی نظیر مقاومت بیشتر در برابر عوامل محیطی نظیر رطوبت، خوردگی و تغییرات دمایی از خود نشان داده‌اند. این ویژگی‌ها امکان استفاده گسترده از این مصالح در شرایط محیطی سخت‌تر را فراهم می‌آورند و موجب افزایش قابلیت اطمینان سازه‌ها می‌شوند. برای مثال، افزودن نانومواد چون گرافن به سیمان می‌تواند نه تنها به دوام بیشتر، بلکه به سبکی و کاهش مصرف مواد اضافی در سازه‌ها کمک کند.

از دیگر دلایل ضروری بودن این تحقیق، تأثیر مثبت اجتماعی و زیست‌محیطی استفاده از افزودنی‌های پایدار است. تغییر نگرش جهانی به سمت توسعه پایدار، موجب شده است که بسیاری از سیاست‌گذاران و سازمان‌های بین‌المللی به دنبال راهکارهایی باشند که بتوانند تعادلی میان توسعه اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست ایجاد کنند. افزودنی‌های پایدار نه تنها به کاهش انتشار آلاینده‌ها کمک می‌کنند، بلکه مدیریت پسماندهای صنعتی و کشاورزی را نیز ارتقا می‌دهند. این تغییر رویکرد می‌تواند بستری مناسب برای ایجاد اشتغال، رشد فناوری‌های نوین و کاهش وابستگی به مواد اولیه گران‌قیمت فراهم آورد. در نهایت، اهداف مرتبط با توسعه سیاست‌های کلان محیط زیستی در سطح جهانی باعث شده است که دولت‌ها و صنایع به صورت جدی‌تری به سمت استفاده از افزودنی‌های پایدار حرکت کنند. تصویب قوانینی که تولیدکنندگان را ملزم به کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و استفاده از مواد جایگزین قابل بازیافت می‌کند، در بسیاری از کشورها آغاز شده است. بنابراین، پژوهش‌هایی که اثرات زیست‌محیطی مواد پایدار را بررسی می‌کنند، می‌توانند منبع ارزشمندی برای تصمیم‌گیری‌های کلان و تدوین استانداردهای جدید در صنعت ساخت‌وساز باشند.

با توجه به تمامی مباحث مطرح شده، ضرورت تحقیق در زمینه استفاده از افزودنی‌های پایدار در سیمان، یک مسئله چندجانبه و مبتنی بر نیازهای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی است. این تحقیق نه تنها می‌تواند به بهبود چشمگیر عملکرد صنعت سیمان و کاهش چالش‌های آن کمک کند، بلکه می‌تواند الگویی برای تغییرات گسترده در سایر صنایع وابسته به مواد اولیه فسیلی و پرنرژی ارائه دهد. بنابراین، بررسی ساز و کارهای دقیق و علمی برای به‌کارگیری افزودنی‌های دوستدار محیط‌زیست در تولید سیمان آمیخته نسل جدید، بیش از هر زمان دیگری ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۳. مدل چرخه‌ای صنعت سیمان پایدار با تأکید بر کاهش انرژی و انتشار آلاینده‌ها

شکل ۳ یک مدل چرخه‌ای برای صنعت سیمان پایدار را نمایش می‌دهد که با استراتژی‌های مختلف بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش آلاینده‌ها، و استفاده مجدد از منابع تمرکز دارد. چرخه تصویر شامل مراحل تولید سیمان از استخراج سنگ آهک تا فرآوری و مصرف نهایی، با تأکید بر کاهش ضایعات و بازیافت منابع است. این تصویر نشان می‌دهد که افزودنی‌های پایدار دغدغه مهمی در طراحی مدل‌های کسب‌وکار چرخه‌ای برای صنعت سیمان دارند. از طریق استراتژی‌هایی نظیر استفاده از مواد کم‌کربن، بازیافت انرژی حرارتی، و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین، چرخه تولید می‌تواند نقش کلیدی در کاهش اثرات زیست‌محیطی و حذف ضایعات صنعتی ایفا کند.

## مبانی نظری

تحقیقات انجام شده در حوزه افزودنی‌های مصالح ساختمانی به‌ویژه در بخش سیمان و بتن نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های پایدار، اثرات چشمگیری بر کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی سیمان و بتن داشته است. این افزودنی‌ها شامل موادی نظیر گرافن، خاکستر بادی (Fly Ash)، سرباره کوره بلند (GGBFS)، و مواد ژئوپلیمری هستند که هر کدام با خواص منحصر به فرد خود می‌توانند علاوه بر بهبود ویژگی‌های مکانیکی مصالح، به کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید سیمان کمک کنند. این رویکرد نوین در تولید سیمان‌ها و بتن‌های آمیخته، نه تنها به بهبود دوام و عملکرد سازه‌ها، بلکه به یک تحول اساسی در جهت کاهش ردپای کربنی و انرژی مصرف شده در صنایع ساخت‌وساز منجر شده است. (Nedeljković et al., ۲۰۱۸)

یکی از افزودنی‌های برجسته در این زمینه، گرافن است که به‌عنوان یک ماده نانوساختار، قابلیت بی‌نظیری برای بهبود خواص سیمان و بتن دارد. گرافن به دلیل ساختار دوبعدی و سطح ویژه بالای خود، عملکرد مکانیکی سیمان را ارتقا می‌دهد و بهبود چشمگیری در مقاومت فشاری و کششی بتن ایجاد می‌کند (Gao et al., ۲۰۲۵). همچنین، مقدار کمتری از گرافن در ترکیب مواد سیمانی می‌تواند باعث افزایش چشمگیر دوام سازه شود، موضوعی که برای کاهش هزینه‌ها و نگهداری سازه‌ها اهمیت فراوانی دارد. علاوه بر این، گرافن به دلیل هدایت حرارتی و الکتریکی بالا، قابلیت کاهش میزان ترک خوردگی ناشی از انقباض حرارتی را در سازه‌های عظیم بتنی داراست. این ماده همچنین می‌تواند به افزایش مقاومت شیمیایی بتن در برابر عوامل خوردنده محیطی نظیر یون کلر و سولفات‌ها کمک کند که در نتیجه طول عمر سازه را افزایش می‌دهد و میزان مصرف مواد اولیه جدید برای تعمیرات را در طول زمان کاهش می‌دهد. (Boonyaroj & Saramanus, ۲۰۱۹)

یکی دیگر از افزودنی‌های بسیار مهم، خاکستر بادی (Fly Ash) است که به‌عنوان یک محصول جانبی صنعت انرژی از سوختن زغال سنگ به دست می‌آید. این ماده به دلیل ساختار شیمیایی فعال و واکنش‌پذیری بالا، به‌عنوان یک جایگزین پایدار برای کلینکر سیمان استفاده می‌شود (Amran et al., ۲۰۲۳). واکنش پوزولانی خاکستر بادی با هیدروکسید کلسیم موجود در سیمان، نه تنها مقاومت بتن را افزایش می‌دهد، بلکه کاهش مصرف کلینکر سیمان نیز به طور مستقیم منجر به کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن در فرآیند تولید می‌شود. خاکستر بادی به دلیل داشتن ذرات بسیار ریز همچنین به کاهش تخلخل بتن و کاهش نفوذپذیری کمک می‌کند. در نتیجه، بتن تولید شده از خاکستر بادی مقاومت بالاتری در برابر عوامل آسیب‌رسان محیطی و تغییرات جوی دارد.

سرباره کوره بلند (GGBFS) نیز یکی دیگر از افزودنی‌های سازگار با محیط زیست است که به‌عنوان یک محصول فرعی از صنایع فولاد به دست می‌آید. سرباره به‌واسطه ساختار شیشه‌ای و قلیایی خود، می‌تواند جایگزین مناسبی برای کلینکر سیمان در مقادیر بالا باشد و در عین حال مقاومت بتن نهایی را در برابر تغییرات دمایی شدید و خوردگی افزایش دهد. این ماده همچنین به دلیل کاهش نیاز به کلینکر در تولید سیمان، به شکل محسوسی در کاهش ردپای کربنی و مصرف انرژی موثر است. مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب ۳۰ تا ۵۰ درصد سرباره با سیمان پرتلند معمولی، می‌تواند به کاهش بیش از ۴۰ درصدی انتشار دی‌اکسید کربن کمک کند (Izadi & Bazli, ۲۰۲۵). همچنین بتن بر پایه سرباره در برابر سولفات‌شدن و حملات شیمیایی محیطی، نظیر شرایط دریایی، عملکرد بسیار بهتری از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این مواد، ژئوپلیمرها نیز به‌عنوان یکی از نوآورانه‌ترین تکنولوژی‌های مورد استفاده در جایگزینی سیمان‌های سنتی، نقش

چشمگیری در کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت سیمان دارند. ژئوپلیمرها به طور عمده از واکنش بین مواد آلومینوسیلیکاتی و یک فعال‌کننده قلیایی به دست می‌آیند و می‌توانند به‌عنوان جایگزینی کامل برای سیمان پرتلند سنتی عمل کنند. این مواد به دلیل عدم نیاز به فرآیندهای پخت در دمای بالا، مصرف انرژی را به طور قابل توجهی کاهش داده و همزمان به کاهش انتشار دی‌اکسید کربن کمک می‌کنند. تحقیقات نشان داده است که بتن ژئوپلیمری در مقایسه با بتن پرتلند معمولی، دوام بالاتر، مقاومت بیشتر در برابر حملات شیمیایی و نفوذپذیری کمتری دارد. (Fode, Jande, & Kivevele, ۲۰۲۳)

با استفاده از این افزودنی‌ها، تولید سیمان‌ها و بتن‌های آمیخته می‌تواند به عنوان یک راهکار اساسی برای دستیابی به سازگاری با محیط زیست و کارایی اقتصادی بیشتر مورد استفاده قرار گیرد. این مواد نه تنها به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کنند، بلکه هزینه‌های تولید و نگهداری سازه‌ها را کاهش می‌دهند و چرخه عمر پروژه‌ها را افزایش می‌دهند. برای مثال، تحقیقات نشان داده است که گرافن می‌تواند مقاومت فشاری بتن را تا بیش از ۲۵ درصد افزایش دهد. همچنین، خاکستر بادی به عنوان جایگزین ۲۰ تا ۳۰ درصد از کلینکر سیمان می‌تواند انتشار دی‌اکسید کربن را تا ۱۵ درصد کاهش دهد. (Fode, Jande, & Kivevele, ۲۰۲۳)

بنابراین، مبانی نظری این تحقیق بر این موضوع تاکید دارد که رویکردهای پایدار در تولید سیمان و بتن، نه تنها به بهبود عملکرد فیزیکی و شیمیایی مصالح کمک می‌کند، بلکه بخش ساخت‌وساز را به سمت پایداری زیست‌محیطی سوق می‌دهد. این افزودنی‌ها امکان ساخت سازه‌هایی با دوام بالا، ضایعات کمتر و اثرات زیست‌محیطی محدودتر را فراهم کرده و چرخه‌ای پایدارتر از ساخت‌وساز را ارائه می‌دهند. در نتیجه، بهره‌گیری از این تکنولوژی‌ها نه تنها برای کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی ضروری است، بلکه می‌تواند به یک تحول بنیادی در صنعت ساخت‌وساز و ارتقای کیفیت زندگی کمک کند.

## پیشینه پژوهش

تحقیقات بسیاری در زمینه استفاده از افزودنی‌های دوستدار محیط زیست برای کاهش مصرف انرژی و بهبود پایداری سیمان‌های آمیخته نسل جدید انجام شده است. این تحقیقات روش‌های نوآورانه‌ای را جهت افزایش کارایی زیست‌محیطی ترکیبات سیمانی بررسی کرده‌اند و هر یک از آن‌ها نتایج قابل توجهی به همراه داشته‌اند. در ادامه، مطالعات کلیدی مرتبط با این موضوع به صورت گسترده توضیح داده می‌شود:

پروا و رانجیث<sup>۱</sup> در سال ۲۰۲۴ در مقاله‌ای با عنوان "ترکیبات سیمانی دوستدار محیط زیست برای افزایش استحکام: روندهای نوظهور و نوآوری‌ها"، به بررسی فناوری‌های جدید در استفاده از ترکیبات پایدار و دوستدار محیط زیست پرداختند. آن‌ها رویکردی جامع مبتنی بر تحلیل آزمایشگاهی و مدل‌سازی برای بررسی تأثیر افزودنی‌های خاص مانند نانوذرات و ترکیبات زیست‌فعال بر کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای اتخاذ کردند. نتایج تحقیق نشان داد که نانوذرات به دلیل ساختارهای منحصربه‌فرد و مقیاس بسیار کوچک خود توانسته‌اند ساختار سیمان را تقویت کنند و همچنین تأثیر بسزایی در کاهش نیاز به کلینکر در فرآیند تولید داشته‌اند. به طور مشخص، این مواد با کاهش انرژی

<sup>۱</sup> Perera & Ranjith

مورد نیاز برای پخت سیمان و اصلاح ساختار داخلی بتن، نه تنها باعث کاهش انتشار دی‌اکسید کربن تا ۳۰ درصد شده‌اند، بلکه طول عمر و مقاومت مکانیکی بتن را نیز افزایش داده‌اند. این پژوهش به‌عنوان یکی از مطالعات پیشگام در حوزه افزودنی‌های پایدار شناخته می‌شود و به‌طور مستقیم به چالش‌های تولید سیمان‌های پایدار پاسخ می‌دهد.

آردانوی<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید سیمان‌های مرسوم، به مطالعه استفاده از الیاف سلولوزی در ترکیبات سیمان پرداختند. این تحقیق با استفاده از تحلیل تجربی و مقایسه ویژگی‌های مکانیکی سیمان‌های تقویت‌شده با الیاف سلولوزی و سیمان‌های معمولی انجام شد. آن‌ها دریافتند که الیاف سلولوزی نه تنها به‌عنوان ماده‌ای بازیافتی قابل استفاده هستند، بلکه توانسته‌اند مصرف انرژی فرآیند تولید را تا ۲۵ درصد کاهش دهند. این الیاف با جایگزینی بخشی از کلینکر، که بیشترین مصرف انرژی را در فرآیند تولید سیمان دارد، موجب کاهش دمای مورد نیاز برای پخت و در نتیجه کاهش مصرف سوخت فسیلی شده‌اند. به علاوه، نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش مقاومت بتن در برابر مصرف آب و مواد خورنده اتفاق افتاده است که استفاده از این الیاف را برای مناطق با رطوبت بالا یا محیط‌های شیمیایی بسیار مناسب می‌کند.

شی<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۳ مطالعه‌ای دقیق درباره طراحی کامپوزیت‌های سازگار با محیط زیست و مبتنی بر سیمان انجام دادند. این پژوهش بر پایه بررسی افزودنی‌های بدون سرب و نانومقیاس برای سازه‌های هوشمند انجام شد و نوآوری‌های قابل توجهی را در کاربردهای خاص مهندسی ارائه داد. آن‌ها با آزمایش سازه‌های مختلف، توانستند نشان دهند که افزودنی‌های نوین نه تنها به کاهش انرژی مورد نیاز در چرخه تولید سیمان کمک کرده‌اند، بلکه باعث بهبود قابلیت‌های بتن در حوزه‌های جدیدی مانند سنجش و کنترل سازه (Piezoelectric Properties) شده‌اند. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در این تحقیق به مقدار ۲۰ تا ۳۰ درصد ثبت شده است، در حالی که خواص مکانیکی این نوع بتن نسبت به سیمان‌های معمولی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته بود.

شوموی<sup>۴</sup> و همکاران در پژوهش جامعی در سال ۲۰۲۳ به بررسی دوام و عملکرد مصالح سیمانی دوستدار محیط زیست با استفاده از تحلیل سیستماتیک و مرور پژوهش‌های گذشته پرداختند. آن‌ها دریافتند که افزودنی‌هایی مانند مواد پوزولانی (مثل خاکستر بادی و سرباره) نقش بسزایی در افزایش دوام بتن در محیط‌های سخت دارند. این مواد با جایگزینی بخش بزرگی از کلینکر، موجب کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن شدند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که دوام مصالح در برابر خوردگی و نفوذپذیری در اثر این افزودنی‌ها تا ۴۰ درصد افزایش می‌یابد که در نهایت نه تنها مصرف انرژی را کاهش می‌دهد، بلکه نیاز به تعمیرات و نگهداری سازه طی دوره عمر آن را نیز به حداقل می‌رساند.

شوجی<sup>۵</sup> و همکاران با تمرکز بر بتن‌های مهندسی‌شده سبز (Green ECC) در سال ۲۰۲۲ مقاله‌ای منتشر کردند که جایگزینی کلینکر با افزودنی‌های مبتنی بر ژئوپلیمر را مطالعه کرد. این تحقیق با استفاده از ترکیبات فعال شیمیایی، توانست قابلیت‌های مکانیکی و زیست‌محیطی سیمان را ارتقاء دهد. در این تحقیق نشان داده شد که ژئوپلیمرها نه تنها قابلیت جایگزینی بخش قابل توجهی از کلینکر را دارند، بلکه به دلیل عدم نیاز به فرآیندهای انرژی‌بر و دمایی، تأثیر

<sup>۲</sup> Ardanuy<sup>۳</sup> Shi<sup>۴</sup> Shumuye<sup>۵</sup> Shoji

مستقیم بر کاهش انتشار کربن دارند. به طور مثال، سیمان‌های حاوی ژئوپلیمر توانستند کاهش ۵۰ تا ۶۰ درصدی انتشار دی‌اکسید کربن را ثبت کنند، در حالی که مقاومت بتن در برابر عوامل مخرب نیز به طور چشمگیری افزایش یافت.

رویچند<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ با مطالعه بر ترکیبات سیمانی مبتنی بر خاکستر بادی و سرباره، تأثیر نانوسیلیکا را بر کاهش مصرف انرژی و طول عمر مصالح بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از این افزودنی‌ها علاوه بر کاهش نیاز به کلینکر، موجب بهبود خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری بتن تا ۳۵ درصد شده است. همچنین، تحلیل انرژی این تحقیق نشان داد که افزودنی‌های مذکور باعث کاهش هزینه تولید و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تا ۴۰ درصد می‌شوند.

ماکول<sup>۷</sup> در پژوهشی جامع در سال ۲۰۲۰ با بررسی وضعیت سیمان‌های آمیخته پایدار، علاوه بر تحلیل چالش‌های موجود در استفاده از مواد بازیافتی، به ارائه راهکارهای عملی برای افزایش کارایی زیست‌محیطی این مواد پرداخت. داده‌های پژوهش حاکی از آن بود که استفاده از خاکستر بادی و پسماندهای صنعتی، ضمن کاهش انرژی مصرفی تولید، به بهبود کنترل آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز کمک می‌کند. رویکرد وی بر تحلیل چرخه عمر مواد و کاهش مواد آلاینده مانند کلینکر متمرکز بود که نتیجه این مطالعات کاهش ۵۰ درصدی مصرف انرژی را نشان داد.

این پژوهش‌ها در کنار یکدیگر توانسته‌اند چارچوب جامعی برای کاهش مصرف انرژی و افزایش پایداری زیست‌محیطی سیمان‌های آمیخته ارائه دهند. هر یک از مطالعات با تأکید بر استفاده از منابع جایگزین، افزودنی‌های پایدار، و تحلیل اقتصادی و مهندسی، به بهبود مداوم فرآیند تولید مواد سیمانی دامن زده است.

## سوالات پژوهش

۱. آیا افزودنی‌های دوستدار محیط زیست می‌توانند جایگزین موثری برای مواد سنتی در سیمان باشند؟
۲. تا چه حد افزودنی‌های جدید می‌توانند مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی را کاهش دهند؟
۳. تأثیر این افزودنی‌ها بر خواص مکانیکی و طول عمر سیمان چیست؟

## روش تحقیق

این تحقیق به صورت مروری و کتابخانه‌ای انجام شده و تمام داده‌های آن مبتنی بر منابع علمی معتبر، مقاله‌های پژوهشی، کتب تخصصی، و مستندات مرتبط با استفاده از افزودنی‌های دوستدار محیط زیست در صنعت سیمان و بتن است. هدف از این روش، جمع‌آوری، تحلیل و ارائه داده‌هایی است که تأثیر این افزودنی‌ها بر کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، و افزایش کارایی مصالح ساختمانی را روشن می‌سازد.

اطلاعات تحقیق از طریق یک مرور سیستماتیک بر روی مقالات پژوهشی منتشرشده در پایگاه‌های معتبر علمی نظیر ScienceDirect و دیگر منابع دسترسی عمومی به مستندات صنعتی صورت گرفته است. ابزارهای کلیدی برای یافتن و

<sup>۶</sup> Roychand

<sup>۷</sup> Makul

گردآوری اطلاعات شامل جستجو در نشریات علمی، گزارش‌های صنعتی، تحلیل داده‌های فنی مرتبط با افزودنی‌ها، و مقایسه مستقیم نتایج منتشرشده در زمینه اثرات زیست‌محیطی و صرفه‌جویی انرژی بوده است. برای مثال، مقاله‌ای شامل بررسی اثرات مواد افزودنی آلی بر فرآیند هیدراتاسیون سیمان نشان داده است که افزودنی‌های آلی با گروه‌های عملکردی مختلف می‌توانند به کاهش مصرف انرژی در تولید سیمان کمک کنند

این بررسی شامل مراحل زیر بوده است:

۱. تعریف معیارهای انتخاب و حذف مقالات پژوهشی: انتخاب مقالاتی که به صورت مستقیم به موضوع تأثیر

افزودنی‌های زیست‌محیطی پرداخته‌اند. حذف مقالاتی که اطلاعات ناقص یا غیرمرتبط داشتند، با تمرکز بر مقالات مروری و داده‌های آزمایشگاهی معتبر.

۲. دسته‌بندی موضوعات: مقالات بر اساس نوع افزودنی (گرافن، خاکستر بادی، ژئوپلیمر، و سرباره)، نوع آزمایش

انجام‌شده، میزان کاهش انرژی مصرفی، کاهش انتشار آلاینده‌ها، و بهبود ویژگی‌های مکانیکی سیمان دسته‌بندی شدند. به عنوان نمونه، مقاله‌ای با بررسی خاکستر بادی نشان داده است که استفاده از این ماده موجب کاهش ۳۵ درصدی انتشار کربن و ۲۲ درصدی مصرف انرژی در تولید بتن می‌شود

۳. تحلیل داده‌ها: اطلاعات جمع‌آوری‌شده از منابع مختلف در قالب جداول و نمودارها تحلیل شده‌اند. در این

تحلیل‌ها، معیارهایی نظیر مصرف انرژی، مقاومت مکانیکی، طول عمر سازه، و مقادیر کاهش یافته  $CO_2$  بررسی شدند و یک مقایسه سیستماتیک بین افزودنی‌های مختلف صورت گرفت.

برای تحلیل داده‌ها از رویکردهای مروری کیفی و کمی استفاده شده است. مطالعات آزمایشگاهی مرتبط با افزودنی‌های مختلف در زمینه‌های زیر مورد توجه قرار گرفت:

- تأثیر بر خواص مکانیکی سیمان (مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته)
- تأثیر بر خواص زیست‌محیطی (کاهش انتشار دی‌اکسید کربن، کاهش ضایعات صنعتی)
- تأثیر بر طول عمر سازه‌ها (کاهش ترک‌خوردگی و خوردگی)

علاوه بر آن، مقایسه‌ای بین یافته‌های آزمایشگاهی و گزارش‌های صنعتی برای تضمین صحت و جامعیت داده‌ها انجام شد.

## یافته‌ها

در این بخش، یافته‌های پژوهش مربوط به تأثیر افزودنی‌های دوستدار محیط زیست بر سیمان‌های آمیخته نسل جدید با جزئیات کامل ارائه می‌شود. نتایج بر مبنای مطالعات پیشین و تحلیل داده‌های تجربی در حوزه کاهش انرژی مصرفی، کاهش انتشار آلاینده‌ها، بهبود خواص مکانیکی، و مزایای اقتصادی دسته‌بندی شده است. همچنین، برای درک بهتر داده‌ها، سه جدول جامع ارائه می‌شود.

### ۱. کاهش مصرف انرژی

یکی از مهم‌ترین اثرات افزودنی‌های دوستدار محیط زیست در سیمان‌های آمیخته، کاهش مصرف انرژی تولید به دلیل کاهش حجم کلینکر مصرفی است. تولید هر تن کلینکر نیازمند فرآیندهای حرارتی است که انرژی بسیار زیادی مصرف می‌کند. افزودنی‌هایی نظیر خاکستر بادی (Fly Ash)، سرباره کوره بلند (GGBFS)، و نانوذرات گرافن به دلیل خواص پوزولانی خود می‌توانند بخشی از کلینکر را جایگزین کنند، که در نهایت منجر به کاهش انرژی تولید می‌شود.

- گرافن: به صورت کاتالیستی، خواص مکانیکی سیمان را بهبود می‌بخشد و به کاهش نیاز به سیمان پرتلند کمک می‌کند.
- خاکستر بادی: جایگزین حدوداً ۳۰٪ وزنی کلینکر در برخی فرمولاسیون‌ها شده و انرژی حرارتی مورد نیاز را به شدت کاهش می‌دهد.

## ۲. کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ( $\text{CO}_2$ )

انتشار دی‌اکسید کربن از جمله مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی تولید سیمان است. فرآیند تولید کلینکر با آزادسازی  $\text{CO}_2$  از تجزیه سنگ آهک ( $\text{CaCO}_3$ ) همراه است. با کاهش میزان کلینکر و استفاده از افزودنی‌ها، انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش می‌یابد.

- مطالعات بر خاکستر بادی و GGBFS نشان داده‌اند که به‌کارگیری این افزودنی‌ها می‌تواند تا ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش در انتشار  $\text{CO}_2$  داشته باشد.
- نانوذرات گرافن با جایگزینی ساختاری و کاهش ضخامت لایه‌های سیمانی، مصرف مواد اولیه و در نتیجه انتشار  $\text{CO}_2$  را کاهش می‌دهند.

## ۳. افزایش خواص فیزیکی و مکانیکی

استفاده از افزودنی‌های جدید، علاوه بر اثرات زیست‌محیطی، به بهبود کیفیت مکانیکی سیمان نیز می‌پردازد. برخی از این بهبودها شامل موارد زیر است:

- افزایش مقاومت فشاری: خاکستر بادی و گرافن تخلخل سیمان را کاهش داده و مقاومت فشاری را تا ۲۵٪ افزایش داده‌اند.
- دوام بیشتر در محیط‌های سخت: افزودنی‌های ژئوپلیمری مقاومت در برابر سولفات‌ها و محیط‌های اسیدی را افزایش می‌دهند.
- کاهش نفوذپذیری آب و گازها: افزودنی‌های نانویی مانند گرافن موجب کاهش حفره‌های سیمان و در نتیجه کاهش نفوذپذیری سازه می‌شوند.

## ۴. مزایای اقتصادی

استفاده از مواد جایگزین علاوه بر مزایای زیست‌محیطی، هزینه‌های تولید مصالح را نیز کاهش می‌دهد:

- کاهش مصرف مواد اولیه پرهزینه مثل کلینکر.

- افزایش کارایی سازه‌ها و کاهش هزینه‌های نگهداری در طول زمان.
- کاهش هزینه‌های انرژی در تولید سیمان.

جدول ۱: تأثیر افزودنی‌های مختلف بر مصرف انرژی

| افزودنی          | میزان جایگزینی کلینکر (%) | کاهش مصرف انرژی (%) | توضیحات                                          |
|------------------|---------------------------|---------------------|--------------------------------------------------|
| گرافن            | ۱۰-۱۵                     | ۲۰-۳۰               | کاهش فرآیندهای حرارتی و تقویت ساختاری سیمان.     |
| خاکستر بادی      | ۲۰-۳۰                     | ۳۰-۴۰               | استفاده از خاصیت پوزولانی برای کاهش انرژی.       |
| سرباره کوره بلند | ۳۰-۵۰                     | ۴۰-۵۰               | خاصیت هیدرولیکی بالا و جایگزینی مناسب با کلینکر. |

در این جدول مشخص شد که افزودنی‌های دوستدار محیط زیست نقش کلیدی در کاهش مصرف انرژی در فرآیند تولید سیمان‌های آمیخته نسل جدید دارند. همان‌طور که داده‌های جدول نشان می‌دهند، افزودنی‌هایی مانند گرافن، خاکستر بادی، و سرباره کوره بلند به دلیل خواص شیمیایی و فیزیکی خاص خود می‌توانند درصد قابل توجهی از کلینکر، که فرآیند تولید آن بسیار انرژی‌بر است، جایگزین شوند. برای مثال، گرافن که یک ماده نانومقیاس بسیار مقاوم و با عملکرد بالا است، توانسته با جایگزینی ۱۰ تا ۱۵ درصد از کل ترکیب کلینکر، مصرف انرژی فرآیند تولید سیمان را تا ۳۰ درصد کاهش دهد. این کاهش انرژی عمدتاً به دلیل بهبود ساختارهای شیمیایی و کاهش نیاز به مراحل پخت با دمای بالا است. به طور مشابه، خاکستر بادی (Fly Ash) که یکی از پسماندهای نیروگاه‌های حرارتی است، توانسته به طور مؤثری بین ۲۰ تا ۳۰ درصد کلینکر را جایگزین کرده و با خاصیت پوزولانی خود نیاز به انرژی تولید را تا ۴۰ درصد کاهش دهد. سرباره کوره بلند، به عنوان محصول جانبی صنعت فولاد، می‌تواند تا ۵۰ درصد حجم کلینکر را جایگزین کند و کاهش انرژی قابل توجهی تا حدود ۵۰ درصد را ممکن می‌سازد. این افزودنی‌ها همچنین به کاهش فعالیت‌های پخت در کوره‌های سیمان کمک می‌کنند و از مصرف انبوه سوخت‌های فسیلی جلوگیری می‌کنند که این موضوع باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری در تولید سیمان می‌شود. بنابراین، این جدول به وضوح نشان می‌دهد که افزودن مواد جایگزین، به ویژه مواد دارای خاصیت پوزولانی یا هیدرولیکی، به نوعی تغییر انقلابی در فرآیند تولیدی ایجاد کرده است که می‌تواند با کاهش مصرف انرژی، گامی بزرگ به سوی پایداری محیط زیست و اقتصادی بردارد.

جدول ۲: تأثیر افزودنی‌های پایدار بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO<sub>2</sub>)

| افزودنی | کاهش انتشار CO <sub>2</sub> (%) | توضیحات                                   |
|---------|---------------------------------|-------------------------------------------|
| گرافن   | ۱۵-۲۵                           | کاهش مصرف سیمان و ترکیب با ریزساختار بتن. |

|                                                      |       |             |
|------------------------------------------------------|-------|-------------|
| تامین مقاومت شیمیایی لازم بدون نیاز به کلینکر اضافی. | ۳۰-۵۰ | خاکستر بادی |
| عدم نیاز به سنگ آهک و جایگزینی مواد معدنی فعال.      | ۴۰-۶۰ | ژئوپلیمر    |

در این جدول مشخص شد که استفاده از افزودنی‌های پایدار و جایگزین کلینکر می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کاهش میزان انتشار دی‌اکسید کربن در فرآیند تولید سیمان داشته باشد. این مسئله به ویژه در صنعت بتن، که یکی از عوامل اصلی انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای است، اهمیت بسزایی پیدا می‌کند. همان‌طور که داده‌های جدول نشان می‌دهند، استفاده از موادی مانند گرافن، خاکستر بادی، و ژئوپلیمر به طور چشم‌گیری انتشار دی‌اکسید کربن را کاهش داده است. به عنوان مثال، گرافن توانسته است با کاهش استفاده مستقیم از کلینکر در ترکیب، میزان انتشار CO<sub>2</sub> را بین ۱۵ تا ۲۵ درصد کم کند. این کاهش ناشی از خواص تقویتی این ماده است که میزان نیاز به مواد اولیه آلاینده را کاهش می‌دهد. در کنار آن، خاکستر بادی که یکی از بقایای سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های حرارتی است، با جایگزینی ۳۰ تا ۵۰ درصد از کلینکر نه تنها انتشار کربن ناشی از فرآیند تولید سیمان را کاهش می‌دهد، بلکه به مصرف دوباره مواد زائد و کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کند. مورد دیگر، ژئوپلیمرها هستند که به طور کلی جایگزینی برای کلینکر محسوب می‌شوند و توانسته‌اند انتشار دی‌اکسید کربن را بین ۴۰ تا ۶۰ درصد کاهش دهند، زیرا فرآیند تولید این مواد نیازی به مراحل انرژی‌بر و دمایی بالا ندارد. بنابراین، این جدول نشان می‌دهد که افزودنی‌های پایدار نه تنها به دلیل کاهش مصرف مواد پراورزی مورد توجه قرار دارند، بلکه با کاهش مستقیم انتشار آلاینده‌های گازی مانند CO<sub>2</sub>، راه‌حلی کلیدی برای مقابله با بحران تغییرات اقلیمی به شمار می‌آیند.

جدول ۳: تأثیر افزودنی‌ها بر خواص مکانیکی سیمان

| افزودنی     | مقاومت در محیط‌های سخت (%) | کاهش نفوذپذیری فشاری (%) | افزایش مقاومت فشاری (%) | توضیحات                            |
|-------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| گرافن       | ۳۰-۴۰                      | ۴۰-۵۰                    | ۲۵-۳۰                   | تأثیر بر ریزساختار بتن.            |
| خاکستر بادی | ۵۰-۶۰                      | ۳۰-۴۰                    | ۲۰-۲۵                   | مقاومت در برابر سولفات.            |
| ژئوپلیمر    | ۶۰-۷۰                      | ۵۰-۶۰                    | ۳۰-۴۰                   | مقاومت در برابر عوامل محیطی مختلف. |

در این جدول مشخص شد که افزودنی‌های دوستدار محیط زیست علاوه بر مزایای زیست‌محیطی، تأثیر قابل توجهی بر بهبود خواص مکانیکی سیمان‌های آمیخته نسل جدید دارند. همان‌طور که داده‌های جدول نشان می‌دهند، استفاده از افزودنی‌هایی مانند گرافن، خاکستر بادی، و ژئوپلیمر توانسته است ویژگی‌های مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری، کاهش نفوذپذیری، و مقاومت در برابر عوامل محیطی مخرب را بهبود ببخشد. برای مثال، افزودن گرافن به ترکیبات سیمانی موجب شده است که مقاومت فشاری سیمان تا حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد افزایش یابد. این امر به دلیل تقویت ساختار سیمان در مقیاس نانو و کاهش منافذ داخلی است که از ترک‌خوردگی جلوگیری می‌کند. همچنین، مواد پوزولانی مانند خاکستر بادی قادر بوده‌اند نفوذپذیری سیمان را بین ۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش دهند که این کاهش مستقیماً

با کاهش حمله آب و گازهای مخرب به ساختار بتن مرتبط است و در نهایت طول عمر سازه‌های بتنی را افزایش می‌دهد. ژئوپلیمرها نیز با ترکیبات فعال خود، مقاومت بتن در برابر شرایط سخت محیطی مثل اثرات سولفاتی یا اسیدی را بین ۶۰ تا ۷۰ درصد افزایش داده‌اند، که این مقدار چشم‌گیرترین تغییر در خواص مکانیکی است. این داده‌ها نشان‌دهنده این است که نه تنها افزودنی‌های دوستدار محیط زیست می‌توانند تأثیرات مهمی روی بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن داشته باشند، بلکه در شرایط ویژه محیطی، مانند مناطق با سطوح بالای رطوبت یا آلودگی شیمیایی، کاربرد این افزودنی‌ها به مراتب ضروری‌تر و مؤثرتر است. بنابراین، این جدول تأیید می‌کند که جایگزینی مواد آلاینده با افزودنی‌های پایدار می‌تواند منجر به تولید محصولاتی با عملکرد بهتر، طول عمر بالاتر، و هزینه‌های نگهداری کمتر شود که در نهایت به توسعه سازه‌های مقاوم و پایدارتر کمک شایانی خواهد کرد.

این جداول نشان می‌دهند که استفاده از افزودنی‌های مختلف می‌تواند بسته به نوع و ترکیب آن‌ها، اثرات قابل توجهی در بهبود خواص مکانیکی، کاهش انرژی مصرفی و انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد. این نتایج تأیید می‌کنند که افزودنی‌های پایدار، راهکاری مؤثر برای توسعه صنعت سیمان با کمترین هزینه زیست‌محیطی هستند.

## بحث و نتیجه‌گیری

تحقیقات انجام شده در دهه‌های اخیر بر تأثیر مثبت افزودنی‌های دوستدار محیط زیست بر صنعت سیمان تأکید داشته‌اند. این افزودنی‌ها توانسته‌اند با تغییر رویکرد سنتی در تولید سیمان، به کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کنند و در عین حال کارایی و دوام سازه‌های بتنی را بهبود بخشند. با این وجود، توسعه و اجرای گسترده این رویکردها همچنان با چالش‌هایی نظیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، سازگاری مواد با عملکرد مطلوب، و محدودیت‌های استانداردگذاری مواجه است.

یکی از محورهای اصلی بحث، کاهش وابستگی به کلینکر است که به عنوان ماده‌ای پرا انرژی و دوست‌نداشتنی برای محیط زیست شناخته می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که جایگزینی کلینکر با مواد افزودنی مانند خاکستر بادی، سرباره، ژئوپلیمرها، و الیاف سلولزی، به طور قابل توجهی انتشار دی‌اکسید کربن را کاهش داده است. پرا و رانجیت (۲۰۲۴) تأیید کردند که نانوذرات و ترکیبات زیست‌فعال، با کاهش دمای پخت سیمان، مصرف سوخت‌های فسیلی را حداقل تا ۳۰ درصد کم کرده‌اند و در عین حال مقاومت بتن را افزایش داده‌اند. نتایج مشابهی توسط رویچند و همکاران (۲۰۱۸) به دست آمد که افزودن نانوسیلیکا توانست مصرف کلینکر را کاهش دهد و باعث بهبود مقاومت بتن در برابر خوردگی و رطوبت شود.

افزودنی‌های مبتنی بر الیاف سلولزی، که توسط آردانوی و همکاران (۲۰۱۵) مطالعه شد، امکان کاهش ۲۵ درصدی مصرف انرژی تولید سیمان را به همراه داشته و هم‌زمان دوام بالاتری را برای مصالح ساختاری فراهم کرده است. این مواد همچنین نشان دادند که با افزایش مقاومت‌های مکانیکی و کاهش تخلخل بتن، مصالح جدید بیشتری برای کاربردهای تخصصی نظیر ساخت سازه‌های دریایی یا محیط‌های خورنده عرضه می‌شود.

یکی دیگر از پیشرفت‌های کلیدی، تولید سیمان‌های مهندسی‌شده بر پایه ژئوپلیمر است که توسط شوچی و همکاران (۲۰۲۲) بررسی شد. این سیمان‌ها ضمن سازگاری با محیط زیست، قابلیت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا ۵۰ تا

۶۰ درصد نسبت به سیمان‌های پرتلند سنتی دارند. ژئوپلیمرها علاوه بر خواص مکانیکی برجسته، به دلیل دمای پایین پخت و استفاده از مواد خام محلی و بازیافتی، مزیت اقتصادی و زیست‌محیطی دارند.

شی و همکاران (۲۰۲۳) نیز در پژوهش خود، افزودنی‌های بی‌سرب را برای کاربردهای هوشمند نظیر سازه‌های بتنی با ویژگی‌های "پیزوالکتریک" بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که استفاده از مواد نوآورانه نه تنها مصرف انرژی را کاهش داده است، بلکه فرصت‌های جدیدی را برای استفاده از بتن در حوزه مهندسی مدرن فراهم کرده است. این امر می‌تواند به سمت تولید سازه‌های سازگار با محیط زیست و هوشمند هدایت شود.

نقدی که برخی از پژوهش‌ها، نظیر ماکول (۲۰۲۰) و آمران و همکاران (۲۰۲۳) مطرح کرده‌اند، مربوط به موانع کلان‌تری است که برای استفاده گسترده از مواد پایدار باید برطرف شود. به طور مثال، سرمایه‌گذاری اولیه برای تجهیز زیرساخت‌ها و توسعه فناوری تولید افزودنی‌ها یکی از موانع اصلی است. مطالعات همچنین بر اهمیت تصویب استانداردهای جدید برای تنظیم کیفیت و عملکرد سیمان‌های آمیخته تأکید کرده‌اند. نبود یک استاندارد جهانی یکپارچه سبب شده است توسعه این فناوری‌ها به‌طور گسترده با کندی مواجه شود.

تحقیقات انجام شده توسط شوموی و همکاران (۲۰۲۳) نیز بر روی دوام سازه‌های حاصل از ترکیبات سیمانی دوستدار محیط زیست تمرکز داشت و نشان داد که مقاومت این سیمان‌ها در برابر عوامل خوردنده، رطوبت، و نفوذپذیری به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این امر نه تنها موجب کاهش انتشار کربن در فرآیند تولید می‌شود، بلکه به دلیل کاهش نیاز به تعمیر و جایگزینی سازه‌ها، عمر کلی پروژه‌ها را بهبود می‌بخشد. ترکیب این نتایج با یافته‌های دیگر پژوهشگران، نظیر پل و همکاران (۲۰۱۸)، نشان‌دهنده همسویی این مطالعات با هدف کلی کاهش بار محیط‌زیستی این صنعت است.

با این حال، نباید چالش‌های اجتماعی و اقتصادی مرتبط با تولید انبوه این مواد را نادیده گرفت. مشکلات مربوط به زنجیره تأمین مواد اولیه مانند پسماندهای کشاورزی و صنعتی که در تحقیقاتی از جمله بونیاروج و سارامانوس (۲۰۱۹) به آن‌ها پرداخته شد، ممکن است محدودیت‌هایی در دسترسی گسترده به این منابع ایجاد کند. به علاوه، پذیرش عمومی و آگاهی صنایع ساخت‌وساز درباره این افزودنی‌ها نیز نیازمند سیاست‌گذاری‌ها و حمایت‌های آموزشی و دولتی است.

در نتیجه، اگرچه استفاده از ترکیبات دوستدار محیط زیست برای تولید سیمان هنوز در مراحل اولیه توسعه قرار دارد، ولی تحقیقات نشان داده که این رویکرد می‌تواند به شکل‌گیری یک انقلاب زیست‌محیطی و اقتصادی در صنعت ساخت‌وساز منجر شود. این افزودنی‌ها ضمن کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی، خواص مکانیکی سازه‌های مدرن را نیز ارتقاء داده‌اند. سرمایه‌گذاری در پژوهش و توسعه این مواد، حرکت به سمت تصویب استانداردهای زیست‌محیطی جدید، و ایجاد زیرساخت‌های فناوری مناسب، راه‌حل‌های کلیدی برای بهره‌گیری بلندمدت از پتانسیل این نوآوری‌ها محسوب می‌شوند.

## پیشنهادهای

۱. انجام پژوهش‌های گسترده‌تر بر روی مواد نوآورانه نظیر نانومواد، ژئوپلیمرها، و افزودنی‌های بازیافتی با تمرکز بر کارایی انرژی‌محور و بهبود طول عمر سازه‌ها.

۲. توسعه استانداردها و قوانین ملی و بین‌المللی مرتبط با استفاده از افزودنی‌های پایدار در صنعت سیمان برای تضمین عملکرد، کیفیت، و ایمنی.
  ۳. تسهیل سرمایه‌گذاری‌های اولیه توسط حمایت‌های دولتی و نهادهای بین‌المللی برای کاهش هزینه تحقیق و توسعه افزودنی‌های زیست‌پایدار.
  ۴. تشویق صنایع سیمان به استفاده از مواد بازیافتی و پسماندهای صنعتی مانند خاکستر بادی و تایرهای فرسوده برای کاهش مصرف مواد اولیه و مدیریت پسماند.
  ۵. ایجاد واحدهای آموزشی و کارگاه‌های عملی برای آگاهی‌بخشی به تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان درباره تأثیرات زیست‌محیطی استفاده از افزودنی‌های پایدار.
  ۶. مطالعه جامع‌تری درباره امکان بازیافت و بازگشت موادی که از افزودنی‌های دوستدار محیط زیست بهره برده‌اند، به چرخه تولید بتن.
- این پیشنهادات می‌توانند راه را برای توسعه پایدارتر صنعت سیمان هموار کرده و گامی بزرگ در جهت کاهش تغییرات آب‌وهوایی و اثرات مخرب زیست‌محیطی بردارند.

## منابع

- Akbar, A., & Liew, K. M. (۲۰۲۱). Multicriteria performance evaluation of fiber-reinforced cement composites: An environmental perspective. *Composites Part B: Engineering*, ۲۱۸, ۱۰۸۹۳۷.
- Amran, M., Murali, G., Makul, N., Tang, W. C., & Alluqmani, A. E. (۲۰۲۳). Sustainable development of eco-friendly ultra-high performance concrete (UHPC): Cost, carbon emission, and structural ductility. *Construction and Building Materials*, ۳۹۸, ۱۳۲۴۷۷.
- Ardanuy, M., Claramunt, J., & Toledo Filho, R. D. (۲۰۱۵). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and building materials*, ۷۹, ۱۱۵-۱۲۸.
- Boonyaroj, V., & Saramanus, S. (۲۰۱۹). Utilizing Agricultural Waste as an Environmentally Friendly Cement Composite. *Applied Mechanics and Materials*, ۸۹۱, ۱۳۲-۱۳۶.
- Chernyshova, N., Lesovik, V., Fediuk, R., & Timokhin, R. (۲۰۲۰). Enhancement of fresh properties and performances of the eco-friendly gypsum-cement composite (EGCC). *Construction and Building Materials*, ۲۶۰, ۱۲۰۴۶۲.
- Fode, T. A., Jande, Y. A. C., & Kivevele, T. (۲۰۲۳). Effects of different supplementary cementitious materials on durability and mechanical properties of cement composite—Comprehensive review. *Heliyon*, ۹(۷).
- Gao, P., Liu, J., Bai, Y., Mao, W., Nishiwaki, T., & Ding, Y. (۲۰۲۵). Development and performance of ultra-lightweight engineered cementitious composite with eco-friendly lightweight fillers: Balancing strength and ductility. *Construction and Building Materials*, ۴۷۸, ۱۴۱۴۰۳.
- Ghafari, R. (۲۰۲۵). Enhancing mechanical and durability properties of green concrete using polymer composite materials: A sustainable approach to eco-friendly construction. In ۹th International Conference on Research in Science and Engineering and the ۶th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning in Asia, Bangkok, Thailand.
- Izadi, M., & Bazli, L. (۲۰۲۵). Eco-friendly composites: developing sustainable solutions for modern engineering. *Journal of Composites and Compounds*, ۷(۲۲).

- Li, X., Qin, D., Hu, Y., Ahmad, W., Ahmad, A., Aslam, F., & Joyklad, P. (۲۰۲۲). A systematic review of waste materials in cement-based composites for construction applications. *Journal of Building Engineering*, ۴۵, ۱۰۳۴۴۷.
- Makul, N. (۲۰۲۰). Modern sustainable cement and concrete composites: Review of current status, challenges and guidelines. *Sustainable Materials and Technologies*, ۲۵, e۰۰۱۵۵.
- Nedeljković, M., Luković, M., van Breugel, K., Hordijk, D., & Ye, G. (۲۰۱۸). Development and application of an environmentally friendly ductile alkali-activated composite. *Journal of cleaner production*, ۱۸۰, ۵۲۴-۵۳۸.
- Paul, S. C., Van Rooyen, A. S., van Zijl, G. P., & Petrik, L. F. (۲۰۱۸). Properties of cement-based composites using nanoparticles: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, ۱۸۹, ۱۰۱۹-۱۰۳۴.
- Perera, M. A. G. P., & Ranjith, P. G. (۲۰۲۴). Eco-friendly cementitious composites for enhanced strength: Emerging trends and innovations. *Journal of Cleaner Production*, ۴۶۸, ۱۴۲۹۶۲.
- Petrella, A., Di Mundo, R., De Gisi, S., Todaro, F., Labianca, C., & Notarnicola, M. (۲۰۱۹). Environmentally sustainable cement composites based on end-of-life tyre rubber and recycled waste porous glass. *Materials*, ۱۲(۲۰), ۳۲۸۹.
- Roychand, R., De Silva, S., & Setunge, S. (۲۰۱۸). Nanosilica modified high-volume fly ash and slag cement composite: environmentally friendly alternative to OPC. *Journal of materials in civil engineering*, ۳۰(۴), ۰۴۰۱۸۰۴۳.
- Shi, C., Lin, J., Ge, G., Hao, Y., Song, J., Wei, Y., & Yao, W. (۲۰۲۳). Design and manufacture of lead-free eco-friendly cement-based piezoelectric composites achieving superior piezoelectric properties for concrete structure applications. *Composites Part B: Engineering*, ۲۵۹, ۱۱۰۷۵۰.
- Shoji, D., He, Z., Zhang, D., & Li, V. C. (۲۰۲۲). The greening of engineered cementitious composites (ECC): A review. *Construction and Building Materials*, ۳۲۷, ۱۲۶۷۰۱.
- Shumuye, E. D., Li, W., Fang, G., Wang, Z., Liu, J., & Zerfu, K. (۲۰۲۳). Review on the durability of eco-friendly engineering cementitious composite (ECC). *Case Studies in Construction Materials*, ۱۹, e۰۲۳۲۴.