ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۷۷۸۶-۲۹۸۰

شماره مجوز مجله:۸۰۴۰۰ زمان چاپ:۱۴۰۳/۰۳/۲۵

بررسی بتن سبز حاصل از پسماندهای ساختمانی در ساخت‌وساز با ارزیابی چرخه حیات بتن با رویکرد توسعه پایدار

شهزاد عنایت[۱] ، مهدی علیخانی[۲]

۱- استادیار، دکتری عمران-سازه، دانشگاه آزاد نجف آباد، ایران.

(Enayat912@gmail.com)

۲- دانشجو کارشناسی ارشد، رشته معماری، دانشگاه آزاد نجف آباد، ایران.

(Alikhani.mehdi۹۷@gmail.com)

چکیده

یکی از ارکان توسعه پایدار، تلاش در کاهش کاربرد منابع اولیه طبیعی و نیز بازیافت و استفاده مجدد از پسماندهای ساختمانی با کاربری‌های مناسب می‌باشد. بتن متشکل از پسماندهای ساختمانی سازگار با محیط زیست را بتن سبز گویند. در این نوع بتن، کلمه سبز به مفهوم مصرف مواد سازگار با محیط زیست در بتن است که باعث ایجاد سیستم مقاوم و پایدارتری می‌شود. با توجه به آثار منفی صنایع تولید بتن و ساخت‌وساز بر محیط زیست ازنظر انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف انرژی و مصرف مصالح خام، جایگزینی بتن‌های معمولی با بتن سبز الزامی است. این پژوهش باهدف ارزیابی مقاومتی و اقتصادی بتن دوست‌دار محیط زیست (بتن سبز) به‌منظور تدوین و ارائه استراتژی‌های مدیریت تولید و استفاده از بتن سبز به انجام رسیده است. تولید بتن در شکل سنتی آن از نظر کاهش منابع و ردپای کربنی که در کل چرخه زندگی ایجاد می‌کند، تأثیر قابل‌توجهی بر محیط زیست دارد. در این مقاله، بتن سبز به‌عنوان بتن تولیدشده با پسماند ساختمانی برای کاهش مصرف انرژی، بهبود آثار زیست‌محیطی و استفاده از منابع طبیعی تعریف شده است. یکی از مسائل مهم مرتبط با بتن سبز این است که چگونه مواد جایگزین، پسماند سیمانی و سنگ‌دانه‌ها بر خواص بتن در مقایسه با بتن از سیمان پرتلند معمولی تأثیر می‌گذارند. مزیت حفاظت از منابع بتن سبز با استفاده از محصول‌های جانبی صنعتی مانند خاکستر بادی، سرباره کوره بلند، دود سیلیس و ... به‌عنوان مواد چسبنده جایگزین و زباله‌های بازیافتی همچون پسماندهای ساختمانی و تخریب‌شده و سایر پسماند صنعتی به‌عنوان پرکننده‌های سنگ‌دانه مشهود است. با این حال، کمی کردن آثار زیست‌محیطی این‌گونه بتن‌ها مانند انتشار گاز دی‌اکسید کربن، چهره دوست‌دار محیط زیست در بتن سبز را نمایان می‌کند. ارزیابی چرخه حیات، یکی از قابل اعتمادترین ابزارها برای رسیدن به امتیاز وجود کربن در بتن سبز است. یافته‌های قطعی از آخرین تحقیق‌های موجود برای انواع مختلف بتن سبز، برای انعکاس مزیت‌ها و زیان‌های زیست‌محیطی ارائه شده‌اند. با درنظر گرفتن تمام جنبه‌های چرخه عمر برای بتن سبز می‌توان به یک رویکرد پایدارتر برای ساخت‌وساز دست یافت که درنتیجه مزایای قابل توجهی برای محیط زیست و جامعه به همراه خواهد داشت.

کلمات کلیدی: بتن سبز، پسماندهای ساختمانی، توسعه پایدار، محیط زیست، چرخه عمر

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۷۷۸۶-۲۹۸۰

مقدمه

هزینه تحقیق و توسعه در ایران در مقایسه با سایر کشورهای توسعه‌یافته نسبتاً پایین است. کشور ایران به‌طور تخمینی حدود ۰/۸ درصد از تولید ناخالص داخلی خود را صرف تحقیق و توسعه می‌کند. این رقم به‌مراتب کمتر از متوسط هزینه مشابه در کشورهای توسعه یافته (حدود ۱/۲۳ درصد از تولید ناخالص داخلی) است. در صنعت سیمان ایران، حدود ۲۶ درصد از خاکستر بادی و تقریباً تمام سرباره دانه‌بندی تولیدی توسط فولاد و نیروگاه‌های حرارتی استفاده می‌شود. به همین ترتیب، استفاده از پسماند صنعتی توسط متخصصان و کارشناسان در صنعت بتن کمک می‌کند تا بر روی ساخت بتن سبز برای رسیدگی به چالش‌های مختلف متمرکز شوند. تولید سیمان در ایران طی پنج سال گذشته به‌طور متوسط ۶/۴ درصد رشد داشته است. حدود ۵۶ درصد از تولید جهانی سیمان در چین انجام می‌شود. پیش‌بینی می‌شود که تولید سیمان در کشور تا سال ۲۰۲۴ به بیش از ۷۰ میلیون تن برسد که به دلیل افزایش فعالیت‌های ساختمانی است. انتظار می‌رود که افزایش فعالیت‌های عمرانی در کشور باعث ازدیاد مصرف سیمان شود. همچنین انتظار می‌رود که حمایت دولت از پروژه‌های زیربنایی مختلف مانند راه‌ها و تسهیلات مسکن، بازار را به حرکت درآورد (احمدی و کریمی، ۱۳۹۴).

امروزه به‌کارگیری بتن به‌نحوی‌که امکان استفاده مجدد داشته باشد، در توسعه پایدار مورد توجه قرار گرفته است. بدین سبب بایستی به‌طور جدی به موضوع تخریب ساختمان‌ها و به‌ویژه سازه‌های بتنی توجه شود. بهترین راهکار برای بازیابی زباله‌ها و پسماند بتنی، جایگزینی یا بازیافت این مواد و استفاده مجدد در طرح اختلاط بتن می‌باشد. در حال حاضر مهندسی بتن سبز در مراحل اولیه آن می‌باشد و هنوز مقادیر بسیار زیادی از پسماند وارد محیط زیست می‌شود که باید چاره‌ای برای آن اندیشیده شود. بازیافت بتن فرآیندی است که بتن ضایعاتی را از محل‌های تخریب و سایر منابع بازیابی می‌کند تا آن را به مصالح ساختمانی جدید تبدیل کند. بازیافت سنگ‌دانه‌های بتنی روشی است که به‌خوبی در صنعت ساختمان شناخته شده است، امّا به‌طور گسترده برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن از تولید سیمان استفاده نشده است. به این دلیل است که زنجیره تأمین مصالح بازیافتی هنوز به‌طور کامل توسعه نیافته است. با این حال، با افزایش تقاضا برای مصالح ساختمانی پایدار، انگیزه بیشتری برای تولیدکنندگان برای یافتن راه‌هایی برای بازیافت سنگ‌دانه‌ها وجود دارد. بتن سبز معرف مصرف مواد سازگار با محیط زیست در بتن است که باعث ایجاد سیستم مقاوم و پایدارتری می‌شود. بتن سبز اغلب ارزان‌قیمت است. علت این امر می‌تواند به‌واسطه استفاده از محصول‌های پسماند به شکل مواد جایگزین سیمان باشد که دفع پسماند محصول‌ها، هزینه چندانی دربر ندارد. مصرف انرژی آنها نیز در تولید ناچیز می‌باشد و قابلیت و دوام بالاتری هم دارند. بتن متشکل از پسماندهای بتنی که سازگار با محیط زیست باشد را بتن سبز می‌نامند. این نوع بتن ماده‌ای سازگار با محیط زیست است (فهیمیان و یزدان فر، ۱۳۸۹).

در همین راستا کاهش میزان سیمان مصرفی در بتن و جایگزین کردن مواد مکمل سیمانی به‌جای آن، می‌تواند نقش مهمی در دستیابی به اهداف فوق داشته باشد. از جمله مهمترین و اثر گذارترین بخش در موضوع بهبود کیفیت بتن، تغییر در ساختار و مواد تشکیل‌دهنده آن با مواد جایگزین مناسب می‌باشد. تحقیق‌های اخیر درزمینهٔ بعضی مواد جایگزین نشان می‌دهد که استفاده از این مواد می‌تواند به‌عنوان قدمی مهم در توسعه مهندسی بتن سبز باشد. اگرچه در وهله اول به‌کاربردن این مواد دارای مشکل‌هایی می‌باشد؛ ولی می‌توان با برنامه‌ریزی و تمرکز بیشتر روی این مسئله، بتنی باکیفیت بالاتر ازلحاظ دوام و پایداری به دست آورد. ازجمله پسماندهای بسیار مهم در کشورهای پیشرفته یا در حال توسعه مانند ایران که نیاز بسیار زیادی به برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه در کاربری و دفع رادارند؛ همانا پسماندهای صنعتی، کشاورزی و شهری می‌باشند. دفع مستقیم و نامناسب این پسماندها -که برحسب نوع صنعت و فرایندهای به کار گرفته شده، دارای کمیت و کیفیت بسیار متنوع می‌باشد- می‌تواند آثار بسیار مخرب و زیان‌باری را به طبیعت و منابع آن وارد سازد. در راستای این نوع بازیافت، دو راهکار وجود دارد. راهکار اول آن است که مصالحی که ویژگی‌های اولیه حفظ شده‌ای دارند را مجدداً در ساخت‌وسازها به کاربرد.

ISSN ۷۷۸۶-۲۹۸۰

بعضی از این مصالح یا بدون آسیب‌پذیری از ساختار اصلی بنا جدا می‌شوند و بدون تغییر مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ مانند چهارچوب‌ها، درب و برخی پنجره‌ها و حتی برخی آجرها و کاشی‌ها. در بعضی دیگر از این مصالح، قبل از استفاده باید تغییرهای جزئی داده شود؛ مانند قطعه‌های چوبی که به دلیل آسیب وارده، لازم است به تکه‌های کوچکتر تقسیم شوند. راهکار دوم، تولید مصالح جدید باقابلیت بازیافت و سازگار با محیط زیست است که کمترین آسیب را به منابع طبیعی وارد کند. این مصالح که دوست‌دار محیط زیست نامیده می‌شوند، دارای تنوع بالایی هستند (چرمسازی و همکاران، ۱۴۰۱).

اگرچه پایداری بتن را می‌توان با استفاده از مواد زائد بهبود بخشید، افزودن مکمل سیمانی یا مصالح جایگزین می‌تواند بر خواص بتن مانند مقاومت فشاری، کارایی و غیره تأثیر بگذارد که برای کاربردهای آن بسیار مهم هستند. همچنین تولید بتن با استفاده از مواد زائد لزوماً پایدار درنظر گرفته نمی‌شود؛ مگر این‌که دوام بتن ثابت شده باشد. مطالعه‌های گسترده‌ای برای شناسایی مواد زائد که می‌توانند به‌عنوان مکمل سیمانی و مصالح جایگزین در تولید بتن استفاده شوند، انجام شده است. به‌عنوان مثال؛ خاکستر بادی، سرباره کوره بلند و پوزولان‌ها به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان مکمل سیمانی شناسایی شده‌اند (تاپکو و بوگا[۱]، ۲۰۱۰).

استفاده از بتن در مقیاس خرد و کلان تا حد بسیار زیادی اکوسیستم را تخریب می‌کند و با تولید گاز گلخانه‌ای در فرایند عمل‌آوری بتن، اتمسفر را نیز تحت تأثیر منفی قرار می‌دهد. این موضوع با روند توسعه پایدار و اهداف کلان معماری و سازه سبز، بسیار تناقض دارد. استفاده از پسماند ساختمانی برای تولید بتن سبز مزایای بی‌شماری دارد. اولاً میزان زباله‌های حمل شده به محل‌های دفن زباله را کاهش می‌دهد و اقتصاد دایره‌ای را ترویج می‌کند. ثانیاً تقاضا برای منابع طبیعی محدود مانند شن و ماسه را کاهش می‌دهد و اغلب از طریق روش‌های مخرب زیست‌محیطی به دست می‌آیند. ثالثاً تولید بتن سبز به انرژی کمتری نسبت به تولید بتن سنتی نیاز دارد و درنتیجه انتشار کربن کمتری دارد. درنهایت، بتن سبز دارای استحکام و دوام قابل مقایسه یا حتی برتر نسبت به بتن سنتی است که آن را به یک جایگزین مناسب برای پروژه‌های ساختمانی تبدیل می‌کند.

صنعت بتن سالانه بیش از یک تریلیون گالن آب در سطح جهان مصرف می‌کند. مصرف زیاد آب شرب برای تولید بتن باعث بحران کم‌آبی به‌ویژه در مناطق دارای منابع محدود آب شرب شده است. استفاده از آب در بتن به‌عنوان یکی از مهمترین اجزا در واکنش هیدراتاسیون سیمان است. ازآنجاکه نمی‌توان آب را از بتن حذف کرد، استفاده از فاضلاب به‌جای آب شرب، یکی از راه‌های دستیابی به بتن سبز است (ویشوکارما و عثمان[۲]، ۲۰۲۰).

صنعت ساختمان یکی از بزرگترین صنایع تولید اشتغال در جهان به شمار می‌آید که سالانه افراد کثیری در آن مشغول فعالیت هستند. به‌رغم توجه کارفرمایان به رشد این صنعت، امانگاه جامع و منطقی و آینده‌نگری در راستای حفظ محیط زیست نشده است. بلکه صرفاً کلیه افراد دخیل در این صنعت، به‌صرفه اقتصادی و تسریع در اتمام پروژه عنایت دارند. این در حالی است که با تولید بیشتر مصالح غیرمتجانس طبیعی، انواع آلاینده‌های محیطی گسترش می‌یابد. در این تحقیق از روش ارزیابی چرخه زندگی[۳](LCA) به‌عنوان یک ابزار سودمند و استاندارد برای ارزیابی زیست‌محیطی مصالح ساختمانی مانند بتن استفاده می‌شود. این ارزیابی از شروع عمر اولیه تا پایان عمر ثانویه بتن ادامه دارد. ارزیابی چرخه عمر روشی برای ارزیابی و اندازه‌گیری کمی و کیفی تأثیرهای احتمالی محیط زیستی و همچنین منابع استفاده شده در چرخه عمر یک محصول است، یعنی مدیریت تأثیر محیط زیستی از زمان استخراج منابع اولیه تا فازهای تولید، استفاده، دفع و بازیافت ادامه دارد که نیازمند داده‌های خاص در مورد روند تولید است که شامل چهار فاز تحلیلی می‌باشد: تعریف هدف و محدوده، تحلیل و ایجاد فهرست چرخه عمر (LCI)[۴] ارزیابی تأثیر چرخه عمر (LCIA)[۵] و تفسیر نتایج (پاشاییان و خوش نوا، ۱۳۹۶). تولید سیمان در بتن با مصرف زیاد

---

۱ - Topcu & Boga

۲ - Vishwakarma & Uthaman

۳ - Life cycle assessment

۴ - Life cycle inventory

۵ - Life cycle impact assessment

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۷۷۸۶-۲۹۸۰

انرژی، آزاد شدن مقدار زیادی دی‌اکسید کربن و مصرف زیاد آب همراه می‌باشد که هر یک آثار زیان باری بر محیط زیست می‌گذارد. راه‌حل این مشکل‌ها استفاده از بتن سبز است که آثار زیست‌محیطی صنعت سیمان را به حداقل می‌رساند. بتن سبز، ماده عالی است که جایگزین سیمان شده و بسیار مقرون‌به‌صرفه است؛ زیرا محصول‌های پسماند را مصرف کرده و انرژی را ذخیره می‌کند. تمام بتن‌های سبز نسبت به بتن سنتی از مقاومت و دوام‌پذیری بالاتری برخوردارند. هدف از این مقاله معرفی بتن سبز به‌عنوان راهی برای دستیابی به ساخت‌وساز پایدار می‌باشد.

روش

روش تحقیق در این پژوهش بر اساس هدف، کاربردی است و بر اساس ماهیت، توصیفی و مروری می‌باشد که از یافته‌های تحقیق می‌توان به مواردی همچون: درک عمیق‌تری از تولید و استفاده از فناوری بتن سبز در راستای مفاهیم کلان حفظ محیط زیست و توسعه پایدار اشاره کرد و از نتایج پژوهش می‌توان در علوم مهندسی عمران، معماری و ساختن ساختمان‌های سبز بهره برد. با توجه به اهمیت عنوان پژوهش، سعی شده است که از روش‌های متنوع جهت گردآوری اطلاعات در این پژوهش استفاده شود. ازاین‌رو به مطالعه‌های کتابخانه‌ای (داخلی و خارجی و سایت‌های مرتبط ...) می‌توان اشاره کرد. این مقاله دارای قلمرو مکانی خاصی نیست. بدین سبب به‌صورت کلی و عام مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مرحله نخست، بامطالعه‌ی تحقیق‌ها و مقاله‌های پیشین در ارتباط با موضوع تحقیق، مهمترین نیازها برای ساخت بتن سبز با استفاده از پسماندهای ساختمانی شناسایی و جمع‌آوری گردیدند. سپس برای تعیین مهمترین معیارها از پرسشنامه استفاده شده برای جلوگیری از گازهای گلخانه‌ای انجام گرفته است و درنهایت از طریق روش چرخه حیات بتن مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پژوهش یک روش گام‌به‌گام برای تولید بتن سبز با استفاده پسماند ساختمانی به‌وسیله مراحل چرخه زندگی بتن را بیان می‌کند. با توجه به اینکه هدف از این پژوهش توجه به استفاده و کاربرد بتن سبز حاصل از پسماند ساختمانی در صنعت ساخت‌وساز است؛ این تحقیق ترکیبی از تحقیق‌های بنیادی و کاربردی شامل استفاده از نظریه‌ها و موارد عملی است. به‌عبارت دیگر چون این تحقیق برای کمک به حل موضوع علمی پسماند ساختمانی و ترویج آن انجام شده پژوهشی بنیادی-کاربردی است. برای گردآوری داده‌ها از اطلاعات کمی برای روشن نمودن مقدار و میزان تأثیرگذاری بازیافت و داده‌های کیفی برای روشن نمودن چگونگی توجه به پسماند ساختمانی در صنعت ساخت‌وساز استفاده شده است. روشی که برای پاسخگویی به سؤال‌های پژوهش مورد استفاده قرار گرفته با توجه به شناسایی و توصیف و ثبت اجزا و فرایند موضوع بازیافت توصیفی است. در این تحقیق از روش ارزیابی چرخه زندگی LCA به‌عنوان یک ابزار سودمند و استاندارد برای ارزیابی زیست‌محیطی مصالح ساختمانی مانند بتن درنظر گرفته می‌شود. روش ارزیابی چرخه عمر (LCA) به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای به دست آوردن نتایج قابل مقایسه برای آثار زیست‌محیطی برای انواع مختلف بتن درنظر گرفته می‌شود. این روش برای ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی بتن سبز در مقایسه با بتن سنتی سودمند است.

یافته ها

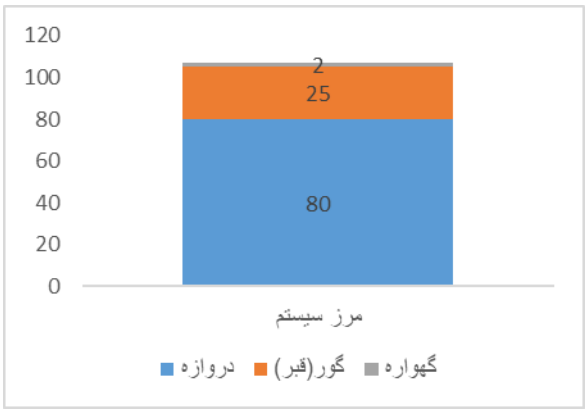
بیش از ۷۵ درصد از مطالعاتی که مورد بررسی قرار گرفت در آنها یک مطالعه LCA انجام شده است که مرز سیستم گهواره به دروازه را نشان می‌دهد، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است. مرز سیستم گهواره به دروازه، دامنه را محدود می‌کند. از فرآیندها و انتشارها و انرژی حاصله در LCA تا مرحله تولید مطالعه شده است، به‌استثنای مراحل استفاده و پایان عمر. همان‌طور که توسط ویو و همکاران بیان شد که در سال ۲۰۱۳ برای ارائه معیاری برای روش LCA منتشر شد، مشخص می‌کند که برای یک کاربر برای حذف مراحل استفاده و پایان عمر در حین انجام LCA، باید وجود داشته باشد (وو[۱] و

[۱] - Wu

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۷۷۸۶-۲۹۸۰

همکاران، ۲۰۱۴). شواهد کافی مبنی بر اینکه نتایج تحت تأثیر این موضوع قرار نخواهند گرفت. بنابراین، قطع استفاده و مراحل پایان عمر از محدوده به سه دلایل زیر قابل‌قبول نخواهد بود:



شکل ۱: تجزیه‌وتحلیل مرز سیستم انتخاب شده برای هر یک از مطالعه‌های LCA بررسی شده.

اول بتن در طول فاز "استفاده" خود کربناته شدن را نشان می‌دهد، فرآیندی که طی آن دی‌اکسید کربن توسط بتن از محیط در معرض واکنش با ترکیب‌های کلسیم موجود درزمینهٔ خود جذب می‌شود و کربنات‌ها را تشکیل می‌دهد. با این حال، از طریق فرآیند کربناته سازی، بتن می‌تواند در طول عمر مفید خود، ۱۳ تا ۴۸ درصد از دی‌اکسید کربنی را که در مرحله تولید منتشر می‌کند، جذب کند. این مقدار از دی‌اکسید کربن جذب‌شده که به‌عنوان کربن جداشده نشان داده می‌شود، بسته به نوع بتن، شرایط نوردهی و هندسه متفاوت است (کیم و چایی[۱]، ۲۰۱۶). باید در یک مطالعه LCA گنجانده شود تا امکان کسر ارزش آن از انتشار کربن در فرآیندهای باقیمانده فراهم شود.

دوم با حذف مرحله استفاده، کاربر همچنین فرض می‌کند که تمام مخلوط‌های بتن مورد مقایسه عمر مفید موردنیاز را حفظ می‌کنند. با این حال، یافته‌های جدول (۱) شواهدی را نشان می‌دهد که این فرض درست نیست. بسته به شرایط قرار گرفتن در معرض، پوشش بتن و مخلوط بتن، احتمال زیادی وجود دارد که یک مخلوط بتن سبز مسلح نتواند عمر مفید خود را به‌ویژه بالای ۶۰ سال برآورده کند. ازاین‌رو، طبق گفته پانسار و همکاران، باید حداقل ۲۰ درصد افزایش در تأثیر زیست‌محیطی بتن وجود داشته باشد تا بتن بالقوه نگهداری شود که به آن اجازه می‌دهد تا الزام‌های عمر مفید خود را برآورده کند (پانسار[۲] و همکاران، ۲۰۱۷). تایی و همکاران انتشار دی‌اکسید کربن مورد انتظار برای بتن در حال کار را معادل ۰/۶۰ کیلوگرم دی‌اکسید کربن بر مترمکعب بر سال، تعیین می‌کند. علاوه بر این، همچنین پیشنهاد می‌شود که یک ضریب جایگزین که نسبت بین عمر کارکرد مرجع عضو بتنی موردمطالعه و عمر مفید پیش‌بینی شده آن است، باید به‌عنوان یک عامل ضرب کننده برای تأثیر محیطی بتن موردمطالعه درنظر گرفته شود. محاسبه‌ها را نسبی‌تر و درنتیجه قابل اعتمادتر می‌کند (تایی[۳] و همکاران، ۲۰۱۱). بنابراین، این نشان می‌دهد که اگر تأثیر تعمیر، نگهداری و جایگزینی به‌عنوان بخشی از فاز «استفاده» LCA درنظر گرفته نشود، تأثیرهای زیست‌محیطی، تأثیرهای محیطی نسبی و مطلق بتن، دست‌کم گرفته می‌شود.

---

۱ - Kim & Chae

۲ - Panesar

۳ -Tae

ISSN ۷۷۸۶-۲۹۸۰

جدول ۱: پیش‌بینی عمر مفید برای انواع مختلف بتن سبز

ارجاع		پانسار و همکاران (۲۰۱۷)				پی ون دن هید و دی بلی [۱](۲۰۱۲)		
نوع بتن		سیمان پرتلند	سرباره ۲۵٪	سرباره ۵۰٪	خاکستر بادی ۱۵٪	خاکستر بادی ۳۵٪	خاکستر بادی ۵۰٪
پوشش	(میلی‌متر)	عمر خدمات (سال)					
کربناته شده	۶۵	۶۲	۱۲۴	۲۰۰	-	-	-
	۵۰	۱۲۴	۲۰۰	۲۰۰	-	-	-
	۳۵	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	-	۱۰۰	۱۰۰
نفوذ کلرید	۶۵	۳۳	۶۸	۱۴۴	-	-	-
	۵۰	۶۷	۱۳۸	۲۰۰	۵۱	-	۶۱
	۳۵	۹۱	۱۸۶	۲۰۰	-	-	-

سوم داشتن مرحله پایان عمر (می‌تواند با درنظر گرفتن مرز گهواره به گور یا مرز گهواره به گهواره به دست آید.) که در مرز سیستم LCA گنجانده شده است. دی شپر و همکاران فرض کردند که سنگ‌دانه‌های مورداستفاده در مخلوط بتن کاملاً قابل بازیافت هستند. با انتخاب مرز سیستم گهواره به گهواره، محاسبه شد که اجتناب از دفن زباله بتن آثار زیست‌محیطی را در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی بین ۴ تا ۱۵ درصد کاهش می‌دهد (دی شپر[۲] و همکاران، ۲۰۱۴). دینگ و همکاران، آنها پتانسیل پرهیز از دفن زباله برای پسماند ساختمانی بازیافتی را در LCA لحاظ کردند و نتیجه این بود که شاخص محیطی حمل‌ونقل و مصرف منابع طبیعی، ۴۶ درصد کاهش یافت (دینگ[۳] و همکاران، ۲۰۱۶). جدای از آن، زمانی که عمر مفید یک محصول بتنی به پایان می‌رسد، فرآیند تخریب نیاز به انرژی دارد. در مرحله مطالعه LCA ناشناخته است که آیا زباله مجدداً مورد استفاده قرار می‌گیرد یا خیر.

دومین بخش از محدوده LCA که کاربر انتخاب می‌کند واحد عملکردی (FU)[۴] می‌باشد. به گفته پانسار و همکاران، یک FU عنصری است که نحوه کمی سازی ورودی‌ها و خروجی‌های LCA را دیکته می‌کند. چهار سطح اصلی برای واحدهای عملکردی بتن وجود دارد: یک ساختار کامل یا یک ساختمان، یا جزء یک سازه مانند تیر، ستون یا تیر پل؛ و معروف‌ترین سطح جزئیات موردمطالعه در LCA بتن، واحد مصالح بتن است. یک FU واحد برای بتن به دو دسته تقسیم می‌شود: بر اساس حجم با درنظرگرفتن مقاومت بتن و بر اساس حجم در حالی که هم مقاومت و هم عمر مفید بتن درنظر گرفته می‌شود. دقیق نیست که یک واحد حجم را FU بنامیم زیرا به‌اندازه کافی ویژگی‌های عملکردی قابل مقایسه را نشان نمی‌دهد و باید به‌جای آن یک واحد اعلام شده نامیده شود (پانسار و همکاران، ۲۰۱۷).

ازنظر تفاوت مقاومت بین جایگزین‌های بتن موردبحث، برای بازیافت بتن سنگ‌دانه، حفظ همان چسب دهنده به‌جای سنگ‌دانه‌های تازه با سنگ‌دانه‌های درشت و یا ریز بازیافت شده از زباله‌های ساختمانی و تخریب، مقاومت مخلوط حاصل را کاهش می‌دهد (به ترتیب سنگ‌دانه درشت و سنگ‌دانه ریز). ازاین‌رو، همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده که تأثیر محیطی مخلوط با سنگ‌دانه‌های بازیافتی بزرگتر از سیمان پرتلند معمولی می‌باشد نه کمتر.

---

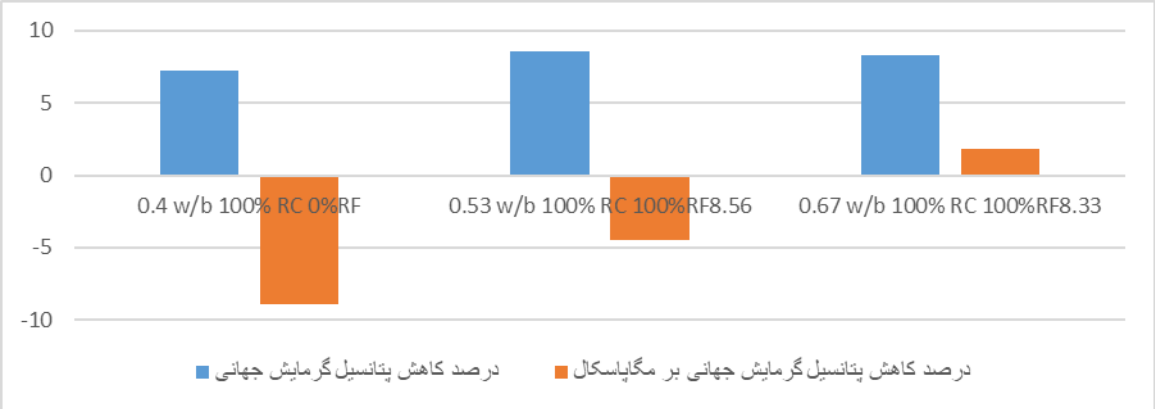
۱ - P. Van den Heede & De Belie

۲ - De Schepper

۳ - Ding

۴ - Functional unit

ISSN ۷۷۸۶-۲۹۸۰



شکل ۲: مقایسه بین تأثیر بتن بازیافتی سنگ‌دانه با استفاده از FU حجمی و یک FU نرمال شده به مقاومت

دومین منبع عدم قطعیت و عدم اطمینان در نتایج LCA پس از تعریف محدوده، فهرست چرخه عمر (LCI) است. این مرحله جمع‌آوری داده‌ها است که در آن عوامل ورودی و خروجی، ازجمله انرژی، مواد خام، محصول‌ها و پسماند، برای LCA بتن تجزیه‌وتحلیل می‌شوند. LCI برای یک مخلوط بتن عمدتاً شامل: (الف) فرآیندهای بالادستی: فرآیندهایی که در تولید هر یک از اجزاء تشکیل‌دهنده و انتقال آن به کارخانه تولید بتن نقش دارند. (ب) فرآیندهای اصلی که شامل انرژی و گازهای گلخانه‌ای مورد نیاز برای اختلاط بتن و حمل‌ونقل به محل است. (ج) فرآیندهای پایین‌دستی مورد نیاز برای تخریب یا هر سناریوی پایان عمر دیگری. از میان تمام داده‌های ورودی و خروجی از این فرآیندها، در درجه اول تعیین کمیت انتشار و مصرف انرژی به‌جای مصرف نفت، زباله‌های تولیدشده و بقیه مهم است. پس از بررسی‌های لازم، نشان می‌دهد که داده‌های LCI به چهار دلیل زیر به عدم قطعیت در یک مطالعه LCA ملموس کمک می‌کند:

الف) منبع LCI هیچ استانداردی در مورد اینکه کجا و چگونه می‌توان داده‌های LCI را برای چرخه عمر بتن دریافت کرد، ندارد. آناند و آمور بیان کردند که داده‌های موجودی مشخص باید از منابع اولیه برای اهداف قابل اعتماد یا منابع ثانویه در صورت در دسترس نبودن منبع اولیه باشد. داده‌های اولیه می‌تواند نتایج آزمایشگاهی، گزارش‌های دولتی یا (EPD)[۱] صنعت ساختمان باشد که کاربر به آن‌ها دسترسی دارد. اسناد EPD استانداردهای برای ارتباط عملکرد زیست‌محیطی یک محصول هستند که توسط مقام‌های محلی تائید شده است (آناند و امور[۲]، ۲۰۱۷). از سوی دیگر، داده‌های ثانویه می‌توانند از پایگاه‌های داده‌های زیست‌محیطی معتبر، مانند پایگاه داده EcoInvent، GaBi و ELCD یا فقط با استفاده از داده‌های منتشر شده قبلی می‌باشند. با بررسی پژوهش‌های که درواقع شامل یک مطالعه LCA بودند، مشخص شد که بیش از نیمی از آن‌ها، همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود؛ استفاده از منابع ثانویه را برای داده‌های موجودی انتخاب کرده‌اند که نمی‌تواند به‌اندازه کافی قابل اعتماد برای توصیف سناریوهای خاص در حال مدل‌سازی در LCA بتن باشد. اگرچه پایگاه داده EcoInvent (یک مرکز صلاحیت که توسط مؤسسه‌های فدرال سوئیس توسعه یافته است) و GaBi (که توسط نرم افزار Thinkstep Inc ایجاد شده است) هرساله به‌روز می‌شوند تا هرگونه تغییر در داده‌های موجودی را منعکس کنند. تأثیر زیست‌محیطی بتن زمانی که مدل‌سازی شده با استفاده از پایگاه داده Ecoinvent و EPD تا ۲۰ درصد متغیر است (هافلیگر[۳] و همکاران، ۲۰۱۷).

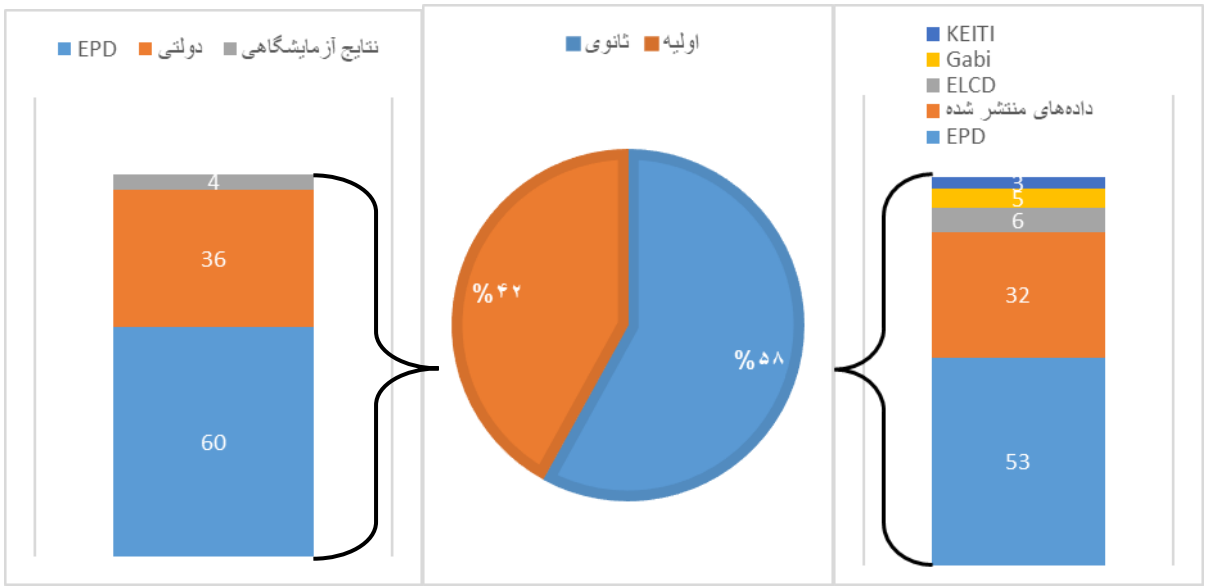
۱-Environmental Product Declarations

۲- Anand & Amor

۳- Häfliger

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۷۷۸۶-۲۹۸۰



شکل ۳: داده‌های منابع اولیه در مقابل منابع ثانویه برای مطالعه‌های LCA مورد بررسی قرار گرفته.

ج) طبق دستورالعمل اتحادیه اروپا در سال ۲۰۰۸، پسماند زمانی می‌تواند به‌عنوان یک محصول جانبی درنظر گرفته شود که استفاده بعدی آن قطعی باشد، به‌عنوان بخشی جدایی ناپذیر از یک فرآیند تولید، تولید شود که می‌توان از آن بدون هیچ‌گونه فرآوری دیگری غیر از روش معمول صنعتی استفاده کرد و استفاده بیشتر از آن قانونی است. هر چهار امتیاز برای خاکستر بادی، سرباره دانه‌بندی شده و دود سیلیس اعمال می‌شود. ازاین‌رو، آن‌ها باید به‌عنوان محصول‌های جانبی درنظر گرفته شوند، نه زباله. این بدان معناست که آن‌ها باید درصدی از بار زیست‌محیطی فرآیندهای تولید اولیه خود را که به ترتیب عبارتند از احتراق زغال‌سنگ، تولید فولاد و تولید شیشه به آن‌ها اختصاص داده شود. اولین سناریوی تخصیص تأثیر «تخصیص جرم» است که در آن درصد تخصیص بر اساس جرم نسبی بین مواد زائد به‌عنوان محصول جانبی و جرم کل (جرم مؤثر برق + جرم FA) است که در فرمول (۱) نشان داده شده است. سناریوی دوم "تخصیص اقتصادی" است که در آن درصد تخصیص‌یافته بر اساس ارزش نسبی بازار بین محصول نهایی FA و برق است که مطابق با فرمول (۲) می‌باشد (چن[۱] و همکاران، ۲۰۱۰).

$$\text{تخصیص جرم} = \frac{\text{محصول جانبی (متر)}}{\text{محصول اصلی (متر)} + \text{محصول جانی (متر)}} \qquad (۱)$$

$$\text{تخصیص اقتصادی} = \frac{\text{محصول جانبی (تومان)}}{\text{محصول اصلی (تومان)} + \text{محصول جانی (تومان)}} \qquad (۲)$$

ازاین‌رو، به‌عنوان یک الزام قابلیت اطمینان برای مطالعه‌های LCA، ازجمله مکمل‌های سیمانی، برای گنجاندن سناریوی تخصیص تأثیر دیده می‌شود. به گفته مارینکوویچ و همکاران، در صورتی که تفاوت قیمت فرآیند اصلی و فرعی تولید مواد سیمانی تکمیلی بیش از ۲۵ درصد باشد، باید تخصیص اقتصادی اعمال شود (مارینکوویچ[۲] و همکاران، ۲۰۱۳). با این حال، این واقعیت که نوسان در قیمت‌های بازار مواد اولیه باید بخشی از ارزیابی آثار زیست‌محیطی بتن از طریق تخصیص اقتصادی باشد،

۱ - Chen

۲ - Marinković

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۷۷۸۶-۲۹۸۰

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، فضایی برای اختلاف بیشتر در نتایج ایجاد می‌کند. نتایج LCA بتن محدود به چارچوب زمانی است که قیمت مواد خام هنوز بدون تغییر باقی می‌ماند.

جدول ۳:قیمت بازار اجزای مختلف بتن در پژوهش‌ها.

مرجع	کشور	سال	خاکستر بادی (تن)	سرباره کوره (تن)	دود سیلیس (تن)	برق (کیلووات/ساعت)
آناستاسیوس[۱] و همکاران(۲۰۱۵)	یونان	۲۰۱۵		۳.۵۰		
چن و همکاران(۲۰۱۰)	فرانسه	۲۰۱۹	۳۵	۲۳		۰.۱۲
چن و همکاران(۲۰۱۰)	فرانسه	۲۰۱۰	۲۰	۴۰		۰.۱
کراسین[۲](۲۰۱۲)	استرالیا	۲۰۱۲		۱۰۰		
گورسل[۳](۲۰۱۵)	آمریکا	۲۰۱۵			۸۹۰	
جی هابرت[۴] و همکاران(۲۰۱۵)	سوئیس	۲۰۱۱	۲۵	۴۵		۰.۱۲
جیانگ[۵] و همکاران(۲۰۱۴)	آمریکا	۲۰۱۴		۷۴		
خدابخشیان و همکاران(۲۰۱۸)	ایران	۲۰۱۸			۵۰۰	
لی[۶] و همکاران(۲۰۱۰)	چین	۲۰۱۵		۲۰		
مارینکوویچ و همکاران(۲۰۱۳)	صربستان	۲۰۱۷	۳.۵			۰.۰۵
پارک[۷] و همکاران(۲۰۱۲)	اسپانیا	۲۰۱۸	۳۸		۱۱۴۰	
پانسار و همکاران (۲۰۱۷)	کانادا	۲۰۱۹	۱۳۵			
پارک و همکاران(۲۰۱۲)	کره جنوبی	۲۰۱۲	۳۳	۴۱		
راحلا[۸] و همکاران(۲۰۱۹)	پرتغال	۲۰۱۹	۲۸	۳۷	۴۳۰	
پانسار و همکاران (۲۰۱۷)	کانادا	۲۰۱۷	۱۰۷			۰.۰۷
وانگ[۹] و همکاران(۲۰۱۷)	پرتغال	۲۰۱۵				۰.۲۲
جیانگ و همکاران(۲۰۱۴)	آمریکا	۲۰۱۷	۲۱			۰.۰۹
وانگ و همکاران(۲۰۱۷)	چین	۲۰۱۷	۱۰			۰.۱۱
وانگ و همکاران(۲۰۱۷)	چین	۲۰۱۷				۰.۱۱
گورسل (۲۰۱۵)	چین	۲۰۱۴	۹			
میانگین			۳۷.۸	۴۲.۶	۷۴۰.۰	۰.۱۱
انحراف معیار			۴۰.۳	۲۹.۰	۳۳۴.۸	۰.۰۵
میانگین درصد انحراف معیار			۱۰۴.۲	۶۸.۲	۴۵.۲	۴۳.۱

د) جدای از موضوع پایایی انتخاب LCI مناسب برای داده‌های موجود در هر یک از منابع LCI حاوی عدم قطعیت‌های بزرگ است. علاوه بر این، فرآیند بالادستی برای تولید سیمان پرتلند معمولی به ترکیب برق کشور مبدأ بستگی دارد. به‌عنوان مثال،

۱ - Anastasiou
۲ - Crossin
۳ - Gursel
۴ - G. Habert
۵ - Jiang
۶ -Li
۷ - Park
۸ - Rahla
۹ - Wang

ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۷۷۸۶-۲۹۸۰

در ایالات‌متحده حدود ۸ درصد از سیمان پرتلند معمولی مورداستفاده، وارداتی است و موجودی‌های بالادستی کلینکر وارداتی خاص کشور مبدأ و همچنین انرژی مصرف‌شده در حمل‌ونقل سیمان پرتلند معمولی به ایالات‌متحده، تأثیر ناشی از آن را نسبت به جایگزین‌های محلی افزایش می‌دهد (گورسل، ۲۰۱۵). به دلیل وابستگی بیشتر به سوخت‌های فسیلی در تولید برق، ترکیب برق در چین تقریباً دو برابر تأثیر زیست‌محیطی مالزی، ایران و تایلند می‌باشد. در همه موارد، اختلاف در تأثیر سیمان نسبت داده شده تأثیر زیادی بر تأثیر نهایی محیطی محاسبه‌شده از طریق LCA بتن، یک جایگزین مشخص دارد. مرحله سوم LCA، ارزیابی تأثیر مخلوط بتن با ضرب واحد عملکردی در تأثیر سنگ‌دانه‌های بتن از سه فاز حیاتی است. همان‌طور که در معادله‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌شود، انتشار و مصرف انرژی با جمع‌کردن تمام انتشارها و انرژی مصرفی محصول‌ها و فرآیندهای درگیر در مراحل تولید، استفاده و پایان عمر محاسبه می‌شود.

$$\text{مجموع انتشار برای مخلوط } (x) = FUx \times \sum_{N=1}^{3} \text{انتشار همه محصول‌ها و فرآیندهای مرحله } (n) \quad (۳)$$

$$\text{مجموع انتشار برای مخلوط } (x) = FUx \times \sum_{N=1}^{3} \text{استفاده از انرژی تمام محصول‌ها و فرآیندهای مرحله } (n) \quad (۴)$$

به‌منظور زمینه‌سازی اطلاعات در مورد مخلوط بتن، یک شاخص آثار زیست‌محیطی مورد نیاز است. یک روش ارزیابی تأثیر برای تولید شدت تأثیر بتن بر سه حوزه اصلی حفاظت از محیط زیست است: ۱) کیفیت اکوسیستم، ۲) سلامت انسان و ۳) منابع طبیعی. این کار از طریق سه مرحله انجام می‌شود: مشخص کردن تأثیر که باید انجام شود. سپس، نرمال‌سازی و توزین که هر دو اختیاری هستند. به گفته سیاق و همکاران، دو نوع شاخص اصلی وجود دارد: شاخص‌های نقطه میانی که تأثیر محاسبه‌شده را به یک تغییر خاص در محیط، مانند پتانسیل گرمایش جهانی مرتبط می‌کنند و شاخص‌های نقطه پایانی که همین افزایش را با آسیب‌هایی که بعداً در زنجیره علت و معلولی رخ می‌دهد، مانند سلامت انسان، مرتبط می‌کنند. اهمیت این تمایز در این است که مقایسه یکسان بین محصول‌ها یا فرآیندها می‌تواند به نمرات متفاوتی منجر شود (سیاق[۱] و همکاران، ۲۰۱۰). چهارمین و آخرین مرحله LCA زمانی است که کاربر نتیجه ارزیابی شده را از مرحله ۳ تجزیه‌وتحلیل می‌کند تا تأثیر زیست‌محیطی جایگزین مشخص موردمطالعه را بررسی کند. در این مرحله دو مشکل اصلی مشاهده می‌شود تا نتایج قطعی برای تأثیرات زیست‌محیطی بتن ارائه دهند. صرف‌نظر از شاخص انتخاب شده، حتی اگر کاربر از تمام خطاهای سیستماتیکی برای قابل اعتماد کردن مطالعه‌ها اجتناب کند. مشخص شده است که برخی از مهمترین عناصر یک LCA بتنی ذاتاً نامشخص هستند، مانند ۱) پیش‌بینی انتظارهای عمر مفید یک مخلوط بر اساس شرایط قرار گرفتن در معرض و نسبت اختلاط؛ ۲) عدم قطعیت در داده‌های بالادستی در مورد برخی مواد خام، بسته به منبع یا پایگاه داده مورد استفاده. ۳) مصرف انرژی پیش‌بینی‌شده در فعالیت‌های آینده‌نگر، مانند تخریب و یا نگهداری جایگزین بتن. ۴) پیش‌بینی مقدار کربنی که مخلوط بتن می‌تواند بسته به سطح و شرایط جوی جذب کند. ۵) عوامل مشخصه برای شاخص‌های نقطه میانی انتخاب شده. ازاین‌رو، نتایج یک LCA بتن باید به روش احتمالی ارتباط داده شود. به‌منظور کمی سازی این عدم قطعیت‌ها، تحلیل سناریو باید بر روی هر یک از عناصر منفرد انجام شود.

نتیجه گیری

برای توضیح پیشرفت‌های علمی مطالعه LCA بر روی بتن، پژوهش انجام شده برای توصیف سناریوی فعلی مورد بررسی قرار گرفت که منجر به نتایج زیر شد: نیاز زیادی به ترکیب زباله‌های بازیافتی در شروع چرخه عمر بتن، علاوه بر نیاز به تبدیل زباله‌های تولیدشده در پایان چرخه عمر آن به ورودی برای یک سیستم تولید دیگر یا حتی برای سیستم تولید بتن وجود دارد. نیاز به مطالعه‌های بیشتر LCA در مورد تصفیه و استفاده مجدد از زباله‌های ساختمانی برای جلوگیری از دفع آن‌ها در محیط

[۱] - Sayagh

ISSN ۷۷۸۶-۲۹۸۰

زیست و گنجاندن آن در چرخه زندگی بتن‌های جدید مشهود است. در حال حاضر، امکان طبقه‌بندی مطالعه‌های LCA بر روی بتن به ۳ مرز سیستم وجود دارد: گهواره به دروازه، گهواره تا گور و گهواره به گهواره. اگرچه متداول‌ترین مرز مورداستفاده، گهواره به دروازه است، تمایل به پیشروی به رویکرد گهواره به گهواره است. مطالعه‌ها نشان دهنده گرایشی به سمت ارزیابی استفاده از پسماند مانند سرباره کوره بلند، خاکستر بادی و سایر مواد افزودنی معدنی (با کلینکر کمتر و مواد افزودنی معدنی بیشتر) برای تولید بتن است که جایگزین بخشی از سیمان پرتلند می شود زیرا سیمان عامل اصلی تأثیرهای زیست‌محیطی ناشی از چرخه عمر بتن است.

در LCA استفاده از پسماند بازیافتی به‌عنوان سنگ‌دانه‌ها در تولید بتن، توجه قابل‌توجهی باید به انواع حمل‌ونقل مورداستفاده در فرآیند و فاصله از کارخانه پردازش پسماند مطمئن شود تا از مزایای قابل‌توجهی در بیشترین تعداد دسته‌بندی آثار زیست‌محیطی اطمینان حاصل شود. سه عاملی که باید هنگام مقایسه LCA بتن معمولی با بتن اکولوژیکی درنظر گرفته شود: انتخاب واحد عملکردی، داده‌های موجودی و روش LCIA است. در میان روش‌های LCIA، پایگاه‌های اطلاعاتی LCI و نرم‌افزار LCA توسعه‌یافته، برتری کشورهای اروپایی و ایالات‌متحده و آسیا مشهود است، بنابراین مطالعه‌های LCA تأیید می‌کند که این کشورها در خط مقدم توسعه هستند. روش LCA ابزاری عالی برای مقایسه سناریوها با مخلوط‌های مختلف بتن در جستجوی مقدار بهینه مواد افزودنی معدنی جایگزین است که به دنبال کمترین تأثیر زیست‌محیطی است. ابزار "GreenConcrete LCA" یک پیشرفت بزرگ در مطالعه‌های LCA در مورد بتن است، زیرا متفاوت از ابزارهای موجود برای مطالعه‌های LCA، خاص و سازگار با تولید بتن است. رویکرد جدید برای ارزیابی عملکرد فنی مواد افزودنی معدنی جایگزین مشهود است و نشان می‌دهد که علاوه بر تجزیه‌وتحلیل خواص مکانیکی ماده، تجزیه‌وتحلیل چرخه زندگی آن نیز مرتبط است و نشان می‌دهد که آیا استفاده از مواد افزودنی معدنی در مقیاس کامل چرخه زندگی بتن ازنظر زیست‌محیطی قابل‌دوام است یا خیر. برخی از موانعی پیش رو در کاربردهای بتن سبز در ساخت‌وساز که با آن‌ها روبرو هستیم عبارتند از: مشکل در رعایت استانداردهای نظارتی مانند حداقل سطوح بتن کلینکر و ترکیب شیمیایی سیمان‌ها، عدم وجود یا ناکافی بودن داده‌های ماندگاری تا ۲۰ سال یا بیشتر، تمایز بتن سبز برای انواع مختلف. کاربردها، تحقیق و توسعه بیشتر برای ترویج درک بهتر از شیمی بتن سبز. دستورالعمل‌ها و فناوری‌های مقرون‌به‌صرفه برای پردازش کارآمد و تولید بتن سبز در کنار داده‌های عملکرد برای توجیه و اطلاع‌رسانی تغییر در کدها و استانداردهای ساخت‌وساز مورد نیاز است. داده‌های میدانی در مورد کاربردهای بتن سبز محدود است. کاربردهای میدانی بتن سبز در اشکال ساختاری مختلف در کنار استانداردسازی برای تشویق به تولید داده‌های بلندمدت و هدایت کاربردهای آن‌ها مورد نیاز است. همچنین، داده‌های دوام بیشتری در مورد انقباض، خزش، سایش و غیره مورد نیاز است.

چالش‌های مورد بحث مانند توسعه استانداردها برای به دست آوردن پذیرش و استقرار گسترده، توسعه پایگاه داده که می‌تواند تولید و استقرار میدانی آن‌ها را هدایت کند. سایر موارد ذکر شده عبارتند از: درک بهبودیافته از مکانیسم واکنش بتن سبز، توصیف بهبودیافته ترکیب‌های مختلف بتن سبز پیچیده در فازهای مایع و جامد و آثار پارامترهای مختلف سودمندی مواد اولیه بر عملکرد بتن سبز. برای ایجاد آگاهی بیشتر در مورد مزایای بتن سبز، باید به متخصصان محیط‌های ساخته شده داده شود. این امر باعث گسترش شیوه‌های بتن سبز در صنایع ساختمانی می‌شود. به همین ترتیب، چالش‌هایی که در تصویب آن توسط شرکت‌های ساختمانی و مشاور با آن مواجه است، باید مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، فعال‌کننده‌های جدید و مقرون‌به‌صرفه مورد نیاز است. تشویق توسعه پایدار و استقرار بتن سبز در کاربردهای میدانی، تکنیک‌های مشخصه یابی ارزان و مقرون‌به‌صرفه نیز به‌ویژه برای کشورهای درحال توسعه مانند ایران که هزینه تحقیق و توسعه مقرون‌به‌صرفه نیست، مورد نیاز است. همچنین باید مشوق‌هایی به شرکت‌های ساختمانی، دانشگاه‌ها و مؤسسه‌های تحقیقاتی داده شود تا در توسعه و کاربرد بتن سبز در پروژه‌های زیربنایی خود پیشگام باشند.

ISSN ۷۷۸٦-۲۹۸۰

علاوه بر این، خوشه‌های تحقیقاتی برای بتن سبز باید ایجاد شود تا نوآوری مستمر محصول‌های بتن سبز و شیوه‌های ساخت‌وساز را تشویق کند. روش‌های تولید بومی باید برای تولید محصول‌های بتن سبز ارزان و کاهش وابستگی بیش‌ازحد به فناوری‌های وارداتی گران‌قیمت تشویق شوند. علاوه بر این، تلاش‌ها برای تشویق بتن سبز در ساخت‌وساز باید برای جلوگیری از تکرار تحقیق‌ها، کاربرد سریع بتن سبز و توسعه بهترین شیوه‌ها برای تثبیت آن در صنعت ساخت‌وساز بر اساس پایداری هماهنگ شود. پیش‌بینی می‌شود که بتن سبز با استفاده از پسماند ساختمانی بیشتر در فناوری ساخت‌وساز پیش‌ساخته کاربرد داشته باشد، زیرا نسبت به فناوری بتن ریخته شده در محل سنتی سازگارتر با محیط زیست است. با تحقیقاتی انجام شده متأسفانه دراین‌باره کارهای زیربنایی در کشور انجام نشده و تقریباً یک موضوع عادی هست که پسماند و نخاله‌های ساختمانی در محلی با نظارت شهرداری دفن می‌شوند و سرمایه‌های بسیاری که از آن با عنوان طلای سیاه یاد می‌شود به باد می‌رود. مهمتر از ارزش ریالی تلف‌شده این اتفاق، تخریب محیط زیست و آثار منفی آن است. معماران، طراحان داخلی و شرکت‌های ساختمانی می‌توانند با درنظر گرفتن مزایای بی‌شمار بتن پایدار با استفاده از پسماند ساختمانی، تصمیم‌های آگاهانه‌ای اتخاذ کنند که به صنعت ساخت‌وساز پایدارتر و مسئولیت‌پذیرتر کمک می‌کند. سه عاملی که باید در مطالعه‌های آتی بیشتر مورد توجه قرار گیرند عبارتند از: ۱. فقدان ارزیابی کلی‌نگر از آثار زیست‌محیطی، ۲. فقدان کاربردهایی که تغییرهای منطقه‌ای و تکنولوژیکی را درنظر می‌گیرند. ۳.بی‌توجهی به فازها.

منابع

۱. احمدی، رضا، و کریمی، ادیبه، تحلیل آماری میزان تولید، مصرف و تجارت جهانی صنعت سیمان ایران در مقایسه با کشورهای صاحب این صنعت در جهان، مجله‌ی بررسی‌های آمار رسمی ایران سال ۲۶، شماره‌ی ۱، ۱۲۸-۱۰۷، ۱۳۹۴.

۲. پاشائیان، معین، و خوش‌نوا، سید میثم، ارزیابی چرخه عمر اعمال‌شده به ساخت رایج بتن و آثار زیست‌محیطی آن، دومین کنفرانس ملی رویه‌های بتنی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۶.

۳. چرمسازی، محمدابراهیم، و منصوری، شعیب، و گوهری، مینا، مطالعه‌ای بر کاربردهای ایده‌ی بتن سبز با تأکید بر توسعه پایدار، بیستمین همایش روز بتن و چهاردهمین کنفرانس ملی بتن، تهران، ۱۴۰۱.

٤. فهیمیان، پگاه، و یزدانفر، فیضی، نگرشی نو به همراه معماری سبز، مجله ساختمان، شماره ۲۳ سازمان تحقیقات مسکن و شهرسازی، ایران، ۳۰-۲۷، ۱۳۸۹.

٥. Anand, C.K.; Amor, B., (۲۰۱۷). *Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. Renew*. Suatain. Energy Rev., ٦۷:٤۰۸–٤۱٦.

٦. Anastasiou, E.K.; Liapis, A.; Papayianni, I., (۲۰۱٥). *Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials*. Resour. Conserv. Recycl.

۷. Chen, C.; Habert, G.; Bouzidi, Y.; Jullien, (۲۰۱۰). A. *Ventura, A. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete. Resour*. Conserv. Recycl., ٥٤:۱۲۳۱–۱۲٤۰.

۸. Crossin, E., (۲۰۱۲). *Comparative Life Cycle Assessment of Concrete Blends; RMIT University: Melbourne*, Australia.

۹. De Schepper, M.; van den Heede, P.; van Driessche, I.; de Belie, N., (۲۰۱٤). *Life cycle assessment of completely recyclable concrete.* Materials. ۷:٦۰۱۰–٦۰۲۷.

۱۰. Ding, T.; Xiao, J.; Tam, V.W.Y. (۲۰۱٦)*A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China*. Waste Manag., ٥٦:۳٦۷–۳۷٥.

۱۱. G. Habert, Y. Bouzidi, C. Chen, A. Jullien, (۲۰۱۰). *Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete, Resour.* Conserv. Recycl. ٥٤:۳٦٤–۳۷٦.

۱۲. Gursel, A.P. (۲۰۱٤). *Life-Cycle Assessment of Concrete: Decision-Support Tool and Case Study Application. Int*. J. Life Cycle Assess., ۱۹.

۱۳. Häfliger, I.-F.; John, V.; Passer, A.; Lasvaux, S.; Hoxha, E.; Saade, M.R.M.; Habert, G. (۲۰۱۷). *Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials.* J. Clean. Prod., ۱٥٦:۸۰٥–۸۱٦.

۱٤. Jiang, M.; Chen, X., Rajabipour, F., Hendrickson, C.T., (۲۰۱٤). *Comparative Life Cycle Assessment of Conventional, Glass Powder, and Alkali-Activated Slag Concrete and Mortar*. J. Infrastruct. Syst. ۲۰.

ISSN ۷۷۸۶-۲۹۸۰

۱۵. Khodabakhshian, A.; de Brito, J.; Ghalehnovi, M.; Shamsabadi, E.A., (۲۰۱۸). *Mechanical environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder*. Constr. Build. Mater., ۱۶۹:۲۳۷–۲۵۱.

۱۶. Kim, T.; Chae, C.U., (۲۰۱۶). *Evaluation analysis of the CO2 emission and absorption life cycle for precast concrete in Korea*. Sustainability (Switzerland), ۸:۶۶۳.

۱۷. Li X., Zhu Y., and Zhang Z., (۲۰۱۰). *An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes Building and Environment*. ۴۵(۳).

۱۸. Marinković S.B., Malešev M., and Ignjatović I., (۲۰۱۳). *Life cycle assessment (LCA) of concrete made using recycled concrete or natural aggregates Eco-Efficient Construction and Building Materials* Elsevier (P.۲۳۹–۲۶۶).

۱۹. P. Van den Heede, N. De Belie, (۲۰۱۲). *Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: literature review and theoretical calculations, Cem*. Concr. Compos. ۳۴:۴۳۱–۴۴۲.

۲۰. Panesar, D.; Seto, K.; Churchill, C., (۲۰۱۷). *Impact of the selection of functional unit on the life cycle assessment of green concrete. Int.* J. Life Cycle Assess., ۲۲:۱۹۶۹–۱۹۸۶.

۲۱. Park, J.; Tae, S.; Kim, T., (۲۰۱۲). *Life cycle CO2 assessment of concrete by compressive strength on construction site in Korea.* Renew. Sustain. Energy Rev., ۱۶, ۲۹۴۰–۲۹۴۶.

۲۲. Rahla, K.M.; Mateus, R.; Bragança, L. (۲۰۱۹). *Comparative sustainability assessment of binary blended concretes using Supplementary Cementitious Materials (SCMs) and Ordinary Portland Cement (OPC*). J. Clean. Prod. ۲۲۰:۴۴۵–۴۵۹.

۲۳. Sayagh, S.; Ventura, A.; Hoang, T.; François, D.; Jullien, A. *Sensitivity of the LCA allocation procedure for BFS recycled into pavement structures.* Resour. Conserv. Recycl. ۲۰۱۰, ۵۴, ۳۴۸–۳۵۸.

۲۴. Tae, S.; Baek, C.; Shin, S., (۲۰۱۱). *Life cycle CO2 evaluation on reinforced concrete structures with high-strength concrete*. Environ. Impact Assess. Rev.

۲۵. Topcu, I. B., & Boga, A. R. (۲۰۱۰). Effect of boron waste on the properties of mortar and concrete. Waste Management & Research, ۲۸, (P.۶۲۶-۶۳۳).

۲۶. Vishwakarma, V., & Uthaman, S. (۲۰۲۰). *Environmental impact of sustainable green concrete*. In Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials (P.۲۴۱-۲۵۵).

۲۷. Wang, J.; Wang, Y.; Sun, Y.; Tingley, D.D.; Zhang, Y. (۲۰۱۷) *Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures*. Renew. Sustain. Energy Rev., ۸۰:۱۱۶۲–۱۱۷۴.

۲۸. Wu, P.; Xia, B.; Zhao, X., (۲۰۱۴). *The importance of use and end-of-life phases to the life cycle greenhouse gas (GHG) emissions of concrete—A review.* Renew. Suatain. Energy Rev., ۳۷:۳۶۰–۳۶۹.