

مروری بر مبانی و مفاهیم ارزیابی چرخه عمر ساختمان ها و روش های تحلیل آن

^۱ امیرحسین جانزاده^۱، ساسان مرادی^{۲*}، مریم ارمغان^۳

^۱ پژوهشگر دکتری، گروه معماری، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.
^۲ استادیار، گروه معماری، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران. نویسنده مسئول.
^۳ استادیار، گروه معماری، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۲ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

چکیده

ارزیابی چرخه عمر (LCA) ساختمان ها به عنوان ابزاری موثر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و اثرات زیست محیطی، اهمیت بسیاری در مقابله با بحران های آب و هوایی دارد. با وجود آگاهی رو به رشد نسبت به ارزیابی چرخه عمر ساختمان ها، اما دانش اجرایی در این حوزه همچنان محدود است، که این امر بهره گیری کامل از پتانسیل های این روش برای کربن زدایی در صنعت ساخت و ساز را دشوار کرده است. این پژوهش با بررسی روش ها و اصول ارزیابی چرخه عمر و تحلیل سوابق مرتبط، به شناسایی و ارائه راهکارهایی برای کاهش اثرات زیست محیطی و انتشارات مرتبط با ساختمان ها در چهارچوب ارزیابی چرخه عمر در بخش های مختلف می پردازد. تمرکز اصلی تحقیق بر کاهش انتشار دی اکسید کربن در مراحل تولید، ساخت و بهره برداری ساختمان ها است و این سوال مطرح می شود که چگونه استفاده از LCA می تواند به کاهش اثرات مخرب زیست محیطی در محیط ساخته شده کمک کند. در این پژوهش، روش تحقیق به صورت توصیفی-تحلیلی بوده و با ارائه اصول، چارچوب ها و دستورالعمل های بین المللی مرتبط، به تحلیل جامع اثرات زیست محیطی ساختمان ها در کل چرخه عمر آن ها می پردازد. نتایج این پژوهش نشان می دهد که ارزیابی توانان انرژی نهان و بهره برداری در تحلیل چرخه عمر ساختمان ها، می تواند رویکردی کارآمد و عملی برای ارزیابی میزان تاثیرات زیست محیطی ساختمان ها ارائه کند. در این راستا، استفاده از روش های تحلیل ترکیبی مبتنی بر ورودی-خروجی نیز به عنوان ابزاری مکمل، امکان دستیابی به ارزیابی جامع تر و دقیق تر اثرات زیست محیطی را فراهم می آورد. علاوه بر این، پژوهش به بررسی محدودیت ها و چالش های اجرایی LCA پرداخته و پیشنهادهایی برای بهبود کاربرد آن در صنعت ساختمان ارائه می دهد. این پیشنهادها شامل یکپارچه سازی LCA با ابزارهای مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، آموزش تخصصی برای متخصصان حوزه، و تدوین استانداردهای ملی هماهنگ با شرایط اقلیمی و محیطی است. این تحقیق بر اهمیت رویکردها و کاربردهای عملی LCA در کاهش اثرات زیست محیطی ساختمان ها و دستیابی به توسعه پایدار تأکید دارد.

واژگان کلیدی: ارزیابی چرخه عمر ساختمان ها، محیط زیست، دی اکسید کربن، ساختمان، انرژی نهان، انرژی بهره

برداري

* نویسنده مسئول: E-mail: SSn.arc.95@gmail.com

^۱ این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول با عنوان "تحلیل پویای پسته ساختمان های مسکونی میان مرتبه از منظر ارزیابی چرخه عمر ساختمان در شهر تهران با رویکرد انتشار کربن مصالح رایج و جاذب کربن در دو بخش ساخت و بهره برداری" می باشد که به راهنمایی نویسنده دوم و مشاوره نویسنده سوم در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین انجام شده است.

مقدمه

پرداختن به اثرات بالقوه تغییرات آب و هوایی در حال حاضر با توجه به با شواهدی که نشان می‌دهد این تأثیرات ممکن است تأثیر مهمی بر سیستم‌های طبیعی و انسانی داشته باشد یکی از مهم‌ترین مسائل در سطح جهان به شمار می‌رود (IPCC, 2007). انسان‌ها، مانند بسیاری دیگر از موجودات زمینی، به شدت در برابر تغییرات جزئی آب و هوا حساس هستند. بالا آمدن سطح آب دریاها ناشی از ذوب شدن یخ‌ها و گسترش آب دریا از طریق جذب دی اکسید کربن، این پتانسیل را دارد که هزاران نفر و زیستگاه را به ویژه در مناطق کم ارتفاع جهان از بین ببرد. افزایش خشکسالی، بارندگی و طوفان پتانسیل قابل توجهی برای جابجایی میلیون‌ها نفر و محدود کردن دسترسی به برخی از ضروریات بقای انسان مانند غذا و آب را دارد. به طور ویژه مشخص است که اتکای ما به سیستم‌های انرژی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی یکی از نیروهای محرک در روند پر سرعت افزایش گازهای گلخانه‌ای خاص در جو است که منجر به گرم شدن کره زمین و پیامدهای متعدد و گوناگون تغییر آب و هوا می‌شود. همچنین، نرخ فعلی مصرف بسیاری از منابع زمین و شیوه‌هایی که برای استخراج یا حذف آنها از زمین استفاده می‌کنیم به ندرت پایدار هستند. بسیاری از این منابع نمی‌توانند به طور طبیعی با همان سرعتی که مصرف می‌شوند دوباره پر شوند و روش‌های سنتی استخراج و حذف نیز به تخریب قابل توجه محیط زیست کمک می‌کنند. در این میان محیط ساخته شده به تنهایی مسئول بخش قابل توجهی از این تأثیرات است که نه تنها از بهره‌برداری یا استفاده از ساختمان‌ها و سایر زیرساخت‌ها بلکه از استخراج مواد خام تا دفع نهایی آنها ناشی می‌شود و می‌توان گفت که ساختمان‌ها اثر بسیار مهمی بر محیط زیست نیز دارد (Dodman, 2017). اثرات مستقیم به مصرف مواد، انرژی و زمین مورد استفاده برای ساخت و ساز ساختمان‌ها مربوط می‌شود. اثرات غیرمستقیم ساخت و ساز ساختمان نیز شامل انرژی مورد نیاز برای بهره‌برداری و نگهداری سازه‌ها در طول عمر آن، اثرات مکان ساختمان و توسعه مستمر چشم انداز شهری است. با توجه به اثرات ساخت و ساز ساختمان و توسعه شهری بر محیط زیست، به حداقل رساندن مصرف انرژی و تلاش برای ایجاد سازه‌های انرژی کارا بسیار مهم است. اثرات زیست محیطی و مصرف انرژی ساختمان‌ها بر اساس نوع و مقدار مواد استفاده شده متفاوت است (Alshamrani, 2021). مهمترین عواملی که تأثیر زیست محیطی مواد را تعیین می‌کند، روش تولید آنها و روش تحویل و جابجایی آنها است (Atkinson-Palombo, 2010). در این زمینه نیز از آنجایی که میزان تولید نخاله‌های ساختمانی و تخریب در ایران بسیار بیشتر از سایر کشورهای در حال توسعه است بنابراین اقدام موثر در زمینه ارتقا مصالح از منظر زیست محیطی امری لازم می‌باشد (هاشمی و حیدری، ۱۳۹۱). در این زمینه نیز از آنجایی که میزان تولید نخاله‌های ساختمانی و تخریب در ایران بسیار بیشتر از سایر کشورهای در حال توسعه است بنابراین اقدام موثر در زمینه ارتقا مصالح از منظر زیست محیطی امری لازم می‌باشد. به طور کل تخمین زده می‌شود که در بخش ساختمان مرحله ساخت (از گهواره تا دروازه^۱) چیزی حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد و مرحله بهره‌برداری رقمی معادل ۷۵ تا ۹۰ درصد انتشار کل کربن چرخه عمر را شامل می‌شود (Zhang, 2018, Roberts, 2020). به منظور کاهش بسیاری از مسائل زیست محیطی که انسان در حال حاضر با آن مواجه است، محیط ساخته شده باید در هر گونه تلاش برای بهبود محیط زیست، محور باشد. در این میان ساختمان‌ها و صنعت ساختمان نقش بسیار تعیین کننده‌ای را در ساز و کار تولید دی اکسید کربن و سوخت‌ها فسیلی ایفا می‌کنند (Crawford, 2011).

مصرف انرژی در ساختمان‌ها در دو بخش مهم طبقه بندی می‌شود که شامل انرژی (ساخت)^۲ و انرژی بهره‌برداری یا عملیاتی^۳ است. انرژی نهان انرژی است که در فرآیندهای مختلف مرتبط با مصالح از قبیل فرآیندهای تولید، نصب در محل، و تخریب و دفع نهایی استفاده می‌شود. انرژی بهره‌برداری اما شامل انرژی مصرف شده برای حفظ آسایش دمایی در محیط داخلی از طریق فرآیندهایی مانند گرمایش و سرمایش همراه با روشنایی و وسایل کاربردی است (Dixit et al, 2010 & Ding 2004). این مطالعه تلاش دارد تا در جهت آگاه سازی و ارتقا کیفیت ساخت ساختمان‌ها از منظر کاهش آسیب‌های زیست محیطی گام بردارد. در این راستا ضمن ارائه مبانی و تعاریف مهم در عرصه مرتبط با ارزیابی چرخه عمر ساختمان‌ها

این پژوهش به بررسی مراحل مختلف مرتبط با این موضوع، ادبیات موضوع در کنار روش های محاسبه و بهینه یابی آن می پردازد تا از این مجرا بتواند به هدف و سوال این پژوهش که مرتبط با چگونگی کاربرد ارزیابی چرخه عمر ساختمان ها در بحث کاهش و ارزیابی اثرات زیست محیطی در بخش محیط ساخته شده است بپردازد.

پیشینه پژوهش

در نظر گرفتن چشم انداز چرخه حیات ساختمان می تواند از تصمیم گیری در جهت پایداری محیط ساخته شده حمایت کند. هزینه یابی چرخه عمر و ارزیابی های چرخه عمر از منظر انتشار کربن، ابزارهای اصلی برای پرداختن به هزینه و تاثیرات زیست محیطی هستند (Kjær, et al, 2015). در سال های اخیر توجه روزافزونی به اثرات زیست محیطی محیط ساخته شده نسبت داده شده است. این توجهات هم در قالب تحقیقات دانشگاهی و هم در قالب ابتکارات صنعتی است. در بخش مطالعات آکادمیک، ژنگ و چایینی تاکید کردند که تعداد سالانه انتشارات متمرکز بر ساختمان ها و کربن انتشار یافته از آن ها از چهار مورد در سال ۲۰۰۵م به ۷۶ مورد در سال ۲۰۱۵م افزایش یافته است (Zeng & Chini, 2018). مقالات منتشر شده از سال ۲۰۰۵م تا ۲۰۱۵م را بررسی کردند و تاکید کردند که بیشتر مطالعات فقط انتشارات از گهواره به دروازه را در نظر گرفته اند. انتشار از گهواره به دروازه تمام انتشارات کربن تا مرحله آماده سازی در کارخانه برای مصرف در ساختمان را در نظر میگیرد (Wolf et al, 2016). تاکید بر تأثیرات اولیه ساختمان ها توسط (Pomponi & Moncaste, 2016)، بیشتر برجسته شده است. آن ها نشان دادند مراحل بهره برداری و پایانی عمر یک ساختمان اغلب از مطالعات چرخه حیات ساختمان در بخش کربن ساخت حذف می شوند. فنر و همکاران (Fenner et al, 2018)، روش های فعلی ارزیابی انتشار کربن یک ساختمان را بررسی و تاکید کردند که این روش های مختلف با یکدیگر سازگار نیستند، و مانع از مقایسه نتایج می شوند. نودو و آنومبا (Nwodo and Anumba, 2019)، مقالات متمرکز بر ارزیابی چرخه عمر ساختمان های مسکونی منتشر شده از سال ۱۹۹۰م تا آوریل ۲۰۱۹م را بررسی کردند. این بررسی چالش های کلیدی مانع استفاده از LCA از جمله تناقضات در طول عمر، عدم قطعیت و تعهدات زمانی را برجسته می کند.

به طور کل مطالعات محدودی وجود دارد که چرخه حیات را در زمینه ساختمانی و در زمینه مصالح مختلف آن از منظر انرژی کارایی و کاهش تولید گاهای گلخانه ای و مقایسه آن با مصالح معمول بررسی کرده باشد (Pacheco and Jalali, 2011). به عنوان مثال، الشمرانی و الشیبانی یک فرآیند تصمیم سازی را توسعه دادند که به هیئت مدیره مدارس در انتخاب سازه و مصالح ساختمان مدارس کمک می کند. این سیستم پشتیبانی شامل سیستم های مدولار و سنتی در مدرسه بر اساس ارزیابی چرخه حیات است. این سیستم بر اساس تجزیه و تحلیل ۱۴ نمونه مختلف، از جمله موارد رایج و پایدار، توسعه یافته است. این مطالعه نشان داد که بیشترین میزان انتشار در بخش رایج مربوط به سیستم های سازه های فولادی است، در حالی که کمترین انتشار مربوط به سیستم های بتنی پیش ساخته است. همچنین دریافت که انتشار را می توان با ساخت سیستم های پایدار در مقایسه با گزینه معمولی به نصف کاهش داد (Alshamrani and Alshibani, 2021).

کریستوفرو و همکاران (Christoforou et al., 2016) سناریوهای مختلف تولید آجرهای خشتی در قبرس را ارزیابی کردند و دریافتند که استفاده از خاک اره به جای کاه گندم و در نظر گرفتن فواصل حمل و نقل به طور قابل توجهی میزان انتشارات را تغییر می دهد. جو و همکاران یک LCA مقایسه ای از پنج آجر با ترکیب ضایعات مختلف صنعتی و کشاورزی در هند انجام داد و استدلال کرد که این آجرها بهتر از آجرهای رسی معمولی هستند. گوو و همکاران (Guo et al, 2018) اثرات مکانیکی و زیست محیطی سنگدانه های بتن بازیافتی را در بلوک های ساختمانی بتنی ارزیابی کردند. مطالعه آنها نشان می دهد که اثرات زیست محیطی بلوک های بتنی معمولی به دلیل فواصل حمل و نقل طولانی تر بسیار بیشتر است. بن آلون و همکاران (Ben-Alon et al., 2019) اثرات زیست محیطی کاهگل مورد استفاده در ایالات متحده را ارزیابی کرد و نشان داد که اثرات دیوار کاهگلی به شدت به ضخامت دیوار و منبع مواد بستگی دارد. در پژوهشی دیگر که توسط ردی و همکاران (Venkatarama

(Reddy. et al, 2014) انجام شد، آن ها نشان دادند که انرژی تجسم یافته یک ساختمان خاکی تثبیت شده با سیمان در هند تقریباً ۶۰ درصد کمتر از یک جایگزین آجر سفالی سوخته است. هم چنین اثرات زیست محیطی یک ساختمان بتنی و چوبی در استرالیا را مقایسه کرد که نشان داد بازیافت و استفاده از مواد منطقه ای بیشترین تأثیر را دارد. در پژوهشی دیگر بتن هوادهی اتوکلاو شده (AAC) و دیوارهای خارجی آجر پخته شده در معرض ارزیابی زیست محیطی، اقتصادی و حرارتی قرار گرفتند که نشان می دهد میزان تأثیرات زیست محیطی سیستم دیوار سنتی به دلیل محتوای سیمان کمتر آن ها کمتر است (Prateep Na Talang & Sirivithayapakorn, 2018). در رابطه با نماهای مبتنی بر سیمان و خاک، مطالعات کمی در مورد عملکردهای زیست محیطی نماهای کامپوزیت عایق (ICF) وجود دارد. در این میان، تنها ایلماز و همکاران (Yılmaz et al, 2019) یک LCA مقایسه ای را بر روی پانل های نمای کامپوزیتی گالوانیزه عایق شده پر شده از پشم سنگ و پلی اورتان در ترکیه انجام دادند. این مطالعه نتیجه گیری می کند که برای همان نیاز عملکردی، پانل های پر شده از پلی اورتان به دلیل استفاده کمتر از فولاد گالوانیزه سازگارتر با محیط زیست هستند.

پوترچ و همکاران (Potrč et al., 2016) تأثیر چرخه عمر سیستم های کامپوزیت عایق حرارتی خارجی (External Thermal Insulation Composite Systems, ETICS) را با پلی استایرن منبسط شده (EPS)، پشم معدنی و پرکننده عایق تخته فیبر چوبی تجزیه و تحلیل کردند. این مطالعه ثابت می کند که مواد عایق باعث اثرات زیست محیطی عمده می شوند که در میان آنها EPS کمترین سهم را دارد. سیرا پرز و همکاران (Sierra-Pérez et al, 2016) عملکرد زیست محیطی عایق های حرارتی در نمای تهویه شده و نمای عایق داخلی را برای مناطق مختلف آب و هوایی اسپانیا ارزیابی کرد و نشان داد که ETICS با پر کردن پشم شیشه کمترین تأثیر زیست محیطی را دارد. در پژوهشی دیگر یک فرآیند تصمیم گیری چند معیاره برای انتخاب سیستم نما بهینه بین پانل AAC، پانل کامپوزیت آلومینیوم، روکش سرامیکی، بلوک بتنی و آجر دو لایه در استرالیا توسعه داده شد (موسوی نادوشانی، اکبرنژاد، ۲۰۱۷). این مطالعه انرژی/کربن مواد را به عنوان مهم ترین عامل شناسایی کرد و پانل AAC بدترین عملکرد را داشت. اشمیت و همکاران (Schmidt et al, 2004) عملکرد زیست محیطی پشم سنگ، پشم کاغذ و کتان را ارزیابی کرد و به این نتیجه رسید که پشم کاغذ کمترین اثرات زیست محیطی را دارد در حالی که عایق کتان دارای بزرگترین تأثیرات است.

در پژوهشی دیگر رویکرد ارزیابی چرخه حیات برای ارزیابی اثرات زیست محیطی سیستم های مدولار جهت سقف های مختلف ساختمان های صنعتی با دهانه بزرگ مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله سیستم سقف فولادی، بتن شبکه ای پیش ساخته، سیستم سقف چوبی و سیستم سقف مرکب. خروجی این مطالعه نشان داد که سیستم های سقف چوبی کمترین تأثیر زیست محیطی و کمترین مصرف انرژی را نسبت به سایر سیستم ها دارند (Alshamrani, 2021). در رابطه با توسعه مدل های مختلف ارزیابی چرخه عمر، مدل پیش بینی ANN که توسط حمیدا و همکاران (۲۰۲۰)، توسعه یافته است، برای اندازه گیری انواع پوشش های ساختمانی بر پارامترهای محیط زیستی می باشد. این پارامترها شامل میزان مصرف انرژی، کربن ساخت در پوشش ساختمان، کربن بهره برداری و کربن کل است. مدل ANN مفاهیم عملی را برای دفاتر معماری/مهندسی با ارائه یک ابزار حمایتی برای پیش بینی تأثیرات زیست محیطی ساختمان ها در مراحل اولیه طراحی ممکن می سازد (Hamida et al, 2020).

هم چنین طبق مطالعه ای که توسط شولتر و دسلینگ انجام شد، الزام طراحان ساختمان به اولویت بندی پارامترهای سازگار با محیط زیست منجر به ایده های طراحی قوی تر شد که هم نیازهای مشتریان را برآورده می کند و هم منجر به معماری پایدار می شود (Schlueter and Thesseling, 2009). پوشکار و همکاران نیز از LCA برای دسته بندی متغیرهای طراحی در چهار خوشه مختلف استفاده کردند و سپس محدودیت های اثرات زیست محیطی هر متغیر را به منظور تعیین تأثیر کلی در طول عمر یک ساختمان نشان دادند (Pushkar et al, 2005). در مطالعه آنها، اثرات زیست محیطی مصالح ساختمانی رایج اندازه گیری شد و تجزیه و تحلیل حساسیت با استفاده از پایانه های سوخت و روش های تولید متفاوت به منظور نشان دادن

چگونگی تأثیر کمیت مواد بر اثرات زیست محیطی در طول زمان انجام شد. علاوه بر این، بریبیان و همکاران. همچنین LCA را برای طرح‌های ساختمانی اولیه، تجزیه و تحلیل اندازه اجزای ساختمانی و انواع مصالح، به منظور ارائه دستورالعمل‌های انتخاب مصالح بر اساس به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی به کار بردند (Bribian et al., 2011). مطالعه دیگری که توسط ژانگ و وانگ (Zhang & Han et al, 2016) انجام شد از LCA برای بررسی انتشار کربن مرتبط با ساخت، نگهداری و بهره برداری از ساختمان‌ها در طول عمر آن استفاده کرد. خروجی‌ها نشان می‌دهند که زنجیره تامین گازهای گلخانه‌ای و انرژی نقش عمده‌ای در انتشارات کلی چرخه حیات بخش ساختمان دارند. با وجود آن، مرحله بهره برداری نشان دهنده بیشترین مصرف انرژی و تأثیر زیست محیطی در طول عمر ساختمان‌ها است و در مرحله بعدی ساخت و ساز ممکن است تأثیر قابل توجهی داشته باشد. گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی در مرحله ساخت و ساز بالاترین بخش (بیش از ۶۰٪) از چرخه عمر بخش ساختمان را به دلیل تعداد زیاد پروژه‌های ساختمانی سالانه تشکیل می‌دهد. آریگونی و همکاران (Arrigoni et al, 2017) تأثیر زیست محیطی بلوک‌های کنفی (بلوک‌های ساخته شده از خرده‌های چوبی با ترکیب چسب بر پایه آهک و آب) را در ایتالیا ارزیابی کرد و نشان داد که بلوک‌های کنفکری^۴ به دلیل جذب دی اکسید کربن در طول رشد کنف و کریاته شدن، تأثیر محیطی مطلوبی دارند. هم چنین در رابطه با بهره‌گیری از ارزیابی چرخه عمر در مراحل مختلف پروژه نیز تحقیقاتی انجام شده که اکثراً بر این نکته تأکید دارند که استفاده از چرخه عمر در مراحل اولیه طراحی بسیار کارا تر است. استفاده از ارزیابی چرخه عمر برای تعیین ویژگی‌های طراحی ساختمان از منظر پایداری و مصرف انرژی، قبل از ساخت ساختمان‌ها، به طور موثرتری اثرات زیست محیطی کلی را کاهش می‌دهد (Brophy, V., & Lewis, 2012).

در پژوهشی دیگر، ارزیابی چرخه عمر (LCA) به طور مشابه برای تقریب اثرات زیست محیطی ساختمان‌ها در طول دوره‌های طراحی اولیه استفاده شده است. به عنوان مثال، در یک ساختمان مبتنی بر BIM، روش ارزیابی میزان انتشار دی اکسید کربن توسط جان و همکاران برای تجزیه و تحلیل کاهش انتشار CO₂ و مصرف انرژی به صورت کمی و هدفمند پیشنهاد شده است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از روش ارزیابی انتشار CO₂ مبتنی بر BIM، می‌تواند تا ۲۰٪ نسبت به روش ارزیابی معمول از انتشار CO₂ بکاهد (Jun et al., 2015). در این میان، هزینه یابی چرخه عمر (LCC) به عنوان تکنیکی تعریف می‌شود که برای اندازه‌گیری هزینه‌های اقتصادی مرتبط با ساخت یک ساختمان و هزینه بهره برداری و نگهداری آن در طول زمان به کار می‌رود. این پارامتر به عنوان یک راهنما جهت انتخاب فرآیندهای مناسب ساخت و ساز با طبقه بندی طرح‌های ساختمان بر اساس مقرون به صرفه بودن در طول عمر آن استفاده می‌شود (Sherif and Kolarik, 1981). از بررسی ادبیات بالا می‌توان دریافت که ارزیابی چرخه عمر ساختمان‌ها با گذشت عمر محدودی از پیاده سازی آن توانسته توجهات بسیاری را در زمینه‌های پژوهشی به خود جلب کند در حالی که در بخش اجرایی هم چنان نیاز به توجه و اقدامات بسیار بیشتری دارد. همچنین بررسی ادبیات منتشر شده نشان می‌دهد که تحقیقات کمی در این زمینه در ایران، به ویژه از نظر ارزیابی اثرات زیست محیطی ساختمان‌هایی با سیستم‌های ساخت و ساز رایج، انجام شده است. برخی از مطالعات موجود در این زمینه بر مبنای مطالعات تک مصالح یا رویکرد مقایسه‌ای بوده است (یوسفی و قلی پور، ۲۰۱۸).

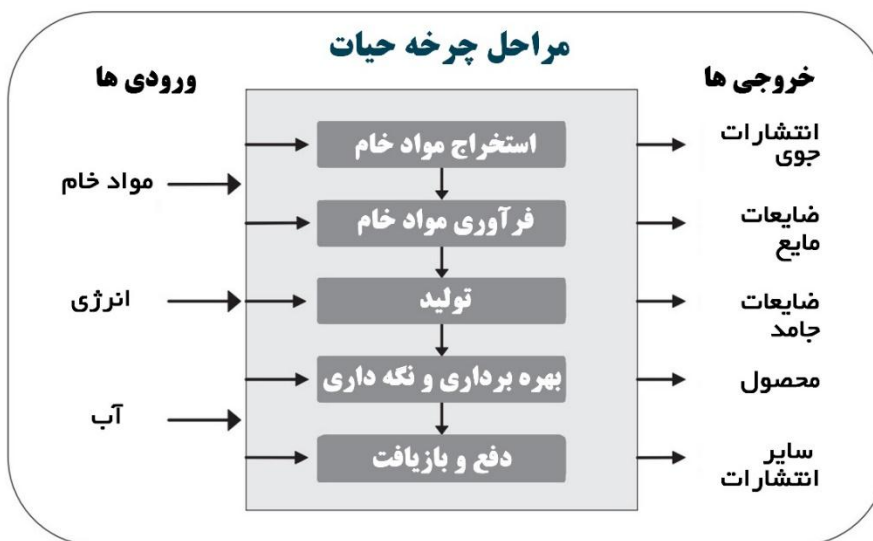
روش تحقیق

روش پژوهش در این مطالعه بر اساس یک رویکرد توصیفی-تحلیلی طراحی شده است که با روش مطالعه اسنادی به عنوان روش گردآوری داده‌ها جهت دستیابی به اهداف این پژوهش ترکیب شده است. در این روش، ابتدا منابع علمی و اسناد معتبر مرتبط با ارزیابی چرخه عمر ساختمان‌ها از منظر اثرات زیست محیطی شناسایی و بررسی شده‌اند. این منابع شامل مقالات علمی، کتاب‌ها، استانداردهای بین‌المللی و گزارش‌های مرتبط با اصول و چارچوب‌های ارزیابی چرخه عمر هستند. هدف اصلی این مرحله، ایجاد یک پایه علمی محکم برای تحلیل داده‌ها و تدوین راهکارهای پیشنهادی بوده است. در گام بعدی، داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری‌شده به صورت دقیق و نظام‌مند تحلیل شدند. این تحلیل شامل بررسی چارچوب‌ها و

دستورالعمل‌های موجود در استانداردهای بین‌المللی مرتبط با ارزیابی چرخه عمر ساختمان‌ها است. همچنین، تلاش شده تا جنبه‌های مختلف اثرات زیست‌محیطی، از جمله مصرف منابع و انتشار گازهای گلخانه‌ای، در تمامی مراحل چرخه عمر ساختمان مورد ارزیابی قرار گیرد. این تحلیل‌ها به کمک معیارهای کمی و کیفی صورت گرفته است تا نتایج حاصل، قابل اتکا و کاربردی باشند. در نهایت، یافته‌های این پژوهش به گونه‌ای تنظیم و ارائه شده‌اند که به صورت واضح و قابل درک برای مخاطبان علمی و حرفه‌ای قابل استفاده باشند.

■ ارزیابی چرخه عمر

ارزیابی چرخه عمر ابزاری است که برای تعیین و ارزیابی بارگذاری‌های محیطی و اثرات یک محصول یا فرآیند خاص، از جمله اثرات مرتبط با فرآیندهای بالادستی در زنجیره تامین استفاده می‌شود (Curran, 1993). از این ابزار برای تجزیه و تحلیل این بارگیری‌ها در کل چرخه عمر محصول یا فرآیند مورد مطالعه، از استخراج مواد خام از زمین تا دفع نهایی یا بازیافت محصول در پایان عمر مفید آن، استفاده می‌شود. اثرات زیست‌محیطی در طول چرخه عمر هر محصول یا فرآیند را می‌توان به ورودی‌ها و خروجی‌های مربوط به سیستم محصول مرتبط کرد. این ورودی‌ها و خروجی‌ها شامل مواد خام استخراج شده از زمین، مصرف انرژی و آب، انتشار در هوا، زمین و آب، زباله‌های جامد، محصولات مشترک و سایر نسخه‌ها می‌باشد (تصویر ۱). رویکرد چرخه عمر برای اقتصاد ساختمان اغلب توسط حامیان توسعه پایدار حمایت می‌شود، زیرا معمولاً هزینه سرمایه بالاتر این نوع توسعه را فقط می‌توان با صرفه جویی در هزینه‌های عملیاتی و مزایای مداوم توجیه کرد. بنابراین تنها از طریق رویکرد هزینه‌یابی چرخه عمر (Life Cycle Costing) می‌توان این منافع و پس‌اندازهای بالقوه را شناسایی کرد.



تصویر ۱: مراحل چرخه عمر یک محصول (Curran, 1993)

■ ارزیابی چرخه عمر ساختمان‌ها

بخش ساختمان می‌تواند از طریق به کارگیری ارزیابی‌های چرخه عمر (Life Cycle Assessment: LCA)، برای کاهش اثرات زیست‌محیطی بهینه شود. ارزیابی چرخه حیات (LCA) ابزاری برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی بالقوه از مرحله استخراج و تولید مواد، ساخت و ساز، فاز بهره‌برداری تا تصفیه زباله و پایان عمر محصول است (Curran, 2013). ارزیابی چرخه حیات ساختمان (Building LCA) یک روش تحلیل علمی است که برای تعیین میزان اثرات زیست‌محیطی یک ساختمان در طول عمر آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش به منظور اندازه‌گیری و کاهش "کربن ساخت"^۵، کربن

دوره بهره برداری⁶ و "کربن کل"⁷ در نظر گرفته می شود. هم چنین این روش اغلب جهت دستیابی به انواع گواهینامه های مرتبط با ساختمان سبز نظیر LEED و BREEAM می باشد. هم چنین تحلیل اقتصادی چرخه حیات ساختمان (Life-Cycle Cost) نیز به همراه شبیه سازی مصرف انرژی به منظور توجیه ارتقای بهره وری انرژی استفاده می شود. این به آن دلیل است که امروزه بسیاری از تکنولوژی هایی که سبب کاهش مصرف انرژی می شوند در ابتدا هزینه های بسیاری را به همراه دارند، و یا ممکن است هزینه بالایی جهت نگهداری آنها نسبت به راه حل های مرسوم نیاز باشد. از این رو به منظور توجیه انتخاب این فناوری های صرفه جویی در انرژی، ترکیب هزینه های اولیه و آتی در فرآیند تصمیم گیری ضروری است. به گفته ویلچس و همکاران (Vilches et al, 2017)، برای دستیابی به هدف کاهش انتشار دی اکسید کربن، یک رویکرد چرخه عمر برای جزئیات ردپای⁸ کربن در ساختمان ها و استراتژی کاهش کربن امکان پذیر مورد نیاز است.

به طور کل می توان گفت ارزیابی چرخه عمر (LCA) یکی از بهترین ابزارها برای ارزیابی اثرات زیست محیطی در تمام مراحل ساختمان است (Schlanbusch et al, 2016). مزایای استفاده از LCA که به پایداری در بخش ساختمان کمک می کند عبارت است از زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی. مزایای زیست محیطی با مقایسه محصولات جایگزین و ارائه اطلاعات در مورد اثرات زیست محیطی به ذینفعان کمک می کند تا تصمیمات آگاهانه بگیرند. مزایای اجتماعی می تواند مقررات دولتی را هدایت کند و شامل تصمیم گیری های مناسب شود. منافع اقتصادی مبتنی بر ارتقای محصولات برای بازار سبز، هزینه کمتر برای ساخت و سازها و کاهش هزینه ها به دلیل کاهش اثرات منفی زیست محیطی است. علاوه بر این، روش LCA توسط استاندارد ISO دنبال می شود و از دیدگاه بلندمدت استفاده می کند (Saunders, 2013).

■ ارزیابی چرخه عمر ساختمان در طول طراحی ساختمان

ارزیابی چرخه عمر (LCA) به عنوان ابزاری کارآمد برای اندازه گیری پروفایل های زیست محیطی و انرژی ساختمان ها با محاسبه پایداری انرژی و مواد در طول عمر یک ماده در رابطه با محیط آن در نظر گرفته می شود (Asif et al., 2007). ارزیابی چرخه عمر (LCA) یک روش تثبیت شده برای ارزیابی طیف وسیعی از اثرات زیست محیطی در تمامی مراحل تولید، استفاده و دفع نهایی محصولات است (BS EN ISO 14040, McManus, M. C., & Taylor, 2015). رویکرد مرتبط با تجزیه و تحلیل "کربن کل عمر" بر اساس روش تحلیل چرخه عمر (LCA) است اما بر یک موضوع واحد در زمینه پتانسیل گرمایش جهانی تمرکز دارد که اغلب "ردپای کربن" نامیده می شود. کاربرد LCA در محیط ساخته شده در ۱۵ سال گذشته پس از انتشار ISO 14040 و اخیراً EN 15978 که متدولوژی LCA را برای ساختمان ها توصیف می کند، جذابیت قابل توجهی پیدا کرده است (Anand & Amor, 2017). با این حال، همانطور که از مطالعات میکس و همکاران (Meex et al, 2018) و هم چنین ساندرز و همکاران (Saunders et al, 2013)، مشهود است، LCA همچنان با موانعی جهت کاربرد گسترده خود در صنعت ساختمان مواجه است که تا حدی به این دلیل است که ارزیابی چرخه عمر با استفاده از روش های معمول می تواند زمان بر باشد و به مقادیر گسترده ای از اطلاعات نیاز داشته باشد (Jusselme et al, 2020).

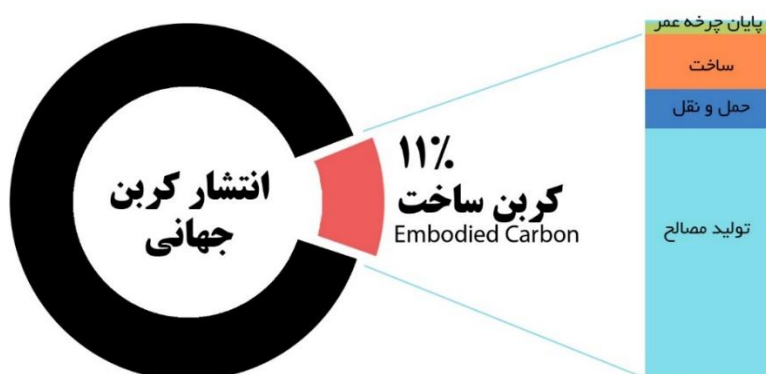
به این معنی که این گونه از ارزیابی به طور کلی پس از نهایی شدن طراحی انجام می شود (Hakkinen et al, 2015)، که معمولاً برای کمک به طراحان مجرب در انتخاب راه حل های طراحی با کمترین تأثیر زیست محیطی استفاده نمی شود. به طور کل مطالعات نشان می دهند که رویکرد واکنشی به ارزیابی زیست محیطی در صنعت رایج ترین است، یعنی ارزیابی پس از تکمیل راه حل طراحی انجام می شود، بنابراین ارزیابی به طرح واکنش نشان می دهد یا به آن پاسخ می دهد. به عبارت دیگر پیاده سازی LCA در مراحل اولیه طراحی ساختمان، بیشترین پتانسیل را برای هدایت طراحی به سمت راه حل های مبتنی بر محیط زیست دارد (UKGBC, 2017 & BSI, 2016). با این حال، مراحل طراحی اولیه که دارای درجه بالایی از عدم قطعیت همراه با فقدان مشخصات دقیق هستند، مانع می شود (Jusselme et al, 2020 & Hakkinen et al, 2015).

■ اهمیت و انواع تأثیرات زیست محیطی در چرخه عمر ساختمان

ساختمان‌ها به دلیل طراحی‌های خاص، مجموعه‌ای از مصالح، استفاده طولانی‌مدت، چرخه‌های تعمیر و نگهداری مکرر و تعداد زیادی از ذینفعان، سیستم‌های پیچیده‌ای هستند. ساختمان‌هایی که از هم‌اکنون تا سال ۲۰۵۰م ساخته می‌شوند، اثرات زیست‌محیطی مداومی پس از سال ۲۰۵۰م خواهند داشت (RICS, 2017 & ISO 15686, 2011). اثرات زیست محیطی ساختمان‌ها (و زیرساخت‌ها) اغلب به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

۱- **اثرات بهره‌برداری** – انتشارات ناشی از مصرف انرژی در زمان بهره‌برداری ساختمان (RICS, 2017). این بخش که با عنوان "کربن بهره‌برداری" یا همان "Operational Carbon" شناخته می‌شود به انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از استفاده از ساختمان در دوران بهره‌برداری اشاره دارد: به عنوان مثال، انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از مصرف انرژی به منظور گرم کردن، خنک کردن و نگهداری از ساختمان به عنوان کربن بهره‌برداری یا کربن عملیاتی شناخته می‌شود. (B1-B5 در شکل ۴).

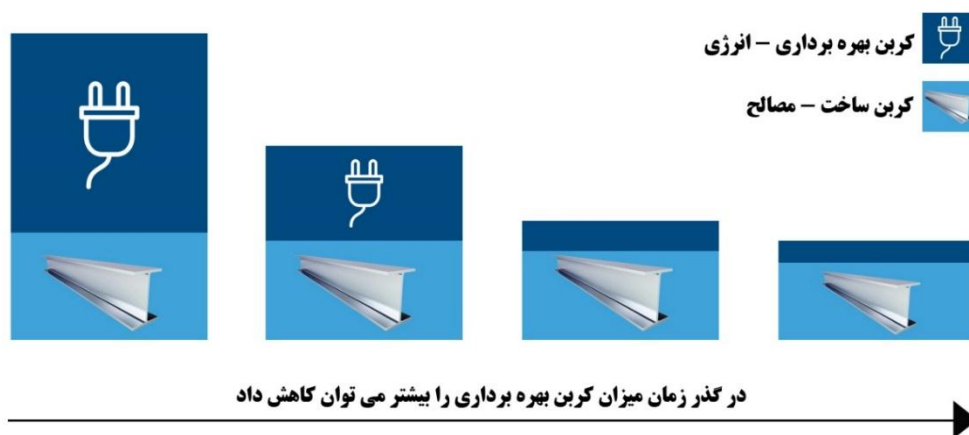
۲. **تأثیرات تجسم یافته (نهان)** – انتشارات ناشی از "همه چیز دیگر به جز بخش یک"، مانند ساخت مواد، حمل و نقل به محل، ساخت و ساز در محل، بازسازی و فرآیندهای دفع (RICS, 2017)، که با عنوان "کربن ساخت" یا "کربن نهان" یا همان "Embodied carbon" شناخته می‌شود و به کربن منتشر شده که ناشی از استخراج، ساخت، حمل و نقل، نصب، نگهداری و دفع مصالح است، اطلاق می‌شود. این بخش تقریباً ۱۱ درصد از انتشار کل کربن جهان را به خود اختصاص داده است. (تصویر ۲).



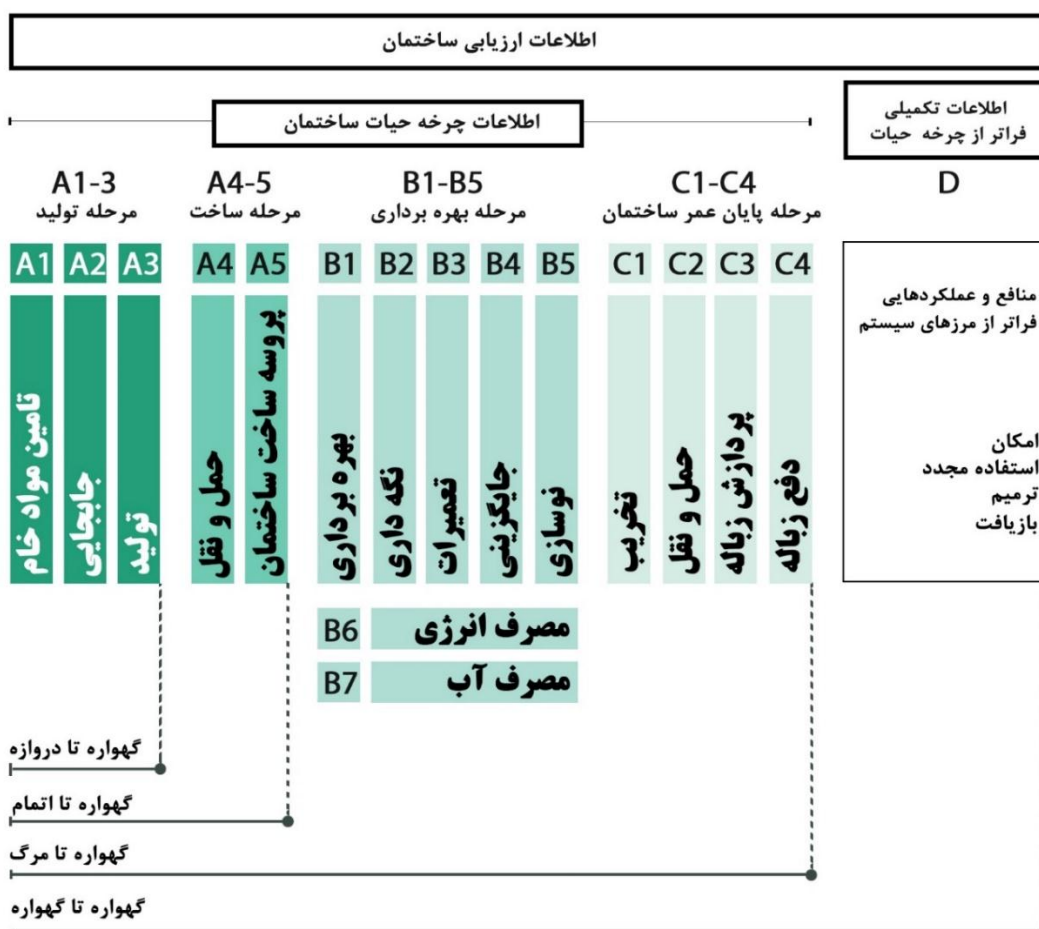
تصویر ۲. سهم کربن ساخت (نهان) از کل انتشار کربن جهانی (One Click LCA, 2021)

با این حال اغلب تلاش‌ها برای کاهش کربن در بخش ساخت و ساز مدت‌هاست که بر کربن بهره‌برداری متمرکز شده است زیرا امکان کربن زدایی در این بخش سریع‌تر است (تصویر ۳)، اما در عین حال کربن ساخت نیز به عنوان یک محرک اصلی موثر بر تغییرات آب و هوایی شناخته می‌شود و به همین دلیل بسیاری از کشورها قوانین مشخصی را برای کنترل آن وضع کرده‌اند. در این رابطه می‌توان گفت که اثرات تجسم یافته (نهان) در مراحل مختلف در طول چرخه عمر یک ساختمان رخ می‌دهد. ته و همکاران (Teh et al, 2015) تأثیرات تجسم یافته را بر حسب تأثیرات تجسم یافته اولیه، تأثیرات تجسم یافته مکرر، و تأثیرات تجسم یافته تمام عمر، تعریف می‌کنند. همانطور که در تصویر ۴ نشان داده شده است، این اصطلاحات را می‌توان به ماژول‌های تعریف شده توسط EN 15978، که شامل تولید مواد (A1-A3)، شیوه‌های ساخت و ساز (A4-A5)، استفاده از ساختمان (B1-B7)، پایان عمر ساختمان (C1-C4) و هرگونه مزایا یا بارهایی که فراتر از چرخه عمر ساختمان رخ می‌دهد (D) هستند، ترسیم کرد (ISO, BS-EN 15978). تأثیرات تجسم یافته (کربن ساخت یا کربن نهان) ساختمان‌ها

عمدتاً تا همین اواخر نادیده گرفته می شد، زیرا این تصور وجود داشت که مرحله عملیاتی بیشتر تأثیرات کل عمر ساختمان را به خود اختصاص می دهد (Pomponi & Moncaster, 2016).



تصویر 3-: تغییرات کربن ساخت و کربن بهره برداری در طول زمان (One Click LCA, 2021)



تصویر 4: مراحل چرخه عمر ساختمان (One Click Lca, 2021)

اما ذکر این نکته ضروریست که تمرکز صرف بر کاهش اثرات بهره برداری ساختمان‌ها می‌تواند منجر به جابجایی بار انتشارات شود، بدین معنا که کاهش یک شکل از اثرات زیست‌محیطی منجر به اثرات بیشتر در جای دیگری در چرخه زندگی شود (Lavagna, et al, 2018). زیرا که به طور معمول ساختمان‌های کم‌انرژی که از فتوولتائیک، عایق‌های با کارایی بالا و سایر ابزار برای کاهش اثرات کربن بهره برداری استفاده می‌کنند، تأثیرات تجسمی (کربن ساخت) بیشتری دارند (Georges et al, 2015). در سناریوهای خاصی، دوره بازپرداخت کربن برای این فناوری‌ها از عمر مفید خود فناوری بیشتر می‌شود که منجر به افزایش کلی تأثیر زیست‌محیطی کل عمر ساختمان می‌شود (Valančius, 2018). برای جلوگیری از جابجایی بار در بخش انتشارات، یک رویکرد کل نگر جهت چرخه عمر مورد نیاز است که تأثیرات نهان و بهره برداری را توأمان را در نظر بگیرد. به علاوه و فراتر از جابجایی بار انتشارات، سهم تأثیرات چرخه عمر ساختمان که به تأثیرات تجسم یافته (کربن ساخت) نسبت داده می‌شود، نگرانی فزاینده‌ای را ایجاد کرده است. با کاهش انتشارات در بخش بهره‌وری ساختمان‌ها، به دلیل بهبود طراحی ساختمان، عملکرد و کربن زدایی شبکه، سهم تأثیرات تجسم یافته افزایش یافته و توجهات بیشتری را ایجاد کرده است (Azari & Abbas Abadi, 2018). چندین گزارش اخیر پیش‌بینی می‌کنند که تأثیرات تجسم یافته ساختمان‌های جدید از ۶۰ درصد تأثیرات کل عمر آنها فراتر خواهد رفت (Sturgis, 2019). از سوی دیگر توانایی کاهش اثرات اولیه و کل عمر، بدون متحمل شدن زمان یا هزینه‌های سنگین، با پیشرفت طرح کاهش می‌باید (Treasury, 2013). طراحان می‌توانند اثرات چرخه عمر را با انتخاب مواد با تأثیرات کم محیطی و بهینه‌سازی طراحی ساختمان‌ها کاهش دهند. بنابراین، پرداختن به انتشارات اولیه یا همان کربن ساخت از ابتدای فرآیند طراحی برای دستیابی به یک محیط ساخته شده خالص صفر حیاتی خواهد بود (Gieseckam, et al, 2018).

■ اثرات زیست محیطی

به عنوان یک روش علمی جهت ارزیابی و برآورد میزان تأثیر یک ساختمان بر محیط زیست به واسطه انتشار کربن از مرحله صفر تا مرحله بهره برداری، معیار ارزیابی چرخه عمر ساختمان (LCA)، می‌تواند یک ابزار سنجش بسیار مناسب باشد تا تأثیر کامل یک پروژه ساختمانی را در مراحل مختلف ساخت از تهیه و تولید مواد ساختمانی، جابجایی، ساخت، بهره برداری و حتی تخریب را بر محیط زیست در نظر بگیرد. ارزیابی چرخه عمر در بسیاری از کشورها نظیر هلند، فرانسه و بریتانیا به عنوان بخشی لازم الاجرا در مقررات ساختمانی آن‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین معیار LCA در چندین گواهینامه معتبر ساختمان سبز نظیر LEED، BREEAM، DGNB و Energie carbon گنجانده شده است. ارزیابی چرخه حیات ساختمان چندین دسته بندی از اثرات زیست محیطی در طول حیات یک ساختمان را که پتانسیل بالایی به لحاظ تأثیر بر افزایش گرمایش جهانی (Global Warming Potential: GWP) دارند را بررسی و ارزیابی می‌کند. این ارزیابی به عنوان ردپای کربن شناخته می‌شود. در جریان تحلیل LCA، تمامی انتشارات به پتانسیل‌های ممکن از منظر اثرات زیست محیطی تبدیل می‌شوند. این تأثیرات، که عنوان شاخص‌های نقطه میانی^۹ شناخته می‌شوند، در مقادیری از ماده‌ای بیان می‌شود که می‌تواند به محیط زیست آسیب برساند، مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای. این شاخص‌ها نشان دهنده آسیب واقعی نیستند، که به عنوان شاخص‌های نقطه پایانی^{۱۰} شناخته می‌شوند، برای مثال افزایش سطح دریا که به عنوان یک شاخص نهایی شناخته می‌شود که بر اثر افزایش دمای زمین به واسطه انتشار گازهای گلخانه‌ای به عنوان شاخص‌های میانی ایجاد می‌شود. پرکاربردترین شاخص‌های نقطه میانی برای ارزیابی اثرات زیست محیطی و استفاده از منابع در تصویر شماره ۵ نشان داده شده است.

■ ارزیابی چرخه عمر ساختمان در فازهای مختلف یک پروژه

یک ساختمان تا مرحله بهره برداری چندین مرحله را طی می‌کند که عبارت است از: طراحی مفهومی، طراحی جزئیات، ساخت و ساز و تدارکات مرتبط و فاز بهره برداری. سطح جزئیات مورد نیاز برای انجام محاسبات مرتبط با چرخه حیات ساختمان به داده‌های موجود در هر مرحله بستگی دارد (تصویر ۶).

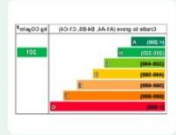
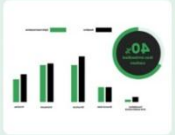
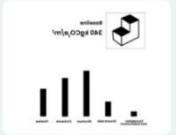
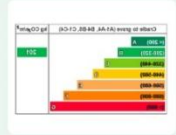
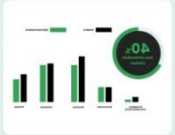
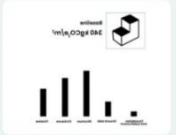
توضیف Description	شاخص های زیست محیطی و استفاده از منابع Environmental and resource use indicators
پتانسیل گرمایش جهانی کربن منتشر شده است که می تواند منجر به تغییر دما در مقیاس های محلی تا جهانی به دلیل اثر گلخانه ای شود	■ پتانسیل گرمایش جهانی ■ Global Warming Potential (GWP) Unit kgCO ₂ eq
انتشار اسیدی می تواند منجر به کاهش سطح PH آب و خاک، کاهش مواد مغذی موجود در خاک و فرسایش گیاه شود	■ پتانسیل اسیدی سازی ■ Acidification potential (AP) Unit kgSO ₂ eq
انتشار نیتروژن و فسفر و افزایش جریان آن ها در اکوسیستم سبب رشد فزاینده جلبک ها و مرگ برخی جانداران می شود که این مسئله با افزایش گرمایش جهانی، افزایش می یابد	■ افزایش اثر اوتروفیکاسیون ■ Eutrophication potential (EP) Unit kgCFC ₁₁ eq
بیان کننده آسیبی است که سبب تخریب لایه اوزون در سطح استراتوسفر می شود که عمدتاً به واسطه پخچال ها و گازهای موجود در آن جهت خنک کنندگی ایجاد می شود. که می تواند منجر به اشعه های مضر فرابنفش شود	■ پتانسیل تخریب لایه اوزون ■ Ozone depletion potential (ODP) Unit kgCFC ₁₁ eq
بیان کننده وجود یکسری مواد در لایه های پایینی جو هست که باعث ایجاد مه دود فتوشیمیایی می شوند	■ تشکیل اوزون در لایه های پایینی جو ■ Formation of ozone of lower Atmosphere (POCP) Unit kgC ₂ H ₄ eq
شاخص مصرف منابع که بیان کننده کاهش میزان مواد خام غیر قابل تجدید در جهان است و این برآورد بر اساس میزان استخراج و میزان منابع باقی مانده تعیین می شود	■ پتانسیل ایجاد منابع فسیلی از طریق غیر زنده ■ Abiotic Depletion Potential for Fossil Resources (ADP _f) Unit MJ

تصویر ۵: شاخص های میانی تاثیر محیطی و استفاده از منابع (One Click LCA, 2021)

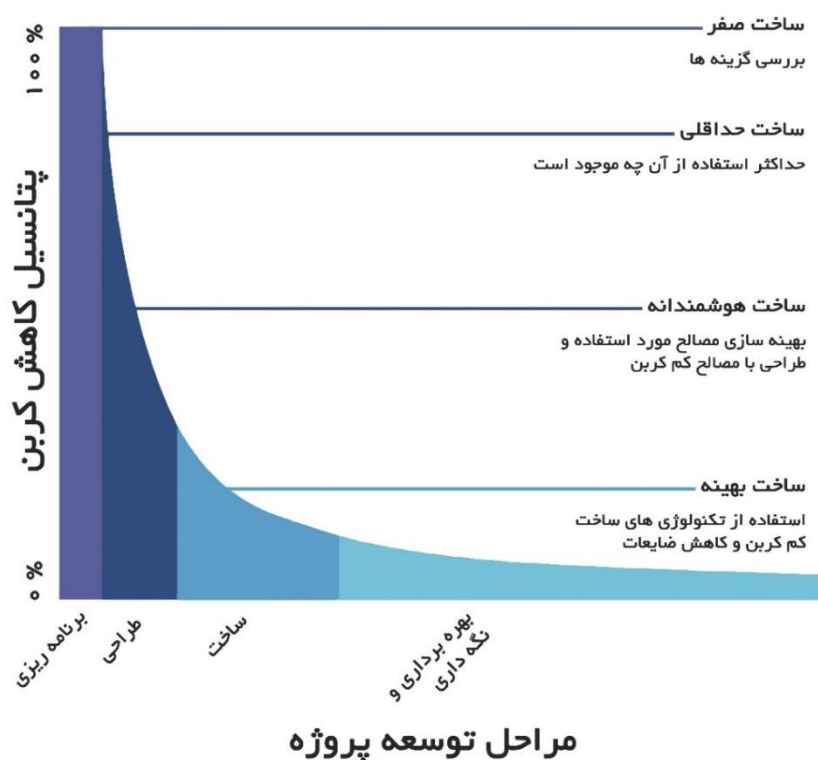
یک پایش جهت LCA به طور معمول در مرحله طراحی برای شناسایی داده های مرتبط با مصالح و عناصر ساختمان انجام می شود. یک LCA مقایسه ای را نیز به منظور مقایسه دو ساختمان با هم می توان در مرحله طراحی جزئیات انجام داد تا از داده های دقیق تر و مرتبط تری برای انتخاب بهترین گزینه های طراحی استفاده نمود. اما دقیق ترین LCA پس از مرحله ساخت و با استفاده از اطلاعات واقعی و دقیق مربوط به مواد انجام می شود. شکل ۵ راه حل های هر مرحله از پروژه را نشان می دهد. شایان ذکر است که انجام ارزیابی چرخه حیات ساختمان در مراحل اولیه طراحی منجر به بالاترین میزان کاهش کربن و کمترین هزینه می شود. با پیشرفت پروژه، توانایی کاهش کربن به شدت کاهش می یابد (تصویر ۷).

■ چهارچوب ارزیابی چرخه عمر

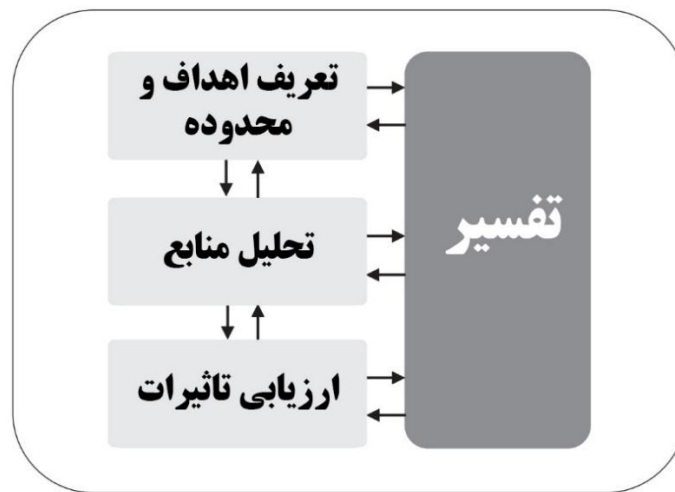
برای هر LCA چهار مرحله وجود دارد. این مراحل توسط استاندارد بین المللی مدیریت زیست محیطی (ISO 1404, 2006) به عنوان هدف و محدوده تعریف، تجزیه و تحلیل منابع، ارزیابی تاثیر و تفسیر تعریف شده است. (تصویر ۸).

مرحله بهره برداری	مرحله ساخت و ساز	طراحی جزئیات	طراحی مفهومی	
ساختمان تکمیل شده 	ساختمان در حال ساخت 	مدل BIM 	مدل طراحی 	مراحل ساخت
مقتادیر واقعی 	آماده سازی نقشه های اجرایی و مدل BIM به همراه بر آورد اقتصادی نهایی مصالح 	طراحی و آماده سازی نقشه های جزئیات ساختمان و یا مدل BIM 	مدل های طراحی که میتواند بر اساس مدل های دستی و یا کامپیوتری ایجاد شود و در مراحل اولیه به کار رود 	موارد مورد نیاز
تجهیز داخلی و بازسازی 	معیار سنجی 	طرح های مقایسه ای 	محاسبات پایه کربن 	فرآیند مرتبط با چرخه حیات ساختمان

تصویر ۶: مراحل ساخت یک پروژه با توجه به فرآیند مرتبط با آن در چرخه حیات ساختمان (One Click LCA, 2021)



تصویر ۷: میزان پتانسیل کاهش کربن در مراحل مختلف ساخت و توسعه یک پروژه (One Click LCA, 2021)



تصویر ۸ مراحل تحلیل چرخه عمر (ISO 1404, 2006)

ارزیابی چرخه عمر ساختمان شامل یک روند تکراری است که در هر مرحله به خروجی های مرحله قبل متکی است. به همین دلیل یک متخصص ممکن است شکاف در داده ها، مسائل مربوط به قابلیت اطمینان داده ها یا مسائل مهمی را که قبلاً نادیده گرفته شده بود به واسطه همین روند وابستگی شناسایی کند. وقتی این شکاف ها و مسائل شناسایی شدند، جنبه های خاصی از LCA ممکن است دوباره مورد بازبینی قرار گیرد. این تکرار در مطالعات LCA حائز اهمیت است زیرا سطحی از مفهوم پذیری و استفاده از بازبینی جنبه های مختلف مطالعه را فراهم می کند که ممکن است به هر طریقی ناقص باشد.

در حین انجام هر مرحله از ارزیابی چرخه عمر، ارزیاب و یا متخصص ممکن است بر اساس یافته های به دست آمده، لازم بداند که یکی یا همه مراحل قبلی را اصلاح کند. یافته های یک فاز ممکن است نقص هایی را در رابطه با داده های جمع آوری شده برجسته کند که توانایی دستیابی به اهداف پروژه مورد نظر را محدود می کند. برای مثال، مسائل مربوط به کمیت یا کیفیت داده های جمع آوری شده در مرحله تحلیل منابع ممکن است توانایی یافته ها را برای پرداختن به اهداف مطالعه محدود کند، که این مسئله ممکن است تنها در حین انجام ارزیابی تأثیر شناسایی شوند. پس از آن، کارشناس ممکن است نیاز داشته باشد که جنبه های تجزیه و تحلیل منابع، از جمله جمع آوری داده های بیشتر یا با کیفیت بهتر را مجدداً انجام دهد تا اطمینان حاصل شود که اهداف پروژه می توانند برآورده شوند.

■ انواع تحلیل چرخه عمر

به طور کل انواع تحلیل و ارزیابی چرخه عمر در سه بخش طبقه بندی می شود:

- ۱- ارزیابی پایه چرخه عمر
- ۲- ارزیابی مقایسه ای چرخه عمر
- ۳- ارزیابی ساده شده چرخه عمر

■ ارزیابی پایه چرخه عمر

یک LCA پایه، که بیشتر به عنوان LCA معمولی شناخته می شود، برای ارزیابی یک محصول، سیستم یا فرآیند منفرد، با هدف نهایی شناسایی زمینه های بهبود بالقوه در عملکرد زیست محیطی آن محصول، سیستم یا فرآیند استفاده می شود. این اغلب با ارزیابی اثرات زیست محیطی مرتبط با یک محصول و استفاده از یافته های LCA برای شناسایی مناطقی که بیشترین تأثیرات در آن رخ می دهد شروع می شود. سپس می توان استراتژی ها را برای هدف قرار دادن این حوزه های

کلیدی توسعه و به کار گرفت. نمونه ای از چگونگی استفاده از LCA پایه در توسعه مصالح ساختمانی جدید یا بهبود عملکرد زیست محیطی مصالح ساختمانی موجود است. LCA در این زمینه، می تواند برای شناسایی ورودی های مواد، انرژی، آب و سایر منابع، و همچنین خروجی ها (آلودگی، محصولات، محصولات مشترک و ضایعات) مرتبط با ساخت این مواد (بر اساس فرآیندهای خاص، فناوری ها و مکان های جغرافیایی درگیر) مورد استفاده قرار گیرد. یافته های این نوع مطالعه، که به طور بالقوه مقدار انرژی، آب و مواد خام مصرفی و ضایعات مرتبط با فرآیند تولید را مشخص می کند، می تواند برای شناسایی این که کدام فرآیند یا مرحله ساخت یا مواد خام خاص یا سایر ورودی های مرتبط با منابع مورد بیشترین تأثیر زیست محیطی کلی مربوط به ساخت مصالح ساختمانی را داشته است. با استفاده از این اطلاعات، طراحان محصول می توانند فرآیندها، مواد و منابع مورد نیاز جدید را جایگزین فرآیندهای موجود کنند یا بر بهبود کارایی این فرآیندهای موجود تمرکز کنند.

■ ارزیابی مقایسه ای چرخه عمر

یک LCA مقایسه ای، همانطور که از نام آن پیداست، برای مقایسه اثرات زیست محیطی دو یا چند محصول یا فرآیندهایی که عملکرد یکسانی را انجام می دهند، استفاده می شود. این می تواند در مواردی مفید باشد که هدف مورد نظر انتخاب جایگزینی با کمترین تأثیر زیست محیطی باشد. با هر LCA مقایسه ای، ضروری است که یک واحد عملکردی قابل مقایسه انتخاب شود تا جایگزین ها بر اساس یک مبنای مشترک مقایسه شوند. به عنوان مثال، مقایسه اثرات زیست محیطی دو کره نوری با خروجی نور متفاوت، مقایسه کاملاً معنی داری نخواهد بود. در این مورد، کمیت و کیفیت نور برای کار خاص، مهم ترین عامل در تعریف عملکرد کره ها است. چنین مقایسه ای باید بر اساس مقدار مشخصی از خروجی نور باشد تا یافته ها مرتبط باشند. ممکن است برای ارائه عملکرد مشابه (روشن کردن یک منطقه مشخص تا سطح مشخصی از روشنایی) به تعداد بیشتری از کره های با خروجی کمتر نیاز باشد. توسعه محصول اغلب با LCA پایه به منظور تعیین مهم ترین اثرات زیست محیطی آغاز می شود. از آنجایی که محصولات یا راه حل های جایگزین در تلاش برای کاهش این تأثیرات توسعه می یابند، ممکن است لازم باشد یک LCA مقایسه ای انجام شود تا همه گزینه ها را با هم مقایسه کند تا مشخص شود آیا بهبودهای زیست محیطی در حال انجام است یا خیر. این نوع ارزیابی برای تصمیم گیرندگانی که بیش از یک گزینه در دسترس آن ها است مفید است.

■ ارزیابی ساده شده چرخه عمر

اغلب، اهداف یک مطالعه LCA ارزیابی تنها محدوده محدودی از اثرات زیست محیطی یا مراحل چرخه زندگی مرتبط با یک محصول یا فرآیند است. کار قبلی ممکن است اثرات قابل توجهی را که از یک ورودی خاص (مانند انرژی) یا مرحله چرخه عمر (مانند ساخت) ناشی می شود، شناسایی کند. به عنوان مثال، در جایی که فرآیندهای تولید جایگزین برای یک محصول مورد بررسی قرار می گیرند، ممکن است مطالعه تنها این مرحله از چرخه عمر محصول قابل قبول باشد. این نوع LCA، که در آن دامنه از نظر عمق، وسعت یا جزئیات محدود است، به عنوان یک LCA ساده شناخته می شود. اهداف و دامنه شناسایی شده در ابتدای مطالعه، مناسب بودن استفاده از یک رویکرد کارآمد را نشان می دهد. در استفاده از این رویکرد باید احتیاط کرد، زیرا اغلب برای محدود کردن دامنه مطالعه به این طریق، درک بسیار دقیق تر از یک محصول ضروری است. باید دلیل خوبی برای محدود شدن دامنه وجود داشته باشد که باید در مرحله تعریف محدوده توضیح داده شود. در بسیاری از پژوهش های انجام شده نشان داده شده است که بیشترین تأثیرات مرتبط با ساختمان ها اغلب مربوط به مصرف انرژی است (Junnila and Horvath, 2003). بنابراین تمرکز بیشتر بهبود عملکرد زیست محیطی در صنعت ساخت و ساز بر روی بهره وری انرژی در مراحل مختلف زندگی یک ساختمان، از ساخت و ساز تا استفاده و در نهایت دفع بوده

است. به همین دلیل، یک رویکرد ساده که فقط اثرات زیست محیطی مرتبط با انرژی را در نظر می گیرد، برای مطالعات LCA ساختمان ها کاملاً رایج است. این نوع مطالعه معمولاً به عنوان تجزیه و تحلیل انرژی چرخه عمر شناخته می شود. از سویی دیگر با توجه به بالاتر بودن میزان انتشار کربن در مرحله بهره برداری اما مطالعاتی نیز نشان داده اند که علی رغم اثرات زیست محیطی بالاتر در فاز استفاده از ساختمان، تأثیر زیست محیطی در واحد زمان برای مراحل مصالح و ساخت و ساز نیز بسیار مهم است (Ortiz et al., 2009 & Du et al, 2019).

■ بحث

در راستای پاسخ به پرسش این پژوهش یافته های این تحقیق و تحلیل پیشینه علمی، نشان دهنده چند جنبه کلیدی از تأثیر ارزیابی چرخه عمر ساختمان ها در رابطه با اثرات زیست محیطی مرتبط با محیط ساخته شده هستند. در ابتدا می توان گفت که ارزیابی هم زمان انرژی نهان و انرژی بهره برداری، روش LCA امکان تحلیل دقیق تر و تصمیم گیری آگاهانه تر در مراحل طراحی، ساخت، و بهره برداری ساختمان ها را فراهم می کند. این روش، با در نظر گرفتن تمامی مراحل چرخه عمر از تولید مواد اولیه تا پایان عمر ساختمان، می تواند به شناسایی نقاط بحرانی و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای کمک کند. مطلب بعدی که می توان آن را به عنوان پاسخی دیگر برای چگونگی کاهش اثرات زیست محیطی با استفاده از تحلیل چرخه عمر ساختمان ها در نظر گرفت مرتبط با انتخاب بهینه مصالح و سیستم ها است. نتایج این پژوهش و مطالعات مرتبط نشان داده اند که انتخاب مصالح و سیستم های ساخت و ساز مناسب، بر اساس ارزیابی های LCA، می تواند تأثیرات زیست محیطی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. برای مثال، استفاده از بتن بازیافتی، بلوک های کف کربن، یا مواد با انرژی نهان پایین، به کاهش انتشار دی اکسید کربن کمک می کند. همچنین، مقایسه سیستم های سازه ای نشان می دهد که سیستم های چوبی و مدولار می توانند نسبت به سیستم های فولادی یا بتنی سنتی اثرات کمتری داشته باشند. هم چنین ترکیب LCA با ابزارهای مدل سازی اطلاعات ساختمان (BIM) امکان شبیه سازی دقیق تر و تصمیم گیری های بهتر در مراحل اولیه طراحی را فراهم می کند. این یکپارچگی می تواند به کاهش انتشار دی اکسید کربن در پروژه های ساختمانی منجر شود، که به ویژه در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، با سیستم های ساخت رایج، بسیار ارزشمند است.

در رابطه با چالش های موجود ذکر این نکته ضروریست که اجرای موفق LCA در محیط ساخته شده نیازمند غلبه بر محدودیت هایی همچون عدم قطعیت داده ها، نبود استانداردهای بومی، و کمبود دانش اجرایی است. این تحقیق پیشنهاد می کند که تدوین دستورالعمل های ملی، آموزش تخصصی برای متخصصان صنعت، و توسعه مدل های پیش بینی، از جمله اقدامات کلیدی برای بهبود بهره وری این روش هستند. هم چنین استفاده از روش های ترکیبی، مانند تحلیل ورودی-خروجی و مدل سازی چندمعیاره، می تواند ارزیابی دقیق تر و جامعی از اثرات زیست محیطی ارائه دهد. این روش ها، با در نظر گرفتن عوامل منطقه ای و اقلیمی، امکان کاهش اثرات زیست محیطی و دستیابی به طراحی پایدارتر را فراهم می آورند. به طور کلی، پژوهش حاضر نشان می دهد که استفاده از LCA، در کنار به کارگیری فناوری های نوین و رویکردهای جامع، می تواند ابزاری موثر و کارآمد برای کاهش اثرات زیست محیطی در محیط ساخته شده و دستیابی به اهداف توسعه پایدار باشد.

به طور کل و با توجه به موارد اشاره شده می توان نشان داد که اثرات زیست محیطی مواد ساختمانی و عملکرد کلی ساختمان ها به ترکیب و ویژگی های مصالح مورد استفاده وابسته است. بررسی ها همچنین نشان دادند که پتانسیل کاهش انتشار کربن در مرحله بهره برداری ساختمان ها به طور قابل توجهی بیشتر از مرحله ساخت است. این امر به دلیل مصرف انرژی مداوم در طول عمر مفید ساختمان و استفاده از انرژی های تجدیدپذیر در این مرحله اهمیت می یابد. با این وجود، ارزیابی چرخه عمر (LCA) مصالح و فرآیندهای ساخت هنوز با چالش هایی از جمله محدودیت داده ها، عدم شفافیت در مدل سازی، و کمبود پایگاه های

داده محلی و منطقه‌ای مواجه است. هم چنین یکی از مسائل کلیدی که در پژوهش حاضر شناسایی شد، نیاز به توسعه روش‌هایی است که بتوانند تعاملات پیچیده میان کربن نهان و کربن بهره‌برداری را در شرایط مختلف محیطی و اقلیمی به طور همزمان تحلیل کنند. در این راستا، استفاده از مدل‌های ترکیبی و مبتنی بر ورودی-خروجی می‌تواند رویکردهای جامع‌تری را برای تحلیل اثرات زیست‌محیطی ساختمان‌ها فراهم آورد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که در ایران، تمرکز پژوهش‌ها عمدتاً بر کاهش انرژی بهره‌برداری بوده است، در حالی که بخش کربن نهان که ناشی از تولید و ساخت مصالح ساختمانی است، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این عدم توجه می‌تواند به تخمین نادرست اثرات زیست‌محیطی کل چرخه عمر ساختمان منجر شود. همچنین بررسی مقررات ملی ساختمان (مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان (۲)) در ایران نشان می‌دهد که رویکرد غالب بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در مرحله بهره‌برداری متمرکز است و ارزیابی جامع‌تری که شامل تمامی مراحل چرخه عمر باشد، به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که انتخاب مصالح با مقاومت حرارتی بالاتر، اگرچه می‌تواند مصرف انرژی در مرحله بهره‌برداری را کاهش دهد، اما ممکن است منجر به افزایش میزان کربن نهان شود. این یافته تأکید می‌کند که برای کاهش اثرات کلی زیست‌محیطی، نیاز به یک رویکرد متوازن وجود دارد که در آن تصمیم‌گیری‌ها بر اساس تحلیل جامع اثرات در تمام مراحل چرخه عمر انجام شود. علاوه بر این، پیشرفت در فناوری‌های مرتبط با تحلیل LCA و گسترش دسترسی به داده‌های دقیق می‌تواند به بهبود کیفیت این ارزیابی‌ها و تسهیل پیاده‌سازی آن‌ها در صنعت ساختمان منجر شود. هم چنین ترکیب مناسب رویکردهای مبتنی بر ارزیابی چرخه عمر با سیستم‌های مدل‌سازی یکپارچه ساختمان (BIM^{11}) نیز می‌تواند به برآورد دقیق اثرات زیست‌محیطی یک بنا قبل از ساخت کمک کند.

این پژوهش همچنین نشان داد که تحقیقات داخلی در زمینه ارزیابی چرخه عمر ساختمان‌ها در ایران محدود بوده و بسیاری از مطالعات موجود به مقایسه میان مصالح یا تحلیل یک جنبه خاص محدود شده‌اند. این محدودیت‌ها نشان‌دهنده نیاز به سرمایه‌گذاری بیشتر در تحقیقات میان‌رشته‌ای است که به جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ساختمان‌ها توجه کند. در مقابل، نیاز به توسعه مطالعات جامع که تأثیرات زیست‌محیطی در سطح ملی و محلی را در نظر گیرند، احساس می‌شود. برای دستیابی به این هدف، هماهنگی میان سیاست‌گذاران، پژوهشگران، و صنعت ضروری است. علاوه بر این، ایجاد استانداردهای ملی برای انجام تحلیل چرخه عمر و تدوین پایگاه‌های داده محلی می‌تواند نقش مهمی در توسعه این حوزه داشته باشد.

نتیجه‌گیری

محیط ساخته‌شده به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های تأثیرگذار بر کاهش اثرات زیست‌محیطی و مقابله با تغییرات اقلیمی، نیازمند اتخاذ رویکردهای جامع و دقیق در ارزیابی و کاهش این اثرات است. این پژوهش بر اهمیت ارزیابی چرخه عمر (LCA) ساختمان‌ها به‌عنوان ابزاری کلیدی برای دستیابی به توسعه پایدار تأکید دارد. امکان تحلیل جامع انرژی و کربن را در تمامی مراحل عمر مفید ساختمان، شامل تولید، ساخت، بهره‌برداری و پایان عمر، فراهم می‌کند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب انرژی نهان و انرژی بهره‌برداری در ارزیابی چرخه عمر، یک رویکرد کارآمد و عملی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی است. یکی از مسائل کلیدی مطرح‌شده در این پژوهش، عدم وجود دانش اجرایی کافی در خصوص استفاده بهینه از LCA در صنعت ساختمان است. این مسئله موجب محدود شدن پتانسیل‌های این ابزار در کربن‌زدایی و کاهش اثرات زیست‌محیطی شده است. پیشنهاد‌های ارائه‌شده در این پژوهش می‌توانند راهگشا باشند:

۱. یکپارچه‌سازی LCA با ابزارهای مدل‌سازی اطلاعات ساختمان: استفاده از مدلسازی اطلاعات ساختمان در زمینه ارزیابی چرخه عمر ساختمان‌ها می‌تواند دقت و کارایی تحلیل‌های LCA را افزایش دهد. این یکپارچگی نه تنها

امکان انجام تحلیل‌های دقیق‌تر و جامع‌تر را فراهم می‌کند، بلکه فرآیند تصمیم‌گیری در طراحی و ساخت را نیز تسهیل می‌کند.

۲. **آموزش تخصصی برای متخصصان حوزه:** توسعه مهارت‌ها و دانش تخصصی مرتبط با LCA، از جمله توانایی استفاده از ابزارهای پیشرفته و تحلیل داده‌های مربوطه، می‌تواند به اجرای بهتر این روش در صنعت ساختمان کمک کند. برنامه‌های آموزشی هدفمند و کارگاه‌های تخصصی می‌توانند دانش فنی را در این حوزه افزایش دهند.

۳. **تدوین استانداردهای ملی هماهنگ با شرایط اقلیمی و محیطی:** استانداردسازی داده‌ها و روش‌ها یکی از گام‌های اساسی برای تضمین صحت و قابلیت مقایسه تحلیل‌های LCA است. این استانداردها باید متناسب با شرایط اقلیمی و محیطی کشور تدوین شوند تا قابلیت کاربرد در پروژه‌های محلی را داشته باشند.

پژوهش حاضر همچنین نشان می‌دهد که استفاده از رویکردهای ترکیبی مانند تحلیل‌های مبتنی بر ورودی-خروجی، می‌تواند به افزایش دقت و جامعیت ارزیابی‌ها کمک کند. این رویکردها با توجه به پیچیدگی زنجیره‌های تأمین مصالح و فناوری‌های ساخت، ابزاری مناسب برای تحلیل اثرات زیست‌محیطی به شمار می‌آیند. در نهایت، پژوهش بر لزوم اتخاذ یک رویکرد جامع تأکید دارد که تمامی مراحل چرخه عمر ساختمان را پوشش دهد و از جابه‌جایی بارهای زیست‌محیطی جلوگیری کند. بهره‌گیری از ابزارهای LCA در مراحل طراحی، ساخت و بهره‌برداری می‌تواند راهکاری مؤثر برای مقابله با بحران‌های زیست‌محیطی و دستیابی به محیط ساخته‌شده پایدارتر باشد. با پیشبرد این پیشنهادها و سرمایه‌گذاری در توسعه فناوری‌های مرتبط، می‌توان گامی بلند به سوی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف منابع طبیعی برداشت و به اهداف توسعه پایدار نزدیک‌تر شد.

پی‌نوشت

- 1- Cradle to Gate
- 2- Embodied Energy
- 3- Operational Energy
- 4- Hempcrete
- 5- Embodied carbon
- 6- Operational carbon
- 7- Whole-life carbon (WLC)
- 8- Carbon Footprint
- 9- Midpoint Indicators
- 10- Endpoint Indicators
- 11- Building Information Technology

فهرست منابع

- هاشمی، فاطمه و حیدری، شاهین. (۱۳۹۱). *بهینه سازی مصرف انرژی در ساختمان های مسکونی اقلیم سرد (نمونه موردی: شهر اردبیل)*. صفه. 75-86، 22(1).
- وزارت راه و شهرسازی، (۱۳۹۹)، *مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان*، دفتر مقررات ملی و کنترل ساختمان.
- یوسفی، فاطمه؛ قلی پور، یعقوب (۱۳۹۷). *ارزیابی مصرف انرژی طول عمر یک ساختمان مسکونی واقعی در شهر تهران*، هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی بهار ۱۳۹۷، دوره بیست و سوم - شماره ۱۰.

- Alshamrani, Othman Subhi. (2021). **"Life Cycle Assessment for Modular Roof Systems of Large-Span Building."** In Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. ICCCB 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, 98 vols., edited by E. Toledo Santos and S. Scheer. Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-030-51295-8_91.
- Alshamrani, Othman., Alshibani, Adel., & Mohammed, Awsan. (2022). **Operational Energy and Carbon Cost Assessment Model for Family Houses in Saudi Arabia.** *Sustainability*, 14(3), 1278
- Asif, Mohammad., Currie, John, and Tariq. Muneer. 2007. **"Comparison of Aluminium and Stainless Steel Built-in-storage Solar Water Heater."** *Building Services Engineering Research and Technology* 28 (4): 337–346. doi:10.1177/ 0143624407082390.
- Atkinson-Palombo, Carol. 2010. **New Housing Construction in Phoenix: Evidence of "New Suburbanism, Cities** 27 (2): 77–86. doi: 10.1016/j.cities.2009.10.001.
- Anand, Chirjiv Kaur., & Amor, Ben. (2017). **Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings:** A critical review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 67, 408-416.
- Arrigoni, Alessandro, Daman K. Panesar, Mel Duhamel, Tamar Opher, Shoshanna Saxe, I. Daniel Posen, and Heather L. MacLean. (2020). **Life cycle greenhouse gas emissions of concrete containing supplementary cementitious materials: cut-off vs. substitution.** *Journal of Cleaner Production*, 263, 121465.
- Azari, Rahman, and Narjes Abbasabadi. (2018). **Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends.** *Energy and Buildings*, 168, 225-235.
- Ben-Alon, Lola, Vivian Loftness, Kent A. Harries, Gwen DiPietro, and Erica Cochran Hameen. (2019). **Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of natural vs conventional building materials: A case study on cob earthen material.** *Building and Environment*, 160, 106150.
- Bribián, Ignacio Zabalza, Antonio Valero Capilla, and Alfonso Aranda Usón. (2011). **Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential.** *Building and environment*, 46(5), 1133-1140.
- Brophy, Vivienne, and J. Owen Lewis. (2012). **A green vitruvius: principles and practice of sustainable architectural design.** Routledge.
- Christoforou, Elias, Angeliki Kylili, Paris A. Fokaides, and Ioannis Ioannou. "Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks." *Journal of Cleaner Production* 112 (2016): 443-452.
- Crawford, Robert. (2011). *Life cycle assessment in the built environment.* Routledge.
- Curran, Mary Ann. 2013. **"Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability,"** *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 273-277.
- Curran, Mary Ann. 2013. **"Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability,"** *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 273-277.
- Ding, Grace KC. (2004). **The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities** (Doctoral dissertation).
- Dixit, Manish Kumar, José L. Fernández-Solís, Sarel Lavy, and Charles H. Culp. (2010). **Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review.** *Energy and buildings*, 42(8), 1238-1247
- Dodman, David. .2017. (2016). **Environment and urbanization. International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology: People, the Earth,** *Environment and Technology*, 1-9.
- Du, Qiang, Tana Bao, Yi Li, Youdan Huang, and Long Shao. (2019). **Impact of prefabrication technology on the cradle-to-site CO 2 emissions of residential buildings.** *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 1499-1514.
- Fenner, Andriel Evandro, Charles Joseph Kibert, Junghoon Woo, Shirley Morque, Mohamad Razkenari, Hamed Hakim, and Xiaoshu Lu. (2018).. **The carbon footprint of buildings: A review of methodologies and applications.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 1142-1152.
- Georges, Laurent, Matthias Haase, Aoife Houlihan Wiberg, Torhildur Kristjansdottir, and Birgit Risholt. (2015). **Life cycle emissions analysis of two nZEB concepts.** *Building Research & Information*, 43(1), 82-93.

- Giesekam, Jannik, John Barrett, and Peter Taylor. (2016, August). “**Scenario analysis of embodied greenhouse gas emissions in UK construction.**”. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability (Vol. 171, No. 4, pp. 178-190). Thomas Telford Ltd.
- Guo, Zhanggen, An Tu, Chen Chen, and Dawn E. Lehman. (2018). **Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates.** *Journal of Cleaner Production*, 199, 136-149.
- Häkkinen, Tarja, Matti Kuittinen, Antti Ruuska, and Nusrat Jung. (2015). **Reducing embodied carbon during the design process of buildings.** *Journal of Building Engineering*, 4, 1-13.
- Hamida, Amneh, Abdulsalam Alsudairi, Khalid Alshaibani, and Othman Alshamrani.(2020). “**Environmental Impacts Cost Assessment Model of Residential Building Using an Artificial Neural Network.**” *Engineering, Construction and Architectural Management* ahead-of-print (ahead-of-print). doi:10.1108/ECAM-06- 2020-0450.
- Han, Baolong, Rusong Wang, Liang Yao, Hongxiao Liu, and Zhonghang Wang. (2015). **Life cycle assessment of ceramic façade material and its comparative analysis with three other common façade materials.** *Journal of Cleaner Production*, 99, 86-93.
- International Energy Agency, <https://www.iea.org/countries/Iran>, Achieve, 5/8/2023
- IPCC. (2022), **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**, 4/1/2023 from: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3> .Accessed 18 June 2023.
- ISO, I. (2006). **ISO 14040. Environmental management–Life cycle assessment–Principles and framework** (ISO 14040: 2006).
- Jun, Hanjong, Namgi Lim, and Mikyoung Kim. (2015). **BIM-based carbon dioxide emission quantity assessment method in Korea.** *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 14(3), 569-576.
- Junnila, Seppo, and Arpad Horvath. (2003). **Life-cycle environmental effects of an office building.** *Journal of Infrastructure systems*, 9(4), 157-166.
- Jusselme, Thomas, Emmanuel Rey, and Marilyne Andersen. (2018). **An integrative approach for embodied energy: Towards an LCA-based data-driven design method.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88, 123-132.
- Kjær, Louise Laumann, Aris Pagoropoulos, Michael Hauschild, Morten Birkved, Jannick H. Schmidt, and Tim C. McAloone. (2015). **From LCC to LCA using a hybrid input output model—a maritime case study.** *Procedia CIRP*, 29, 474-479.
- Lavagna, Monica, Catia Baldassarri, Andrea Campioli, Serena Giorgi, Anna Dalla Valle, Valentina Castellani, and Serenella Sala. (2018). **Benchmarks for environmental impact of housing in Europe: Definition of archetypes and LCA of the residential building stock.** *Building and Environment*, 145, 260-275.
- McManus, Marcelle C., and Caroline M. Taylor, (2015). **The changing nature of life cycle assessment.** *Biomass and bioenergy*, 82, 13-26.
- Meex, Elke, Alexander Hollberg, Elke Knapen, Linda Hildebrand, and Griet Verbeeck. (2018). **Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design.** *Building and Environment*, 133, 228-236.
- Nwodo, Martin N., and Chimay J. Anumba. (2019). **A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach.** *Building and Environment*, 162, 106290.
- Ortiz, Oscar, Francesc Castells, and Guido Sonnemann. (2009). **Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA.** *Construction and building materials*, 23(1), 28-39.
- One Click LCA. (2021), **Life Cycle Assessment for Building, why it matters and how to use it.** One Click LCA Board.
- Pacheco-Torgal, F., and Said Jalali. (2011). **Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials.** *Construction and building materials*, 25(2), 582-590..
- Pomponi, Francesco, and Alice Moncaster. (2016). **Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment—What does the evidence say.** *Journal of environmental management*, 181, 687-700.
- Prateep Na Talang, Rutjaya, Massimo Pizzol, and Sanya Sirivithayapakorn. (2017). **Comparative life cycle assessment of fired brick production in Thailand.** *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 1875-1891.
- Potrč, Tajda, Katja Malovrh Rebec, Friderik Knez, Roman Kunič, and Andraž Legat. (2016). **Environmental footprint of external thermal insulation composite systems with different insulation types.** *Energy Procedia*, 96, 312-322.

- Pushkar, S., R. Becker, and A. Katz. (2005). "A Methodology for Design of Environmentally Optimal Buildings by Variable Grouping." *Building and Environment* 40 (8): 1126–1139. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.09.004.
- Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS), 2024, 2 July from: RICS, **Whole life carbon assessment for the built environment**, London. http://www.rics.org/Global/Whole_life_carbon_assessment_for_the_BE_PG_guidance_2017.pdf, 2017.
- Roberts, Matthew, Stephen Allen, and David Coley. (2020). **Life cycle assessment in the building design process—A systematic literature review**. *Building and Environment*, 185, 107274.
- Saunders, Christi L., Amy E. Landis, Laurel P. Mecca, Alex K. Jones, Laura A. Schaefer, and Melissa M. Bilec. (2013). **Analyzing the practice of life cycle assessment: focus on the building sector**. *Journal of industrial ecology*, 17(5), 777-788.
- Schlanbusch, Reidun Dahl, Selamawit Mamo Fufa, Tarja Häkkinen, Sirje Vares, Harpa Birgisdottir, and Peter Ylmén. (2016). "Experiences with LCA in the Nordic building industry – challenges, needs and solutions," *Energy Procedia*, 96, 82-93.
- Schlueter, Arno, and Frank Thesseling. (2009). **Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages**. *Automation in construction*, 18(2), 153-163.
- Schmidt, Anders C., Allan A. Jensen, Anders U. Clausen, Ole Kamstrup, and Dennis Postlethwaite. (2004). **A comparative life cycle assessment of building insulation products made of stone wool, paper wool and flax: part 1: background, goal and scope, life cycle inventory, impact assessment and interpretation**. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9, 53-66.
- Sherif, Yosef S., and William J. Kolarik. (1981). **Life cycle costing: concept and practice**. *Omega*, 9(3), 287-296.
- Sierra-Pérez, Jorge, Jesús Boschmonart-Rives, and Xavier Gabarrell. (2016). **Environmental assessment of façade-building systems and thermal insulation materials for different climatic conditions**. *Journal of cleaner production*, 113, 102-113.
- Sturgis, Simon. (2019). **Targeting Zero: Whole Life and Embodied Carbon Strategies for Design Professionals**. Riba publishing.
- Teh, Soo Huey, Thomas Wiedmann, Judith Schinabeck, Hazel Rowley, and Stephen Moore. (2015). **Integrated carbon metrics and assessment for the built environment**. *Procedia CIRP*, 29, 480-485..
- Treasury, H. M. (2013). **Planning for economic infrastructure**. National Audit Office.
- UKGBC. 2017. **Embodied Carbon, Developing a client brief**, London. <https://www.ukgbc.org/wp-content/uploads/2017/09/UK-GBC-EC-Developing-Client-Brief.Pdf>. Accessed 15 April 2022.
- Venkatarama Reddy, B. V., & Latha, M. S. (2014). **Influence of soil grading on the characteristics of cement stabilised soil compacts**. *Materials and Structures*, 47, 1633-1645.
- Vilches, Alberto, Antonio Garcia-Martinez, and Benito Sanchez-Montanes. (2017). **Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review**. *Energy and Buildings*, 135, 286-
- Wolf, Christian, Daniel Klein, Gabriele Weber- Blaschke, and Klaus Richter. (2016). **Systematic review and meta- analysis of life cycle assessments for wood energy services**. *Journal of Industrial Ecology*, 20(4), 743-763.
- Yilmaz, Emrah, Hakan Arslan, and Alper Bideci. (2019). **Environmental performance analysis of insulated composite facade panels using life cycle assessment (LCA)**. *Construction and Building Materials*, 202, 806-813.
- Zeng, Ruochen, and Abdol Chini. (2017). **A review of research on embodied energy of buildings using bibliometric analysis**. *Energy and Buildings*, 155, 172-184.
- Zhang, X. (2018). **Research on the Quantitative Analysis of Building Carbon Emissions and Assessment Methods for Low-carbon Buildings and Structures**. Harbin Institute of Technology. M. Ph. thesis.