

## پیوست ۴

ارزیابی چرخه عمر ساختمان و معیارهای ارزیابی  
و رتبه‌بندی ساختمان سبز

### تأثیرات محیطی صنعت ساختمان

شواهد حاصل از تحقیقات علمی تایید کننده تغییرات اقلیمی و خطرات جدی حاصل از آنهاست. بر همین اساس تغییرات آب و هوایی، جدی ترین عامل تهدید کننده جوامع بشری بوده و حاصل رفتارهای نامناسب خود اوست. از سال ۱۹۷۰ میزان گازهای گلخانه‌ای متصاعد شده در جو زمین بخصوص حجم دی اکسید کربن بعنوان مهم ترین گاز گلخانه‌ای بشکل قابل توجهی افزایش یافته است. حجم دی اکسید کربن حاصل از مصرف سوختهای فسیلی و تولید سیمان بتنهایی دلیل ۷۵ درصد از افزایش تولید این گاز در جو زمین از قرن ۱۸ میلادی یا دوران پیش از دوران صنعتی تا کنون است. بعلاوه، ساخت و بهره‌برداری ساختمان‌ها بعنوان عاملی مهم در تولید یک چهارم کل دی اکسید کربن جهان مطرح است.

ساختمان‌ها به تنهایی ۴۰ درصد کل مصرف انرژی جهان را به خود اختصاص داده اند. این انرژی در مرحله ساخت به صورت انرژی نهفته و در فاز بهره‌برداری بصورت انرژی مصرفی ساختمان مورد استفاده قرار می گیرد.

صنعت ساختمان بدلیل مصرف بالای منابع زمین، مواد خام و انرژی و همچنین تولید نخاله، نقشی مهم و تعیین کننده در محیط زیست دارد. این صنعت همچنین مصرف کننده مهم انرژی‌های تجدید پذیر و تجدید ناپذیر و تولید کننده مهم گازهای گلخانه‌ای و سایر پسماندهای جامد و گازی است. به مرور با افزایش عوامل مخرب محیطی، میزان انرژی مصرفی ساختمان‌ها نیز افزایش یافت. به همین ترتیب اندازه‌گیری انرژی مورد نیاز برای ساخت و ساز و تولید مصالح نیز اهمیت بیشتری یافت. صنعت ساختمان بین ۲۵ تا ۴۰ درصد کل انرژی مصرفی در بسیاری از کشورها را به خود اختصاص داده است. مطالعات مختلف نشان داده است که انرژی مصرفی ساختمان‌ها در فاز بهره‌برداری در یک بازه زمانی ۵۰ ساله ۸۰ تا ۹۰ درصد کل انرژی مصرفی ساختمان را بخود اختصاص داده است. مطالعات مرتبط با ساختمان‌های با میزان پایین انرژی بهره‌برداری نشان داده است که، انرژی نهفته فاز ساخت ۴۰ تا ۶۰ درصد از کل انرژی مصرفی ساختمان را بخود اختصاص داده است.

به همین دلیل در صورت کنترل میزان مصرف انرژی در بخش ساختمان و در نتیجه آن، کاهش میزان تولید دی اکسید کربن حاصل از این بخش، می‌توان به شکل قابل توجهی

به جلوگیری از افزایش دمای زمین کمک نمود. توجه به اندازه‌گیری و کنترل میزان انرژی مصرفی در جهان از دو منظر قابل توجه است، از یک سو ارتباط میان تولید گازهای گلخانه‌ای و میزان مصرف انرژی مورد توجه قرار دارد. به این ترتیب با کاهش میزان مصرف انرژی‌های فسیلی، میزان تولید دی اکسید کربن نیز کاهش یافته و سرعت افزایش دمای زمین کاهش خواهد یافت، پیمان بین المللی کیوتو<sup>۱</sup> را می‌توان مهمترین برنامه عملی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای با تمرکز بر کاهش میزان مصرف سوخت‌های فسیلی دانست. از سوی دیگر، کاهش میزان مصرف انرژی بخصوص انرژی‌های فسیلی و سایر منابع تجدید ناپذیر انرژی را می‌توان وظیفه تمامی نسل‌های بشر دانست، بدین ترتیب ضمن حفظ منابع محدود انرژی زمین می‌توان امکان بهره‌برداری نسل‌های آینده از این منابع را فراهم نمود. پیمان مونترال<sup>۲</sup> نیز یکی از مهمترین برنامه‌های بین المللی برای کاهش میزان مصرف انرژی در جهان است.

با توجه به لزوم اندازه‌گیری و کاهش میزان انرژی مصرفی، صنعت ساختمان را می‌توان بعنوان یکی از بزرگترین مصرف کنندگان انرژی و مهمترین تولید کننده دی اکسید کربن در جهان معرفی نمود. انرژی مصرفی ساختمان و دی اکسید کربن تولید شده توسط آنرا می‌توان در سه بخش جداگانه مورد بررسی قرار داد که با وجود جدایی ظاهری در واقع به شکل اجتناب ناپذیری با یکدیگر مرتبط هستند. این سه بخش شامل تولید، بهره‌برداری و تخریب ساختمان است.

صنعت ساختمان به‌مراه صنایع وابسته آن، یکی از مهمترین مصرف کننده‌های منابع تجدید پذیر و تجدید ناپذیر طبیعی است که تأثیرات مهمی بر محیط زیست زمین دارد.

استخراج، فرآوری، تولید، حمل و استفاده از مصالح ساختمانی تأثیرات محیطی قابل توجهی بر محیط زیست دارد. این تأثیرات در غالب دو پارامتر اصلی انرژی نهفته و دی اکسید کربن تولیدی قابل بررسی است. تحقیقات صورت گرفته نشان داده است که ۸۲ تا ۸۷ درصد از انرژی نهفته ساختمان مربوط به مصالح، ۶ تا ۸ درصد مربوط به حمل و ۶ تا ۹ درصد آن مربوط به انرژی مصرفی در سایت است. در تحقیق دیگری که در زمینه اندازه‌گیری انرژی نهفته ساختمان صورت گرفته است مشخص گردید که تا ۷۵ درصد از

1- Kyoto Protocol

2- Montreal Protocol

انرژی نهفته ساختمان مربوط به بخش‌های خارج از سایت و مربوط به مصالح است. لذا در صورت استفاده از مصالح با انرژی بالاتر میزان انرژی خارج از سایت نیز افزایش می‌یابد.

اندازه‌گیری انرژی مصرفی فاز بهره‌برداری ساختمان، اندازه‌گیری انرژی نهفته ساختمان امری پیچیده و وقت گیر است. با وجود تحقیقات صورت گرفته در این مورد، هنوز روشی اثبات شده برای محاسبه دقیق انرژی نهفته ساختمان وجود ندارد و علاوه بر این در فرآیند اندازه‌گیری انرژی نهفته، نوسان‌های قابل توجهی در بسیاری از پارامترها وجود دارد.

با گسترش مباحث علمی پیرامون مفهوم توسعه پایدار و راههای دستیابی به آن به مرور این مفهوم وارد عرصه ساخت و ساز گردید و مفهوم ساخت پایدار را ایجاد کرد. ساخت و ساز پایدار را می‌توان به عنوان گونه‌ای از تولید با مدیریت پاسخگو در برابر برداشت کارا و بهره‌ورانه از منابع و قواعد زیست محیطی دانست. به بیان بهتر ساخت و ساز پایدار گونه‌ای از کاربرد توسعه پایدار در ارتباط با صنعت ساختمان است. صنعت ساختمان نیز مجموعه‌ای از تولید، توسعه، برنامه ریزی، ساخت، تغییر، نگهداری محیط مصنوع را در بر می‌گیرد و شامل تمامی تولید کنندگان مصالح ساختمانی و استفاده کنندگان ساختمان‌ها می‌شود. به این ترتیب ساخت و ساز پایدار را می‌توان به عنوان زیرمجموعه‌ای از توسعه پایدار در نظر گرفت که مسائلی مانند برنامه ریزی مالی و فیزیکی، طراحی، سازماندهی، انتخاب مصالح، بازیافت و به حداقل رساندن پسماند ها را در بر می‌گیرد.

همانطور که در ارتباط با توسعه پایدار سه حوزه اصلی اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی در ذیل مفهوم پایداری در توسعه بیان گردیده است. در بررسی ساخت و ساز پایدار نیز می‌توان سه حوزه پایداری محیطی، اقتصادی و اجتماعی را در نظر گرفت که هر کدام به تنهایی نیاز به بررسی دقیق داشته و قابل تحلیل در فازهای مختلف عمر ساختمان با رویکردهای فنی، سازه‌ای در مقیاس جزئی و کلی است بعلاوه ارتباط آنها با یکدیگر و تاثیرشان بر یکدیگر نیز قابل بررسی و ارزیابی می‌باشد که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

### ■ امکان ارزیابی پایداری محیطی در چرخه عمر

برای ایجاد سامانه ساختمانی پایدار، نخست می‌بایست فرآیند طراحی بگونه‌ای اصلاح شود که معیارهای پایداری در همان فاز طراحی نیز در نظر گرفته شوند. برای دستیابی به

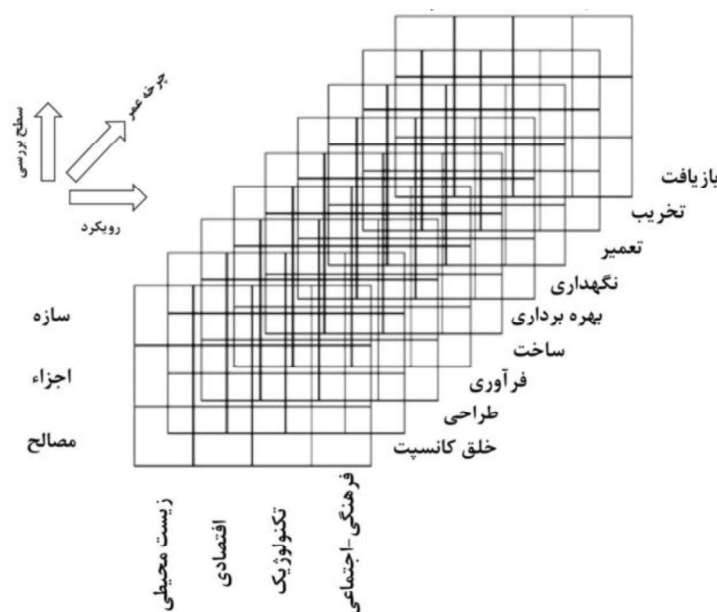
طراحی پایدار می بایست راه حل‌های خلاقانه ای در مواجهه با مسائل فنی ساختمان ارائه کرد. در ارائه این راهکارها توجه به تاثیر محیطی آنها نیز می بایست در نظر گرفته شود. از این میان تنها روشهایی موفقیت آمیز خواهند بود که با بکارگیری آنها هزینه کمتر، حفظ انرژی و مواد طبیعی، آلوده کنندگی کمتر در عین ارتقاء سطح سلامتی و آسایش بیشتر در فضای داخل حاصل آید. اما به منظور تدوین راهکارهایی جهت دستیابی به طراحی پایدار مانند رویارویی با هر مسئله دیگری ابتدا می بایست طراحی ساختمان را به بخشهای تشکیل دهنده آن تقسیم نمود و با اتخاذ تدابیری در جهت بهبود طراحی هر یک از بخشها در نهایت سامانه ساختمانی بهتری را ایجاد کرد. به این منظور هر سامانه ساختمانی را از نقطه نظر طراحی به بخشهای مشخص تقسیم می کنیم.

به این ترتیب می توان گفت که طراحی پایدار از طریق پیوستگی معماری با مهندسی مکانیک، الکترونیک و سازه بدست می آید. به عبارت دیگر ساختمان پایدار زمانی حاصل خواهد شد که در کنار توجه به معماری و سازه و مصالح و همچنین تناسبات، نور، رنگ و فرم به عنوان عناصر زیربنایی زیبایی شناختی در فرآیند معماری به مسائل و نکات بلند مدتی مانند محیط، اقتصاد و جامعه نیز توجه شود.

از میان بخشهای مختلف، پوسته بنا را می توان قابل اندازه گیری ترین بخش ساختمان در ارتباط با طراحی معماری دانست. منظور از پوسته بنا جداره های خارجی و جداکننده های داخلی است. در این تعبیر فونداسیون، سازه، سقفها و دیوارهای داخلی و خارجی به همراه بازشو ها را می توان عناصر تشکیل دهنده پوسته بنا قلمداد کرد. برای درک بهتر موضوع به نمودار ارائه شده در شکل ۱ مراجعه شود. در این نمودار سه محور اصلی در نظر گرفته شده و شامل محور طول عمر ساختمان، سطوح بررسی در ساختمان و رویکرد مطالعه هر بخش است. در هر محور نیز می توان فاکتورهای متعددی را تبیین نمود. با نگاهی به این نمودار می توان دریافت که پایداری ساختمان در حوزه های زیست محیطی، اقتصادی، تکنولوژیکی، فرهنگی و اجتماعی قابلیت بررسی بر اساس اجزا تشکیل دهنده ساختمان و در فازهای مختلف طول عمر ساختمان را دارا می باشد. لذا ملاحظه می شود که پایداری ساختمان پدیده ای پیچیده و دارای ابعادی گسترده است و دستیابی به پایداری فرآیندی است که محصول تقاطع پارامترهای این سه محور است. اما برای حصول پایداری می بایست این پارامترهای متعدد را در بخش های کوچک تر و محدودتر تقسیم بندی کرده و مطالعه

نمود. به این ترتیب پایداری ساختمان با تمام پیچیدگی، به مقوله ای قابل مطالعه، اندازه گیری، ارزیابی و اصلاح تبدیل می شود.

علاوه بر این لازم به ذکر است که آن بخش از طول عمر ساختمان که موضوعیت قابل توجهی در این بازه زمانی دارد مربوط به بخش تولید ساختمان می باشد. چراکه در فاز نگهداری، تا کنون تحقیقات بسیاری انجام گرفته و معیارهای صرفه جویی در مصرف انرژی در دوران بهره برداری نیز تهیه و تدوین شده و در حال اجرا می باشد.



شکل ۱- پارامترهای موجود در بررسی پایداری صنعت ساختمان

اما فاز تولید و تخریب ساختمان به اندازه کافی مورد مطالعه قرار نگرفته و به دلیل اهمیت بسیار، نیازمند بررسی و تدوین استانداردها و آیین نامه های مخصوص بخود است.

## تعاریف، اصول، مبانی نظری

تا کنون تعاریف مختلفی از توسعه پایدار ارائه شده است که برخی از مهم ترین آنها را جهت ورود به بحث پایداری در ساخت و ساز مطرح می نماییم. براساس سمینار اس-ای-جی-

ای<sup>۱</sup> توسعه پایدار مرهون تامین نیازهای انسان از طریق پیشرفت همزمان تکنولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی در عین حفظ منابع زمین است. در تعریف دیگری که مجمع حمایت از توسعه پایدار در بریتانیا ارائه داده است توسعه پایدار، فرآیندی معرفی شده است که طی آن افراد استعدادهای خود را بارور نموده و کیفیت زندگی را به گونه‌ای افزایش می‌دهند که بطور همزمان محافظت لازم از منابع پشتیبان طبیعی انجام گیرد. در نگاهی دیگر توسعه پایدار به عنوان موضوعی چند وجهی در ارتباط با حوزه‌های محیط زیست، صنعت، اقتصاد، تکنولوژی، سیاست و رسانه در نظر گرفته می‌شود. در تعریف دیگری، توسعه پایدار در ارتباط با تضمین کیفیت بهتری از زندگی برای همگان در نسل حاضر و نسلهای آینده است که این هدف با بکارگیری عوامل زیر قابل دستیابی می‌باشد.

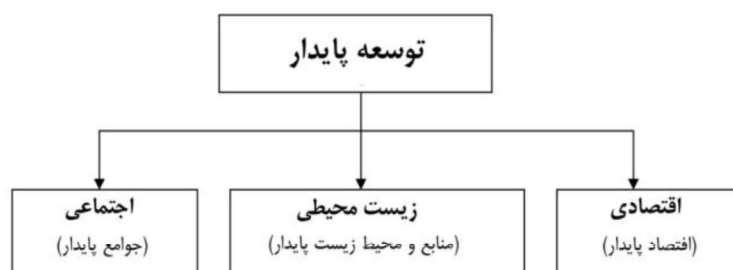
- توسعه اجتماعی بر اساس شناخت نیازهای همه افراد
- حفاظت موثر از محیط
- برداشت محتاطانه از منابع طبیعی
- حفظ نرخ رشد اقتصادی و اشتغال در سطح بالا و ثابت

تعریف نسبتاً معروف دیگری که از توسعه پایدار ارائه شده است مربوط به کمیسیون جهانی محیط زیست و توسعه (WCED)<sup>۲</sup> می‌باشد. در این تعریف که در سال ۱۹۸۳ برای نخستین بار بیان شد توسعه پایدار گونه‌ای از توسعه معرفی شده است که طی آن نیازهای نسل کنونی بدون تاثیر منفی در توانایی نسل آینده برای تامین نیازهایشان برآورده می‌شود.

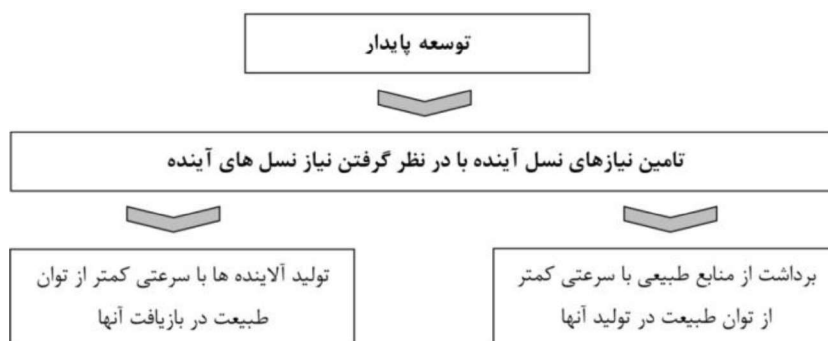
آن چه از تعاریف ارائه شده می‌توان دریافت، ماهیت چند وجهی توسعه پایدار است که اصلی‌ترین جنبه‌های این توسعه را می‌توان در بخش اجتماعی، اقتصادی و محیطی خلاصه نمود. با چنین رویکردی می‌توان توسعه پایدار را حاصل واقعیتی برخاسته از سه عنصر پایداری اجتماعی، پایداری اقتصادی و پایداری محیطی دانست. به بیان دیگر زمانی که توسعه در این حوزه‌های سه گانه بصورت همزمان حاصل گردد می‌توان اعلام نمود که توسعه پایدار ایجاد شده است.

<sup>۱</sup>- SAGE (Sustainability and the Global Environment)

<sup>۲</sup>- WCED (UN-sponsored World Commission on Environment and Development)



شکل ۲- حوزه های سه گانه توسعه پایدار  
با توجه به تعاریف ارائه شده در خصوص مفهوم توسعه پایدار می توان مفهوم توسعه پایدار را بصورت زیر خلاصه نمود.



شکل ۳- تعریف و نتایج حاصل از مفهوم توسعه پایدار  
به این ترتیب برداشت محتاطانه و محدود از منابع طبیعی تجدید ناپذیر را می توان بعنوان مهمترین اصل در تولید ساختمان عنوان نمود. این منابع علاوه بر سوخت های فسیلی شامل معادن و مواد خام اولیه مورد استفاده برای تولید ساختمان می باشد. در صورت ادامه روند کنونی ساخت و ساز در کشور که نتیجه آن ساختمان هایی با طول عمر کوتاه و غیر بهینه از نظر مصرف انرژی می باشد هر دو اصل ذکر شده در بالا نقض خواهد شد. چراکه از یک سو منابع بصورت بی رویه و غیر محتاطانه مورد استفاده قرار می گیرد و از سوی دیگر بدلیل طول عمر کوتاه آنها با فرا رسیدن فاز پایان عمر ساختمان و تخریب، توده قابل توجهی از مصالح غیر قابل بازیافت به طبیعت تحمیل می گردد که در صورت افزایش دو راه بهره برداری از ساختمان ها و به تعویق افتادن هر چه بیشتر فاز تخریب، مقادیر کمتری از نخاله های ساختمانی به طبیعت تحمیل خواهد شد.



## روش ارزیابی چرخه عمر LCA<sup>۱</sup>

ارزیابی یک محصول در تمام چرخه عمر، روشی است که در سال های اخیر برای ارزیابی، اندازه گیری و اصلاح محصولات ساخته دست انسان بخصوص در حوزه تولیدات صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. شاید بتوان نقطه آغاز شکل گیری این روش ارزیابی محصول را در سال ۱۹۹۶ یافت. در این سال ارزیابی چرخه عمر بعنوان ابزاری برای مدیریت زیست محیطی استفاده شد. در ابتدای دهه ۱۹۹۰ میلادی نیز مطالعات مشابهی برای ارزیابی چرخه عمر صورت گرفت که نقطه شروع آنرا می توان در صنایع دفاع ایالات متحده مشاهده نمود. البته در این مورد، ارزیابی هزینه های کارکرد و نگهداری سامانه ها مورد نظر بوده است. به همین دلیل از آن با نام "حسابرسی چرخه عمر"<sup>۲</sup> و یا "هزینه یابی چرخه عمر"<sup>۳</sup> یاد شده است.

اولین کاربرد ارزیابی چرخه عمر بصورت مدرن کنونی توسط شرکت کوکاکولا و برای ارزیابی چرخه عمر قوطی های نوشابه از تولد تا مرگ صورت گرفت. در آن زمان تاکید بر ارزیابی پسماند حاصل از محصولات بوده و تاثیرات زیست محیطی و مصرف انرژی مورد توجه نبوده است. اولین تجربه ارزیابی چرخه عمر در بریتانیا نیز با انتشار کتاب راهنمای تجزیه و تحلیل انرژی صنایع تالیف بوستند و هنکک<sup>۴</sup> شکل گرفت.

جمعیت شیمی و مسمومیت شناسی محیطی<sup>۵</sup> (SETAC) در سال ۱۹۹۲ دو کارگاه آموزشی برگزار نمود. کارگاه اول درباره ارزیابی تاثیر چرخه عمر و کارگاه دوم درباره کیفیت اطلاعات بود. شاخه آمریکای شمالی و اروپای این جمعیت در سال ۱۹۹۳ میلادی در پرتغال تشکیل جلسه داد و خطوط کلی ارزیابی چرخه عمر را با عنوان "شناسه های عملی"<sup>۶</sup> تدوین نمود.

بغیر از این جنبش، گروهها و محققان دیگری در اسکاندیناوی مشغول به تدوین و انتشار چهارچوب های خود در این زمینه بودند. این محققان سوئدی، فنلاندی، دانمارکی و نروژی در نهایت راهنمای ارزیابی چرخه عمر کشورهای شمال اروپا را تدوین نمودند. برنامه زیست

1- LCA (Life Cycle Assessment)

2- Life-Cycle Accounting

3- Life-Cycle Costing

4- Boustead and Hancock

5- Society of Environmental Toxicology and Chemistry

1- Code of Practice

محیطی سازمان ملل متحد نیز نشریه ای با عنوان "ارزیابی چرخه عمر چیست و چگونه باید انجام شود؟" را تدوین نمود. آژانس زیست محیطی اروپا نیز راهنمایی برای رویکردها، تجارب و منابع اطلاعاتی تدوین نمود. پس از آن، تلاش های متعددی برای استاندارد سازی روش ارزیابی چرخه عمر صورت گرفت و اتحادیه استانداردهای کانادا نیز اولین راهنمای ملی ارزیابی چرخه عمر را با عنوان Z-760 برای ارزیابی محیطی چرخه عمر در سال ۱۹۹۴ میلادی منتشر نمود. اما شناخته شده ترین استانداردهای منتشر شده در این ارتباط از سوی موسسه بین المللی استانداردسازی ISO<sup>۱</sup> صورت گرفت:

- استاندارد مدیریت محیطی ۱۴۰۴۰، قواعد و چهارچوب ها (۱۹۹۷)

- استاندارد مدیریت محیطی ۱۴۰۴۱، تعیین هدف و تحلیل جزء به جزء (۱۹۹۸)

- استاندارد مدیریت محیطی ۱۴۰۴۲، ارزیابی تاثیر چرخه عمر (۲۰۰۰)

- استاندارد مدیریت محیطی ۱۴۰۴۳، تفسیر چرخه عمر (۲۰۰۰)

استاندارد ایزو سری ۱۴۰۴۰ نخستین قوانین و چهارچوب ها را برای کنترل تاثیرات مخرب زیست محیطی تولیدات صنعتی تصویر نمود. از دیدگاه این استاندارد برای کنترل تاثیرات مخرب محیطی می بایست عوامل تاثیرگذار مانند میزان انرژی مصرفی، هزینه، نیروی کار، میزان مصرف آب، میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و سایر عوامل را از زمان استخراج مواد و فرآوری آنها تا زمان تولید محصول و پس از آن در طول عمر آن مورد اندازه‌گیری قرار داد. در پایان عمر، ممکن است محصول تخریب شود و یا بازیافت گردد. در انتها با جمع‌بندی این عوامل در تمام طول عمر یک محصول می‌توان میزان کارایی و بازدهی محیطی آنرا اندازه‌گیری و اصلاح نمود.

ارزیابی چرخه عمر، روشی برای بررسی میزان بار زیست محیطی حاصل از فرآیندها و یا تولید محصولات از لحظه تولد تا مرگ است. این روش از سال ۱۹۹۷ میلادی در عرصه ساختمان مورد استفاده قرار گرفت و از آن به بعد نیز به عنوان ابزاری مهم برای ارزیابی ساختمان‌ها شناخته شده‌است.

روش LCA ابزار مناسبی در اختیار قرار می دهد که به وسیله آن میتوان تأثیرات محیطی ساختمان را از زمان تولید تا تخریب مورد ارزیابی و اندازه گیری قرارداد. این ارزیابی تمام چرخه عمر یک محصول را در بر می گیرد. این چرخه از استخراج و فرآوری مواد خام اولیه، تولید، حمل، توزیع، مصرف، مصرف مجدد، نگهداری، بازیافت و بازگشت به طبیعت را شامل می شود. بر اساس تعریف ارائه شده از سوی سازمان ایزو: "ارزیابی چرخه عمر روشی برای ارزیابی زوایای محیطی و پتانسیل تأثیر یک محصول بوسیله تدوین روش بررسی ورودی و خروجی سامانه مربوط به یک محصول، ارزیابی پتانسیل تأثیرات محیطی و تفسیر نتایج حاصل از فازهای ارزیابی محیطی و بررسی جزء به جزء است و معمولاً بعنوان ابزاری کمکی تحلیلی در تصمیم گیری استفاده می شود."

همانطور که گفته شد استاندارد ایزو سری ۱۴۰۴۰ شرح کاملی از نحوه استفاده از این روش برای ارزیابی چرخه عمر ارائه داده است. برای ارزیابی چرخه عمر محصول به روش ارزیابی چرخه عمر می بایست مراحل مشخصی را دنبال نمود. این فرآیند را می توان در چهار مرحله اصلی مختلف دسته بندی کرد: در مرحله اول هدف و روش عمل در بررسی مشخص می گردد که خود دارای چهار بخش جزئی تر است. در مرحله دوم بررسی وضعیت موجود در دو بخش صورت می گیرد. در مرحله سوم ارزیابی تأثیر محصول در سه بخش انجام می شود و در مرحله نهایی تفسیر یافته های حاصل از سه مرحله قبلی در دو بخش صورت می گیرد. در جدول (۱) این چهار مرحله و بخش های جزئی تر آنها نشان داده شده اند.

جدول ۱- ساختار بررسی استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰

مراحل ارزیابی چرخه عمر	اقدامات اولیه
تعریف هدف و روش	تعریف واحد عملکردی
	تعریف محدوده سامانه
	اطمینان از کیفیت داده ها
	تعریف چرخه عمر
بررسی جزء به جزء	جمع‌آوری داده ها
	اندازه‌گیری ورودی ها و خروجی ها
ارزیابی تاثیر	دسته‌بندی داده ها
	تعیین موقعیت داده
	تعیین ضرائب اهمیت در ابعاد مختلف
تفسیر نتایج	جمع بندی اطلاعات
	بازنگری

### ▪ ضرورت ارزیابی چرخه عمر در ساختمان

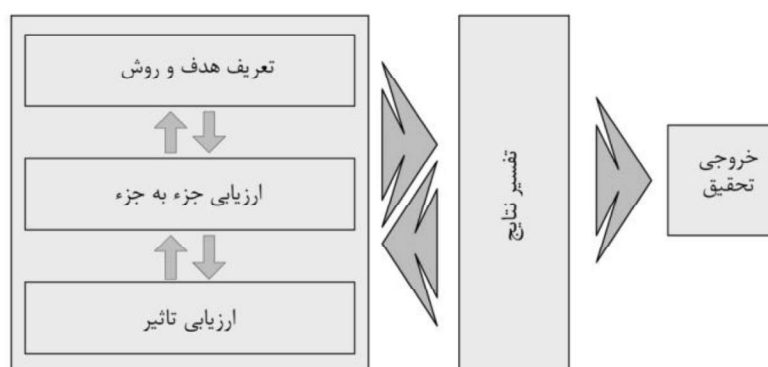
با وجود آنکه ارزیابی چرخه عمر از دهه ۱۹۹۰ میلادی بصورت گسترده در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار گرفته‌است، اما در مقایسه با سایر صنایع مانند صنایع مهندسی و زیرساخت ها از توسعه کمتری بهره مند بوده است. در نتیجه بکارگیری این روش توسط تمامی عوامل صنعت ساختمان، دولت ها، طراحان و محققان صنعت ساختمان تحت تاثیر تولید پایدار ساختمان و راهکارهای زیست محیطی قرار گرفته اند. شاید میزان کمتر توسعه این روش در صنعت ساختمان، تنها بدلیل پیچیدگی ساختمان بعنوان محصول مورد ارزیابی نیست بلکه عوامل دیگری نیز در آن دخیل بوده اند که از این میان به موارد زیر می‌توان اشاره نمود:

اولین عامل را می‌توان طول عمر قابل توجه ساختمان نسبت به سایر محصولات دانست. بطور متوسط بازه طول عمر ساختمان ۵۰ سال در نظر گرفته می شود که همین امر ارزیابی تولید تا تخریب محصول را دشوار می نماید. از سوی دیگر در طول این دوره طولانی، امکان

ایجاد تغییرات قابل توجهی در فرم و عملکرد ساختمان، محصول را با تغییرات جدی مواجه خواهد نمود تا جایی که ممکن است در طول عمر، این محصول بطور کلی تغییر نماید. بسیاری از تاثیرات محیطی ساختمان نه در فاز تولید بلکه در دوره بهره‌برداری بروز می‌نمایند که میزان این تاثیرات با انتخاب دقیق و هوشمندانه مصالح و روش‌های ساخت قابل کنترل خواهد بود.

ساختمان پدیده‌ای متشکل از عوامل مختلفی است که لزوماً ارتباطی با یکدیگر ندارند. به همین دلیل تدوین استاندارد برای دربر گرفتن تمامی این عوامل از تولیدکنندگان مصالح تا طراحان، دارای دشواری‌های خاص خود است. به همین دلیل در بسیاری موارد بصورت محلی و ملی، اقداماتی برای یکسان سازی و یکپارچه سازی راهکارهای این روش تدوین شده‌است، اما اصول و سرخط‌ها همواره ثابت خواهند بود.

همانطور که گفته شد استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰ چهار مرحله اصلی را برای ارزیابی چرخه عمر معرفی نموده است. ارتباط میان این چهار بخش در شکل (۲-۵) نشان داده شده‌است.



شکل ۴- ساختار ارزیابی چرخه عمر

### ▪ تعریف هدف و روش

این قسمت اولین مرحله از ارزیابی چرخه عمر است. این مرحله قدمی بحرانی در تعریف هدف تحقیق است و سوالات تحقیق را مشخص می‌نماید. در این مرحله محقق، اقدام به تعریف اهداف و محدوده مطالعه می‌نماید. این مرحله شامل موارد مهم دیگری مانند تعریف کلی محدوده سامانه بررسی، تعریف واحد عملکردی، کیفیت اطلاعات و سایر محدودیت‌ها

نیز می شود. تمامی این موارد می بایست که در همین مرحله بصورت کاملاً دقیق و واضح تعریف شوند چراکه تعیین کننده جهت و معیارهای تحقیق هستند.

بر اساس استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰، هدف هر ارزیابی چرخه عمر بیان کننده کاربرد و دلایل انجام بررسی است و شامل محصول مورد مطالعه، کاربردهای آن، واحد عملکردی، محدوده سامانه، فرآیند مربوط، دسته‌بندی های انتخاب شده برای تاثیر، روش ارزیابی تاثیر، اطلاعات مورد نیاز، مفروضات، محدودیت ها، کیفیت اطلاعات اولیه مورد نیاز و نوع مرور اطلاعات و گزارش مورد نیاز از مطالعه می شود.

هدف کلی از ارزیابی چرخه عمر در مورد ساختمان، به حداقل رساندن تاثیرات زیست محیطی در کل چرخه عمر است. ساختمان‌ها همواره بعنوان محصولات پیچیده شناخته شده اند، دلیل این پیچیدگی را می توان در فرآیند تولید جستجو نمود. به دلیل پیچیدگی صنعت ساختمان و بازه عمر طولانی و تغییرات احتمالی آن در طول این دوره که غالباً در ابتدای تولد محصول خیلی مشخص نیست، تمامی مراحل ارزیابی چرخه عمر بر تعریف هدف و روش تحقیق تاثیرگذار خواهند بود. به همین دلیل، نحوه بررسی ساختمان پس از هر فاز می بایست مورد بازبینی مجدد قرار گیرد.

### ▪ بررسی جزء به جزء

مرحله دوم از ارزیابی چرخه عمر، بررسی جزء به جزء محصول است. این مرحله شامل جمع‌آوری و محاسبه اطلاعات بوده و بدلیل اینکه مبنای مطالعه محسوب می گردد دارای اهمیتی کلیدی است. این مرحله به دلیل تاثیر احتمالی جمع‌آوری اطلاعات بر بازنویسی و یا اصلاح محدوده سامانه، با مرحله تعریف هدف و روش نیز مرتبط است. کامل بودن اطلاعات در این مرحله بسیار تعیین کننده است چراکه فقدان برخی از اطلاعات می تواند به تغییر روش منجر شود. از سوی دیگر انتخاب منبع درست اطلاعات نیز به دلیل تاثیر بر کیفیت تحقیق، حائز اهمیت است. علاوه بر صحت و یا عدم صحت اطلاعات مورد استفاده و محل انجام تحقیق نیز در تعیین بانک اطلاعاتی مورد استفاده تاثیر گذار است و در هر کشور می توان بانک های اطلاعات محلی و ملی را مورد استفاده قرار داد. در تعریف هدف و روش تحقیق، در دسترس بودن اطلاعات دقیق و با کیفیت نیز می بایست در نظر گرفته شود.

انرژی نهفته مصالح و اجزاء ساختمانی، حمل مصالح و اجزاء به کارگاه، مصالح مصرفی و پسماند مصالح و حمل پسماند از جمله مواردی است که اطلاعات آنها در این مرحله مورد نیاز است. فقدان بانک اطلاعاتی کامل یکی از موانع اصلی در افزایش مقبولیت ارزیابی چرخه عمر در سطح بین المللی است. در حال حاضر پایگاه های اطلاعاتی مختلفی از جمله پایگاههای عمومی، دانشگاهی، تجاری و صنعتی تدوین شده است. اطلاعات موجود در هر یک از این پایگاه ها با یکدیگر متفاوت اند و دلیل آن نحوه محاسبه و جمع بندی اطلاعات است. عدم شفافیت در نحوه محاسبات پایگاه های اطلاعاتی، مقایسه آنها با یکدیگر را دشوار می نماید. به این ترتیب می توان دریافت که کیفیت نتایج ارزیابی چرخه عمر با دقت و کیفیت ارزیابی جزء به جزء مرتبط است.

## ▪ ارزیابی تاثیر

استاندارد ایزو ۱۴۰۴۲، استاندارد بین المللی تدوین شده برای ارزیابی تاثیر چرخه عمر<sup>۱</sup> (LCIA) است. در این استاندارد ارزیابی تاثیر به معنای بررسی محصول از نقطه نظر تاثیرات محیطی بوسیله تعریف پارامترهای اندازه گیری و تحلیل نتایج حاصل از آنهاست. پارامترهای آشکارساز محیطی در تحقیقات مختلف، متفاوت بوده اند. برخی از متداول ترین آشکارسازهای محیطی مورد استفاده، پتانسیل گرمایش زمین، اسیدی سازی و مسمومیت هواست. میزان اهمیت و روش اندازه گیری هر یک از این موارد در هر نقطه مکانی، متفاوت است. برای مثال شاخص گرمایش زمین، معیاری با دامنه تاثیر بین المللی است. به بیان دیگر گازهای گلخانه ای گرم کننده زمین با انتشار در هر نقطه از زمین، با تاثیر بر جو به عنوان عنصری مشترک برای تمام زمین، تمامی نقاط دیگر را تحت تاثیر قرار می دهد. اما شاخص اسیدی سازی آب در هر نقطه بصورت محلی عمل می نماید. لذا در تعیین مرجع و روش اندازه گیری این شاخص ها و همچنین ضریب تاثیر آنها می بایست مختصات محلی مورد توجه قرار گیرد.

## ▪ تفسیر نتایج

این مرحله بعنوان آخرین مرحله از فرآیند ارزیابی چرخه عمر شناخته می شود. در این مرحله نتایج حاصل از ارزیابی جزء به جزء پس از خلاصه شدن، جمع بندی شده و نتایج

<sup>۱</sup> Life Cycle Inventory Assessment

اولیه از آنها استخراج خواهد شد. بر اساس این نتایج، توصیه ها و تصمیمات با توجه به تعاریف هدف و روش تدوین خواهد شد.

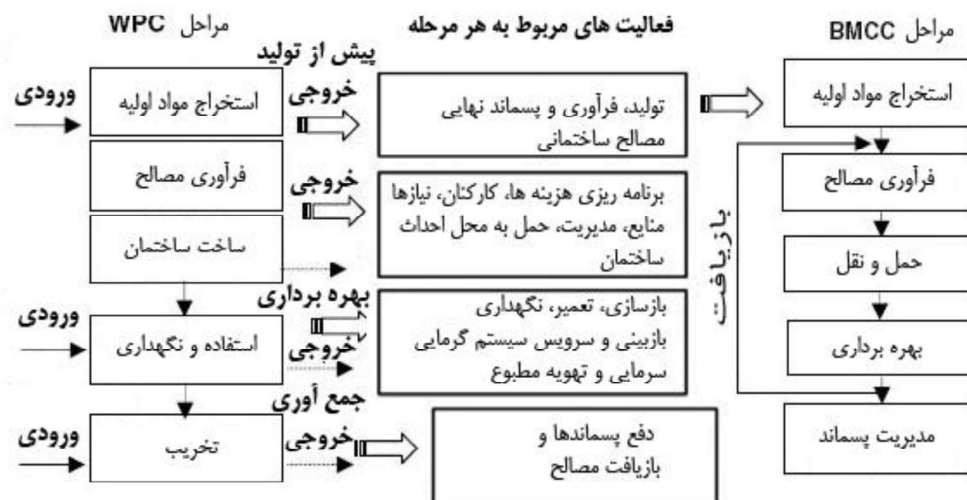
با بررسی حدود بیست و پنج مورد تحقیقی که بین سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ میلادی در حوزه ارزیابی ساختمان به روش ارزیابی چرخه عمر انجام شده است مشاهده می شود که در نحوه بررسی چرخه عمر محصول، دو رویکرد مختلف در بکارگیری این روش قابل تفکیک می باشد. روش اول، روش ترکیب اجزاء و مصالح ساختمانی<sup>۱</sup> BMCC است. روش دوم فرآیند کامل ساخت<sup>۲</sup> WPC نامیده می شود و طی آن تمامی مراحل ساخت مورد ارزیابی قرار می گیرد و مرحله بازیافت در نظر گرفته نشده است. در حدود ۶۰ درصد بررسی ها که با روش LCA انجام گرفته با رویکرد ترکیب اجزاء و مصالح و تنها ۴۰ درصد با رویکرد فرآیند کامل ساخت بوده است که این خود نشان دهنده جامع تر و کاربردی تر بودن رویکرد ترکیب اجزاء و مصالح است. در شکل (۲-۶) مراحل مختلف این دو رویکرد ارائه شده است.

بر اساس بررسی ها، بیشترین تاثیر در افزایش تاثیرات محیطی محصولات مربوط به شاخص انرژی است. در نتیجه کمترین تاثیرات محیطی مربوط به محصولاتی است که کمترین میزان مصرف انرژی را دارا هستند. اصلی ترین شاخص ها برای رسیدن به این هدف عبارتند از:

- استفاده از مواد با انرژی نهفته پایین
- فرآیند تولید بهینه
- کاهش هزینه های توزیع
- کمترین میزان انرژی بهره برداری برای واحد عملکردی
- فاز پایانی ساده و با آلاینده گی پایین

1- Building and Materials Components Combinations  
2- Whole Process Construction





شکل ۵- ساختار بررسی LCA با دو رویکرد WPC و BMCC

### ▪ معیارها و راهکارهای دستیابی به ساخت پایدار

همانطور که پیش تر گفته شد برای نخستین بار در سال ۱۹۹۶ میلادی استاندارد برای ارزیابی و اصلاح روش‌های ساخت تدوین شد. استانداردهای پایداری محیطی ساختمان که در سطح بین‌المللی شناخته شده و قابل استناد می‌باشند همگی از این سال به بعد و غالباً توسط سازمان استاندارد سازی تولید صنعتی تدوین شد. اکنون با توجه به معیارهای ارائه شده در استانداردها می‌توان تاثیر قابل توجه صنعت ساختمان بر محیط زیست را بخوبی درک نمود. اما نخست باید دانست که ساختمان مورد تایید این استاندارد چه ویژگی‌هایی دارد و این ویژگی‌ها با چه روش‌هایی به دست می‌آید؟

ساختمان سازگار با محیط زیست یا ساختمان سبز مجموعه‌ای است که در انتخاب مکان، طراحی و ساخت آن استراتژی‌هایی برای کاهش تاثیر مخرب بر محیط در نظر گرفته شده‌است. برای بوجود آمدن این استراتژی‌ها می‌بایست رویکرد مناسبی برای طراحی معماری ساختمان اتخاذ شود. از این رو برای ایجاد معماری پایدار می‌بایست تمامی منابع مورد نیاز مانند مصالح، سوخت، نیروی انسانی و غیره به خوبی با هدف پایداری ساخت در فرآیند طراحی معماری در نظر گرفته شده باشند. شاید بتوان گفت که ساخت یک

ساختمان سازگار با محیط مستلزم حل هوشمندانه تناقضات بسیاری در تصمیم گیری در فاز طراحی معماری است. چراکه هر تصمیمی که در فرآیند طراحی اتخاذ شود تاثیر مستقیم یا غیرمستقیم بصورت کوتاه مدت یا بلند مدت بر محیط وارد خواهد نمود. با توجه به اهمیت تاثیر ساخت بر محیط می توان شاخص های اساسی ساختمان های سازگار با محیط را در مقایسه با ساختمان های معمولی به این شکل بیان نمود.

- کاهش مصرف انرژی و برداشت از منابع جهت ساخت
- کاهش انرژی مصرفی در طول عمر
- به حداقل رساندن آلودگی خارجی و تاثیر بر محیط اطراف
- به حداقل رساندن آلودگی داخلی و تاثیر بر سلامت افراد

با چنین تدابیری ساختمان حاصل، تاثیر بسیار مثبتی بر سلامتی محیط، حفظ منابع و محیط زیست خواهد داشت. به این ترتیب ساختمان سبز یا ساختمان سازگار با محیط علاوه بر ملاحظات در نظر گرفته شده در ساخت به روش های قبلی مانند توجه به اقتصاد، کارایی، دوام و زیبایی موارد دیگری را در ارتباط با محیط، منابع و سلامت ساکنان مورد توجه قرار خواهد داد:

- کاهش قرارگیری انسان در معرض مواد مضر
- حفاظت از منابع تجدید ناپذیر و مصالح کمیاب
- کاهش تاثیر محیطی در طول عمر ساختمان با توجه به میزان انرژی و مصالح مصرفی
- بهره برداری از انرژی ها و مصالح تجدید شونده که میزان تولید پایدار و ثابتی داشته باشند
- حفظ و نگهداری هوای سالم، آب، خاک، گونه های گیاهی و جانوری
- در نظر گرفتن امکانات حمل و نقل پیاده یا با دوچرخه و یا وسایل نقلیه سبک تا سنگین

کشورهای مختلف بخصوص کشورهای صنعتی مطالعات گسترده ای را در ارتباط با دستیابی به این اهداف انجام داده اند و برنامه های راهبردی و عملی مختلفی را در پیشبرد

این اهداف تدوین و اجرایی کرده اند. از جمله در انگلستان با مطالعه ساختار پیشنهادی در آجندا برنامه ای برای ساخت پایدار و سازگار با محیط تهیه شده است. از دید این برنامه که توسط دولت تهیه و تدوین شده، ساخت و ساز پایدار مجموعه ای از فرآیندهایی است که در آن یک صنعت سودمند (صنعت ساختمان) محیط مصنوعی را خلق می کند که:

- باعث ارتقاء کیفیت زندگی و ارضاء مصرف کنندگان می شود.
- امکان تغییر برای تامین نیاز مصرف کنندگان در آینده را دارا می باشد.
- مجموعه ای مطلوب از نظر اجتماعی و محیطی را ایجاد و حفاظت می نماید.
- بهره وری برداشت از منابع را به حداکثر می رساند.

### انرژی نهفته ساختمان

تا کنون روش های مختلفی برای اندازه گیری میزان مصرف انرژی چرخه عمر ساختمان ارائه شده است. اهمیت این موضوع با توجه به سهم ۴۰ درصدی ساختمان ها از کل انرژی مصرفی جهان آشکار می گردد. اطلاعات بدست آمده از آمارهای رشد روز افزون جمعیت بیان کننده این نکته است که جمعیت ۶/۵ میلیارد نفری زمین در سال ۲۰۰۵ میلادی به ۹ میلیارد نفر در سال ۲۰۳۰ میلادی خواهد رسید. این رشد شدید نشان دهنده گسترش قابل توجه فعالیت های ساختمانی و در نتیجه نیاز فزاینده به مصرف انرژی و تولید مصالح در دهه های آینده است.

به این ترتیب صنعت تولید ساختمان بتنهایی یکی از اصلی ترین مصرف کنندگان انرژی الکتریکی و گرمایی حاصل از سوزاندن سوخت های فسیلی در جهان است. در سال ۲۰۰۴ میلادی ساختمان ها بتنهایی ۳۷٪ از کل انرژی مصرفی در سال را بخود اختصاص دادند و پیش بینی می شود که این عدد در سال ۲۰۳۰ میلادی به ۴۲٪ افزایش پیدا کند.

همانطور که پیش تر هم گفته شد مصرف بالای انرژی تنها بخشی از نتایج مخرب صنعت ساختمان است و تاثیرات مخرب محیطی ناشی از مصرف انرژی و گازهای گلخانه ای حاصل از آن بعنوان اصلی ترین عامل تغییرات آب و هوایی شناخته می شود. به همین دلیل در کنار بازنگری جدی در شیوه های ساخت و ساز، روش های مهندسی و تکنیک های ساخت و تولید مصالح از نقطه نظر مصرف انرژی نیز می بایست اصلاح گردد.

انرژی مصرفی چرخه عمر ساختمان شامل بخش انرژی نهفته و انرژی دوره بهره‌برداری است:

#### ۱- انرژی نهفته<sup>۱</sup> (EE):

این بخش شامل تمام انرژی مورد استفاده برای تولید مصالح، انرژی مصرفی در کارگاه ساختمانی و تخریب و بازیافت ساختمان است.

#### ۲- انرژی بهره‌برداری<sup>۲</sup> (OE):

این بخش شامل تمامی انرژی‌های مورد نیاز برای نگهداری محیط داخلی ساختمان مانند سرمایش، گرمایش، روشنایی و وسایل برقی درون ساختمان است.

تا چندی پیش تنها انرژی دوران بهره‌برداری ساختمان مورد توجه محققان بود، چراکه سهم قابل توجهی از کل انرژی مصرفی چرخه عمر را بخود اختصاص می‌دهد. اما در سال‌های اخیر با توجه به تولید وسایل برقی با بازدهی انرژی بسیار بالا و رواج استفاده از مصالح عایق حرارتی در ساختمان میزان انرژی دوره بهره‌برداری به شکل چشمگیری کاهش یافته و در نتیجه توجهات به سمت انرژی نهفته ساختمان متمایل شده‌است.

دینگ<sup>۳</sup> معتقد است که انرژی تولید اجزاء ساختمان تا ۷۵٪ از کل انرژی نهفته را بخود اختصاص می‌دهد که این عدد نتیجه رشد استفاده از مصالح با انرژی تولید بالاتر است. به این ترتیب در سطح جهان توجه روزافزونی به افزایش بازدهی انرژی ساختمان در هر دو بخش انرژی بهره‌برداری و انرژی نهفته معطوف شده‌است.

اندازه‌گیری انرژی دوره بهره‌برداری را ساده و غیر پیچیده می‌داند. با این حال وی اندازه‌گیری انرژی نهفته را موضوعی پیچیده و وقت گیر بیان نموده است. بعلاوه در حال حاضر هنوز هیچ روش دقیق و ثابتی با مقبولیت عمومی برای اندازه‌گیری انرژی نهفته وجود ندارد و به همین دلیل تفاوت‌های بسیار زیادی در اعداد حاصل از روش‌های مختلف اندازه‌گیری انرژی نهفته دیده می‌شود.

1- Embodied Energy

2- Operating Energy

3- Ding

## ■ تعاریف انرژی نهفته

در ساخت، تخریب و بازیافت ساختمان مقادیری از انرژی در مراحل مختلف استفاده می‌شود، این مراحل شامل استخراج مواد اولیه، حمل، تولید، نصب و ساخت، تخریب، تفکیک و بازیافت است که مجموع این مقادیر انرژی، انرژی نهفته نامیده می‌شود. هر چه مقدار این انرژی بیشتر باشد متعاقباً میزان گازهای گلخانه‌ای حاصل از تولید و مصرف آنها نیز افزایش خواهد یافت.

عبارت انرژی نهفته مفهومی است که تا بحال تعاریف متعدد و متنوعی از آن ارائه شده‌است اما با این حال هنوز تعریف دقیق و واضحی از آن در دست نیست.

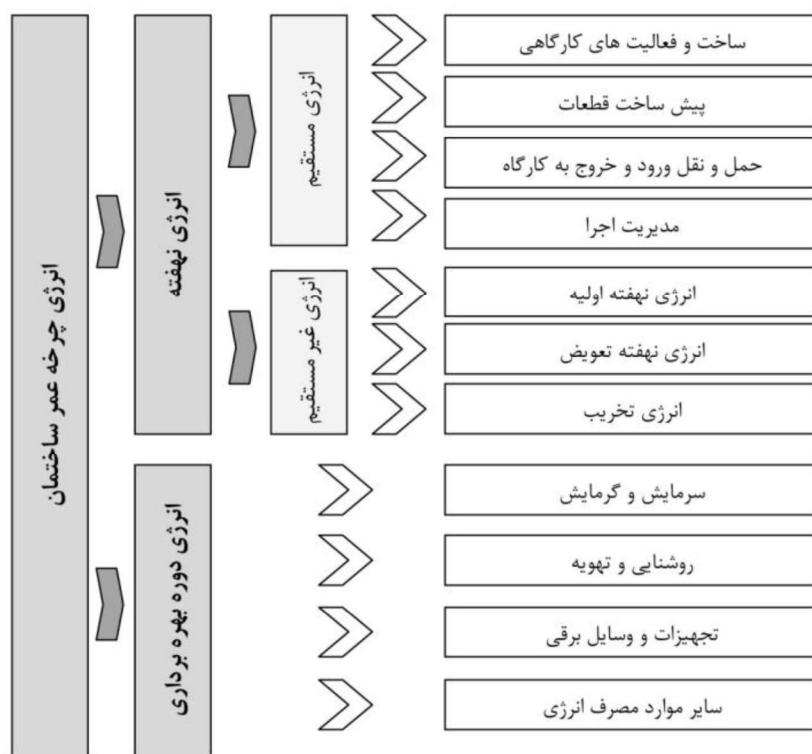
انرژی نهفته به عنوان کل انرژی مورد نیاز برای تولید ساختمان است که شامل انرژی‌های مصرفی مستقیم در برپا نمودن و ساخت ساختمان در محل کارگاه و همچنین انرژی‌های غیر مستقیم مانند انرژی بکار رفته در تولید مصالح و اجزاء ساختمانی است.

انرژی نهفته به صورت تمامی انرژی‌های مستقیم و غیر مستقیم بکار رفته برای تولید یک محصول بیان می‌شود که این انرژی‌ها از بازنگری معکوس خط تولید از محصول تا مواد اولیه قابل پیگیری هستند.

در تعریف دیگری، انرژی نهفته بعنوان انرژی مورد نیاز برای ساخت بعلاوه تمامی انرژی‌های مورد نیاز برای تولید مصالح مانند حفاری، استخراج، تصفیه، تولید، حمل و نصب بیان شده‌است.

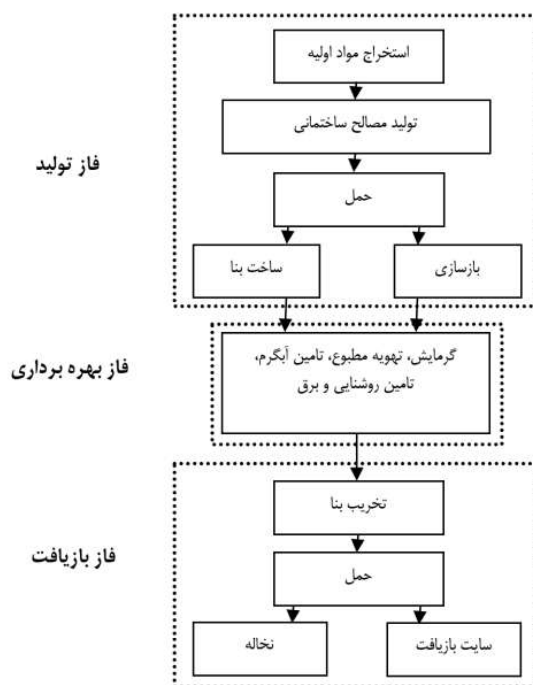
تعریف نسبتاً قابل فهم دیگری نیز از انرژی نهفته وجود دارد که توسط محققان بسیاری مورد تایید قرار گرفته‌است:

"انرژی نهفته بیانگر انرژی مورد استفاده طی استخراج و فرآوری مواد اولیه، حمل مواد اولیه، تولید اجزاء و مصالح ساختمانی و انرژی مورد استفاده در تمام فرآیندهای فاز تولید و تخریب یک ساختمان است."



شکل ۶- مدل سازی انرژی نهفته

انرژی نهفته را می توان بعنوان انرژی مصرف شده در فاز تولید ساختمان تعریف نمود. این انرژی دربرگیرنده انرژی تمام مصالح بکار رفته در ساختمان و انرژی مورد نیاز برای نصب آنها و برپا نمودن ساختمان و همچنین بازسازی ساختمان است. انرژی نهفته مصالح نیز حاصل جمع انرژی مصرفی برای استخراج مواد اولیه، فرآوری مواد و حمل آنها به محل کارگاه ساختمانی است.



شکل ۷- سامانه بخش بندی آنالیز انرژی چرخه عمر ساختمان

انرژی نهفته ساختمان را می‌توان به دو بخش انرژی اولیه و انرژی تعویض تقسیم بندی نمود:

#### - انرژی نهفته اولیه<sup>۱</sup>:

انرژی اولیه یک ساختمان را می‌توان بصورت انرژی مورد نیاز برای نخستین نوبت ساخت بنا تعریف نمود که بصورت زیر قابل محاسبه است:

$$EE_i = \sum m_i M_i + E_c$$

در این رابطه:

<sup>۱</sup> - Initial Embodied Energy

$$EE_i = \text{انرژی نهفته اولیه} \quad m_i = \text{مقدار مصرفی از ماده } i$$

$$M_i = \text{مقدار انرژی نهفته ماده } i \text{ در واحد اندازه گیری}$$

$$E_c = \text{انرژی مصرفی در کارگاه برای ساخت ساختمان}$$

### - انرژی نهفته تعویض<sup>۱</sup>:

مصارف متنوعی در ساخت یک ساختمان مورد استفاده قرار می گیرند. طول عمر برخی از آنها از طول دوره بهره‌برداری ساختمان کمتر است. به این ترتیب طی دوره بهره‌برداری، این دسته از مصارف نیاز به تعویض خواهند داشت. بعلاوه انرژی لازم برای انجام تعمیرات و تعویض مصارف نیز می بایست در محاسبه انرژی نهفته در نظر گرفته شود. انرژی بکار رفته در مصارف مورد تعویض در ساختمان بصورت زیر بیان می شود:

$$EE_r = \sum m_i M_i [(L_b / L_{mi}) - 1]$$

در این رابطه:

$$EE_c = \text{انرژی نهفته تعویض} \quad L_b = \text{طول عمر ساختمان} \quad L_{mi} = \text{طول عمر ماده (i)}$$

### - انرژی بهره‌برداری<sup>۲</sup>:

انرژی بهره‌برداری، نشان دهنده میزان انرژی مورد نیاز برای حفظ کیفیت فضای داخلی بصورت روزمره است که شامل انرژی مصرفی سامانه تهویه مطبوع، آبگرم مصرفی، سامانه روشنایی و وسایل برقی مورد استفاده در ساختمان است. انرژی بهره‌برداری تابع عوامل متعددی مانند میزان آسایش مورد نیاز در فضای داخلی، شرایط آب و هوایی، برنامه زمانی استفاده از ساختمان است و به بصورت زیر بیان می شود:

$$O_e = E_{OA} L_b$$

در این رابطه:

1- Recurring Embodied Energy  
2- Operating Energy



$O_e =$  انرژی بهره‌برداری  $E_{OA} =$  انرژی مصرفی سالانه  $L_b =$  طول عمر ساختمان

### - انرژی تخریب<sup>۱</sup>:

انرژی مورد استفاده در پایان عمر ساختمان برای تخریب، تفکیک، حمل نخاله ها و بازیافت آنها را انرژی تخریب می نامند که بصورت زیر بیان می شود:

$$DE = E_D + E_r$$

در این رابطه:

$O_e =$  انرژی تخریب  $E_D =$  انرژی تخریب بنا  $E_r =$  انرژی حمل نخاله ها

### - انرژی چرخه عمر<sup>۲</sup>:

بر اساس روابط ذکر شده در بالا، انرژی چرخه عمر ساختمان از حاصل جمع تمامی انرژی‌های فوق بدست خواهد آمد:

$$LCE = EE_i + EE_r + OE + DE$$

تا کنون مطالعات گسترده ای در ارتباط با انرژی مصرفی ساختمان انجام گرفته‌است. اما بیشتر آنها انرژی چرخه عمر ساختمان را مورد توجه قرار داده اند و انرژی نهفته فاز ساخت کمتر بصورت مستقل مورد توجه و ارزیابی بوده است. بعلاوه همانطور که ملاحظه گردید تعاریف مختلفی از انرژی نهفته وجود دارد که تفاوت اصلی در آنها ناشی از تفاوت در تعریف محدوده سامانه در بر گیرنده انرژی نهفته است.

---

1- Demolition Energy  
2- Life Cycle Energy (LCE)

## ▪ ارتباط انرژی چرخه عمر، انرژی بهره‌برداری و انرژی نهفته

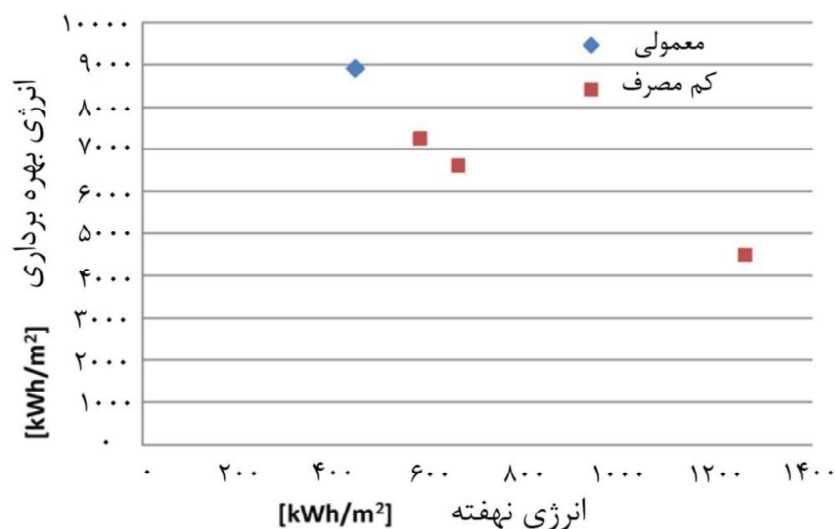
در ارتباط با تاثیر متقابل انرژی نهفته و انرژی بهره‌برداری نظرات مختلفی مطرح شده‌است و همواره لزوم توجه به تاثیر متقابل هر یک بر دیگری از سوی محققان مختلف یادآوری شده‌است، چراکه پدیده انرژی مصرفی ساختمان بصورت یک سامانه کلی است که اجزاء مختلفی مانند انرژی نهفته تولید، انرژی تعویض، انرژی بهره‌برداری و انرژی بازیافت را در خود جای داده‌است.

افزایش بازدهی انرژی در یک ساختمان به معنای تاثیر در کاهش برآیند کل این نیروهاست. به این ترتیب در صورتیکه برخی از راهکارهای کاهشی در یک مورد تاثیر معکوس بر موارد دیگری داشته باشد، توجه، اندازه‌گیری و کنترل تاثیرات متقابل اجزاء تشکیل دهنده رفتار انرژی یک ساختمان بر یکدیگر و تاثیر هر یک بر کل انرژی چرخه عمر ساختمان از اهمیت بالایی برخوردار است.

در ساختمان‌های با مصرف انرژی کم و بازدهی انرژی بالا، طراحی بصورتی صورت می‌گیرد که تا بیشترین میزان ممکن از هدر رفت انرژی جلوگیری شود، یکی از راهکارهای افزایش بازدهی انرژی در ساختمان‌ها استفاده از مصالح عایق حرارت است. معمولاً کاهش اتلاف انرژی در ساختمان با افزایش میزان انرژی نهفته همراه است که علت آن میزان بالاتر انرژی نهفته مصالح عایق حرارت نسبت به مصالح معمولی است.

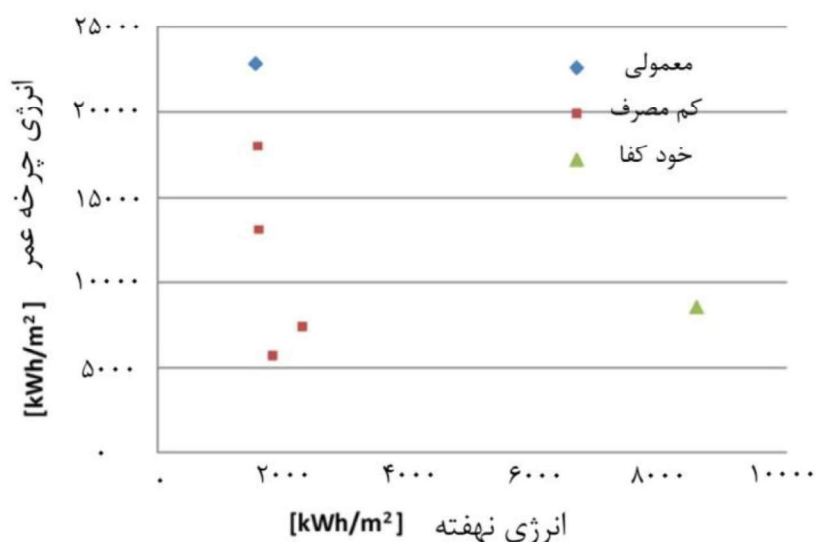
کاهش انرژی دوره بهره‌برداری، منجر به کاهش انرژی چرخه عمر در ساختمان خواهد شد تا جایی که امروزه در برخی ساختمان‌ها میزان انرژی دوره بهره‌برداری تا حداکثر ممکن کاهش یافته و به صفر رسیده است. این ساختمان‌ها را ساختمان‌های با مصرف انرژی صفر<sup>۱</sup> یا بی نیاز از انرژی<sup>۲</sup> نامیده‌اند. در این ساختمان‌ها سوخت مصرف نمی‌شود و انرژی الکتریکی مورد نیاز نیز از طریق تجهیزات تعبیه شده در ساختمان از انرژی خورشیدی و باد تامین می‌شود.

<sup>۱</sup>- Zero Energy Building  
<sup>۲</sup>- Self-sufficient Building



شکل ۸- ارتباط میان انرژی نهفته و انرژی بهره‌برداری

در یک تحقیق، شش ساختمان مختلف از دیدگاه مصرف انرژی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این میان یک ساختمان با مصرف انرژی معمولی، چهار ساختمان با مصرف انرژی کم و یک ساختمان بی نیاز از انرژی قرار دارند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که انرژی چرخه عمر ساختمان‌های بی نیاز از انرژی از ساختمان‌های کم مصرف بیشتر است. در ساختمان‌های با مصرف انرژی صفر، تمامی توجهات معطوف به بکارگیری مصالح و تکنیک‌هایی است که ساختمان را از انرژی بی نیاز نماید. به همین دلیل میزان انرژی نهفته در مصالح و تجهیزات این نوع ساختمان‌ها بسیار بالاست. در چنین مواردی انرژی نهفته بحدی بالاست که حتی گاهی از کل انرژی دوره بهره‌برداری ساختمان‌های کم مصرف نیز بیشتر است. به این ترتیب نتیجه می‌گیریم که ساختمان‌های بی نیاز از انرژی (خود کفا) لزوماً کمترین انرژی چرخه عمر را دارا نیستند.



شکل ۹ - ارتباط میان انرژی نهفته و انرژی چرخه عمر

همانطور که در شکل (۹) می‌توان دید در ساختمانی بی نیاز از انرژی که مورد بررسی قرار گرفته‌است، میزان انرژی نهفته به قدری زیاد است که از کل انرژی چرخه عمر ساختمان کم مصرف بیشتر است. نتیجه این بررسی‌ها را می‌توان به این صورت توصیف نمود که کاهش انرژی دوره بهره‌برداری و تکنیکها و مصالح مورد نیاز آن تا جایی بهینه خواهد بود که افزایش انرژی نهفته حاصل از آن از صرفه جویی حاصل از بهینه‌سازی دوره مصرف بیشتر نباشد چراکه در غیر اینصورت برآیند این اقدامات موجب افزایش انرژی چرخه عمر خواهد شد. تعبیر دیگر این واقعیت لزوم بسیار بالای توجه به انرژی نهفته ساختمان است. تا چندی پیش تنها انرژی مصرفی دوره بهره‌برداری مورد اندازه‌گیری بوده است حال آنکه تحقیقات جدید نشان دهنده آنست که صرف توجه به انرژی دوره بهره‌برداری نه تنها تضمین کننده کاهش انرژی کل چرخه عمر نیست بلکه کاهش انرژی بهره‌برداری بدون توجه به تاثیرات آن بر انرژی نهفته، ممکن است حتی باعث افزایش انرژی کل چرخه عمر ساختمان شود.

از دیدگاه دیگری انرژی نهفته ساختمان را می‌توان به دو بخش اصلی تقسیم نمود:

#### ۱- انرژی‌های مستقیم:

انرژی مستقیم شامل انرژی‌های مصرفی تمامی فعالیت‌های درون و بیرون کارگاه ساختمانی مانند ساخت، پیش ساخت قطعات، حمل و مدیریت است. این موارد شامل مصرف انرژی

برای مونتاژ مصالح و اجزاء درون کارگاه و پیش ساختگی اجزاء بیرون کارگاه و حمل اجزاء تولید شده خارج از کارگاه و مصالح مورد استفاده درون کارگاه است.

## ۲- انرژی‌های غیر مستقیم:

این بخش غالباً مربوط به انرژی مرتبط با مصالح ساختمانی است. استخراج مواد، فرآوری مواد، تولید مصالح، حمل به محل کارگاه، مصالح مورد نیاز برای مرمت و تعمیر ساختمان و انرژی مورد نیاز برای بازیافت مصالح و تمامی انرژی‌های الکتریکی و مکانیکی و یا احتراقی مورد استفاده در تمام این مراحل را می‌توان جزء این بخش منظور نمود.

### ▪ افزایش اهمیت انرژی نهفته

همانطور که پیشتر گفته شد، تا چندی پیش بیشترین توجه در مورد انرژی مصرفی ساختمان‌ها به دلیل سهم قابل توجه از کل انرژی چرخه عمر ساختمان به دوران بهره‌برداری اختصاص داشت. اما تحقیقات اخیر این نسبت را تغییر داده بطوریکه توجه به انرژی نهفته روز به روز در حال افزایش است. انرژی نهفته تنها یکبار در ساختمان مصرف می‌گردد در حالی که انرژی بهره‌برداری در کل دوران عمر ساختمان مصرف می‌شود. از سوی دیگر امروزه با توجه به تولید دستگاه‌های برقی کم مصرف و تولید مصالح عایق بصورت فراوان، کاهش انرژی مصرفی دوره بهره‌برداری براحتی امکان پذیر شده‌است.

اما کاهش انرژی نهفته از طریق بکارگیری مصالح با چگالی انرژی کمتر قابل دستیابی خواهد بود. نتایج تحقیقات سازمان جمعیت تحقیقات صنعتی و علمی (CSIRO)<sup>۱</sup> میزان انرژی نهفته ساختمان‌های مسکونی در استرالیا را تا معادل پانزده سال انرژی مصرفی دوره بهره‌برداری اعلام نموده است. در تحقیق دیگری که توسط کرافورد<sup>۲</sup> و ترلور<sup>۳</sup> صورت گرفته میزان انرژی نهفته ساختمان‌ها در استرالیا را معادل مصرف انرژی سالیانه ساختمان در طول ۲۰ تا ۵۰ سال اندازه‌گیری نموده اند. افزایش اهمیت انرژی نهفته نه تنها تولیدکنندگان مصالح را به سوی تولید مصالح با انرژی نهفته کمتر متمایل نموده بلکه تأثیرات خود را بر طراحان و مدیران ساخت نیز آشکار خواهد نمود. چراکه تولید مصالح

<sup>۱</sup>-Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization

<sup>۲</sup>- Crawford

<sup>۳</sup>- Treloar

بتنهایی ۲۰٪ کل مصرف سوخت در دنیا را بخود اختصاص داده است که این عدد اهمیت بالای این موضوع در برنامه ریزی های استراتژیک ملی و جهانی را نشان می دهد.

### پارامترهای ارزیابی محیطی چرخه عمر ساختمان:

برای سنجش تأثیرات محیطی تولیدات صنعتی، از مجموعه ای از پارامترها و شاخص ها استفاده می شود که به ارزیابی چرخه عمر محصولات و فرآیندهای تولید کمک می کنند. این پارامترها جنبه های مختلف اثرات زیست محیطی، مصرف منابع و انتشار آلاینده ها را در بر می گیرند. برخی از مهم ترین پارامترهای سنجش تأثیرات محیطی تولیدات صنعتی عبارتند از:

#### ۱. انتشار گازهای گلخانه ای (Greenhouse Gas Emissions)

- معیار: میزان دی اکسید کربن ( $\text{CO}_2$ )، متان ( $\text{CH}_4$ )، اکسید نیتروژن ( $\text{N}_2\text{O}$ ) و سایر گازهای گلخانه ای منتشر شده.
- اندازه گیری: به طور معمول بر حسب تن  $\text{CO}_2$  معادل ( $\text{tCO}_2\text{e}$ ) اندازه گیری می شود.

#### ۲. مصرف انرژی (Energy Consumption)

- معیار: کل انرژی مصرفی در طول چرخه عمر تولید محصول، شامل انرژی های مستقیم و غیرمستقیم (مانند انرژی مورد نیاز برای تولید مواد اولیه).
- اندازه گیری: به طور معمول بر حسب مگاژول (MJ) یا کیلووات ساعت (kWh).

#### ۳. مصرف آب (Water Consumption)

- معیار: کل حجم آب مصرفی در فرآیندهای تولید.
- اندازه گیری: معمولاً بر حسب متر مکعب ( $\text{m}^3$ ) آب.

#### ۴. مصرف مواد اولیه (Raw Material Consumption)

- معیار: میزان مواد خام و منابع طبیعی مصرف شده در تولید.
- اندازه گیری: بر حسب تن یا متر مکعب.

#### ۵. تولید زباله و پسماند (Waste Generation)

- معیار: مقدار پسماندهای تولید شده در فرآیندهای صنعتی، شامل زباله‌های جامد، مایع و گاز.
- اندازه‌گیری: معمولاً بر حسب کیلوگرم یا تن.

#### ۶. آلودگی هوا (Air Pollution)

- معیار: مقدار انتشار آلاینده‌های هوا مانند دی‌اکسید گوگرد ( $SO_2$ )، اکسیدهای نیتروژن ( $NO_x$ )، ذرات معلق ( $PM$ )، ترکیبات آلی فرار ( $VOCs$ ).
- اندازه‌گیری: معمولاً بر حسب میلی‌گرم یا گرم بر متر مکعب یا تن برای کل انتشار.

#### ۷. آلودگی آب (Water Pollution)

- معیار: میزان آلاینده‌های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی وارد شده به منابع آبی.
- اندازه‌گیری: معمولاً بر حسب میلی‌گرم بر لیتر یا تن آلاینده.

#### ۸. آلودگی خاک (Soil Pollution)

- معیار: میزان آلاینده‌های ورودی به خاک ناشی از تولیدات صنعتی، مانند فلزات سنگین، مواد شیمیایی سمی و زباله‌های خطرناک.
- اندازه‌گیری: بر حسب میلی‌گرم یا گرم بر کیلوگرم خاک یا تن آلاینده.

#### ۹. شاخص پتانسیل اسیدی‌سازی (Acidification Potential)

- معیار: میزان انتشار مواد اسیدی مانند  $SO_2$  و  $NO_x$  که به اسیدی شدن باران و خاک کمک می‌کند.
- اندازه‌گیری: معمولاً بر حسب معادل‌های دی‌اکسید گوگرد ( $SO_2$ -eq).

#### ۱۰. پتانسیل اوتروفیکاسیون (Eutrophication Potential)

- معیار: میزان مواد مغذی مانند نیترات‌ها ( $\text{NO}_3$ ) و فسفات‌ها ( $\text{PO}_4$ ) که می‌توانند سبب رشد بی‌رویه جلبک‌ها و اوتروفیکاسیون منابع آبی شوند.

- اندازه‌گیری: بر حسب معادل‌های فسفات ( $\text{PO}_4\text{-eq}$ ).

#### ۱۱. پتانسیل تخریب لایه اوزون (Ozone Depletion Potential)

- معیار: میزان انتشار مواد مخرب لایه اوزون مانند کلروفلوئوروکربن‌ها (CFCs).

- اندازه‌گیری: بر حسب معادل‌های  $\text{CFC-11}$ .

#### ۱۲. استفاده از زمین (Land Use)

- معیار: میزان زمین‌های مورد استفاده برای استخراج منابع، ساخت‌وساز صنعتی و دفع زباله.

- اندازه‌گیری: بر حسب هکتار یا مترمربع.

#### ۱۳. پتانسیل ایجاد مه‌دود فتوشیمیایی (Photochemical Smog Potential)

- معیار: میزان انتشار ترکیبات آلی فرار (VOCs) و  $\text{NO}_x$  که به تشکیل مه‌دود فتوشیمیایی کمک می‌کنند.

- اندازه‌گیری: بر حسب معادل‌های اتیلن ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{-eq}$ ).

#### ۱۴. بازیافت و استفاده مجدد (Recycling and Reuse)

- معیار: نسبت موادی که می‌توانند در پایان عمر مفید خود بازیافت یا مجدداً استفاده شوند.

- اندازه‌گیری: بر حسب درصد وزنی یا کیلوگرم مواد بازیافتی.

ارزیابی تأثیرات محیطی تولیدات صنعتی نیازمند توجه به مجموعه‌ای از پارامترها است که هر کدام جنبه‌های مختلفی از اثرات تولید بر محیط زیست را بررسی می‌کنند. این پارامترها در کنار هم برای کاهش اثرات منفی و افزایش پایداری محیطی تولیدات صنعتی به کار می‌روند. امید است تا با ایجاد زیرساخت‌های لازم در ویرایش‌های آتی مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان بتوان بازه ارزیابی را از مدیریت انرژی دوره بهره‌برداری به مدیریت تمامی پارامترهای تأثیرات محیطی ساختمان در تمام چرخه عمر آن گسترش داد.