

"به نام خدا"

دانشگاه شریف

دانشکده مهندسی انرژی

انرژی نهفته

پروژه درس تحلیل سیستم‌های انرژی

استاد: دکتر رجایی قهنویه

بهمن ۱۴۰۰

تهیه کنندگان:

پریشان احمدی - ش.د: ۴۰۰۲۰۷۷۴۸

دانیال بنکداری - ش.د: ۴۰۰۲۰۵۹۸۵

فهرست مطالب

۱	مقدمه	۴
۲	مفاهیم	۷
۲-۱	انرژی در ساختمان	۷
۲-۲	تفسیر انرژی نهفته	۹
۲-۳	انرژی نهفته در مقابل انرژی عملیاتی	۱۰
۳	اهمیت انرژی نهفته	۱۲
۴	مدل سازی انرژی نهفته	۱۴
۵	روش های آنالیز انرژی نهفته	۱۵
۵-۱	آنالیز مبتنی بر فرآیند	۱۵
۵-۲	آنالیز داده/ستانده	۱۶
۵-۳	آنالیز ترکیبی	۱۷
۶	تنوع و ناهماهنگی	۱۸
۶-۱	تنوع و ناهماهنگی در انرژی نهفته	۱۸
۶-۱-۱	تنوع و ناهماهنگی در فهرست های انرژی نهفته	۱۸
۶-۱-۲	تنوع و ناهماهنگی در نتایج انرژی نهفته	۱۸
۶-۲	علل تنوع و ناهماهنگی در انرژی نهفته	۲۰
۷	انرژی نهفته و کربن نهفته	۲۵
۸	استراتژی های کاهش انرژی نهفته	۳۰
۹	شکاف های دانش و جهت گیری برای تحقیقات آینده	۳۱
۱۰	نتیجه گیری و جمع بندی	۳۳
۱۱	منابع و مراجع	۳۴

فهرست اشکال

- شکل ۱ روند تغییرات در جمعیت، تعداد خانوارها و واحدهای مسکونی جدید در ایالات متحده، بر اساس داده‌های اداره سرشماری ایالات متحده [۵] ۵
- شکل ۲ روند تغییرات در استفاده از انرژی در ایالات متحده و سهم بخش‌های مصرف نهایی در استفاده از انرژی اولیه ایالات متحده، بر اساس داده‌های اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده [۵] ۵
- شکل ۳ انرژی چرخه عمر [۳] ۷
- شکل ۴ سهم انرژی عملیاتی و نهفته در ساختمان‌های متفاوت [۳] ۱۱
- شکل ۵ سهم انرژی نهفته در انرژی دوره عمر ساختمان‌های مسکونی با سطوح مختلف بهره‌وری انرژی عملیاتی [۵] ۱۲
- شکل ۶ مدل‌سازی انرژی [۶] ۱۴
- شکل ۷ تفاوت مقدار انرژی نهفته در ساختمان‌های تجاری [۶] ۱۹
- شکل ۸ تفاوت مقدار انرژی نهفته در ساختمان‌های مسکونی [۶] ۱۹
- شکل ۹ مرزهای سیستم در دوره عمر مصالح ساختمانی [۶] ۲۰
- شکل ۱۰ تجزیه انرژی و کربن نهفته مواد [۷] ۲۸

۱ مقدمه

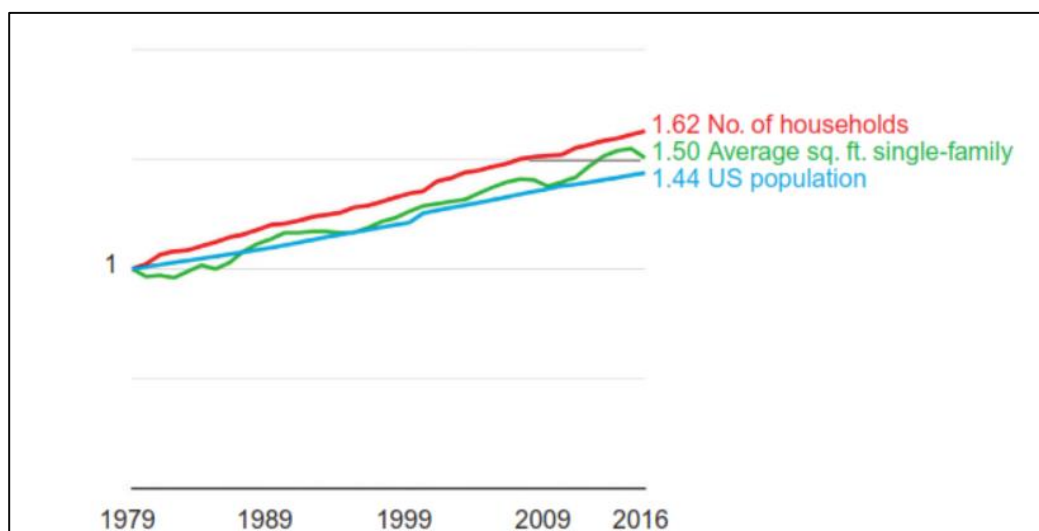
دهه ۱۹۷۰ از دید انرژی دهه مهمی در قرن بیستم بود. جنگ اعراب و اسرائیل، که در اکتبر ۱۹۷۳ رخ داد، باعث بحران جهانی نفت شد. این بحران با اعمال تحریم نفتی بر آمریکا و هم پیمانانش از سوی اعضای عرب سازمان کشورهای صادرکننده نفت (اوپک) آغاز شد. قیمت جهانی نفت تقریباً در حدود ۶ ماه چهار برابر شد و تولید نفت کاهش یافت. بحران نفت در سال ۱۹۷۳ باعث تغییراتی در سیاست‌های ایالات متحده و اجرای استانداردهای جدید در بهره‌وری انرژی شد. دومین بحران جهانی در دهه ۱۹۷۹ به دلیل کمبود ذخایر ملی انرژی توسط دولت آمریکا اعلام و محدودیت‌های دمایی برای ساختمان‌های غیرمسکونی ایجاد شد.

تقریباً ۳۹ سال پس از سال ۱۹۷۹، استفاده از انرژی‌های برپایه سوخت فسیلی هنوز در حال افزایش است که یادآور اهمیت آن در جامعه مدرن است. بررسی تغییرات جامعه ایالات متحده بین سال‌های ۱۹۷۹ و ۲۰۱۶ بر مبنای اداره آمار آمریکا نشان می‌دهد که ۴۴ درصد افزایش جمعیت، ۶۲٪ افزایش در تعداد خانوارها، و ۵۰٪ افزایش در متراژ خانه‌ها به ازای هر خانوار در این مدت رخ داده است (شکل ۱). با نگاهی به روند استفاده از انرژی، چهار دهه گذشته شاهد رشد در دو بخش عمده ساختمان و حمل و نقل (شکل ۲) بوده‌ایم [۵].

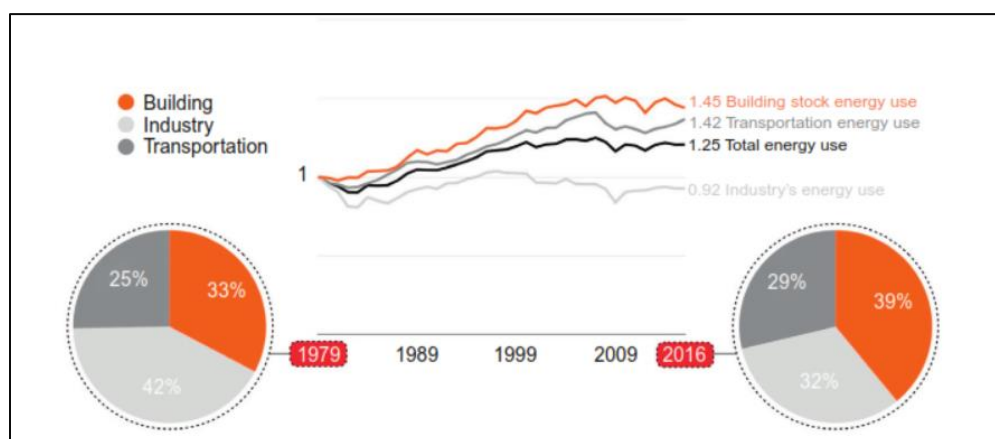
مصرف انرژی اولیه از ۱۱ درصد در سال ۱۹۴۹ به ۱۹ درصد در سال ۲۰۱۱ رسیده است در حالی که پیشرفت در دانش و فناوری نحوه ساخت و ساز ساختمان‌ها را بهبود بخشیده است ولی بهبود عملکرد انرژی در این بخش در مقایسه با صنعت هنوز کند است [۵].

صنعت ساخت‌وساز و صنایع همراه، یکی از بزرگ‌ترین بهره‌برداران منابع طبیعی، اعم از تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر، هستند که به شدت محیط زیست را تغییر می‌دهند. این صنعت دو پنجم سنگ خام جهانی، شن

و ماسه و یک چهارم از چوب خام را مصرف کرده و ۴۰ درصد از کل انرژی و ۱۶ درصد آب را سالانه مصرف می‌کند [۵].



شکل ۱ روند تغییرات در جمعیت، تعداد خانوارها و واحدهای مسکونی جدید در ایالات متحده، بر اساس داده‌های اداره سرشماری ایالات متحده [۵]



شکل ۲ روند تغییرات در استفاده از انرژی در ایالات متحده و سهم بخش‌های مصرف نهایی در استفاده از انرژی اولیه ایالات متحده، بر اساس داده‌های اداره اطلاعات انرژی ایالات متحده [۵]

از سال ۱۹۷۹، کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها یکی از دغدغه‌های اصلی جامعه پژوهشی در حوزه محیط زیست و ساخت و ساز بوده است. بیشترین تمرکز بر روی مرحله سکونت در ساختمان در دوره عمر^۱ آن و استفاده

^۱Life cycle

از انرژی عملیاتی^۱ بوده و موفقیت‌های بزرگی در این زمینه حاصل شده‌است. با این حال، به نظر می‌رسد که تغییراتی در الگوی محاسبه مصرف انرژی در دوره عمر ساختمان‌ها در جریان است؛ یعنی انرژی که در کل دوره عمر یک ساختمان از استخراج مواد خام برای تولید اجزا و سیستم‌ها، حمل و نقل، ساخت‌وساز، بهره‌برداری، نگهداری (بازسازی) و تخریب ساختمان‌ها مصرف می‌شود را در نظر بگیرند [۵].

این پژوهش نگاهی کلی از اطلاعات و دانش در زمینه مصرف انرژی دوره‌ی عمر ارائه می‌دهد و داده‌ها، روش‌ها، توسعه طراحی، و چالش‌های طراحی ساختمان‌ها با اتکا کمتر بر انرژی فسیلی و تأثیرات پایین بر محیط‌زیست را فراهم می‌کند [۵].

^۱ Operational energy

۲ مفاهیم

۱-۲ انرژی در ساختمان

اصطلاح "انرژی" اغلب برای انرژی عملیاتی استفاده شده و انرژی نهفته^۱ که جزء دیگری از دوره عمر انرژی است، تا حد زیادی نادیده گرفته شده است.

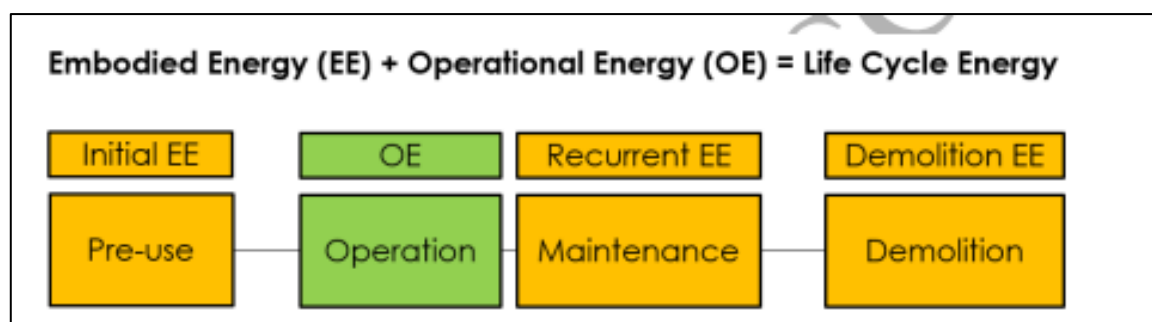
انرژی دوره عمر دو مولفه مهم دارد: انرژی عملیاتی (بهره برداری) و انرژی نهفته [۶]:

(۱) انرژی نهفته (EE) : در مواد ساختمانی و در طول تمام فرایندهای تولید، ساخت محل، و تخریب

نهایی و دفع زباله؛ و

(۲) انرژی عملیاتی (OE) : برای محیط داخلی از طریق فرایندهایی مانند گرمایش و سرمایش، نورپردازی

و وسایل و تجهیزات مورد استفاده مصرف شده است.



شکل ۳ انرژی چرخه عمر [۳]

تلاش‌های زیادی در گذشته صرف افزایش بهره‌وری ساختمان‌ها با توجه به انرژی عملیاتی (به عبارت دیگر

انرژی ای که در طول مرحله سکونت در ساختمان برای گرمایش، سرمایش، روشنایی، و سایر تجهیزات مصرف می‌شود.) شده‌است؛ معماران و مهندسان در حال حاضر دانش طراحی و تکنولوژی مورد نیاز برای توسعه

^۱ Embodied energy

ساختمان‌ها با مصرف انرژی عملیاتی کمتر را در اختیار دارند. طراحی و ارتقا فن‌آوری به تنهایی برای تضمین کاهش انرژی عملیاتی کافی نیست، رفتار ساکنین نیز باید برای طراحی و بهره‌برداری از ساختمان‌های کم مصرف در نظر گرفته شود. علاوه بر این، استانداردهای مرتبط با انرژی و معیارها و اهداف عملکردی در دهه‌های گذشته در کشورهای مختلف توسعه یافته اند تا ساخت ساختمان‌های کم مصرف آسان تر شود.

دومین بخش انرژی دوره عمر، انرژی نهفته است. افزایش بهره‌وری برای انرژی نهفته در سال‌های اخیر توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. انرژی نهفته، انرژی است که برای استخراج مصالح، تولید قطعات، ساخت، نگهداری، و تخریب ساختمان و همچنین همه حمل و نقل‌های مرتبط استفاده می‌شود. علی‌رغم پیشرفت‌های اخیر، تحقیقات در زمینه انرژی نهفته در مقایسه با انرژی عملیاتی کمتر توسعه یافته است و چالش‌های جدی در روش‌های تحلیلی، در دسترسی به داده‌ها و ابزارها و معیارهای وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرند. پرداختن به این محدودیت‌ها راه را برای تخمین‌های دقیق انرژی نهفته، و در نهایت انرژی دوره‌ی عمر ساختمان‌ها هموار می‌سازد.

تا همین اواخر، انرژی عملیاتی با توجه به سهم بزرگ خود در کل انرژی دوره‌ی عمر، به تنهایی در نظر گرفته می‌شد. با این حال، به دلیل ظهور تجهیزات کارآمد انرژی، پتانسیل برای مهار انرژی عملیاتی افزایش یافته و در نتیجه، تاکید بر گنجانیدن انرژی نهفته در مواد ساختمانی افزایش یافته است. تولید اجزای ساختمان (خارج از محل ساخت) ۷۵ درصد از کل انرژی نهفته ساختمان‌ها را در بر می‌گیرد. و این سهم انرژی به تدریج با افزایش استفاده از مواد انرژی بر در حال افزایش است. بنابراین تقاضای عظیمی برای سنجش عملکرد ساختمان‌ها به منظور کاهش مصرف انرژی عملکردی و نهفته ایجاد شده است [۶].

در سطح کلان، در دسترس بودن داده‌ها و اطلاعات از انرژی عملیاتی و نهفته به ایجاد یک اقتصاد انرژی که هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم را حساب می‌کند، کمک خواهد کرد.

۲-۲ تفسیر انرژی نهفته

ساختمان‌ها، با انواع مختلفی از مواد ساختمانی ساخته می‌شوند و هر ماده در طول مراحل تولید، استفاده و تخریب، انرژی مصرف می‌کند. این مراحل شامل استخراج مواد خام، حمل و نقل، تولید، مونتاژ، نصب و همچنین جداسازی، تخریب و تجزیه آن است. انرژی مصرفی در تولید "انرژی نهفته" ماده نامیده می‌شود که این انرژی دغدغه اصلی در مصرف انرژی و انتشار کربن است. مواد ساختمانی دارای انرژی نهفته بالا منجر به انتشار دی‌اکسید کربن بیشتری نسبت به مواد با انرژی‌های نهفته کم می‌شوند. [۷]

انرژی نهفته در ادبیات بر اساس مراحل دوره عمر ساختمان که در تعریف آن گنجانده شده است، به طور متفاوتی استفاده می‌شود. بیشتر رویکردها، انرژی را از منظر "گهواره به دروازه"^۱ بیان می‌کنند و آن را به عنوان مجموع انرژی که به طور مستقیم یا غیرمستقیم برای تولید مصالح ساختمانی مورد استفاده در یک ساختمان مصرف می‌شود، تخمین می‌زنند. این رویکرد از انرژی نهفته تنها مرحله پیش ساخت (یعنی استخراج مواد، ساخت محصولات، اجزا و سیستم‌ها) ساختمان را در بر می‌گیرد. برخی دیگر از رویکردها این تعریف را به "گهواره به محل"^۲ گسترش می‌دهند و مراحل پیش ساخت و ساخت و حمل و نقل مرتبط را در بر می‌گیرند [۷]. تعریف جامع تری از انرژی نهفته بر اساس مرزبندی "گهواره تا گور"^۳ است که نه تنها مراحل پیش ساخت و ساخت را شامل می‌شود، بلکه مراحل نگهداری، تخریب و دفع را نیز شامل می‌شود. این رویکرد انرژی نهفته را به عنوان کل انرژی مصرف شده در کل دوره عمر یک ساختمان، بدون احتساب انرژی عملیاتی، تعریف می‌کند. بر اساس این رویکرد، انرژی نهفته مجموع انرژی‌های نهفته اولیه، تکرار شونده و تخریبی است. انرژی نهفته اولیه، کل انرژی است که برای استخراج مواد خام، تولید و حمل و نقل محصولات و اجزاء و ساخت یک ساختمان مصرف می‌شود. انرژی نهفته مکرر انرژی است که برای نگهداری ساختمان و تعمیر یا جایگزینی مواد و اجزای آن لازم است [۶].

^۱ Cradle to gate

^۲ Cradle to site

^۳ Cradle to grave

به گفته میلر ، تعریف اصطلاح "انرژی نهفته" با توجه به تفاسیر مختلفی که توسط نویسندگان از آن ارائه شده است متفاوت است. کروتز انرژی نهفته را به عنوان «کل انرژی مورد نیاز در ساخت یک ساختمان، از جمله انرژی مستقیم مصرف شده در فرآیند ساخت و مونتاژ، و انرژی غیرمستقیم، که برای ساخت مواد و اجزای ساختمان‌ها لازم است، تعریف می‌کند. یکی دیگر از تعریف‌های ارائه شده توسط بوستد و هنکوک این است: «انرژی نهفته به عنوان انرژی مورد نیاز برای ساخت و ساز به اضافه انرژی تمام فرآیندهای بالادستی لازم برای مواد مانند استخراج، پالایش، ساخت، حمل و نقل، نصب تعریف می‌شود. به همین ترتیب، یک تعریف جامع تر، ارائه شده توسط جمعی از دانشمندان ، توضیح می‌دهد که «انرژی نهفته شامل انرژی مصرف شده در طول استخراج و پردازش مواد خام، حمل و نقل مواد خام اولیه، ساخت مواد و اجزای ساختمانی و مصرف انرژی برای فرآیندهای مختلف در طول ساخت و ساز و تخریب ساختمان است [۶]».

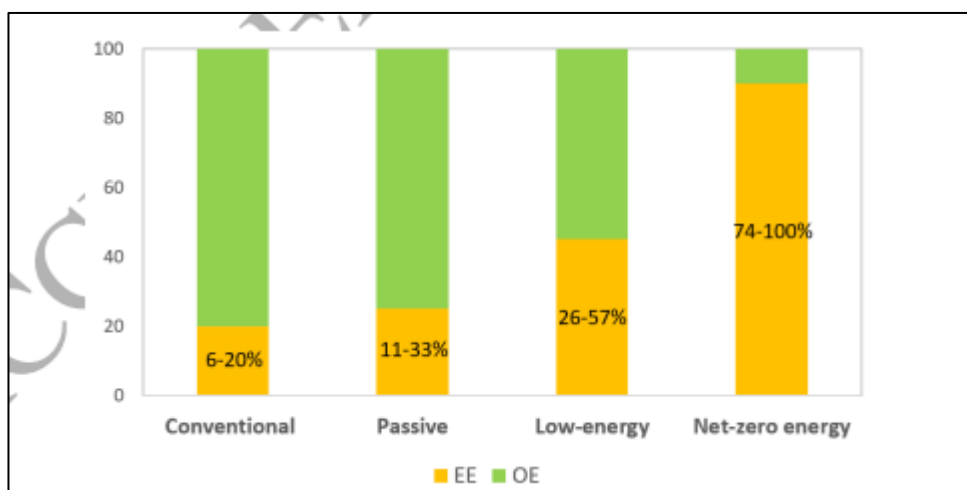
این تعاریف نشان دهنده اختلاف نظر در مورد مرزهای سیستم است که باید در آنالیز انرژی نهفته گنجانده شود.

۲-۳ انرژی نهفته در مقابل انرژی عملیاتی

انرژی عملیاتی در مرحله بهره برداری چرخه عمر ساختمان برای گرمایش محیط و آب ، سرمایش محیط ، روشنایی و راه اندازی تجهیزات و لوازم خانگی مصرف می‌شود انرژی عملیاتی ساختمان‌های تجاری و مسکونی در آمریکا سالانه ۴۱٪ انرژی اولیه را مصرف می‌کند برای مثال در ساختمان‌های مسکونی گرمایش (۴۵٪) ، گرمایش آب (۱۸٪) از مصارف کنندگان غالب انرژی هستند [۳] .

برای کاهش استفاده انرژی عملیاتی ساختمان‌ها طراحان ابتدا از طراحی پایه ساختمان و استراژی‌های غیر فعال برای کاهش تقاضای انرژی ساختمان استفاده می‌کنند و سپس به استفاده از سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی با بهره وری بالا روی آورند تا ساکنان با راحتی مواجه شوند

تحقیقات نشان می دهد یک رشد قابل ملاحظه ای در انرژی نهفته در مقایسه با انرژی عملیاتی در چرخه مصرف انرژی ساختمان اتفاق می افتد این مقدار رشد انرژی نهفته میتواند متفاوت باشد که تابعی از اقلیم و محل جغرافیایی و مقدار بهره وری انرژی عملیاتی می باشد



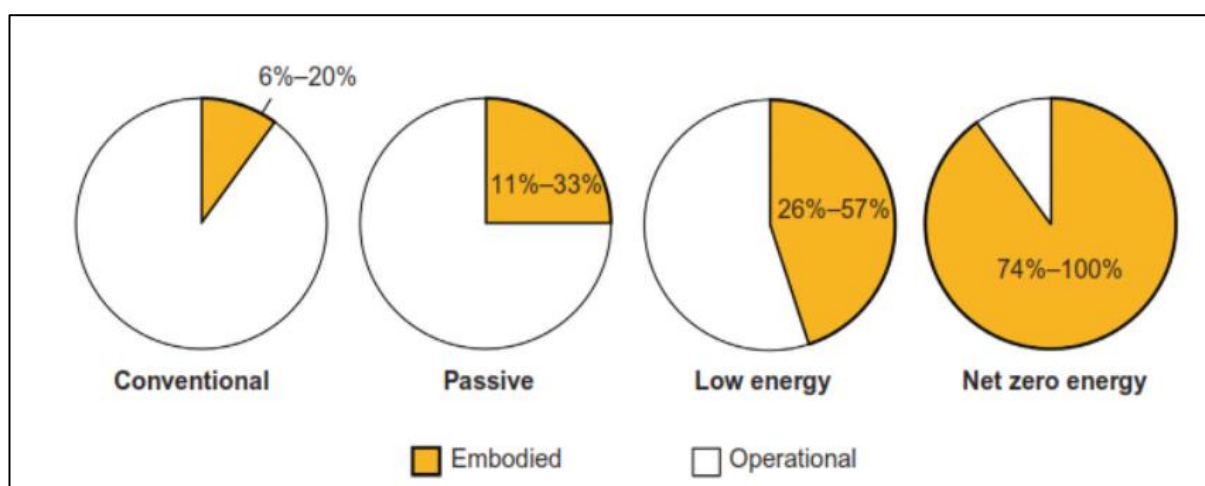
شکل ۴ سهم انرژی عملیاتی و نهفته در ساختمان های متفاوت [۳]

مقدار سهم انرژی تابعی از اقلیم است در مناطق معتدل و سرماخیز، انرژی عملیاتی در آنجا کمتر است اما در مناطق گرماخیز انرژی عملیاتی بالا است در حالی که انرژی نهفته مقدار کمتری از چرخه عمر مصرف انرژی را تشکیل می دهد.

۳ اهمیت انرژی نهفته

همانطور که قبلاً ذکر شد، در تلاش‌های عمده برای صرفه جویی در انرژی، انرژی عملیاتی ساختمان را بسیار بیشتر از انرژی نهفته آن فرض می‌کردند. با این حال، تحقیقات فعلی این فرض را رد کرده است و دریافته است که انرژی نهفته سهم قابل توجهی از کل انرژی دوره عمر را به خود اختصاص می‌دهد [۵]. انرژی نهفته در مرحله ساخت و ساز اولیه ساختمان صرف می‌شود، در حالی که انرژی عملیاتی در طول عمر موثر ساختمان صرف می‌شود. صرفه جویی در انرژی عملیاتی را می‌توان با وسایل کم مصرف و مواد عایق پیشرفته که به آسانی در دسترس هستند به طور بهینه تری انجام داد. تعداد رو به رشد لوازم خانگی با برچسب کم مصرف نشانگر یکی از عواملی است که می‌تواند انرژی عملیاتی ساختمان‌ها را در طول زمان کاهش دهد [۵].

تحقیق در مورد انرژی نهفته در سال‌های اخیر مورد توجه بیشتری قرار گرفته است، به ویژه به این دلیل که سهم انرژی نهفته در انرژی دوره عمر ساختمان در حال افزایش است، زیرا ساختمان‌ها با کارایی انرژی بالاتری ساخته می‌شوند. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، اهمیت انرژی نهفته می‌تواند به عنوان تابعی از سطح بهره‌وری انرژی عملیاتی ساختمان متفاوت باشد [۵].



شکل ۵ سهم انرژی نهفته در انرژی دوره عمر ساختمان‌های مسکونی با سطوح مختلف بهره‌وری انرژی عملیاتی [۵]

انرژی نهفته را فقط می‌توان با استفاده از مواد کم انرژی کاهش داد. تحقیقات سازمان تحقیقات علمی و صنعتی مشترک المنافع (CSIRO) نشان داده است که انرژی نهفته یک خانه متوسط در استرالیا تقریباً معادل

پانزده سال انرژی عملیاتی آن است. در استرالیا، انرژی نهفته موجود در یک ساختمان ۲۰ تا ۵۰ برابر انرژی عملیاتی سالانه مورد نیاز برای ساختمان است. [۵]

رامش و همکاران با بررسی ۷۳ ساختمان مسکونی و اداری معمولی، سهم ۱۰٪ - ۲۰٪ را برای انرژی نهفته گزارش می‌کند. در تلاشی دیگر، سارتوری و هستنس داده‌های ۶۰ ساختمان معمولی و کم انرژی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که انرژی نهفته ۲ تا ۳۸ درصد کل مصرف انرژی در ساختمان‌های معمولی و ۹ تا ۴۶ درصد در ساختمان‌های کم مصرف را تشکیل می‌دهد.

دانش و آگاهی از انرژی نهفته مصالح ساختمانی می‌تواند تولید و توسعه مواد کم انرژی را تشویق کند، و مصرف آنها را در طراحی و صنعت ساخت و ساز برای کم کردن مصرف انرژی و تولید دی اکسید کربن ترویج دهد. صنعت تولید مصالح ساختمانی مسئول ۲۰ درصد از مصرف سوخت در جهان است، بنابراین، آگاهی از انرژی نهفته برای برنامه‌های استراتژیک ملی و جهانی انرژی، حیاتی است [۵].

۴ مدل سازی انرژی نهفته

به طور کلی، مصرف انرژی ساختمان‌ها از استخراج مواد خام تا ساخت و ساز و استفاده از انواع زیر است [۶].

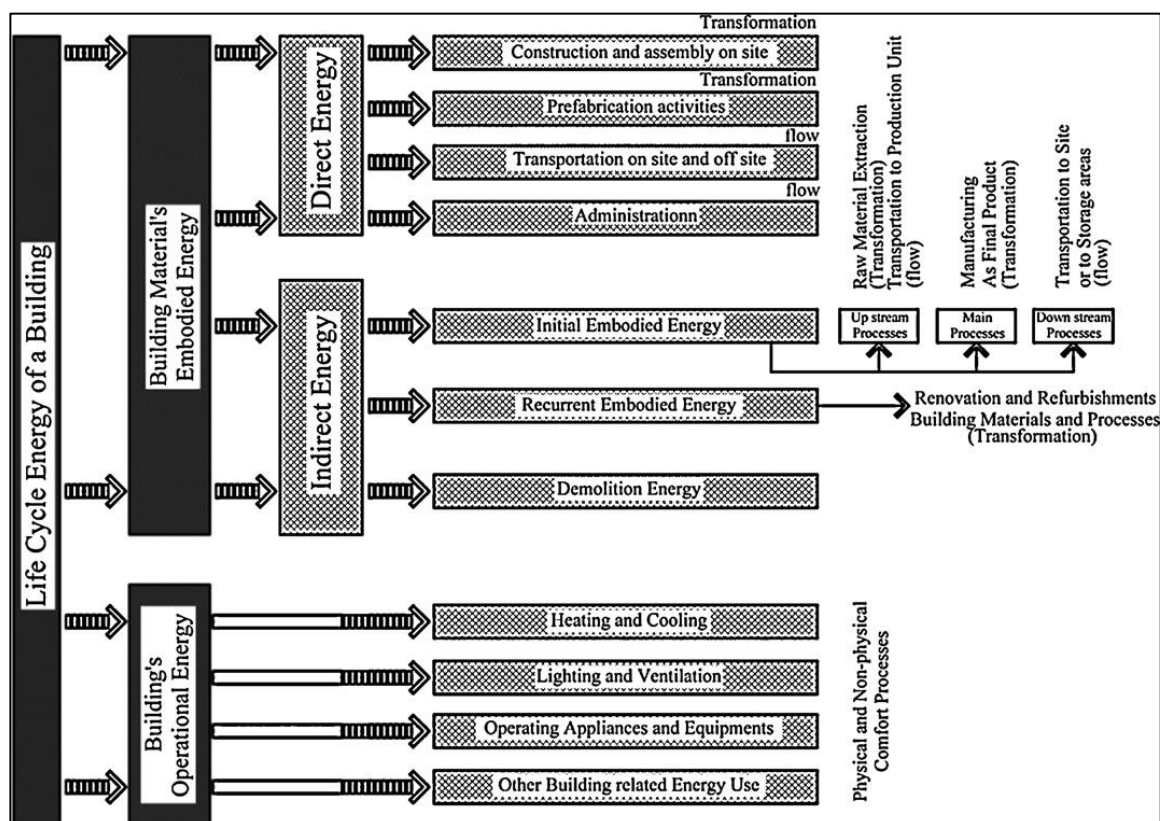
انرژی نهفته (به دو صورت مستقیم و غیر مستقیم) و انرژی عملیاتی:

انرژی مستقیم^۱: در عملیات‌های مختلف در محل و خارج از محل مانند ساخت و ساز، پیش ساخت، حمل و نقل و اجرا، مصرف می‌شود.

انرژی غیرمستقیم^۲: بیشتر در ساخت مصالح ساختمانی، در فرآیندهای اصلی، فرآیندهای بالادستی و پایین دستی و در هنگام نوسازی و تخریب استفاده می‌شود.

انرژی عملیاتی: انرژی مورد نیاز در ساختمان برای بهره برداری از خدمات مختلف الکتریکی و مکانیکی [۶].

شکل ۶ این تقسیم بندی و مدلسازی انرژی دوره عمر را به دقت به نمایش گذاشته است.



شکل ۶ مدلسازی انرژی [۶]

^۱ Direct energy

^۲ Indirect energy

۵ روش‌های آنالیز انرژی نهفته

از جمله روش‌های اصلی آنالیز انرژی نهفته، روش آنالیز مبتنی بر فرآیند^۱، آنالیز آماری^۲، آنالیز داده/ستانده^۳ و آنالیز ترکیبی^۴ است. نتایج روش‌های آنالیز انرژی نهفته و دوره عمر به دلیل محدودیت‌های ذاتی مربوطه، به طور گسترده‌ای متفاوت است و بنابراین، نمی‌توان آنها را در کنار هم قرار داد. اطلاعات زیر در مورد مزایا، محدودیت‌ها و سطوح خطای سه روش پرکاربرد آنالیز انرژی نهفته است [۶].

۵-۱ آنالیز مبتنی بر فرآیند

آنالیز مبتنی بر فرآیند یکی از پرکاربردترین روش‌های آنالیز انرژی نهفته است، زیرا نتایج دقیق‌تر و قابل اعتمادتری را ارائه می‌دهد. فرآیند با مصالح ساختمانی به عنوان محصول نهایی آغاز می‌شود و در بالادست فرآیند اصلی، با در نظر گرفتن تمام ورودی‌های انرژی مستقیم ممکن یا انرژی مجزا از هر ماده کمکی، به عقب حرکت می‌کند [۶]. همچنین مقادیر مربوط به انرژی عملیاتی (مانند حرارت و روشنایی و ...) از گردآوری‌ها حذف می‌شوند ارزیابی دوره عمر در چهار مرحله انجام می‌شود:

۱- هدف و تعیین محدوده

۲- مدل سازی اجزا ساختمان

۳- ارزیابی اثرات

۴- تفسیر نتایج

در مرحله اول تابع هدف و محدوده سیستم مشخص می‌شود. تابع هدف یک تابع پایه بنا می‌کند برای مقایسه انرژی نهفته در مطالعات موردی مختلف و محدوده سیستم باعث می‌شود تا موارد و فرایندها که شامل تحلیل می‌شوند به طور کامل مشخص شود.

^۱ Process analysis

^۲ Statistical analysis

^۳ Input/output analysis

^۴ Hybrid analysis

مرحله دوم و سوم شامل رهگیری و گردآوری و تجميع انواع و مقادير انرژی مورد استفاده در چرخه عمر ساختمان است.

از این نوع ارزیابی برای مقایسه و اهداف معيارسنجی استفاده می‌شود. این متد داده محور و زمان بر است با این حال، آنالیز مبتنی بر فرآیند به دلیل حذف بسیاری از فرآیندهای بالادستی، در نتیجه کوتاه شدن مرزهای سیستم، غیر عملی و ناقص است. که به دلیل تلاش‌های مورد نیاز برای شناسایی و اندازه گیری هر انرژی کوچک و محصول ورودی فرآیندهای پیچیده بالادستی رخ می‌دهد. میزان نقص سیستم و خطا در آنالیز فرآیند به ترتیب تا ۵۰ درصد و ۱۰ درصد تخمین زده می‌شود، و حتی فهرست‌های بر پایه آنالیز دقیق و گسترده فرآیندی نمی‌توانند به حد قابل توجهی کامل شوند. پولن بیان می‌کند که آنالیز فرآیندی نه تنها برخی از فرآیندهای پایین دستی، بلکه انرژی ورودی کارخانه‌ها و تجهیزات مورد نیاز در جریان تولید مصالح ساختمانی را نیز در بر نمی‌گیرد. [۶]

۲-۵ آنالیز داده/ستانده

آنالیز داده/ستانده می‌تواند بیشتر ورودی‌های مستقیم و غیرمستقیم انرژی در فرآیند تولید مصالح ساختمانی را حساب کند و بنابراین روش نسبتاً کاملی در نظر گرفته می‌شود. این فرآیند از داده‌های اقتصادی جریان پول در میان بخش‌های مختلف صنعت در قالب جداول داده/ستانده که توسط دولت ملی در دسترس است، استفاده می‌کند و بدین ترتیب جریان‌های اقتصادی را با اعمال تعرفه‌های متوسط انرژی به جریان‌های انرژی تبدیل می‌کند. بنابراین، در تحلیل داده/ستانده، انرژی نهفته با ضرب هزینه محصول در شدت انرژی آن محصول (بیان شده بر حسب MJ یا GJ/1000 دلار) و تقسیم آن بر ۱۰۰۰ دلار محاسبه می‌شود [۶].

فرض بر این است که این روش جامع و کامل است زیرا تقریباً کل مرز سیستم را در بر می‌گیرد. با این حال، دارای مشکلات ذاتی مانند فرض همگنی و تناسب، خطاها و عدم قطعیت داده‌های اقتصادی مانند تعرفه انرژی و هزینه محصول، و تجميع و گروه بندی بخش‌ها است. برای مثال این متد می‌تواند داده‌های انرژی نهفته مربوط به حوزه ساختمان‌های مسکونی امریکا را تولید کند اما فاقد این قابلیت برای تمایز موقعیت‌های جغرافیایی و

طراحی و تنوع ساخت و ساز ساختمان است. این مشکلات نتایج آن را اشتباه و غیرقابل اعتماد می کند و خطا در ارقام اندازه گیری را تا ۵۰ درصد می رساند [۶].

۳-۵ آنالیز ترکیبی

آنالیز ترکیبی از ترکیب کردن مزایای دو روش، برای حذف خطاهای اساسی و محدودیت‌های هر دو روش ابداع شده است. با این حال، این روش‌ها نیاز به مقایسه و اعتبارسنجی دارند. روش ترکیبی با آنالیز فرآیندی داده‌های انرژی شروع می‌شود و سپس زمانی که دستیابی به اطلاعات قابل اعتماد و سازگار پیچیده و دشوار است، آن را با روش داده/ستانده جایگزین می‌کند.

نقص یا خطا در محاسبه و آنالیز انرژی نهفته معمولی تقریباً ۲۰ درصد است و بنابراین هیچ روشی در دسترس نیست که کاملاً کارآمد باشد، با این حال، آنالیز ترکیبی داده / ستانده در تحلیل دوره عمر ساختمان‌ها تقریباً کامل در نظر گرفته می‌شود [۶].

۶ تنوع و ناهماهنگی

۶-۱ تنوع و ناهماهنگی در انرژی نهفته

۶-۱-۱ تنوع و ناهماهنگی در فهرست‌های انرژی نهفته

فهرست‌های انرژی نهفته فعلی از روش‌های موجود اندازه‌گیری انرژی و داده‌های قابل اعتماد یا غیرقابل اعتماد برای کالیبره کردن انرژی مصرف‌شده در طول ساخت مصالح ساختمانی یا یک قطعه استفاده می‌کنند. روش‌های اندازه‌گیری دارای مزایا و معایبی هستند که در ادامه مورد بحث قرار خواهند گرفت. هاموند و جونز از گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه باث، بریتانیا، در حال ایجاد فهرستی از مصالح ساختمانی از دید میزان انرژی و برای پروژه ساختمان‌های کم کربن هستند. آنها جدیدترین فهرست از شدت انرژی انواع مصالح ساختمانی، و کربن تولیدی مرتبط با فرآیند تولید آنها را ایجاد کرده‌اند. و رویکرد "گهواره تا دروازه" را اتخاذ کرده‌اند که تمام مصرف انرژی از مراحل بالادستی مانند استخراج مواد خام تا مرحله نهایی و تولید به عنوان یک محصول را در نظر می‌گیرد. آلکورن و بیرد از مرکز تحقیقات و عملکرد ساختمان در دانشگاه ویکتوریا در ولینگتون، نیوزیلند، ضریب انتشار کربن و پایگاه داده‌ای از انرژی نهفته مصالح ساختمانی را که در نیوزیلند استفاده می‌شود، ایجاد کرده‌اند. آنها روش ترکیبی آنالیز مبتنی بر فرآیند را برای محاسبات در نظر گرفتند تا از نقص و عدم اطمینان محاسبات جلوگیری کند. بوکانان وهانی به داده‌های ضریب انرژی در گزارشی که توسط بیرد و چان (۱۹۸۳) تهیه شده است، اشاره می‌کنند تا فهرستی جامع از داده‌های انتشار دی اکسید کربن و انرژی برای نشان دادن پیامدهای فعالیت‌های ساخت و ساز ارائه کنند. در مجموع دانشمندان تلاش‌های قابل توجهی برای تعیین میزان انرژی ذخیره شده در مصالح ساختمانی منتخب انجام دادند تا فهرست‌هایی را تهیه و در دسترس سایرین قرار دهند [۶].

۶-۱-۲ تنوع و ناهماهنگی در نتایج انرژی نهفته

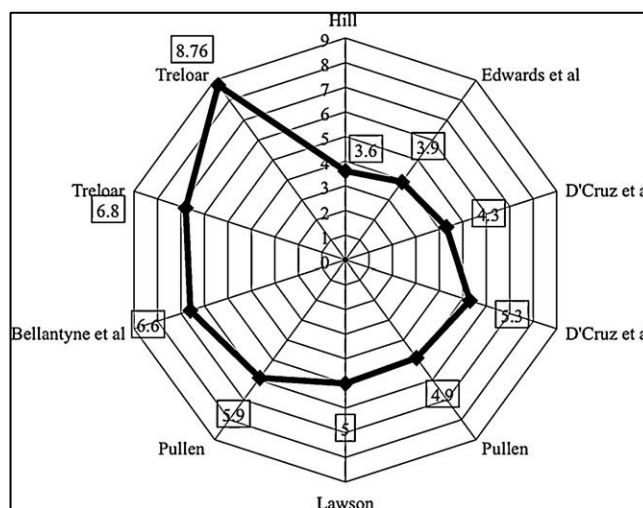
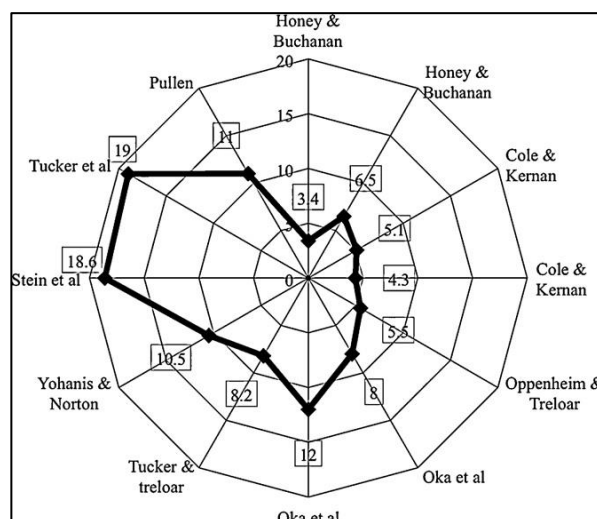
بررسی نتایج اندازه‌گیری تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که نتایج انرژی نهفته که از اطلاعات منابع متفاوت و کشورهای مختلف به دست می‌آیند، اختلافات قابل توجهی را در ارقام انرژی نهفته دارند. جدول ۱ تغییرات در

ارقام مختلف انرژی نهفته یک واحد مسکونی معمولی و یک ساختمان تجاری را نشان می دهد که توسط مطالعات تحقیقاتی مختلف به دست آمده است [۷].

جدول ۱: ارقام انرژی نهفته، نشان دهنده تنوع، به دست آمده از محاسبات نویسندگان مختلف [۷]

Embodied energy (GJ/m ²)	Building type	Source
3.6	Residential	Hill (1978) (cited by Pullen [38])
3.9	Residential	Edwards et al. (1994)
4.3-5.3	Residential	D' Cruz et al. (1990) (cited by Pullen [38])
4.9	Residential	Pullen (1995)
5.0	Residential	Lawson (1992) (cited by Pullen [38])
5.9	Residential	Pullen [38]
6.6	Residential	Ballantyne et al. (2000) (cited by Pullen [38])
6.8	Residential	Treloar [24]
8.76	Residential	Treloar (1996b)
3.4-6.5	Commercial	Honey and Buchanan (1992) (cited by Pullen, 2000c)
4.3-5.1	Commercial	Cole and Kernan (1996)
5.5	Commercial	Oppenheim and Treloar (1995)
8.0-12.0	Commercial	Oka et al. (1993) (cited by Pullen, 2000c)
8.2	Commercial	Tucker and Treloar (1994) (cited by Pullen, 2000c)
10.5	Commercial	Yohanis and Norton (2002)
18.6	Commercial	Stein et al. (1976) (cited by Pullen, 2000c)
19.0	Commercial	Tucker et al. (1993) (cited by Treloar, 1996b)

شکل ۷ و ۸ این تغییرات را به صورت گرافیکی در نمودار راداری نشان می دهد و به این نکته اشاره می کند که واحدهای مسکونی و تجاری از نظر انرژی نهفته متفاوت هستند. میانگین انرژی نهفته واحدهای مسکونی $5/506 \text{ GJ/m}^2$ و انحراف معیار $1/56 \text{ GJ/m}^2$ است در حالی که ارقام انرژی نهفته ساختمانهای تجاری میانگین $9/19 \text{ GJ/m}^2$ و انحراف معیار $5/4 \text{ GJ/m}^2$ را نشان می دهند. بنابراین ساختمانهای تجاری نسبت به واحدهای مسکونی از نظر انرژی نهفته تنوع بیشتری نشان می دهند. شواهد بیانگر این است که تعیین انرژی



شکل ۸ تفاوت مقدار انرژی نهفته در ساختمانهای مسکونی [۶]. شکل ۷ تفاوت مقدار انرژی نهفته در ساختمانهای تجاری [۶].

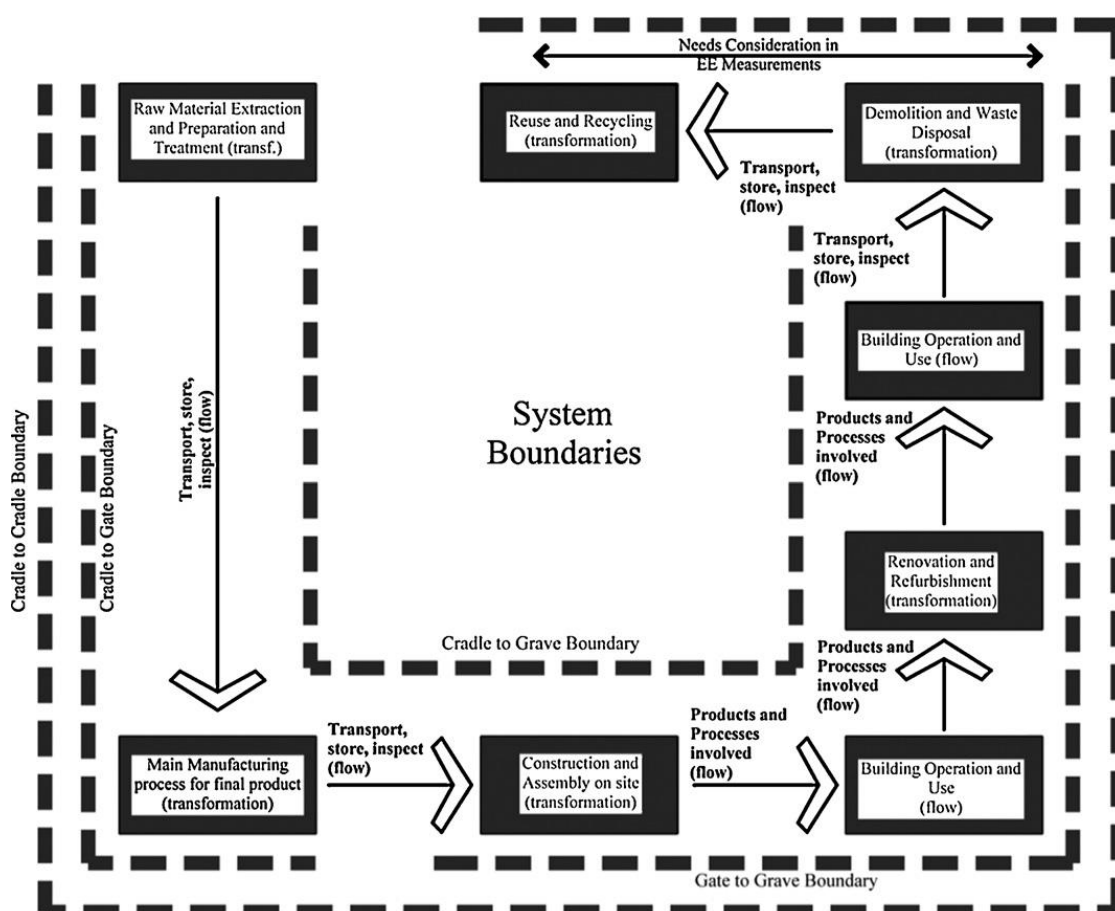
نهفته دشوار است و هیچ روش استاندارد برای تخمین سطح انرژی مصالح ساختمانی در دسترس نیست. تعیین انرژی نهفته بر خلاف انرژی عملیاتی کاری زمان بر و پیچیده است [۶].

۲-۶ علل تنوع و ناهماهنگی در انرژی نهفته

در این بخش پارامترهای اصلی که بر کیفیت نتایج انرژی نهفته تأثیر می گذارند بررسی شده است:

۱-۲-۶ مرزهای سیستم

در آنالیزهای انرژی نهفته در گذشته، هر زمان که به دست آوردن اطلاعات قابل اعتماد و سازگار لازم دشوار می شد، مرزی ترسیم می شد و آنالیز بیشتر در بخش بالادست کوتاه می شد. این مرزها می تواند از استخراج



شکل ۹ مرزهای سیستم در دوره عمر مصالح ساختمانی [۶].

مواد خام در بالادست تا تخریب و دفع نهایی در پایین دست باشد (شکل ۹). نویسندگان مرزهای سیستم مختلفی را اتخاذ کردند و در نتیجه، ارقام اندازه گیری شده متفاوت بودند و قابل مقایسه نبودند [۶].

حذف برخی از ورودی‌های انرژی در اجزای ساختمان، مانند یراق آلات، و در فرآیندهایی مانند ساخت و ساز در محل و تخریب، می‌تواند باعث تغییرات زیادی در نتایج انرژی نهفته شده شود. تعریف مرز یکی از بحرانی‌ترین مسائلی است که باعث حذف فرآیندهای بالادستی می‌شود که می‌تواند تفاوت قابل توجهی در محاسبات انرژی نهفته ایجاد کند.

میلر ادعا می‌کند که نتایج انرژی نهفته منتشر شده به طور قابل توجهی متفاوت است. علاوه بر این، هیچ توضیحی در مورد آنچه در محاسبه گنجانده شده یا حذف شده است، وجود ندارد. چنین مفروضات متفاوتی در مورد مرزها منجر به کیفیت متفاوت داده‌ها می‌شود و بنابراین داده‌ها را غیرقابل مقایسه می‌کند. انتخاب ذهنی مرزهای سیستم می‌تواند نتایج نهایی را نامعتبر کند و با چنین انتخابی از مرزها، ارزیابی مقایسه‌ای دو محصول را نمی‌توان تضمین کرد [۶]. بنابراین دستیابی به روشی ثابت در انتخاب مرز سیستم ارزیابی مقایسه‌ای را ممکن می‌کند.

۶-۲-۲ روش‌های آنالیز انرژی نهفته

از جمله فرآیندهای اصلی آنالیز انرژی نهفته، روش آنالیز مبتنی بر فرآیند، آنالیز آماری، آنالیز داده/ستانده و آنالیز ترکیبی است. نتایج روش‌های آنالیز انرژی نهفته و دوره عمر به دلیل محدودیت‌های ذاتی مربوطه، به طور گسترده‌ای متفاوت است و بنابراین، نمی‌توان آنها را در کنار هم قرار داد. این روش‌ها در قسمت‌های پیشین مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

۶-۲-۳ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

کشورهای مورد مطالعه نه تنها در ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی، بلکه در کیفیت مواد خام، فرآورده‌های تولید، داده‌های اقتصادی، فرآورده‌های تولید انرژی تحویلی، فواصل حمل و نقل، مصرف انرژی (سوخت) در حمل و نقل و نیروی کار با یکدیگر متفاوت هستند. این در نهایت نتایج نهایی آنالیز مصرف انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهد که به طور اساسی متفاوت است. فرآورده‌های بخش‌های صنعتی و اقتصادی بسیار متفاوت هستند و بنابراین بر مقادیر انرژی محاسبه شده تأثیر می‌گذارد. مکان‌های مختلف داده‌ها به دلیل تغییرات در فرآورده‌های تولید و تعرفه‌های انرژی می‌توانند بر نتایج انرژی نهفته تأثیر بگذارند. کشورها می‌توانند در ساختار عرضه سوخت متفاوت باشند و بنابراین مطالعات در آن مکان‌ها می‌تواند مقادیر انرژی متفاوتی تولید کند. موقعیت جغرافیایی یک عنصر محوری است که باید در هنگام محاسبه مقادیر انرژی نهفته در نظر گرفته شود. تعرفه‌های متفاوت انرژی که توسط تولیدکنندگان مواد مختلف در مکان‌های مختلف پرداخت می‌شود، می‌تواند منجر به خطای احتمالی ۲,۶ درصدی در نتایج انرژی نهفته (در صورتی که با استفاده از روش داده/ستانده مشتق شوند) بشود. هم چنین کشورها قیمت‌های مواد متفاوتی دارند که می‌تواند منجر به خطای ۲ درصدی در نتایج انرژی نهفته شود [۶].

۶-۲-۴ سن منابع داده

سن منبع داده تأثیر قابل توجهی بر مقایسه پذیری پایگاه داده انرژی دارد، زیرا داده‌های قدیمی از یک فناوری تولید منسوخ به دست می‌آیند که به اندازه فناوری جدید کارآمد نیست و بنابراین در مقادیر آن اختلاف بسیار است. در نظر گرفتن داده‌های انرژی حمل و نقل قدیمی می‌تواند بر ارزش انرژی تأثیر بگذارد، زیرا وسایل نقلیه جدید دارای راندمان سوخت بیشتر و ساختار سوخت متفاوتی هستند. هر مطالعه‌ای بر اساس چنین منابع داده‌های متناقضی می‌تواند گمراه کننده و نامطمئن باشد. عملکرد مصالح ساختمانی و راندمان تولید مواد در طول زمان افزایش می‌یابد و می‌تواند علت تغییرات در ارقام اندازه گیری باشد [۶].

۶-۲-۵ منبع داده‌ها

محققان رویکردهای متفاوتی برای جمع آوری داده‌ها اتخاذ می‌کنند. برخی ضریب انرژی نهفته خود را استخراج می‌کنند و برخی دیگر به یک پایگاه داده انرژی نهفته که توسط محققان دیگر تهیه شده است ارجاع می‌دهند. این انتخاب نتایج نهایی را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد. بیشتر ارقام منتشر شده از انرژی نهفته در مصالح ساختمانی با استفاده از یک منبع اطلاعاتی منفرد به دست می‌آیند که صحت و قابلیت اطمینان منبع داده را زیر سوال می‌برد. منبع داده یک پارامتر مهم است و قابلیت اطمینان، عدم قطعیت و شفافیت آن باید در حین انجام مطالعات انرژی نهفته در نظر گرفته شود [۶].

۶-۲-۶ فناوری فرآیندهای تولید

ساخت مصالح ساختمانی با استفاده از فناوری‌های مختلف در یک زمان و در یک موقعیت جغرافیایی یکسان می‌تواند منعکس کننده مصرف انرژی متفاوت باشد. استفاده از فناوری‌های مختلف تولید و نوع انرژی مورد استفاده در این فرآیند می‌تواند تأثیر زیادی بر تفاوت ارقام انرژی نهفته داشته باشد [۶].

۶-۲-۷ در نظر گرفتن انرژی مواد اولیه

انرژی خوراک اولیه انرژی است که به عنوان یک عنصر در فرآیند تولید یک ماده استفاده می‌شود. مواد پتروشیمی مانند نفت و گاز به عنوان ورودی در فرآیند تولید محصولات مانند پلاستیک و لاستیک استفاده می‌شوند. در صورتی که از چنین منابع انرژی ارزشمندی در ساخت مواد استفاده شود انرژی خوراک در محاسبه کل انرژی نهفته یک ماده در نظر گرفته می‌شود. حذف یا گنجاندن انرژی مواد اولیه در محاسبه انرژی نهفته می‌تواند به اختلاف در ارقام انرژی منجر شود، و چنین ارقامی قابل مقایسه نیستند [۶].

در مجموع چنین انحرافی می‌تواند گمراه کننده باشد و نتایج آنالیز انرژی نهفته را تحریف کند. بنابراین، ایجاد مجموعه ای از دستورالعمل‌ها یا چارچوب‌ها به منظور نظارت بر فرآیند اندازه گیری بسیار مهم است. علاوه

بر این، نیاز به جمع آوری تمام داده‌های موجود، سپس آنالیز و غربالگری آن‌ها بر اساس الگوی معیار برای ایجاد یک پایگاه داده قابل اجرا و قابل مقایسه وجود دارد. [۷]

۷ انرژی نهفته و کربن نهفته

صنعت ساختمان نیاز به استخراج مقادیر بسیار زیادی از مواد دارد که به نوبه خود منجر به مصرف منابع انرژی و انتشار آلاینده‌های مضر به بیوسفر می‌شود. هر ماده باید استخراج، پردازش و در نهایت به محل استفاده خود منتقل شود.

انرژی مصرف شده در طول این فعالیت‌ها برای توسعه انسانی بسیار مهم است، اما همچنین کیفیت دوام بیوسفر را در نتیجه اثرات ناخواسته به خطر می‌اندازد. بسیاری از این اثرات جانبی تولید و مصرف انرژی منجر به عدم قطعیت منابع و خطرات بالقوه زیست محیطی در مقیاس محلی، منطقه ای یا ملی می‌شود.

علاوه بر مفهوم انرژی نهفته، انتشار آلاینده‌های مرتبط با انرژی مانند CO₂ که موجب گرم شدن کره زمین و تغییرات آب و هوایی می‌شود، ممکن است در طول چرخه حیات مواد مشاهده شود. که به دلیل اهمیت بالا، باعث ایجاد مفهوم "کربن نهفته" می‌شود.

کربن نهفته انتشار دی اکسید کربن (CO₂) مرتبط با مواد و فرآیندهای ساخت و ساز در کل دوره عمر یک ساختمان است. که شامل هر CO₂ ایجاد شده در طول ساخت مصالح ساختمانی، حمل و نقل آن مواد به محل کار، و ساخت و ساز است. به زبان ساده، کربن نهفته ردپای کربن یک ساختمان یا پروژه زیرساختی قبل از عملیاتی شدن است. همچنین به CO₂ تولید شده در نگهداری ساختمان و در نهایت تخریب آن، حمل و نقل زباله و بازیافت آن اشاره دارد.

دانشمندان تلاش‌های بسیاری در تهیه فهرست‌های جامع برای انرژی و کربن نهفته انجام داده اند. یکی از این موارد دیتابیس کربن و انرژی دانشگاه باث است که برای ارائه یک پایگاه داده با دسترسی آزاد و قابل اعتماد برای انرژی نهفته و کربن مرتبط با مصالح ساختمانی ایجاد شد. اکثر داده‌های ورودی از منابع داده ثانویه منشاء می‌گیرند. تعداد مواد موجود در فهرست متعاقباً افزایش یافت و اکنون حاوی بیش از مقادیر انرژی و کربن چهارصد ماده است که آن را برای تجزیه و تحلیل انرژی نهفته یا کربن در ساختمان‌ها، محصولات و سیستم‌ها ایده‌آل می‌کند.

مقادیر انرژی تجسم یافته و کربن به وضوح زمانی که برای یک دسته کلی از مواد (مانند آلومینیوم، فولاد یا الوار) اعمال می‌شود، دقیق نیستند. هر ماده دارای تنوع در شکل و نوع (مخصوصاً برای چوب) است. با این حال، می‌توان آنها را به عنوان معیارهای خوبی برای استفاده در تعیین عملکرد دوره عمر ساختمان‌ها و محصولات تولیدی در نظر گرفت. محققان در این زمینه ناگزیر در مورد انتخاب «بهترین»ها اختلاف نظر خواهند داشت. انتخاب یک عدد واحد که نماینده یک محصول معمولی است، نیازمند تجزیه و تحلیل دقیق منابع داده موجود است و به مرزهای سیستم برای هر مطالعه خاص بستگی دارد. در بسیاری از موارد، داده‌ها باید بر اساس معیارهای انتخابی از پیش تعریف‌شده تنظیم شوند (اگرچه معمولاً فقط به بازنگری‌های جزئی منجر می‌شوند) تا در یک چارچوب منسجم قرار گیرند. [۷]

ضرایب انرژی و کربن نهفته برگرفته شده از نسخه بتا ۱,۵ دیتابیس مذکور در جدول ۲ برای شش مصالح

ساختمانی مهم نشان داده شده است: آجر، سیمان، بتن، شیشه، فولاد و الوار.

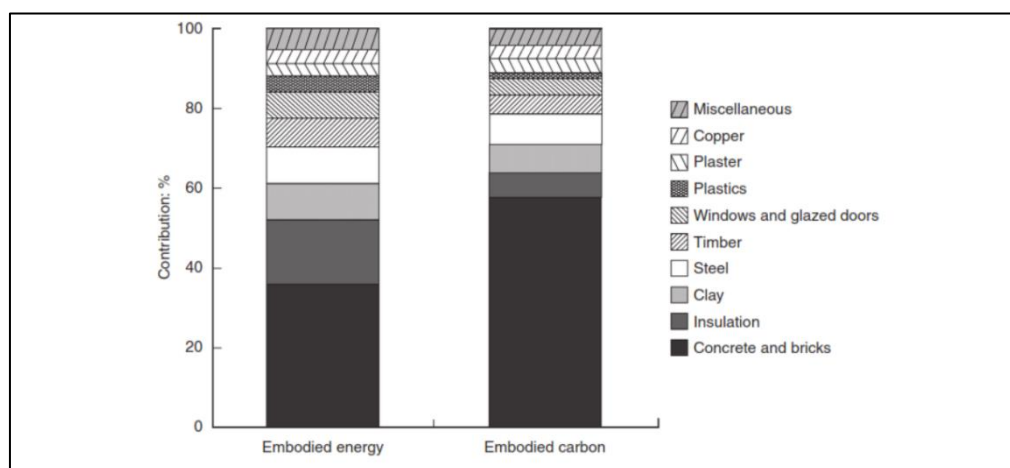
جدول ۲: دیتابیس انتخابی شامل ضرایب انرژی و کربن نهفته [۷]

Material	Embodied energy: MJ/kg	Embodied carbon: kgC/kg
Bricks		
General	3	0.060
Limestone	0.85	—
Cement		
General	4.6 ± 2	0.226
Portland cement, wet kiln	5.9	0.248
Portland cement, semi-wet kiln	4.6	0.226
Portland cement, dry kiln	3.3	0.196
Portland cement, semi-dry kiln	3.5	0.202
Fibre cement	10.9	0.575
Mortar (1:3 cement:sand mix)	1.4	0.058
Mortar (1:4)	1.21	0.048
Mortar (1:0.5:4.5 cement:lime:sand mix)	1.37	0.053
Mortar (1:1:6 cement:lime:sand mix)	1.18	0.044
Mortar (1:2:9 cement:lime:sand mix)	1.09	0.039
Soil-cement	0.85	0.038
Concrete		
General (1:2:4 as used in construction of buildings under three storeys)	0.95	0.035
Precast concrete, cement:sand:aggregate	2	0.059
1:1:2 (high strength)	1.39	0.057
1:1.5:3 (used in floor slabs, columns and load-bearing structures)	1.11	0.043
1:2.5:5	0.84	0.030
1:3:6 (non-structural mass concrete)	0.77	0.026
1:4:8	0.69	0.022
Autoclaved aerated blocks (AACs)	3.5	0.076–0.102
Fibre-reinforced	7.75	0.123
Road and pavement	1.24	0.035
Road example	2085 MJ/m ²	51 kgC/m ²
Wood-wool reinforced	2.08	—
Glass		
General	15	0.232
Fibreglass (Glasswool)	28	0.417
Toughened	23.5	0.346
Steel		
General, 'typical' (42.3% recycled content)	24.4	0.482
General, primary	35.3	0.749
General, secondary	9.5	0.117
Bar & rod, 'typical' (42.3% recycled content)	24.6	0.466
Bar & rod, primary	36.4	0.730
Bar & rod, secondary	8.8	0.114
Engineering steel, secondary	13.1	0.185
Galvanised sheet, primary	39	0.768
Pipe, primary	34.4	0.736
Plate, primary	48.4	0.869
Section, 'typical' (42.3% recycled content)	25.4	0.485
Section, primary	36.8	0.757
Section, secondary	10	0.120
Sheet, primary	31.5	0.684
Wire	36	0.771
Stainless	56.7	1.676
Timber		
General	8.5	0.125
Glue laminated timber	12	—
Hardboard	16	0.234
MDF	11	0.161
Particle board	9.5	0.139
Plywood	15	0.221
Sawn hardwood	7.8	0.128
Sawn softwood	7.4	0.123
Veneer particleboard (furniture)	23	0.338

هموند و همکاران در تحقیقات خود با در نظر گرفتن ۱۴ ساختمان مسکونی به محاسبه انرژی نهفته و کربن نهفته ساختمان‌ها پرداختند. نتایج انرژی نهفته پیش از این مطرح شد. شکل ۱۰ به مقایسه انرژی و کربن نهفته در یکی از این ساختمان‌ها پرداخته است [۷].

تجزیه انرژی و کربن نهفته مصالح ساختمانی (در شکل ۱۰) نشان می‌دهد که بتن و آجر بیشترین سهم را در انرژی نهفته و حتی سهم بیشتری در کربن نهفته دارند. بتن به ازای هر واحد انرژی نهفته، به دلیل تبدیل سنگ آهک به سیمان در طی فرآیند تولید، کربن بالایی ایجاد می‌کند که منجر به انتشار کربن اضافی غیر مرتبط با سوخت می‌شود. سیمان (عنصر کلیدی که به بتن استحکام می‌بخشد) یکی از بزرگترین انتشار دهنده‌های CO₂ در محیط است. از آنجایی که بتن فراوان ترین ماده ساخته شده توسط انسان در جهان است، تولید سیمان حدود ۷ درصد از انتشار CO₂ جهان را ایجاد می‌کند و بزرگترین عامل تولید کربن در صنعت ساخت و ساز است. [۷]

بنابراین مفهوم کربن نهفته همچون انرژی نهفته از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است و توجه به آن در بلند مدت از تخریب محیط زیست به واسطه انتشار گازهای آلاینده جلوگیری می‌کند.



شکل ۱۰ تجزیه انرژی و کربن نهفته مواد [۷]

۷-۱ انرژی نهفته مصالح

پوشش ساختمان

پوشش ساختمان یک سهم اساسی در مصرف انرژی نهفته و انرژی عملیاتی ساختمان‌ها دارد. پوشش ساختمان (کف-دیوار-سقف-رنگ) سهمی حدود ۴۸ تا ۵۰ درصد از انرژی نهفته یک ساختمان استاندارد را دارد برای اینکه پوشش حرارتی و سیستم شیشه ای بخش اصلی پوشش ساختمان هستند و نقش اساسی در استراژی بهره وری انرژی دارند اما انرژی نهفته ماده ی عایقی موضوع اختلاف نظر است و برای یک نوع عایق دامنه وسیعی از تخمین‌های انرژی نهفته وجود دارد [۴۱].

سیستم‌های ساخت و ساز

این بخش حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد از انرژی نهفته را شامل می‌شود تحقیقات نشان می دهد در سیستم‌های ساخت و ساز مربوط به فولاد و سازه‌های صفحه تخت دو طرفه انرژی نهفته بیشترین مقدار است در حالی که تیر و دال یک طرفه و دال تیرچه کمترین انرژی نهفته را دارند تحقیقی که بر روی سازه‌های بتنی انجام شده نشان می دهد که بهینه سازی در طراحی این بخش می تواند انرژی نهفته تا ۱۰٪ کاهش می دهد در حالی که در هزینه‌ها ۵٪ افزایش مشاهده می‌شود [۴۱].

مهم ترین مزیت مدل سازی انرژی نهفته برای طراحان ساخت و ساز این است که میتواند ماده‌ها و سیستم‌هایی که با انرژی بالا نهفته تشخیص دهند.

۸ استراتژی‌های کاهش انرژی نهفته

مقدار پایین انرژی نهفته در بیشتر اوقات اغلب با استفاده از مصالح محلی مثل ساختمان‌های سبک وزن همراه است علاوه بر مزیت اقتصادی، استفاده از مصالح محلی سبب می‌شود تا فاصله حمل و نقل و میزان سوخت کاهش یابد این کاهش حمل و نقل در انرژی نهفته نمایان شود همچنین استفاده از مصالحی با فرایندهای کم انرژی سبب می‌شود بهره‌وری انرژی نهفته افزایش یابد بنابراین شاخص اصلی در انتخاب مصالح شامل این موارد می‌شود: دسترسی محلی، شدت انرژی تولید، پتانسیل قابل بازیافت بودن، محتویات بازیافت، پتانسیل تجدیدپذیر بودن، پتانسیل کاهش ضایعات ساخت و ساز، طول عمر، دوام و نیازهای تعمیرات

همچنین می‌توان به مقدار کم انرژی نهفته با طراحی‌های متفاوت معماری دست یافت که این امر با تمرکز بر انعطاف پذیری فضایی، استفاده کارآمد از مساحت کف، استفاده کمتر از مصالح ساخت و ساز در بافت و پوشش ساختمان و پتانسیل بالا برای تخریب تحقق می‌پذیرد [۱ و ۲].

در طراحی ایجاد شده برای انرژی دوره عمر، موضوع استفاده مجدد و نوسازی یک فرصت عالی برای کاهش انرژی نهفته می‌دهد در حالی که از افزایش اثرات زیست محیطی به دلیل ساخت و ساز جدید جلوگیری می‌کند. طراحی با در نظر گرفتن استفاده مجدد و نوسازی، طول عمر یک ساختمان را افزایش می‌دهد انرژی نهفته اولیه و تخریبی برای یک سازه جدید را کاهش می‌دهد بنابراین یک کاهش چشمگیر در انرژی نهفته اتفاق می‌افتد.

در نوسازی ساختمان پنج عامل سبب می‌شود که مصرف انرژی نهفته بهبود یابد:

۱- انعطاف پذیری (با کاربرد آینده)

۲- تطبیق پذیری (با مصرف‌های مختلف)

۳- مکمل (داشتن پتانسیل برای مکمل شدن با عملکرد بهبود یافته)

۴- دوام (داشتن ظرفیت برای تطبیق پذیری با نیازهای ساکنین در طول عمر طولانی)

۵- برگشت پذیری (داشتن ظرفیت برای برگشت به حالت قبلی در زمانی که استفاده از ساختمان به پایان

رسیده است)

۹ شکاف‌های دانش و جهت‌گیری برای تحقیقات آینده

۹-۱ چالش‌های متدلوژی

در حالی که متدهای قوی وجود دارند که مقدار انرژی نهفته را در محیط ساخت تخمین می‌زند اما همچنان نبود پروتکل‌های استاندارد برای تخمین این انرژی یک مشکل اساسی است استفاده از متدهای مختلف سبب می‌شود برای یک مسئله انرژی نهفته جواب‌های مختلفی به دست بیاید این موضوع مقایسه انرژی نهفته را سخت می‌کند بنابراین محققان نیاز دارند یک چارچوب و پروتکل بر اساس استانداردها توسعه دهند تا این مشکل را رفع کنند مشکل دیگر عدم قطعیت داشتن به دلیل تنوع و ناسازگاری پایگاه داده هستند که حتی از منظر روش گردآوری داده‌ها غیر شفاف و از نظر زمانی، فنی، جغرافیایی غیرنماینده است [۴۱].

به همین خاطر آژانس‌های خصوصی و فدرال باید به جمع‌آوری و انتشار داده‌های با کیفیت بالا و شفاف که در دسترس عموم باشد بپردازد این داده‌ها همچنین به توسعه دهندگان کمک می‌کند که ابزارهای برای تخمین انرژی نهفته و اثرات محیطی ساختمان توسعه دهند

امروزه در تولید، مواد اولیه و اجزا برای ساخت و ساز از کشورهای متفاوت می‌آید. عدم داده کافی و غیر شفاف بودن آن باعث عدم قطعیت در نتایج انرژی نهفته می‌شود بنابراین قابلیت اطمینان نتایج انرژی نهفته همیشه تحت تاثیر کیفیت و بازنمایی (زمانی، جغرافیایی و فناوری) داده‌های موجود در تخمین انرژی نهفته است

۹-۲ چالش ارزیابی عملکرد انرژی نهفته

در حوزه انرژی عملیاتی شاخص‌های عملکرد و اهداف مشخص هستند تا انرژی عملیاتی کاهش یابند چالش‌های متد که در حوزه انرژی نهفته وجود دارند سبب می‌شود که به ارزیابی عملکرد این انرژی در ساختمان نتوان دست یافت به همین دلیل تحقیقات انرژی نهفته همه تنوع سیستم‌ها و ساختمان‌ها را شامل نمی‌شود همچنین تنوع جغرافیایی را نیز در بر نمی‌گیرد و در این تحقیقات از داده و متدهای ناسازگار استفاده می‌شود.

توسعه شاخص عملکرد انرژی نهفته سبب می‌شود تا طراحان بتوانند نتایج انرژی طراحی خود را با نتایج دیگران مقایسه کنند.

۹-۳ چالش دستورالعمل‌های طراحی و داده‌های مصالح

مجامع حرفه‌ای و آکادمیک نیاز دارند تا با هم کار کنند تا پلی بین شکاف تحقیقاتی و عملی انرژی نهفته برقرار کنند. دستورالعمل‌های طراحی واضح‌تر و مشخص‌تری باید برای طراحان توسعه داده شود تا بتوانند تأثیرات هندسه، پوشش ساختمان و انتخاب مصالح بر عملکرد انرژی نهفته ساختمان نشان دهند و بین آنها ارتباط برقرار کنند.

در نهایت صنعت باید با تولید کنندگان همکاری نزدیکی داشته باشند تا داده‌هایی از مصالح با انرژی نهفته کم تهیه شود و این مصالح باید اطلاعات مشخص انرژی نهفته خود را به همراه داشته باشند.

۱۰ نتیجه و جمع بندی

صنعت ساخت‌وساز و صنایع همراه ، یکی از بزرگ‌ترین بهره برداران منابع طبیعی ، اعم از تجدید پذیر و تجدید ناپذیر ، هستند که به شدت محیط زیست را تغییر می‌دهند. بنابراین کاهش مصرف انرژی در این حوزه اهمیت بالایی پیدا می‌کند.

در دوره عمر یک ساختمان دو نوع انرژی وجود دارد: انرژی نهفته و انرژی عملیاتی تا کنون بیشتر تمرکز بر انرژی عملیاتی و کاهش آن بوده است در حالی که انرژی نهفته هم از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. هم چنین پیشرفت‌های قابل توجهی در حوزه انرژی عملیاتی به دست آمده است. با افزایش تعداد ساختمان‌های کم انرژی، انرژی نهفته آن‌ها اخیراً مورد توجه قرار گرفته است انرژی نهفته زمانی مهم است که ساختمان‌های کم انرژی اغلب به انرژی عملیاتی که نیاز دارند دست پیدا می‌کنند این انرژی عملیاتی با استراژی‌هایی مثل عایق بیشتر پوشش‌های ضخیم تر و سیستم پنجره ای مشخص تحقق می یابد در حالی که انرژی عملیاتی با این استراژی کاهش می یابد اما سبب افزایش انرژی نهفته می‌شود. برای دستیابی به ساختمان‌هایی با انرژی نهفته کم استفاده از مصالحی که قابلیت تجدیدپذیر و بازیافت دارند باید افزایش یابد به دلیل این که نوسازی فرصتی برای کاهش انرژی ایجاد می‌کند. بنابراین طراحان باید اصول سازگاری، تطبیق پذیری، مکمل بودن، دوام و برگشت پذیری را در اصول طراحی خود مدنظر قرار دهند. بدین ترتیب میتوان به ساختمان‌هایی دست یافت که علاوه بر انرژی عملیاتی پایین دارای انرژی نهفته و کربن نهفته کمی باشند تا محیط زیست را کمتر تحت تأثیر قرار دهند. محاسبه انرژی نهفته چالش‌های فراوانی دارد که موجب ایجاد تنوع و ناهماهنگی در داده‌ها می‌شود. از جمله این چالش‌ها مرز بندی سیستم ، تکنولوژی تولید و روش‌های آنالیز هستند که هر کدام به نحوی نتایج را تحت تأثیر قرار میدهند.

۱۱ منابع و مراجع

- [1] Azari, R. and Abbasabadi, N., 2018. *Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends*. Energy and Buildings, 168, pp.225-235.
- [2] Sartori, I. and Hestnes, A., 2007. *Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article*. Energy and Buildings, 39(3), pp.249-257.
- [3] Thormark, C., 2002. *A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential*. Building and Environment, 37(4), pp.429-435.
- [4] Venkatarama Reddy, B. and Jagadish, K., 2003. *Embodied energy of common and alternative building materials and technologies*. Energy and Buildings, 35(2), pp.129-137.
- [5] Azari, R, 2019, *Life Cycle Energy Consumption of Buildings; Embodied +Operational*, Energy and Buildings, 170, p.320-341
- [6] Dixit. M, et.al, 2010, *Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review*, Energy and Buildings, (42) p1238-1247
- [7] Hammond, G.P., Jones, C.I., 2008. *Embodied energy and carbon in construction materials*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy 161 (2), 87-98.