



**ابنیه پایدار سبز**  
**پالایش آب و فاضلاب**  
**مدیریت محیط زیست**

Abnie Paidar Sabz  
Water & Wasterwater  
Environmental Managment

## مصالح ساختمانی با انرژی نهفته و کربن نهفته کم

محسنعلی شایانفر<sup>۱\*</sup>، سید مجید مفیدی شمیرانی<sup>۲</sup>، سید احسان سید عبدالهی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه علم و صنعت ایران

### خلاصه

انرژی نهفته انرژی مورد نیاز برای استخراج، تولید، حمل و نقل مصالح، ساخت ساختمان، مرمت و نگهداری و در نهایت تخریب آن است. انرژی نهفته با انرژی بهره برداری در ساختمانها مقایسه شده و هرچه مقادیر مربوط به بهینه سازی انرژی بهره برداری افزایش پیدا کند، درصد انرژی نهفته کل افزایش پیدا خواهد کرد. با توجه به افزایش سهم انرژی نهفته در سالهای اخیر لازم است تا نحوه محاسبه آن شناخته شده و تاثیر نوع مصالح و روش ساخت در تغییر انرژی نهفته بررسی شود. این مقاله مصالح با انرژی نهفته و کربن نهفته کم در ساختمانها را معرفی کرده و مشکلات مربوط به محاسبات انرژی نهفته و ابهامات مربوط به مقایسه محاسبات محققین مختلف را بررسی می کند. سپس ارتباط بین انرژی نهفته و کربن نهفته عنوان شده است. مصالحی که در این مقاله به عنوان مصالح با انرژی نهفته کم ارائه شده اند عبارتند از: سیمان، بتن، چوب، آجرها و بلوکها، دیوارهای خاک متراکم و ماسه سنگ، در نهایت نیز تاثیر جایگزینی مصالح با انرژی نهفته کم به جای مصالح با انرژی نهفته زیاد بررسی شده است.

**کلمات کلیدی:** انرژی نهفته، انرژی بهره برداری، کربن نهفته، مصالح ساختمانی، ساختمان

### ۱. مقدمه

واژه انرژی نهفته برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ میلادی در مقالات استفاده شده است [1] و [2]. ون گول [3] حداقل انرژی نهفته تولید محصولات را مطابق با (شکل ۱) برآورد کرده که نشان می دهد، کل انرژی مورد نیاز برای تولید یک محصول، مجموع انرژی نهفته و انرژی فرآیند مربوط به تولید آنها می باشد. همانطور که از (شکل ۱) مشخص است، حداقل انرژی مورد نیاز کمی بیشتر از انرژی حداقل ایده آل است، که آن را انرژی آزاد گیبز می نامند. [3] انرژی نهفته بخش اصلی از انرژی کل تولیدی هر محصول بوده و مانند تمامی محصولات، بخش ساختمان و ملحقات مهم آن نیز خارج از این تعاریف نیست. مولفه های یاد شده برای مصالح ساختمان نیز کاربرد خواهند داشت [2]، [4]، [5]، [6].

انرژی نهفته توسط محقق در سراسر دنیا با تعابیر گوناگونی تعریف شده است. کاسکلا [7] می گوید انرژی نهفته انرژی است که برای تولید مصالح مصرف می شود. گنزالز و ناوارو [8] بر این باورند که مواد و مصالح با انرژی نهفته بیشتر،

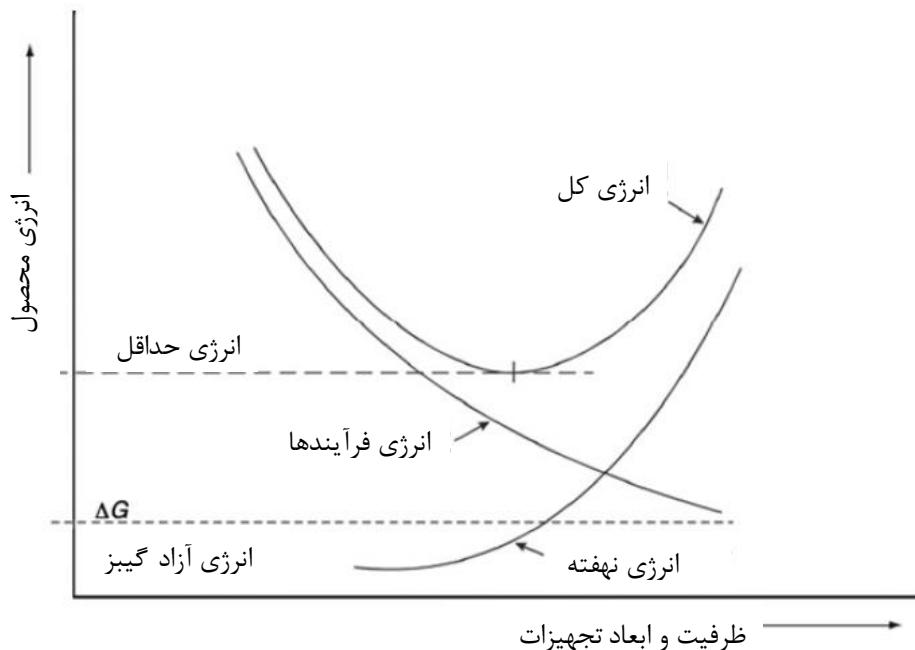
\* Corresponding author: Associate Professor, Department of Civil Engineering, Iran University Science & Technology

Email: shayanfar@iust.ac.ir

نتیجه فرآیندی هستند که طی آن انتشار گاز دی اکسید کربن بیشتر بوده است و مصالح با انرژی نهفته کمتر، دی اکسید کربن کمتری تولید می کنند.

بر اساس نظر میلر [9] واژه انرژی نهفته به واسطه برداشت های گوناگون محققین و تعاریف گوناگون آنها، محاسبات واحدی نخواهد داشت و در نتیجه نتایج محاسبات آنها تفاوت قابل توجهی خواهد داشت. کراودر [10] اظهار می کند: "انرژی نهفته تمام انرژی مورد نیاز در ساخت ساختمان ها، شامل تمامی انرژی هایی است که به صورت مستقیم در مراحل ساخت و مونتاژ مصالح استفاده می شوند و تمام انرژی های غیر مستقیمی که برای تولید مصالح ساختمانی صرف می شوند." در تعریف دیگری که توسط تراولر [11] ارائه شده، آمده است: "انرژی نهفته، انرژی است که برای تولید یک محصول (مستقیم و غیرمستقیم) طی تمام جریان بالادست آن محصول (از استخراج مصالح تا انتقال محصول تولید شده) صرف می شود." بوستر و هانکوک نیز می گویند: "انرژی نهفته به تمام انرژی مورد نیاز در مراحل ساخت و فرآیندهای بالادست محصولات مانند استخراج، تصفیه یا خالص سازی، تولید، حمل و ... گفته می شود." تعریفی مفهومی که توسط دینگ [12] ارائه شده است بیان می دارد که "انرژی نهفته شامل انرژی مصرف شده در زمان استخراج، پردازش مواد خام اولیه، حمل مواد خام اولیه جهت تولید مصالح، تولید مصالح ساختمانی و تمام انرژی هایی که در زمان ساخت و تخریب ساختمان مصرف می شود است."

مجموع انرژی های چرخه حیات هر ساختمان شامل دو قسمت اصلی است که عبارتند از: انرژی نهفته و انرژی بهره بردای. این چرخه به صورت خلاصه در (شکل ۲) نشان داده شده است [10]، [12] و [13].



(شکل ۱) رابطه بین انرژی محصول و انرژی نهفته و انرژی فرآیندها [3]



انرژی مورد نیاز برای بهره‌برداری از همان ساختمان می‌باشد. ترگال [17] تعداد ۹۷ ساختمان با پلان مشابه در کشور پرتغال را مورد مطالعه قرار داد و مقادیر مربوط به انرژی نهفته و انرژی بهره‌برداری آنها را با هم مقایسه نمود. در این تحقیق مشخص شد که انرژی بهره‌برداری متوسط آن ساختمان‌ها معادل با  $187/2 \text{ Mj/m}^2$  در هر سال و مقدار انرژی نهفته محاسبه شده هر ساختمان معادل با  $2372 \text{ Mj/m}^2$  می‌باشد، در صورتی که طول عمر مفید ساختمان ۵۰ سال در نظر گرفته شود، انرژی نهفته آن معادل با  $25/3\%$  انرژی بهره‌برداری کل است. کاهش قابل توجه در مقادیر انرژی بهره‌برداری با توجه به پیشرفت در زمینه عایق‌ها به معنای افزایش قابل توجه در سهم انرژی نهفته می‌باشد تا جایی که در آینده نزدیک انرژی نهفته یک ساختمان معادل با  $40\%$  درصد انرژی بهره‌برداری آن خواهد بود، به علاوه نویسنده فوق‌الذکر در مقاله خود اعلام نموده است، در صورتی که  $75\%$  درصد از وزن سیمان با افزودنی‌های معدنی تعویض گردد، این اجازه را به ساختمان خواهد داد که در طول عمر مفید ۵۰ ساله، بهره‌وری بسیار بالایی از نقطه نظر انرژی نهفته داشته باشد.

لانگستون [18] می‌گوید، اگرچه محاسبات مربوط به انرژی بهره‌برداری نسبتاً ساده و بدون محاسبات پیچیده خاصی قابل انجام است ولی محاسبات انرژی نهفته مصرفی بسیار پیچیده بوده و نیازمند صرف زمان قابل توجهی می‌باشد، علاوه بر آن برای محاسبات انرژی نهفته هیچ روش تایید شده مشخصی وجود ندارد تا به کمک آن بتوان مقادیر انرژی نهفته را به صورت دقیق و ثابتی محاسبه نمود [9] و [10]، بنابراین اختلافات زیاد در محاسبات این نوع از انرژی در جهان زیاد بوده و در حال حاضر این اختلاف‌ها غیر قابل پیشگیری هستند. [9]، [10]، [18] و [19]

اخیراً بیشتر تحقیقات بر روی انرژی نهفته روی انرژی نهفته موجود در مصالح ساختمانی متمرکز شده و محققین بر این عقیده‌اند که برای کاهش انرژی نهفته کل، موثرترین راه کاهش انرژی نهفته مصالح مصرفی می‌باشد [20]. ردی [21] می‌گوید، انسان‌ها در سالهای گذشته از مصالحی استفاده می‌کردند که انرژی نهفته مربوط به آنها نزدیک به صفر بوده است به این علت که استخراج آنها نسبتاً ساده بوده و عملیات خاصی پس از استخراج بر روی آنها انجام نمی‌شده است، مانند استفاده از خاک، برگ‌ها و چوب در حالی که در حال حاضر از مصالحی استفاده می‌شود که در ذات خود انرژی نهفته بسیار زیاد و قابل توجهی دارند مانند آهن، فولاد و پلاستیک‌ها که باید پیش از استفاده مسافت زیادی را طی نموده و در نتیجه مقادیر زیادی از انرژی نهفته حمل را نیز به خود اختصاص می‌دهند. دانش موجود در زمینه انرژی نهفته مصالح نشان می‌دهد که تنها نباید بر روی استفاده از مصالحی با انرژی نهفته کم متمرکز شد، بلکه باید ساخت و تولید نیز به گونه انجام شود که استفاده از انرژی تولیدی و انتشار دی‌اکسیدکربن به حداقل سطح خود برسد [12].

طبق تحقیقات انجام شده توسط تورمارک [22] نشان داده شده که حدود  $40\%$  از کل انرژی مصرفی یک ساختمان با عمر مفید حدودی ۵۰ سال سهم انرژی نهفته آن است و در صورتی که از مصالح جایگزین با انرژی نهفته کمتر استفاده شود می‌توان این مقدار را  $17\%$  کاهش داد. انرژی نهفته مصالح ساختمانی به عواملی مانند فرآیند تولید، وجود مواد خام اولیه در نزدیکی پروژه، بازده تولید و حجم مصالح مصرفی بستگی دارد. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط دیکسیت [20] نشان داده شده است که اطلاعات مربوط به انرژی نهفته به ۱۰ عامل مهم بستگی دارد که عبارتند از: مرزهای سیستم بررسی، روش تحلیل انرژی نهفته، مختصات جغرافیایی محل مورد مطالعه، انرژی‌های اصلی و تحویلی، قدمت منابع اطلاعاتی، منبع اطلاعات، صحت اطلاعات، تکنولوژی ساخت و تولید محصولات، ملاحظات خوراک انرژی و مسائل مربوط به زمان.

رابطه مشخصی بین انرژی نهفته و آلودگی دی‌اکسیدکربن وجود دارد که اشبی [23] به آن پرداخته است. طبق نظر او در حمل و نقل و بیشتر صنایع تولیدی ارتباط بین مصرف انرژی بر حسب مگاژول و انتشار دی‌اکسیدکربن بر حسب کیلوگرم مطابق با (رابطه ۱) است:

$$\text{میزان انتشار دی‌اکسیدکربن (کیلوگرم)} = \text{مصرف انرژی (مگاژول)} \times 0.8 \quad (1)$$



## ۲. مصالح کم کربن

استفاده از مصالح نوین در صنعت ساختمان نیازمند توجه به بسیاری از موارد است [21] که برخی از آنها را می توان اینگونه نام برد، مقادیر انرژی ذخیره شده در مواد، منابع طبیعی و مواد خام مصرفی، بازیافت مصالح و یا انهدام بدون خطر آنها و تاثیرات استفاده از این مواد بر محیط زیست. در سالهای اخیر بیشتر تلاش محققین در زمینه شناخت تاثیرات ناشی از استفاده مصالح ساختمانی بر محیط زیست اطراف انجام شده که نتایج آنها به بسیاری از نرم افزارهای تجاری و کتابهای مرجع انتقال داده شده است [24] و [25]. پایگاه اطلاعات داده مربوط به کشور انگلستان از جمله این موارد بوده تا به کمک آن بتوان اطلاعات جامعی در باره میزان انرژی نهفته مصالح ساختمانی و همین طور مقادیر آزاد سازی دی اکسید کربن آنها به دست آورد. [25]

### ۲.۱. دی اکسید کربن موجود در مواد خام و مواد سوختی

انتشار دی اکسید کربن مربوط به هر پروسه تولید به دو دسته کلی تقسیم بندی می شود، ترکیبات کربنی موجود در مواد خام اولیه که در مراحل پردازش و تولید به دی اکسید کربن تولید می شوند که به دی اکسید کربن مصالح خام معروف هستند و قسمت دوم مربوط به دی اکسید کربن منتشر شده ناشی از احتراق سوخت های فسیلی در طی عملیات استخراج و پردازش مربوط می شود و اصطلاحاً دی اکسید کربن مواد سوختی قلمداد می شود. با توجه به مشخص بودن ترکیبات شیمیایی مواد خام، برآورد دی اکسید کربن مصالح خام به راحتی قابل محاسبه خواهد بود. [26]

### ۲.۲. سیمان و بتن

تاثیر قابل توجه ساختمان های بتنی بر محیط زیست به علت وجود کلینکر در آنها است. این ماده اصلی ترین مولفه برای تولید سیمان در سراسر جهان می باشد و تولید هر تن از این محصول باعث آزاد سازی حدود ۱ تن دی اکسید کربن خواهد شد [23] و [27]. کاهش مقدار استفاده از کلینکر و جایگزینی آن با موادی مانند پوزولان ها و خاکستر بادی که در کنار سیمان خاصیت سیمانی شدن را دارند باعث کاهش انتشار دی اکسید کربن خواهد شد.

هابرت و راسل دو تغییر را که کمترین تاثیر بر محیط زیست را خواهد داشت در طرح اختلاط بتن ارزیابی کردند [27]. در تغییر نخست آنها کلینکر موجود در سیمان را با مواد معدنی که خاصیت سیمانی شدن را دارند، تعویض نمودند تا در یک حجم مشخص از بتن تاثیرات مخرب وارد بر محیط زیست را به حداقل برسانند و در تغییر دوم سعی نمودند تا با افزایش بهره وری بتن مقدار استفاده از آن را به حداقل برسانند. در کشور فرانسه مشاهده گردید که با اعمال تغییر اول می توان تا ۱۵٪ از انتشار دی اکسید کربن کاسته و با اعمال تغییر دوم می توان این مقدار را به ۳۰٪ نیز رسانید.

گارتنر [26] بر روی تاثیر جایگزین نمودن بخش زیادی از سیمان متداول با سیمان های هیدرولیکی با انرژی نهفته به مراتب پایین تر کار کرد و مشاهده نمود در حجم معینی از بتن میزان انتشار دی اکسید کربن کاهش قابل ملاحظه ای خواهد داشت. امروزه صنایع ساخت سیمان نسبت به نگرانی و الزام جهانی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای واکنش نشان داده و تلاش نموده اند تا از مواد جایگزین سیمان که خاصیت سیمانی شدن را دارند، استفاده نماید. در همین راستا استفاده از مواد فرعی که در حین تولید مواد دیگری به وجود آمده اند مورد توجه قرار گرفته است، از جمله این موارد می توان به

خاکستر بادی مانده در مراحل احتراق زغال سنگ و سرباره آهن گدازه اشاره نمود. ذکر این نکته ضروری است که دستیابی به موادی مشابه موارد ذکر شده در حجم زیاد که کیفیت قابل قبولی داشته باشند کار دشوار و سختی خواهد بود. به عنوان راهکاری دیگر می‌توان به استفاده از پوزولان‌های طبیعی اشاره نموده که البته برای فعال نمودن خاصیت سیمانی آن‌ها به مقداری از سیمان‌های هیدرولیکی و یا هیدروکسیدها نیاز است که این مساله نیز باعث انتشار مجدد دی‌اکسید کربن خواهد شد.

امانوتل [28] کمیته را به عنوان شاخص پایداری محیط زیست برای مصالح دیوارها تعریف نمود و آن‌ها را بر اساس میزان تاثیر بر محیط زیست دسته‌بندی نمود. او ادعا می‌کند اگرچه ساخت دیوار با چوب و خشت تاثیر مخرب بسیار کمی بر محیط زیست خواهد داشت ولی سرعت اجرا و مقاومت آن‌ها به مراتب از دیوارهای ساخته شده با بلوک‌های سیمانی متداول کمتر است و در نهایت سیستمی را به عنوان سیستم پایدار تلقی می‌کند که مکانیزم تولید مصالح آن از حالت سنتی به حالت مدرن تبدیل شده و بهره‌وری بالایی در انرژی داشته باشد.

تحلیل‌های انجام گرفته بر روی مصالح ساختمانی مختلف نشان می‌دهند که بین تمامی مصالح ساخت و ساز، چوب کمترین انرژی نهفته و فولاد بیشترین آن را دارد، بتن نیز بین این دو مقدار قرار خواهد گرفت. استفاده از چوب تاثیر منفی بر مقدار کربن موجود در محیط زیست را دارد، زیرا در صورت عدم استفاده از آن به عنوان مصالح ساختمانی، می‌تواند به کاهش مقدار دی‌اکسید کربن کمک شایانی کند. ولی مقدار کربن تولیدی در تامین فولاد به مراتب بیشتر از تامین و تولید بتن خواهد بود.

تالوکدار [29] مطالعه‌ای را بر روی پتانسیل استفاده از لاستیک فرسوده خودروها، شیشه‌های شکسته شده و سنگدانه‌های بازیافتی بر طرح اختلاط بتن انجام داد و هدف او رسیدن به مقدار مشخصی از مقاومت و مدول ارتجاعی بتن بود. طبق تحقیقات او سنگدانه‌های بازیافتی و شیشه‌های شکسته شده گزینه‌های مناسبی جهت کاهش انرژی نهفته کل بودند که به مقاومت مناسب نیز دست یافتند، ولی استفاده از لاستیک باعث شد تا مقدار زیادی هوای ناخواسته به بتن اضافه شود که کاهش مقاومت قابل توجهی را ایجاد کرد.

جایاپالان [30] تاثیر استفاده از مواد نانو و میکرو را در مصالح سیمانی بررسی نمود، مطابق با نتایج او استفاده از این مواد باعث افزایش انرژی نهفته و کربن نهفته مصالح خواهد شد، مطابق با نتایج او بهترین روش برای دستیابی به توسعه پایدار استفاده از مصالح و منابع طبیعی مانند سنگ آهک است و می‌توان در کنار آن‌ها از مصالح فرعی که از تولید مصالح اصلی ایجاد می‌شوند مانند خاکستر بادی استفاده نمود.

### ۳.۲. چوب

بوچانان و لوین [31] نشان دادند که ساختمان‌های چوبی مقادیر بسیار کمتری از انرژی نهفته را در خود جای داده و به تبع آن انتشار گازهای گلخانه‌ای منتج از تولید و ساخت آن‌ها نسبت به سایر مصالح ساختمانی مانند آجر، آلومینیوم، فولاد و بتن کمتر است. استفاده از مصالح چوبی در صنعت ساختمان امروز راهکاری مناسب به نظر می‌رسد زیرا برای تولید آن‌ها منابع فسیلی کمتری نسبت به سایر مصالح ساختمانی سوزانده شده و کاهش کربن ناشی از سوخت‌های فسیلی به ازای استفاده از مصالح چوبی بیش از مقدار کربنی است که در دراز مدت توسط مصالح چوب جذب می‌شود.

نتایج تحقیقات نشان می‌دهند که افزایش ۱۷ درصدی استفاده از مصالح چوبی در کشور نیوزلند باعث کاهش ۲۰ درصدی کل گازهای گلخانه‌ای انتشار یافته به واسطه تولید تمامی محصولات ساختمانی خواهد شد، این مقدار معادل با کاهش ۱/۵ درصدی کل گازهای انتشار یافته می‌باشد [31]

### ۴.۲. آجرها و بلوکها

جیاو [32] با استفاده از مواد زاید جامد سعی نمود تا بر روی مصالح ساختمانی با کربن نهفته کم تغییراتی ایجاد نموده و خواص مکانیکی آنها را بهبود ببخشد. برای این کار او ۴ ماده زائد (یا محصول فرعی) را انتخاب نمود که عبارتند از: گل های لایروبی شده از سطح کانالها، خاکستر بادی، سرباره آهن و گل کلسیم کربید. مطابق با تحقیقات او مشخص شد که وجود گل های لایروبی شده می تواند تاثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی آجرها با کربن نهفته کم داشته باشد و مطابق با تست های انجام شده درصد استفاده از این ماده در ساخت آجر می تواند تا ۶۵٪ نیز افزایش داشته باشد. همچنین وجود خاکستر بادی، سرباره آهن و گل کلسیم کربید تاثیر بسزایی در خواص مکانیکی آجرهای پخته شده داشتند و در بهینه ترین حالت مقدار استفاده از آنها به ترتیب برابر با ۱۵٪، ۱۰٪ و ۱۲٪ می باشد. بر اساس نتایج تحقیقات او برای تولید هر مترمکعب از آجرهای ساخته شده با خاکستر بادی حدود ۴۳۶ کیلوگرم کربن منتشر خواهد شد که از این مقدار حدود ۸۱/۶٪ مربوط به کربن نهفته موجود در مواد خام بوده و ۱۸/۴٪ مربوط به کربن نهفته آماده سازی و فرآیند تولید آن است.

مطابق با نتایج ردی [21] می توان به جای آجرهای رسی پخته شده متداول از بلوک های گلی تثبیت شده استفاده نمود، این بلوک دوستدار محیط زیست بوده و برای تولید آنها از خاک، ماسه، مواد تثبیت کننده (آهک یا سیمان) و آب استفاده شده است. همچنین می توان در تولید آنها از ترکیب محصولات فرعی مانند خاکستر بادی نیز استفاده نمود. نتایج او نشان می دهند که انرژی نهفته این بلوکها حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد کمتر از انرژی نهفته آجرهای پخته رسی متداول است.

کینوتیا [33] در تحقیق مشابه دیگری به جای استفاده از تثبیت کننده های سیمانی و آهکی، از سرباره کوره های آهن که به صورت ذرات بسیار ریزی هستند استفاده کرد. مطابق با نتایج او انرژی مورد نیاز برای تولید هر ۱۰۰۰ کیلوگرم از این ماده ۱۳۰۰ مگاژول و کربن منتشر شده متناظر آن معادل با ۰/۰۷ تن می باشد در حالیکه انرژی مورد نیاز برای تولید هر ۱۰۰۰ کیلوگرم سیمان پرتلند حدود ۵۰۰۰ مگاژول بوده و دی اکسید کربن منتشر شده به ازای آن نیز حداقل ۱۰۰۰ کیلوگرم می باشد.

### ۵.۲. دیوارهای خاک متراکم

ساخت این دیوارها و یا ساختمانها به این روش به اینگونه است که ابتدا به اندازه ضخامت دیوار قالب بندی شده و خاک با ترکیب مشخص، با یا بدون تثبیت کننده درون آن، به صورت لایه لایه درون قالب ریخته شده و به مقدار بسیار زیادی متراکم می شود. در حال حاضر تعداد زیادی دیوار و ساختمان با استفاده از این فناوری ساخته شده اند. [21]

این نوع از دیوارها به دو صورت ساخته می شوند، به صورت خاک متراکم تثبیت شده و خاک متراکم تثبیت نشده. حالت خاک متراکم تثبیت نشده از ترکیب موادی مانند خاک، ماسه و شن ساخته می شود و در مقابل آن خاک متراکم تثبیت شده علاوه بر موارد فوق الذکر حاوی تثبیت کننده هایی هستند که مانند چسب مواد را به هم متصل می کنند، از متداول ترین آنها می توان سیمان و آهک را نام برد. انتشار کربن سیستم خاک متراکم تثبیت نشده تقریباً معادل با صفر است ولی با توجه به تجربیات گذشته و سوابق اجرایی آن، به کار بردن تثبیت کننده ها در آن ضروری به نظر می رسد.

ردی و کومار [34] بر روی انرژی نهفته موجود در دیوارهای خاک متراکم تثبیت شده با سیمان تحقیق کرده و تاثیرات نوع خاک، چگالی دیوار و مقدار سیمان بر انرژی مورد نیاز برای متراکم نمودن خاک را بررسی نمودند. طبق نتایج آنها انرژی مورد نیاز برای متراکم نمودن خاک بین  $0.33 \text{ Mj/m}^3$  تا  $0.36 \text{ Mj/m}^3$  است که این مقدار در مقابل انرژی سیمان مصرفی قابل چشم پوشی خواهد بود. انرژی نهفته با افزایش مقدار سیمان به صورت خطی افزایش پیدا کرده و در صورت وجود سیمان به مقدار ۶ تا ۸ درصد از کل مخلوط، انرژی نهفته مربوط به سیمان بین  $0.4 \text{ GJ/m}^3$  تا  $0.5 \text{ GJ/m}^3$  برآورد شده است.

### ۲.۶. ماسه سنگ

کریشنا [35] تحلیلی بر اساس ارزیابی چرخه حیات با توجه به ابعاد سنگ‌های تولیدی در ۸ کارخانه تولید سنگ در کشور انگلستان انجام داد که نشان می‌دهد مقدار آلاینده‌گی ماسه سنگ معادل  $77 \text{ kg CO}_2/\text{Ton}$ ، سنگ گرانیت  $107 \text{ kg CO}_2/\text{Ton}$  و سنگ گابرو  $251 \text{ kg CO}_2/\text{Ton}$  می‌باشد. دلیل این امر وجود معادن ماسه سنگ در کشور انگلستان بوده و با توجه به واردات سایر سنگ‌ها، مقادیر انرژی نهفته حمل آنها افزایش داشته و به تبع از آن مقادیر انتشار دی‌اکسید کربن آنها نیز با افزایش چشم‌گیری همراه خواهد شد.

### ۳. تاثیر تغییر مصالح ساختمانی بر انرژی نهفته کل ساختمان

تعداد زیادی مطالعه در بارهٔ تاثیر مصالح بر انرژی نهفته کل در حوزه ساختمان انجام شده که در این قسمت شرح مختصری از آنها ارائه شده است [35]. مقایسه‌ای در مورد تیرهای فرودگاه اسلو انجام شده که نشان می‌دهد ساخت این تیرها به صورت فولادی بین ۲ تا ۳ برابر انرژی نهفته بیشتر و بین ۶ تا ۱۲ برابر سوخت فسیلی بیشتر نسبت به تیرهای چوبی مصرف می‌کند [36]. بوچنان [31] تاکید می‌کند که مطابق با نتایج او استفاده از مصالح چوبی در ساختمان باعث کاهش چشم‌گیری در انرژی نهفته کل آن خواهد شد. مطالعات در ساختمان‌های کشور آلمان نشان می‌دهند در صورتی که استفاده از منابع چوبی در ساخت ساختمان‌ها افزایش پیدا کند، انرژی نهفته می‌تواند تا ۲۰٪ کاهش یافته و به تبع آن انتشار دی‌اکسید کربن متناظر در این حوزه نیز تا ۵۰٪ با کاهش روبه‌رو گردد. [37]

اگرچه تمرکز بیشتر این مطالعات بر روی مصالح بوده است ولی برخی از آنها نیز روش‌های ساخت را مدنظر قرار داده‌اند. دارول [38] می‌گوید، فرایند ساخت ساختمان‌ها و مصالح مربوطه باید با توجه بیشتری به محیط زیست انجام شده و در تولید محصولات از روش‌هایی به روز استفاده شود، مانند استفاده از انرژی آب در تولید مصالح و استفاده از مواد بازیافتی به جای استخراج مواد اولیه جدید. به عنوان مثال، استفاده از مقاطع و اعضای پیش‌ساخته، استفاده از مواد جایگزین سیمان (خاکستر بادی و سرباره آهن گدازی)، به حداقل رساندن انرژی مورد نیاز برای ساخت کلینکر و تولید سیمان، استفاده از مصالح پایه چوبی و بازیافت مصالح فولادی می‌توانند انتشار کربن را تا ۳۲٪ کاهش داده و تا ۸۰٪ در مصارف انرژی صرفه‌جویی نمایند.



علاوه بر کاهش انرژی نهفته کل، استفاده از مصالح بازیافتی به جای کاهش انرژی مربوط به استخراج و تولید در یک محدوده زمانی خاص از جمله موارد مهمی است که اهمیت آن معادل با کاهش انرژی نهفته کل بوده که متاسفانه تا این زمان پژوهش های بسیار اندکی را به خود اختصاص داده است.

گائو [39] در تحقیقات خود نشان داده است در صورتی که از مصالح بازیافتی در تولید و ساخت ساختمان ها استفاده شود، می توان انرژی نهفته کل را نسبت به زمانی که از مصالح بازیافتی استفاده نمی شود مقدار ۲۵٪ بیشتر کاهش داد. در مطالعه مشابه که در کشور سوئد انجام شده، یک ساختمان یک طبقه یک واحدی که در سال ۱۹۹۷ میلادی ساخته شده را بررسی کرده است. پس از بازسازی بیشتر مصالح این ساختمان به صورت بازیافتی بوده و تعداد زیادی از مصالح نیز دوباره استفاده شده اند، مطابق با نتایج به دست آمده از این تحقیق، این نوع از بازسازی می تواند تا ۴۰٪ انرژی نهفته بیشتری را نسبت به زمانی که این ساختمان از ابتدا ساخته می شود، صرفه جویی نماید. [40]

تومارکز [22] در مطالعه خود نشان داده است که چگونه انتخاب نوع مصالح می تواند بر انرژی نهفته کل مجموعه تاثیرگذار باشد. ساختمان مورد مطالعه او از بهره‌وری بسیار بالایی از نظر انرژی بهره‌برداری برخوردار بوده است ( انرژی بهره‌برداری محاسبه شده آن معادل با  $45 \text{ kWh/m}^2$  در سال است). در ابتدا و بدون در نظر گرفتن مقادیر انرژی نهفته در انتخاب مصالح، انرژی نهفته این ساختمان معادل با ۴۰٪ انرژی بهره‌برداری این ساختمان در طول عمر مفید ۵۰ ساله آن می باشد. سپس با تغییر نوع مصالح توانست این مقدار را ۱۷٪ درصد کاهش دهد و همچنین در یک حالت این مقدار ۶٪ نیز افزایش داشت.

ردی [21] در مطالعات خود نشان داد که انرژی نهفته یک ساختمان بنایی که در آن از سیستم دیوارهای باربر آجری استفاده شده و در آن از روش ساخت سنتی استفاده شده ( استفاده از آجر فشاری برای ساخت دیوار باربر، استفاده از دال بتن آرمه برای ساخت سقف ها و استفاده از موزائیک برای پوشش کف)، برابر با  $2/95 \text{ GJ/m}^2$  است، حال اگر در ساخت به جای استفاده از روش سنتی، از تکنولوژی ساخت و مصالح جدید استفاده شود ( استفاده از بلوک های گلی تثبیت شده برای دیوار چینی، استفاده از قالبهای سفالی برای مجوف نمودن دال بتن آرمه و استفاده از کاشی گلی پخته شده برای پوشش کف) می توان انرژی نهفته کل را به مقدار  $1/53 \text{ GJ/m}^2$  رسانید.

### ۵. انرژی نهفته در سیستم های ساختمانی متداول

مطابق با (جدول ۱) بر اساس تحقیقات ردی [21] در صورت استفاده از فناوری های با انرژی نهفته کم در صنعت ساخت، می توان انرژی نهفته کل یک ساختمان را تا ۵۰٪ کاهش داد.

جدول ۱- انرژی نهفته سیستم های مختلف احداث سقف و دیوار [21]

انرژی نهفته واحد (گیگاژول)	نوع مصالح ساختمانی و روش ساخت
2-3/400	آجر بنایی رسی پخته شده (مترمکعب)
۰/۵-۰/۶	آجر سفالی (مترمکعب)
۱- ۱/۳۵	بلوک بنایی حاوی خاکستر بادی (مترمکعب)
۰/۱۸-۰	دیوار خاک متراکم تثبیت نشده (مترمکعب)
۰/۴۵-۰/۶	دیوار خاک متراکم تثبیت شده (مترمکعب)
۰/۸-۰/۸۵	دال بتن آرمه (مترمربع)
۰/۴۵-۰/۵۵	سقف بنایی با بلوک سفالی (مترمربع)
۰/۶-۰/۷	دال بتن آرمه مجوف با قالب سفالی (مترمربع)
۰/۴۵-۰/۶	سقف طاق ضربی (مترمربع)

## ۵. نتیجه گیری

اگرچه مطالعات و تحقیقات استفاده از مصالح با انرژی کم را مد نظر قرار می دهند، مطالعات انجام شده در زمینه تکنولوژی بتن همواره کربن نهفته و آثار آلاینده گی ناشی از دی اکسید کربن را بررسی می نمایند. انرژی نهفته توسط تعداد زیادی از محققین تعریف شده است که تنها قسمت هایی از این تعاریف مشترک هستند، ولی همگی آن ها متفق القول هستند که، اهمیت انرژی نهفته در مصالح ساختمانی و روش های ساخت روز به روز در حال افزایش است، زیرا بهره وری از انرژی بهره برداری با سرعت پیشرفت کرده و سهم انرژی نهفته از انرژی های چرخه زندگی ساختمان افزایش پیدا می کند، همچنین همگی بر این باورند که محاسبات انرژی نهفته امری پیچیده و دشوار است زیرا تاکنون روشی واحد و پذیرفته شده برای محاسبات آن ارائه نشده و اختلاف نظر در تعاریف محققین مختلف باعث ایجاد اختلاف نتایج قابل توجهی در تحقیقات آنها شده است. در همین راستا برای اولین بار دیکسیست روشی واحد برای محاسبه انرژی نهفته را پیشنهاد کرده است. [13]

مصالحی که در این مقاله به آنها پرداخته شد عبارتند از: سیمان، بتن، چوب، آجرها و بلوک ها، دیوارهای خاک متراکم و ماسه سنگ. در نهایت مقالاتی در ارتباط با تاثیر این مصالح بر انتشار دی اکسید کربن و انرژی نهفته کل ارائه گردید.

فارغ از این که موارد ذکر شده در این مقاله باعث کاهش آسیب رساندن به محیط زیست خواهد شد، ولی تاثیر آن بر کارایی اقتصادی و بهره وری اعلام نگردیده است. در صورتی که نتایج استفاده از این مصالح و روش ها برای مشتریان شفاف نبوده و تاثیری در خرید آنها نداشته باشد، این امکان وجود دارد که استفاده از این روش ها برای سازندگان مشکل آفرین بوده و به دلیل امکان وجود هزینه اضافی برای تحقق موارد یاد شده سود ده نبوده و موجب از بین رفتن سرمایه آنها نیز خواهد شد. بنابراین در اولین قدم باید تاثیرات استفاده از این روش ها و فواید کاهش صدمه به محیط زیست و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای برای همگان مشخص گردد.

## 6. مراجع

- [۱] M. Slesser“ ,Energy in the economy. London: Macmillan; .”۱۹۷۸
- [۲] M. Slesser“ ,Macmillan dictionary of energy. ۲nd ed.. London: Macmillan; .”۱۹۸۸
- [۳] W. Van Gool“ ,Thermodynamic aspects of energy conservation ”,Energy ,pp. ۷۹۲-۷۸۳, .۱۹۸۰.
- [۴] E. Gartner و M. Smith“ ,Energy costs of house construction ”,Energy Policy ,جلد ۴, p. ۱۴۴-۵۷, .۱۹۷۶.
- [۵] R. Wilson و A. Young“ ,The embodied energy payback period of photovoltaic installations applied to buildings in the UK ”,Building and Environment ,جلد ۳۱, p. ۲۹۹-۳۰۵, .۱۹۹۶.
- [۶] S. Rawlinson و D. Weight“ ,Sustainability: embodied carbon ”,Building Magazine , p. ۸۸-۹۱, .۲۰۰۷.
- [۷] L. Koskela“ ,Application of the new production philosophy to construction, CIFE technical report ۷۲. California ”,Stanford University ..۱۹۹۲ ,
- [۸] M. Gonzalez و J. Navarro“ ,Assessment of the decrease of CO<sub>2</sub> emissions in the construction field through the selection of materials: practical case studies of three houses of low environmental impact ”,Building and Environmen ,جلد ۴۱, p. ۹۰۲-۹۰۶, .۲۰۰۶.
- [۹] A. Miller“ ,Embodied energy—a life cycle of transportation energy embodied in construction materials ”,Proceedings of COBRA ۲۰۰۱ research conference .۲۰۰۱ ,
- [۱۰] P. Crowther “ ,Design for disassembly to recover embodied energy ”,Proceed ings of the ۱۶th annual conference on passive and low energy architecture , Melbourne/Brisbane/Cairns; .۱۹۹۹
- [۱۱] G. Treloar و R. Fay“ ,Building materials selection: greenhouse strategies for built facilities ”,Facilities ,جلد ۱۹, p. ۱۳۹-۴۹, .۲۰۰۱.
- [۱۲] G. Ding“ ,The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities ”,PhD thesis. Sydney: University of Technology; .۲۰۰۴
- [۱۳] M. Dixit, J. Fernández-Solís و S. Lavy“ ,Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: a review paper ”,Renewable and Sustainable Energy Reviews , ,جلد ۱۶, p. ۳۷۳-۴۳, .۲۰۱۲.

- [۱۴] I. Sartori و A. Hestnes“ ,Energy use in the life cycle of conventional and low energy buildings: a review article ”,*Energy and Buildings*, ۳۹ جلد p. ۲۰۰۷, ۵۷-۲۴۹
- [۱۵] J. Nassen, J. Holmberg و A. Wadeskog “ ,Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: an input output analysis ”,*Energy* جلد , ۳۲p. ۲۰۰۷, ۶۰۲-۱۵۹۳
- [۱۶] R. Crawford و G. Treloar “ ,Validation of the use of Australian input output data for building embodied energy simulation ”,*In: Proceedings of the ۱۳th international IBPSA conference. Eindhoven. ۲۰۰۳* ,;
- [۱۷] F. Pacheco-Torgal و J. Faria“ ,Embodied energy vs. operational energy Showing the shortcomings of the Energy Performance Building Directive ”,*Materials Science Forum* ,p. ۲۰۱۳, ۹۱-۷۳۲, ۵۸۷-۷۳۰
- [۱۸] Y. Langston و C. Langston“ ,Reliability of building embodied energy modelling: an analysis of ۳۰ Melbourne case studies ”,*Construction Management and Economics* جلد , ۲۶p. ۲۰۰۸, ۶۰-۱۴۷
- [۱۹] M. Lenzen“ ,Errors in conventional and input output base life cycle inventories ”, *Journal of Industrial Ecology* , ۴ جلد p. ۲۰۰۶, ۴۸-۱۲۸
- [۲۰] M. Dixit, J. Fernández-Solís و S. Lavy “ ,Identification of parameters for embodied energy measurement: a literature review ”,*Energy and Buildings*, ۴۲ جلد p. ۴۷-۱۲۳۸, ۲۰۱۰
- [۲۱] B. Reddy“ ,Sustainable materials for low carbon buildings ”,*International Journal of Low-Carbon Technologies* , ۴ جلد p. ۲۰۰۹, ۸۱-۱۷۵
- [۲۲] C. Thormark“ ,The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building ”,*Journal of Building and Environment* , ۴۱ جلد p. ۲۰۰۶, ۲۶-۱۰۱۹
- [۲۳] M. Ashby“ ,Materials and the environment: ecoinformed material choice ”,*Oxford: Butterworth-Heinemann* ..۲۰۰۹ ,
- [۲۴] J. Anderson“ ,The green guide to specification: an environmental profiling system for building materials and their components ”,*Oxford: Blackwell Science Publishing*. ۲۰۰۲ ,
- [۲۵] J. Anderson, D. Shiers و K. Steele“ ,The green guide to specification ۴ ”,*th ed. UK: BRE Press*. ۲۰۰۹ ,
- [۲۶] E. Gartner“ ,Industrially interesting approaches to low-CO ۲ cements ”,*Cement and Concrete Research* , ۳۴ جلد p. ۲۰۰۴, ۹۸-۱۴۸۹
- [۲۷] G. Habert و N. Roussel“ ,Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives ”,*Cement and Concrete Composites* , ۳۱ جلد p. ۲۰۰۹, ۴۰۲-۳۹۷
- [۲۸] R. Emmanuel“ ,Estimating the environmental suitability of wall materials: preliminary



- results from Sri Lanka ”, *Building and Environment* , ۳۹ جلد , p. ۲۰۰۴, ۶۱-۱۲۵۳
- [۲۹] S. Talukdar, S. Islam و N. Banthia“ ,Development of a lightweight low-carbon footprint concrete containing recycled waste materials ”, *Advances in Civil Engineering* ۲۰۱۱ , Article ID ۵۹۴۲۷۰, ۸ p.
- [۳۰] A. Jayapalan و B. Lee “ ,Can nanotechnology be “ green ?”Comparing efficacy of nano and microparticles in cementitious materials ”, *Cement Concrete Composites* , ۳۶ جلد , p. ۲۰۱۳, ۲۴-۱۱۶
- [۳۱] A. Buchanan و S. Levine“ ,Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions ”, *Environmental Science and Policy* , ۲ جلد , p. ۱۹۹۹, ۳۷-۴۲۷
- [۳۲] S. Jiao و M. Cao“ ,Impact research of solid waste on the strength of low carbon building materials ”, *In: Proceedings of the ۲nd annual conference on electrical and control engineering. Yichang* ., ۲۰۱۱ ,
- [۳۳] J. Kinuthia “ ,Designed non-fired clay mixes for sustainable and low carbon use ”, *Applied Clay Science* , pp. ۲۰۱۲, ۹-۶۰: ۱۳۱-۵۹
- [۳۴] B. Reddy و P. Kumar “ ,Embodied energy in cement stabilised rammed earth walls ”, *Energy and Buildings* , ۴۲ جلد , p. ۲۰۱۰, ۵-۳۸۰
- [۳۵] N. Crishna, P. Banfill و S. Goodsir“ ,Embodied energy and CO<sub>2</sub> in UK dimension stone ”, *Resources Conservation and Recycling* , ۵۵ جلد , p. ۲۰۱۱, ۷۳-۱۲۶۵
- [۳۶] C. Scheuer و G. Keoleian“ ,Life cycle energy and environmental performance of a new university building ”, *Energy and Buildings* , ۳۵ جلد , p. ۲۰۰۳, ۶۴-۱۰۴۹
- [۳۷] A. Petersen و B. Solberg“ ,Greenhouse gas emissions, life-cycle inventory and cost-efficiency of using laminated wood instead of steel construction ”, *Environmental Science and Policy* , ۵ جلد , p. ۲۰۰۲, ۸۲-۱۶۹
- [۳۸] T. Goverse و M. Hekkert“ ,Wood innovation in the residential construction sector; opportunities and constraints ”, *Resources Conservation and Recycling* , ۳۴ جلد , p. -۵۳ , ۲۰۰۱, ۷۴
- [۳۹] V. Darwale و R. Ralegaonkar“ ,Review of carbon emission through buildings: threats, causes and solution ”, *International Journal of Low-Carbon Technologies* , ۷ جلد , p. ۲۰۰۷, ۸-۱۴۳
- [۴۰] W. Gao, T. Ariyama و T. Ojima“ ,Energy impacts of recycling disassembly material in residential buildings ”, *Energy and Buildings* , ۳۳ جلد , p. ۲۰۰۱, ۶۲-۵۵۳
- [۴۱] C. Thormark“ ,Environmental analysis of a building with reused building materials ”, *International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings* ., ۲۰۰۰ ,