مقاله پژوهشی

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و شش، شماره چهار، تیر ماه ۱۴۰۳(۱۱۵-۹۹)

بررسی تأثیرات زیست‌محیطی خاک کوبیده و آجر رسی پخته شده با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات

حامد نوری [۱]

مجید صافحیان [۲*]

safehian@srbiau.ac.ir

سید مجدالدین میرمحمدحسینی [۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۲۸ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۷**

چکیده

زمینه و هدف: استفاده از انواع مختلف آجر به عنوان مصالح ساخت و ساز برای سالیان زیادی مورد توجه بشر بوده است. استفاده از مصالح خاکی در مقایسه با سایر مصالح صنعتی تاثیرات مخرب زیست محیطی کمتری دارد. هدف کلی این مطالعه مقایسه میزان انتشار کربن و محاسبه انرژی مصرفی در طول چرخه حیات مصالح خاک کوبیده و آجر رسی پخته شده (آجرهای سنتی) و بررسی تاثیرات زیست محیطی مربوطه می باشد. درنهایت سعی شده است با استفاده از نتایج مقایسه کل زنجیره تولید تا دروازه این دو نوع مصالح، پیشنهاد ساخت و ساز با حداقل اثرات مخرب زیست محیطی و در جهت تامین اهداف توسعه پایدار ارائه گردد.

روش بررسی: روش ارزیابی چرخه حیات در این تحقیق مبتنی بر استفاده از ضوابط و توصیه های استاندارد معتبر ایزو ۱۴۰۴۰ می باشد. مطابق این استاندارد جهت ارزیابی چرخه عمر به بررسی تک تک دروندادها و بروندادهای زیست محیطی در سراسر چرخه حیات محصول یا خدمت از ابتدای تولید تا انتهای عمر بهره برداری توجه ویژه می گردد. محل انجام این پژوهش شهر کاشان می باشد.

یافته‌ها: بر اساس مطالعه انجام گرفته در شهر کاشان دیده شد که به ازای تولید هر یک تن آجر رسی پخته شده در کل زنجیره چرخه حیات، میزان انرژی مصرفی و انتشار کربن به ترتیب معادل ۴۸۰۴ مگاژول و ۱۲۸۷ کیلوگرم گاز دی‌اکسیدکربن است. در مقایسه، برای یک تن ازخاک کوبیده شده، فقط ۱۵۸ مگاژول انرژی مصرفی و تنها ۴۲ کیلوگرم گاز دی‌اکسیدکربن انتشارمی‌یابد. بدین ترتیب استفاده از خاک کوبیده در مقایسه با آجر رسی موجب کاهش ۱۲۴۵ کیلو گرم بر تن تولید گاز دی اکسید کربن و ۴۶۴۶ مگاژول بر تن انرژی مصرفی، یعنی کاهشی بیش از ۹۵درصد می‌شود.

۱- دانشجوی دکتری گروه مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه مدیریت ساخت و آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. *(مسوول مکاتبات)

۳- استاد، دانشکدهٔ مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

بحث و نتیجه‌گیری: کاربرد خاک کوبیده در مقایسه با آجر رسی می‌تواند به میزان قابل ملاحظه‌ای درکاهش اثرات منفی زیست محیطی ساخت و ساز اثر گذار باشد. علاوه بر این برای صاحبان و سازندگان مسکن، انرژی مصرفی و انتشار کربن مضر از آجر رسی پخته شده به عنوان مصالح متداول ساخت و ساز را مشخص می‌کند.

واژه‌های کلیدی: خاک کوبیده، ارزیابی چرخه حیات، آجر رسی پخته، انتشار کربن.

J. Env. Sci. Tech., Vol 26, No. 4, July, 2024

Investigation of the environmental impacts of rammed earth and fired clay bricks by using life cycle assessment method

Hamed Nouri [1]
Majid Safehian [2*]
safehian@srbiau.ac.ir
Seyed Majdeddin Mir Mohammad Hosseini [3]

Admission Date: August 21, 2021 Date Received: April 17, 2021

Abstract

Background and Objective: The use of different types of bricks as construction materials has been considered by humans for many years. The use of earthen materials has low potential environmental impacts than other industrial materials. This study aims to compare carbon emissions (LCCO2) and calculate energy consumption over the life cycle of these materials.

Material and Methodology: In this study, the environmental impacts of using fired clay bricks and rammed earth have been investigated and evaluated using the life cycle assessment method. Rammed earth consists of sand and clay compacted in its optimum moisture.

Findings: According to the study conducted in Kashan, for each ton of fired clay bricks produced in the entire life cycle chain, the embodied energy and carbon emissions are equivalent to 4804 MJ and 1287 Kg of CO_2, respectively. In comparison, for one ton of rammed earth, only 158 MJ of energy are consumed and only 42 Kg of CO_2 are emitted. Thus, the use of rammed earth in comparison with clay bricks reduces by 1245 kg/ton of CO2 production and 4646 MJ/ton (i.e., more than 95%) of embodied energy.

Discussion and conclusion: The use of rammed earth compared to clay bricks can be significantly effective in reducing the negative environmental impacts of construction. In addition, homeowners and builders identify the embodied energy and harmful carbon emissions from fired clay bricks as common construction materials.

Key words: Rammed earth, Life cycle assessment, Fired clay brick, Carbon emission.

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2- Assistant Professor, Department of civil engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. *(*Corresponding Author*)
3- Professor, Department of Civil Engineering & Environmental, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

مقدمه

حجم زیادی از انرژی، آب و مصالح خاک در فعالیت‌های ساخت و ساز مصرف می‌شود. بر اساس گزارش های ارائه شده در سال ۲۰۱۰ صنعت ساختمان ۳۲ درصد مصرف انرژی کلی، ۱۹ در صد از انرژی مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای و یک سوم انتشار دی اکسید کربن در جهان را بر عهده دارد(۱).

صنعت ساخت و ساز مسئول مصرف ۶۰ درصد از مصالح برگرفته از مواد خام طبیعی است (۲) از چالش‌های بحرانی در صنعت ساخت و ساز ساختمان استفاده از مواد خام، انرژی مصرفی و توسعه پایدار در طول زمان مفید حیات آن است (۳). بنابراین کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای برای معماران و مهندسان از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر این بازیافت مواد به کاهش انتشار دی اکسید کربن منجر می‌شود (۴و۵).

آگاهی‌ها در زمینه مسایل زیست محیطی باعث افزایش تقاضای مصالح دوستدار طبیعت برای اهداف توسعه پایدار، شده است (۶) جهت میل به اهداف توسعه پایدار استفاده از مواد با انرژی مصرفی و مضرات زیست محیطی کمتر مورد توجه قرار دارد (۷). ساخت و ساز دوستدار محیط زیست، یکی از اهداف توسعه پایدار است، لذا ساختمان سبز از نیازهای آینده توسعه پایدار است (۸). یکی از اثرات زیست محیطی توسعه ساخت و ساز، گرمایش زمین است. کارشناسان و متخصصان ذیربط باید برای تغییر الگوی مصرف، جهت کاهش اثرات زیست محیطی ساخت و ساز تلاش نمایند (۹). برای دستیابی به دانش لازم جهت انتخاب مصالح دوستدار محیط زیست باید مصالح مورد استفاده در صنعت ساختمان در کل طول حیات خود، مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرند (۷).

توسعه اقتصادی در دهه‌های گذشته باعث افزایش مصرف منابع و کاهش توجه به محیط زیست شده است (۱۰و۱۱). افزایش میانگین دمای هوا متاثر از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر می‌باشد که تغییرات اقلیمی را به همراه دارد (۱۲). گاز دی‌اکسید کربن یک از گازهای اصلی در بحث گازهای گلخانه‌ای طی فعالیت‌های بشر می‌باشد (۵و۱۳و۱۴). از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ انتشار گازهای گلخانه ای در صنعت ساخت و ساز بیشتر از دو برابر شده است. یعنی در حدود ۹/۱۸ گیگا تن در سال ۲۰۱۰ که این مقدار ۳۲ درصد از مصرف کل انرژی در این بخش مهم جهانی است (۱). فرآیندهای ساخت و ساز باعث افزایش انتشار گاز دی اکسید کربن می‌شود (۱۳). بر اساس توافق نامه پاریس به عنوان یک توافق بین المللی در خصوص تغییرات آب و هوایی که در تاریخ ۲۲ آوریل سال ۲۰۱۶ امضا گردیده، به صنعت ساختمان توجه خاصی شده است. بدین ترتیب معماری موثر و استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر جهت بهبود عملکرد صنعت ساختمان مورد توجه قرار گرفته است (۱۵). شایان ذکر است که هم درمرحله ساخت و ساز و هم در دوران بهره‌برداری ساختمان، اثرات زیست محیطی دارای نقش و اهمیت بسزایی می‌باشد(۱۶و۱۷).

مصالح خاکی به عنوان یکی از مصالح اولیه از دیر باز در ساخت ساختمان‌ها استفاده شده است (۱۸). در حدود ۳۰ در صد از صنعت ساخت و ساز در جهان از مصالح خاکی استفاده می‌شود (۱۹و۲۰). از گذشته تا کنون استفاده از مصالح خاکی پاسخ مناسبی به نیازها در ساخت خانه بشر بوده است (۲۱). خاک کوبیده یکی از روش‌های ساخت و ساز است که در آن لایه‌های خاک در ضخامت‌های ۱۰ تا ۱۵ سانتی متری کوبیده و متراکم می‌شود(۲۲و۲۳). جهت کوبیدن خاک هم از چکش دستی و هم از دستگاه-های تراکم خاک استفاده می شود. تراکم خاک باید در رطوبت بهینه آن جهت رسیدن به وزن مخصوص خشک ماکزیمم و با مصرف حداقل انرژی انجام گیرد (۲۴و۲۵). استفاده از خاک طبیعی به علت هزینه کم، دسترسی آسان و قابلیت بازیافت مصالح، باعث توسعه پایدار ساخت و ساز می‌شود (۲۶). لذا در تکنیک‌های ساخت و ساز که از مصالح خاکی استفاده می‌شود به صورت گسترده همخوانی بیشتری در زمینه پایداری، نسبت به سایر روش‌های معمول در جهان وجود دارد (۲۷).

دیوارهای خاک کوبیده حاصل تراکم خاک در داخل قالب‌های موقتی است، این نوع سازه شباهت زیاد به دیوارهای گلی غیر پخته دارد (۲۸). به صورت ایده‌آل خاک کوبیده متشکل از ماسه و خاک رس است که باید در رطوبت بهینه خود متراکم شده باشد (۲۹). در هر حال خاک نباید شامل مواد آلی باشد. مصالح رس به عنوان چسبنده اجزاء خاک کوبیده که شامل سیلت،

ماسه و شن است می‌باشد (۲۵). تکنیک خاک کوبیده بر اساس دسترسی به مصالح مناسب طبیعی است (۳۰).

بر اساس مطالعات والکر و همکاران جهت گسترش استفاده از خاک کوبیده در ساخت و سازهای کشور انگلستان انجام شده است، از دیوارهای خاک کوبیده هم به عنوان سازه باربر و هم غیر باربر و هم دیوار جدا کننده و هم دیوار خارجی می‌توان استفاده کرد. فرسایش خاک کوبیده از اهمیت بالایی در طراحی دیوارها برخوردار است. علاوه براین دیوارهای خارجی خاک کوبیده بر اساس آیین‌نامه‌های جدید ساختمان نیازمند عایق‌های اضافه حرارتی برای جلوگیری از انتقال انرژی می‌باشند (۲۸).

مصالح خاک کوبیده دارای محدودیت‌هایی مثل خواص مقاومتی ضعیف در مقایسه با مصالح صنعتی مثل فولاد و بتن است (۳۱). در روش‌های سنتی ساخت و سازهای خاک کوبیده که به خاک کوبیده تثبیت نشده معروف است، خاک رس تنها ماده چسبنده می‌باشد (۳۲). در مقابل استفاده از تثبیت کننده‌ها باعث افزایش هزینه ساخت و ساز و اثرات منفی زیست محیطی می‌شود (۳۳). علاوه بر اثرات زیست محیطی استفاده از سیمان به عنوان تثبیت کننده، در عین افزایش مقاومت و دوام، موجب افزایش هزینه‌ها نیز می‌شود (۳۴).

مصالح بنایی یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی برای ساخت خانه می‌باشد. علت این امر مقاومت مناسب در برابر شرایط جوی، در دسترس بودن، مقرن به صرفه بودن، دوام مناسب و آسایش حرارتی می‌باشد (۳۵). آجر که عنصر اصلی تشکیل دهنده مصالح بنایی است، عموما از رس تشکیل شده است (۳۶). معمولا خشت‌های رسی یا آجر رسی پخته به عنوان عناصر باربر در سازه‌های بنایی استفاده می‌شود (۳۷). افراد محلی بر اساس تجربیات خود منابع مناسب برای آجرهای رسی را انتخاب می‌کنند (۳۸). آجرهای رسی پخته شده منابع زیاد انرژی از زمان تولید تا تخریب را مصرف می‌کنند (۳۹و۴۰).

داشتن خانه از نیازهای ابتدایی بشر است (۲). برای هزاران سال مصالح خاکی به عنوان مصالح اصلی ساخت و ساز مورد استفاده قرار گرفته است. در حال حاضر ۳۰ درصد از جمعیت جهان در خانه‌های ساخته شده با مصالح خاکی زندگی می‌کنند (۴۱). از مزایای استفاده از مصالح خاکی که در مطالعات گوناگون بررسی شده است، قابلیت بازیافت راحت در یک حلقه بسته است (۷و۲۳).

توسعه پایدار ساخت و ساز ساختمان‌ها، مخصوصا در بخش مسکونی، به شدت به انتخاب مصالح، روش ساخت و ساز، نوع استفاده و بهره‌برداری و تخریب ساختمان وابسته است. این مراحل باید بر روی کاهش انتشار گاز دی اکسیدکربن، کاهش مصرف انرژی و کاهش مصرف منابع طبیعی در صنعت ساخت و ساز متمرکز باشند. ۱۲/۶۰ درصد تولید گاز دی اکسیدکربن نسبت به کل چرخه حیات ساختمان، مربوط به مرحله تولید و ساخت ساختمان است. این مقدار دومین رده انتشار گازهای گلخانه‌ای بعد از دوران بهره‌برداری و نگهداری ساختمان است. علاوه بر این در مرحله تخریب ساختمان نیز مقادیر کمی تولید دی اکسید کربن تولید می‌شود (۴۲).

با توجه به آگاهی‌های زیست محیطی، استفاده از خاک کوبیده در دهه‌های گذشته در صنعت ساخت و ساز مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این این مصالح در فرم سنتی خود، به شدت دوستدار محیط زیست می‌باشد، این مطلب در خصوص فرم‌های جدید تثبیت شده خاک کوبیده صادق نمی‌باشد (۴۳). در تعدادی از مطالعات اثرات زیست محیطی ساخت و سازهای جدید، معیارهای جدیدی برای انتخاب و ارزیابی مصالح بیان شده است (۴۴). تحقیقات زیادی برای پیدا کردن مصالح دوستدار طبیعت، منجر به استفاده بیشتر از مصالح پایه رسی برای رسیدن به اهداف ساخت و ساز پایدار بوده است (۴۵).

تحقیقات زیادی بر روی ارزیابی چرخه حیات تعدادی از مصالح ساخت و ساز برای مطالعه اثرات زیست محیطی انجام گرفته است (۴۶). ارزیابی چرخه حیات یک سیستم باعث اثرات مهمی در بازدهی زیست‌محیطی می شود (۴۷). ارزیابی چرخه حیات در روش ارزیابی مصالح ساختمانی، باعث یک رویکرد مفید در تحلیل و مستند سازی تکنیک‌ها و متغیرها جهت به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی فرآیند و مراحل ساخت می شود (۴۸). بدین ترتیب حفاظت از محیط زیست به یکی از چالش‌های اصلی بشر تبدیل شده است (۴۹).

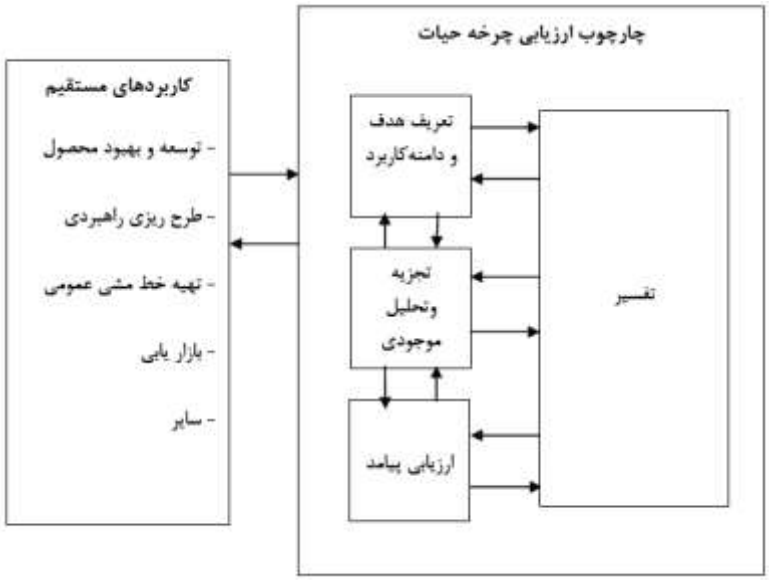
هدف اصلی این مطالعه ارزیابی چرخه حیات زیست محیطی دو نوع مصالح ساخت و ساز یعنی خاک کوبیده و آجر رسی پخته

شـــده بر اســـاس اســـتانداردها و داده‌های جمع آوری شـــده تولیدکنندگان ایرانی اســـت. با اســـتفاده از نتایج مقایســـه کل زنجیره تولید تا دروازه این دو نوع مصـــالح می‌توان ســـاخت و سازی با حداقل اثرات زیست محیطی و رسیدن به اهداف توسعه پایداری دست یافت.

روش بررسی

روش ارزیابی چرخه حیات (LCA) بر اساس استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰ (ISO) انجام می‌گیرد. استاندارد مذکور توسط مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران با همین شماره ترجمه و منتشر شده است. روش ارزیابی چرخه عمر به بررسی دروندادها و بروندادهای زیست‌محیطی در سراسر چرخه حیات محصول یا خدمت از ابتدا تا انتها می‌پردازد. در اصطلاح ادبیات فنی آن را از گهواره تا گور می‌نامند که با استخراج مواد خام از زمین آغاز می‌شود. این استاندارد ۴ مرحله برای ارزیابی چرخه حیات شامل: تعریف هدف و دامنه کاربرد، تجزیه و تحلیل سیاهه، ارزیابی پیامدها و تفسیر نتایج که در شکل ۱ نمایش داده شده است می‌گردد (۵۰).

چرخه حیات ساختمان شامل مراحل تولید، ساخت، بهره‌برداری، تخریب و بازیافت می‌شـــود (۵۱). ارزیابی چرخه حیات یک رویکرد ســـیســـتماتیک و تعاملی برای تحلیل و ارزیابی اثرات زیست محیطی محصول یا فرآیند در کل طول حیاتشان است. این روش بر اســـاس چارچوب ارایه شـــده در اســـتاندارد ایزو ۱۴۰۴۰، داده‌های جمع آوری شـــده از منابع عمومی، اطلاعات شـــرکت‌ها یا محصـــولات و مطالعات تحقیقاتی انجام می‌گیرد (۵۲).



شکل ۱ - مراحل ارزیابی چرخه حیات (۵۳)

Figure 1. Main phases of the LCA [53]

در این مطالعه، چرخه حیات ســـاختمان‌هایی که با آجر رســـی پخته شده که محصول کارخانه‌های آجرپزی در جنوب تهران و ســـازه‌های خاک کوبیده که در ســـایت خود ســـاخته می شـــوند، بررسی شده است.

مطالعه موردی

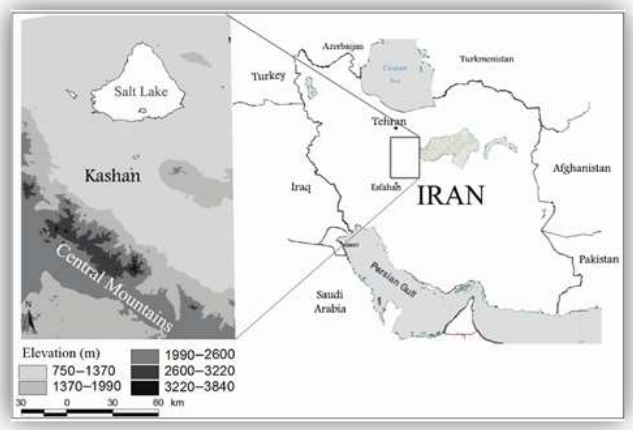
این پژوهش در شهر کاشان با مختصات جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۹ دقیقه شـــمالی و ۵۱ درجه و ۲۶ دقیقه شـــرقی در شـــمال استان اصفهان که در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است، انجام گرفته است. علت انتخاب این شهر، استفاده آجر رسی در ساخت و ساز بناهای ساختمان‌های این شهر است. مقایسه انتشار گاز دی اکسید کربن و انرژی مصرف شده در سازه‌های خاک کوبیده و آجر رســـی پخته در این پژوهش بررســـی شـــده است.

تعریف هدف و دامنه کاربرد

هدف این مطالعه ارزیابی پتانسیل اثرات زیست محیطی و انتشار گاز دی اکسیدکربن و انرژی مصرفی در کل زنجیره ساخت و ساز آجر رسی پخته و خاک کوبیده است. مقایسه در واحد وزنی این این دو نوع مصالح ساختمان در بخش‌های بعدی مقاله انجام می‌گیرد.

تجزیه و تحلیل سیاهه چرخه حیات

ژنگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ سه محدوده را برای تجزیه و تحلیل سیاهه چرخه حیات بررسی کردند. این سه محدوده شامل: مرحله تولید محصول، انرژی مصرفی، سرویس‌های مرتبط که بر اساس مرزهای سیستم است (۵۱). در این مرحله اطلاعات جمع‌آوری و فرآیندهای ساخت و ساز محاسبه می‌شود.



شکل ۲ - موقعیت شهر کاشان در ایران

Figure 2. The location of Kashan as a case study region

شکل ۳ - تصویر ساختمان های سنتی در شهر کاشان

Figure 3. The traditional buildings in Kashan

مرزهای سیستم چرخه حیات

بر اساس دستورالعمل ۲۰۵۰ (PAS 2050) مرزهای سیستم باید به صورت مشخص برای هر محصول در کل فرآیند چرخه حیات مصالح ارزیابی شود. ارزیابی مرز سیستم به عنوان گهواره تا دروازه باید شامل انتشار و حذف گازهای منتشره از جو در ارزیابی انتشارات کلی گازهای گلخانه‌ای محصول مورد ارزیابی باشد (۵۵). فازهای چرخه حیات آجر رسی شامل تولید، کاربرد در ساخت و ساز، بهره برداری، تخریب و بازیافت است. مرحله تولید شامل انرژی مصرفی برای فرآیند تولید می باشد. در شکل‌های ۴ و ۵ مرزهای سیستم و شرح مراحل چرخه حیات را به ترتیب برای خاک کوبیده و آجر رسی پخته ارایه شده است.

مرزهای سیستم چرخه حیات دیوارهای خاک کوبیده

مرزهای سیستم چرخه حیات خاک کوبیده شده شامل اجزای ذیل است:

۱- مرحله تولید شامل ا ستخراج م صالح اولیه می شود. ماده اولیه خاکی است که با استفاده از دستگاه حفاری، با میانگین مصرف سوخت ۲۱ لیتر در ساعت، از محل استخراج می‌شود.

۲- مرحله ساخت و سازکه شامل موارد ذیل است:

- قالب بندی: این فرایند به صورت دستی انجام می‌شود.
- اختلاط کردن: در فرآیند مخلوط کردن ۷ لیتر سوخت در ساعت استفاده می‌شود.
- پر کردن داخل قالب: این فرایند به صورت دستی انجام می‌شود.
- کوبیدن: این فرآیند توسط کارگران با استفاده از چکش پنوماتیک انجام می‌شود که مصرف سوخت آنها ۷ لیتر در ساعت است.
- باز کردن قالب: این فرایند به صورت دستی انجام می‌شود.

۳- مرحله بهره برداری که بیشتر شامل ترمیم سطحی می‌شود. این فرایند به صورت دستی انجام می‌شود.

۴- مرحله تخریب که به صورت دستی یا توسط مینی بیل انجام می‌شود.

۵- مرحله بازیافت، در این فرآیند، مواد به مرحله مخلوط سازی ارسال می شوند.

مرزهای سیستم چرخه حیات آجر رسی پخته شده

مرزهای سیستم چرخه حیات آجر رسی پخته شده شامل اجزای ذیل است:

۱- مرحله تولید شامل موارد ذیل است:

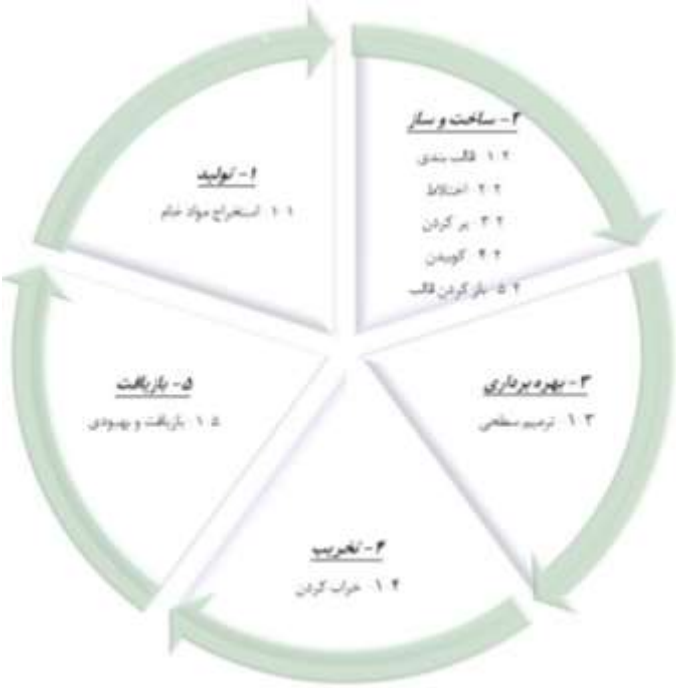
- استخراج مواد اولیه: آجرهای رسی پخته شده بیشتر از خاک رس که در مکان‌هایی به شعاع ۲۰ کیلومتری کارخانه است، ساخته می‌شوند.
- آسیاب کردن: برای دانه بندی مناسب خاک جهت تولید آجر، خاک آسیاب می‌شود.
- الک کردن: پس از خرد شدن خاک باید از الک عبور داده شود.
- مخلوط کردن: در فرآیند مخلوط کردن ۷ لیتر سوخت در ساعت مصرف می‌شود.
- پرس کردن: از پرس الکترونیکی در قالب‌گیری و پرس آجر استفاده می‌شود.
- کوره آجر: بیشترین میزان مصرف انرژی در تولید آجر، پختن آجر در کوره آجرپزی است.

۲- مرحله ساخت و ساز دیوارهای آجری شامل اجرای هرردیف (یا اصطلاحا هر رگ) با ملات ماسه و سیمان است.

۳- مرحله بهره برداری که بیشتر شامل ترمیم سطحی: این فرایند به صورت دستی انجام می‌شود.

۴- مرحله تخریب فرایندی به صورت دستی یا توسط مینی بیل انجام می‌شود.

۵- مرحله بازیافت که طی آن مواد به مرحله مخلوط سازی ارسال می‌شوند.



شکل ۴- مرزهای سیستم چرخه حیات خاک کوبیده شده

Figure 4. Rammed earth system boundaries in LCA

محاسبات انتشار گاز دی اکسیدکربن و انرژی مصرفی

برای تعیین کمی انتشـــار کربن، از معادلات موجود بانک‌های اطلاعاتی اســتفاده می‌شــود. برای انتشــار ســوخت، معادله (۱) جهت محاســبه میزان انتشــار دی‌اکســیدکربن از ســوخت مورد استفاده در ماشین آلات تولید آجر و وسایل نقلیه مورد استفاده برای حمل و نقل استفاده می‌گردد (۳۸).

$$C = F * CF \qquad (۱)$$

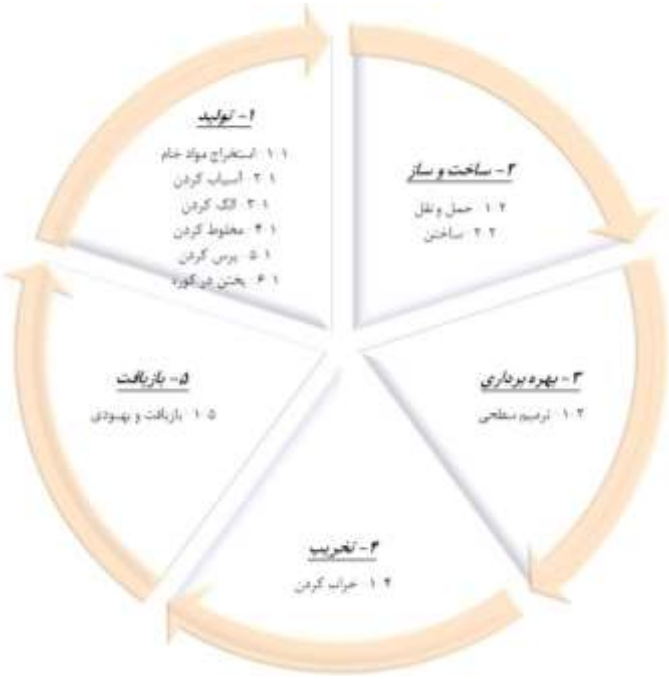
در این معادله:

C: مقدار انتشار دی اکسید کربن(kg)

F: سوخت مصرفی (L)

CF: فاکتور انتشار گاز دی اکسید کربن ($kg\ CO_2/L$)

در این مطالعه، از بانک اطلاعاتی موجود کربن و انرژی (ICE) تهیه شده توسط دانشگاه Bath و دستورالعمل ISIRI7965 که توسط موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، با عنوان معیارهای مصرف انرژی در فرایندهای تولید آجرهای ساختمانی تدوین شده، استفاده و مقایسه شده است. بانک اطلاعاتی موجود کربن و انرژی (ICE) به منظور فراهم کردن یک پایگاه داده قابل دسترس و قابل اعتماد برای انرژی مصرفی و انتشار کربن مرتبط با مصالح ساختمانی تهیه شده است (۵۶).



شکل ۵- مرزهای سیستم چرخه حیات آجر رسی پخته شده

Figure 5. Fired clay bricks system boundaries in LCA

یافته‌ها

فرآیند تولید خاک کوبیده شده

برای ساختن خاک کوبیده شده، شن، ماسه و خاک رس از محل ساخت و ساز جمع آوری می شود و سپس مصالح جمع آوری شده با آب مخلوط می شوند. مونتاژ قالب برای قالب‌بندی خاک کوبیده شده بیشتر به صورت دستی انجام می‌گیرد. کوبیدن خاک توسط کارگران با استفاده از چکش¬های پنوماتیک که توسط یک کمپرسور هوا قابل حمل با مصرف سوخت ۶/۸ لیتر در ساعت، معادل ۲/۶۳ لیتر در متر مکعب از خاک کوبیده شده انجام می‌شود (۷). فقط منابع طبیعی برای تولید خاک کوبیده استفاده می شود، به این معنی که هیچ محصول تولیدی در این مخلوط استفاده نمی شود. نیروی انسانی به عنوان ورودی انرژی برای ساخت خاک کوبیده مورد نیاز است. پس از استفاده و تخریب، خاک به زمین برگردانده می‌شود و می‌توان آن را دوباره به عنوان خاک کوبیده شده یا خاک کشاورزی استفاده کرد. سیاهه چرخه حیات خاک کوبیده شامل محاسبه حمل و نقل کارگران و مواد زائد نیز می‌باشد. جدول ۱ ورودی‌ها و خروجی‌ها را برای ساخت یک متر مکعب از دیواره خاک کوبیده شده ارائه می‌دهد. موجودی چرخه حیات یک متر مکعب از خاک کوبیده شده شامل خاک، آب، برق، حمل و نقل و سوخت به عنوان فاز ورودی در مقابل پسماند خاک و آب برای عمل آوری به عنوان خروجی برای ساخت دیوار خاک کوبیده شده است.

جدول ۱- موجودی چرخه حیات یک متر مکعب از خاک کوبیده شده

Table 1. The life cycle inventory of one m^3 of rammed earth

یک متر مکعب از خاک کوبیده	واحد	ورودی
۲۰۰۰	Kg	خاک
۱۶۵	Lit	آب
۱/۷۵	KWh	الکتریسته
۱۵/۵	Ton.km	حمل و نقل
۲۵۶	MJ	سوخت
		خروجی
۸۸/۹	Kg	پسماند خاک
۹۵/۱	Lit	آب (جهت عمل آوری)

فرآیند تولید آجر

آجرهای ر سی پخته شده با ا ستفاده از رس و ما سه ا ستخراج شده از معدن، تولید می شوند. انت شار کربن به طور م ستقیم و غیرمستقیم تحت تأثیر فرآیندهای تولید، پختن آجر به همراه حمل و نقل مواد اولیه ا ست. انت شار دی‌اک سیدکربن در تولید و پختن آجر به دلیل استفاده از ماشین آلات و کوره‌هایی که از سوخت استفاده می‌کنند زیاد است. در حمل و نقل مواد اولیه به و از سایت‌های ساختمانی، مقدار زیادی سوخت استفاده می‌شود. یک کارخانه آجرپزی در جنوب تهران در شکل ۶ نشان داده شده است. طبق دستورالعمل ISIRI 7965، مصرف انرژی برای تولید آجرهای پرس شده ۲۴۲۰ مگاژول بر تن و ۳۳۲۰ مگاژول بر تن برای آجرهای مهندسی است (۵۷).

از مازوت (ضایعات نفت) یا گازوئیل به عنوان سوخت استفاده می‌شود، به این معنی که حدود ۲۴۲ لیتر در هر تن آجر سوخت سوزانده می¬شود و ۲/۶۸کیلوگرم دی‌اکسیدکربن در لیتر تولید می‌شود. حمل و نقل برای جابجایی مواد اولیه به محل کارخانه و محل ساخت و ساز پس از تولید (۲۴۴ کیلومتر) مورد نیاز است. این حمل و نقل باعث مصرف انرژی بیشتری می‌شود. یک کامیون ۰/۳۵ لیتر سوخت در هر کیلومتر مصرف می‌کند و ۲/۶۸ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن در هر لیتر سوخت منتشر می‌کند.

حدود ۱۰ تا ۸۰ در صد از کل انرژی مورد نیاز برای ساخت یک ساختمان مربوط به حمل و نقل کارگران به محل کارخانه آجرپزی و برعکس ا ست (۳۸). در این مطالعه، میانگین م سافت برای جابجایی کارگران ۱۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. ورودی و خروجی تولید یک تن آجر رسی پخته در جدول ۲ آورده شده ا ست. سیاهه چرخه حیات یک تن آجر ر سی پخته شده شامل خاک، آب، برق، حمل و نقل و سوخت به عنوان فاز ورودی در نقطه مقابل خاک پسماند و آب برای عمل آوری به عنوان فاز خروجی است.

جدول۲- موجودی چرخه حیات یک تن از آجر رسی پخته شده

Table 2. The life cycle inventory of one ton of fired clay bricks

یک تن از آجر رسی.	واحد	ورودی
۱۷۰۰	Kg	خاک
۱۴۵	Lit	آب
۲/۰۰	KWh	الکتریسته
۶۲۴	Ton.km	حمل و نقل

سوخت	MJ	۲۴۲۰۰
خروجی		
پسماند خاک	Kg	۲۴۲
آب (جهت عمل آوری)	Lit	۹۸/۹

انرژی مصـرف شـده برای تولید یک دیوار آجری (آجر و ملات) ۲۸۵۲ مگاژول بر تن در پایگاه داده (ICE) (مرز گهواره تا دروازه) است. ملات استفاده شده در این دیوار آجری از سیمان و ماسه به نسبت ۱ به ۵ تشکیل شده است. یک تن دیوار آجری متشـکل از آجرهای مصـرفی به وزن ۸۵۷ کیلوگرم و ملات به وزن ۱۴۳ کیلوگرم می‌باشد. انرژی مصرف شده برای تولید این مقدار آجرهای مهندسی ۳۰۰۰ مگاژول بر تن است (۵۸).

شکل ۶ - کارخانه آجر پزی در جنوب تهران

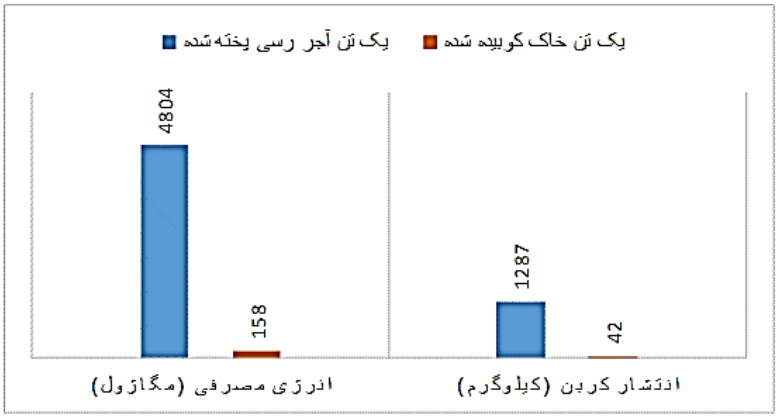
Figure 6. A site of brick factories in southern part of Tehran

مطابق با د ستورالعمل ISIRI 7965 ، حدود ده در صد انرژی مصـرف شـده کمتر برای تولید آجر نسـبت به (ICE) گزارش شـده اسـت. بنابراین انرژی مصـرف شـده برای تولید یک تن از دیوارهای آجری ر سی پخته شده (آجر و ملات) ۲۲۱۲ مگاژول بر تن ا ست. بنابراین ملات در دیوارهای آجری سهم کمتری در مصرف انرژی دارد.

انرژی مصرفی و کربن منتشر شده

نتایج مطالعه نشان می‌دهد که آجر رسی پخته شده در مقایسه با خاک کوبیده شـده تولیدکننده مقدار قابل توجهی از کربن و مصرف انرژی بیشتری در چرخه حیات خود می‌باشد. اگر خاک کوبیده با دیوارهای آجری جایگزین شود، اثرات زیست محیطی ناشـی از انتشـار گاز دی‌اکسـیدکربن و انرژی مصـرفی حداقل خواهد بود (بیش از ۹۵ درصد کاهش نسبت به آجر رسی پخته شده). شکل ۷، انرژی مصرفی و گاز کربن منتشر شده از خاک کوبیده و آجر رسی پخته شده را در یک مقیاس نشان می‌دهد. به ازای تولید هر یک تن آجر تولید شده، میزان انرژی مصرفی و انتشـار گاز دی‌اکسـیدکربن برای اسـتخراج مواد اولیه، آسـیاب کردن، ا لک کردن، مخلوط کردن، پرس کردن، پختن درکوره آجرپزی و انتقال مواد به محل سـاخت به ترتیب برابر ۴۸۰۴ مگاژول و ۱۲۸۷ کیلوگرم دی اکسـید کربن برآورد و محاسـبه شـده اسـت. از طرف دیگر یک تن خاک کوبیده شـده برای ا ستخراج مواد اولیه، قالبندی، مخلوط کردن، پر کردن، کوبیدن، بازکردن قالب و حمل و نقل فقط به ۱۵۸ مگاژول انرژی مصرفی نیاز دارد و انتشار کربن آن ۴۲ کیلوگرم دی اکسید کربن است. علاوه بر این، حداقل انرژی مصـرف شـده و انتشـار گاز دی‌اکسـیدکربن در ارتباط با برگردان خاک کوبیده به طبیعت اتفاق می‌افتد. تخریب خاک کوبیده توسـط کارگران محلی با اسـتفاده از ابزار دسـتی مانند کلنگ انجام می‌شـود، در مقابل

تخریب دیوارهای آجری نیاز به ماشـــین آلات و حمل و نقل ضایعات به محل‌های دفن زباله دارد. با این حال، انرژی مصرف شـده برای تخریب دیوار آجری ۶۰۲ مگاژول بر تن آجر اسـت و میزان انتشـــار کربن ۱۶۱ کیلوگرم دی‌اکســـیدکربن بر تن آجر است.



شکل ۷ – انرژی مصرفی و میزان گاز دی اکسیدکربن انتشار یافته از خاک کوبیده شده و آجر رسی پخته شده

Figure 7. The embodied energy and carbon emissions for rammed earth and fired brick

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه ارزیابی تأثیرات زیســـت محیطی انتشـــار کربن، برای دو مصـالح سـاختمانی قابل تعویض با یکدیگر، یعنی خاک کوبیده و آجرهای رسی پخته شده انجام و ارائه شده است. در مطالعه موردی صورت گرفته نتایج واقعی دو گزینه برای معرفی مصـالح سـاختمانی کم کربن ارائه شـده اسـت. در این پژوهش ارزیابی چرخه حیات به عنوان روش تحقیق انتخاب شده است. نتایج این پژوهش نشـــان می‌دهد که به ازای تولید هر یک تن آجر رســـی پخته شـــده، میزان انرژی و انتشـــار کربن به ترتیب معادل ۴۸۰۴ مگاژول و ۱۲۸۷ کیلوگرم گاز دی‌اکســـیدکربن برای اســـتخراج مواد اولیه، آســـیاب کردن، الک کردن، مخلوط کردن، پرس کردن، پختن در کوره آجر پزی و حمل و نقل به محل ســـاختمان می‌باشـــد. در مقایســـه، برای یک تن ازخاک کوبیده شده، فقط ۱۵۸ مگاژول انرژی مصرفی مورد نیاز است، علاوه بر آن تنها ۴۲ کیلوگرم گاز دی‌اکسیدکربن انتشارمی‌یابد. بنابراین، اسـتفاده از خاک کوبیده شـده به جای آجرهای رسـی منجر به کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن و انرژی مصرف شده به ترتیب تا ۱۲۴۵ کیلوگرم و ۴۶۴۶ مگاژول می‌شـود ، یعنی بیش از ۹۵ درصـــد برای هر تن اجرای خاک کوبیده کاهش در این موارد اتفاق افتاده اســـت. این پژوهش به دلیل نمایش نحوه و میزان تأثیرات زیســـت محیطی می‌تواند گام موثری در انتخاب مصالح ساختمانی مناسب و جایگزینی به جای مصالح صنعتی مانند آجرهای رسی پخته شده، درارتباط با کاهش مصرف انرژی و انتشار گاز دی‌اکسیدکربن به حساب آید. برای تولید مصالح ســـاختمانی مناســـب باید از مواد اولیه محلی و منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده شده و نیز برای اهداف ساختمانی به راحتی قابل بازیافت و استفاده مجدد پس از تخریب باشند. این مطالعه همچنین نشان داد که مصرف انرژی در طول تولید به طور قابل توجهی بر انرژی مصـــرف شـــده و انتشـــارگاز دی‌اکســـیدکربن درطبیعت تأثیر می‌گذارد.

References

1. Ürge-Vorsatz D, Lucon O, Zain Ahmed A, et al (2014) Buildings. In: Mitigation. Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. 671–738.
2. Joglekar SN, Kharkar RA, Mandavgane SA, Kulkarni BD (2018) Sustainability assessment of brick work for low-cost housing: A comparison

between waste based bricks and burnt clay bricks. Sustain Cities Soc 37:396–406.

3. Weißenberger M, Jensch W, Lang W (2014) The convergence of life cycle assessment and nearly zero-energy buildings: The case of Germany. Energy Build 76:551–557.
4. Conejos S, Chew MYL, Yung EHK (2017) The future adaptivity of nineteenth century heritage buildings. Int J Build Pathol Adapt 35:332–347.
5. Sivakumar MVK (2021) Climate change and water productivity. Water Product J 1:1–12.
6. Tinsley J, Pavía S (2019) Thermal performance and fitness of glacial till for rammed earth construction. J Build Eng. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.019.
7. Fernandes J, Peixoto M, Mateus R, Gervásio H (2019) Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks. J Clean Prod. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118286.
8. Le ATH, Park KS, Domingo N, Rasheed E, Mithraratne N (2018) Sustainable refurbishment for school buildings: a literature review. Int J Build Pathol Adapt. https://doi.org/10.1108/IJBPA-01-2018-0009.
9. Khasreen MM, Banfill PFG, Menzies GF (2009) Life-cycle assessment and the environmental impact of buildings: A review. Sustainability 1:674–701.
10. Ahmed IM, Tsavdaridis KD (2018) Life cycle assessment (LCA) and cost (LCC) studies of lightweight composite flooring systems. J Build Eng 20:624–633.
11. Maknon R (1992) Green technology and sustainable development. Civ Eng Sharif 8:46–50.
12. A. G, Amini M, Habibi M, Godarzonad F (2018) Estimation of greenhouse gas emissions from city gas pressure reducing stations. J Envieromental Sci Thenology. https://doi.org/10.22034/jest.2018.15775.2429.
13. Ansari AS (2017) Life Cycle Assessment of Residential Villa. IOSR J Mech Civ Eng 14:50–59
14. Madadi S, Gh. S, A. K (2016) Historical course of global measures to reduce greenhouse gas emissions and the outlook ahead (with emphasis on Iran's position). J. Envieromental Sci. Thenology .
15. Bahramian M, Yetilmezsoy K (2020) Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018). Energy Build 219:109917.
16. Heinonen J, Säynäjoki A, Junnonen JM, Pöyry A, Junnila S (2016) Pre-use phase LCA of a multi-story residential building: Can greenhouse gas emissions be used as a more general environmental performance indicator? Build Environ 95:116–125.
17. Mir Mohammad Hosseini SM (1994) Current patterns of consumption and production of energy and its amendments. Civ Eng Sharif 10:30–37.
18. Raj S. S, Sharma AK, Anand KB (2018) Performance appraisal of coal ash stabilized rammed earth. J Build Eng 18:51–57.
19. Mateus L, Veiga MR, de Brito J, Silva AS (2019) Mineralogical and mechanical characterization of rammed earth external renderings of the south of

Portugal. Constr Build Mater 225:1160–1169.
20. Angulo-Ibáñez Q, Mas-Tomás Á, Galvañ-Llopis V, Sántolaria-Montesinos JL (2012) Traditional braces of earth constructions. Constr Build Mater 30:389–399.
21. Serrano S, Rincón L, González B, Navarro A, Bosch M, Cabeza LF (2017) Rammed earth walls in Mediterranean climate: Material characterization and thermal behaviour. Int J Low-Carbon Technol 12:281–288.
22. Walker P, Keable R, Martin J, Maniatidis V (2005) Rammed earth: design and construction guidelines.
23. Nouri H, Safehian M, Mir Mohammad Hosseini SM (2021) Life cycle assessment of earthen materials for low-cost housing a comparison between rammed earth and fired clay bricks. Int J Build Pathol Adapt. https://doi.org/10.1108/IJBPA-02-2021-0021.
24. El-Nabouch R, Bui QB, Plé O, Perrotin P (2018) Characterizing the shear parameters of rammed earth material by using a full-scale direct shear box. Constr Build Mater 171:414–420.
25. Bui QB, Morel JC, Hans S, Meunier N (2009) Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: The case of rammed earth. Mater Struct Constr 42:1101–1116.
26. Beckett CTS, Cardell-Oliver R, Ciancio D, Huebner C (2018) Measured and simulated thermal behaviour in rammed earth houses in a hot-arid climate. Part A: Structural behaviour. J Build Eng 15:243–251.
27. Loccarini F (2017) Behaviour of rammed earth structures: Sustainable materials and strengthening techniques. 1–151.
28. Maniatidis V, Walker P (2003) A review of rammed earth construction. Dev rammed earth UK Hous 109.
29. Kariyawasam KKGKD, Jayasinghe C (2016) Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. Constr Build Mater 105:519–527.
30. Abhilash HN, Walker P, Venkatarama Reddy B V., Heath A, Maskell D (2020) Compressive Strength of Novel Alkali-Activated Stabilized Earth Materials Incorporating Solid Wastes. J Mater Civ Eng 32:04020118.
31. Hussaini SMS, Toufigh V (2019) Strength and Fracture Behavior of Rammed-Earth Materials. J Mater Civ Eng 31:04019228.
32. Medvey B, Dobszay G (2020) Durability of Stabilized Earthen Constructions: A Review. Geotech Geol Eng 38:2403–2425.
33. Bui TT, Bui QB, Limam A, Maximilien S (2014) Failure of rammed earth walls: From observations to quantifications. Constr Build Mater 51:295–302.
34. Arrigoni A, Grillet AC, Pelosato R, Dotelli G, Beckett CTS, Woloszyn M, Ciancio D (2017) Reduction of rammed earth's hygroscopic performance under stabilisation: an experimental investigation. Build Environ 115:358–367.
35. Jayasinghe C, Fonseka WMCDJ, Abeygunawardhene YM (2016) Load bearing properties of composite masonry constructed with recycled building demolition waste and cement stabilized rammed earth. Constr Build Mater 102:471–477.
36. Al-Kheetan MJ, Rahman MM, Chamberlain DA (2018) Remediation

and protection of masonry structures with crystallising moisture blocking treatment. Int J Build Pathol Adapt 36:77–92.

37. Illampas R, Ioannou I, Charmpis DC (2014) Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress-strain equation. Constr Build Mater 53:83–90.
38. Dabaieh M, Heinonen J, El-Mahdy D, Hassan DM (2020) A comparative study of life cycle carbon emissions and embodied energy between sun-dried bricks and fired clay bricks. J Clean Prod 275:122998.
39. Le HA, Oanh NTK (2010) Integrated assessment of brick kiln emission impacts on air quality. Environ Monit Assess 171:381–394.
40. Bories C, Vedrenne E, Paulhe-Massol A, Vilarem G, Sablayrolles C (2016) Development of porous fired clay bricks with bio-based additives: Study of the environmental impacts by Life Cycle Assessment (LCA). Constr Build Mater 125:1142–1151.
41. Minke G (2000) Earth construction handbook: the building material earth in modern architecture.
42. De Lassio J, França J, Espirito Santo K, Haddad A (2016) Case study: LCA methodology applied to materials management in a Brazilian residential construction site. J Eng (United Kingdom). https://doi.org/10.1155/2016/8513293
43. Arrigoni A, Beckett C, Ciancio D, Dotelli G (2017) Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilised rammed earth. Constr Build Mater 142:128–136.
44. Sameh SH (2014) Promoting earth architecture as a sustainable construction technique in Egypt. J Clean Prod 65:362–373.
45. Marcelino-Sadaba S, Kinuthia J, Oti J, Seco Meneses A (2017) Challenges in Life Cycle Assessment (LCA) of stabilised clay-based construction materials. Appl Clay Sci 144:121–130.
46. Oquendo-Di Cosola V, Olivieri F, Ruiz-García L, Bacenetti J (2020) An environmental Life Cycle Assessment of Living Wall Systems. J Environ Manage 254:109743.
47. Kylili A, Fokaides PA (2016) Life Cycle Assessment (LCA) of Phase Change Materials (PCMs) for building applications: A review. J Build Eng 6:133–143.
48. Christoforou E, Kylili A, Fokaides PA, Ioannou I (2016) Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks. J Clean Prod 112:443–452
49. Morau D, Rabarison T, Rakotondramiarana H (2017) Life Cycle Analysis of Green Roof Implemented in a Global South Low-income Country. Br J Environ Clim Chang 7:43–55.
50. ISO 14040 (2006) Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework (ISO 14040:2006). Environ. Manag. Syst. Requir. 44:
51. Zhang X, Liu K, Zhang Z (2020) Life cycle carbon emissions of two residential buildings in China: Comparison and uncertainty analysis of different assessment methods. J Clean Prod 266:122037.
52. Bilec M, Ries R, Matthews HS, Sharrard AL (2006) Example of a Hybrid Life-Cycle Assessment of Construction Processes. J Infrastruct Syst 12:207–215.
53. Institute of Standards and Industrial

Research of Iran (2006) Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.

54. Shamsipour A, Zawar-Reza P, Alavi Panah SK, Azizi G (2011) Analysis of drought events for the semi-arid central plains of Iran with satellite and meteorological based indicators. Int J Remote Sens 32:9559–9569.
55. BSI (2011) PAS 2050:2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. British Standards Institution, London. 1–45.
56. Hammond GP, Jones CI (2008) Embodied energy and carbon in construction materials. Proc Inst Civ Eng Energy 161:87–98.
57. Institute of Standards and Industrial Research of Iran (2011) Building bricks- Criteria for Energy consumption in production processes.
58. Hammond G, Jones C (2011) A BSRIA Guide. Embodied Carbon: The Inventory of Carbon and Energy. Ice 136.