

Assessment of the Environmental Pollution Impacts of Brick and Composite Facades (Case Study: A Residential Building in Tabriz City)

Paria Memari¹, Fateme Golzaroodi², Taha Sabaghian³, Ahad Shahhoseini⁴

1. Department of Architectural Engineering, Faculty of Architecture and Urban Planning, Islamic Art University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: pa.memari@tabriziau.ac.ir
2. Department of Architectural Engineering, Faculty of Architecture and Urban Planning, Islamic Art University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: fa.golzaroodi@tabriziau.ac.ir
3. Corresponding author, Department of Construction, Faculty of Architecture and Urbanism, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: t_sabaghian@sbu.ac.ir
4. Department of Industrial Design, Faculty of Design, Islamic Art University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: ahad.shahhoseini@tabriziau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received:

18 October 2025

Received in revised form:
22 November 2025

Accepted:
25 November 2025

Available online:
16 December 2025

Keywords:

Brick facade,
Composite façade,
Ecolizer,
Environment,
Pollution.

ABSTRACT

Objective: Nowadays, environmental pollutants are considered one of the most important problems in human life, and one of the sectors producing them is the construction industry. The extraction of raw materials, production of building products, transportation of materials, and many other construction-related activities have substantial and often irreversible impacts on the environment. Therefore, the development and use of green materials and sustainable construction practices are of great importance.

Method: Since the facade is a critical component of a building's construction, this study selects two common types of facade in Tabriz—brick and composite—and investigates their associated pollution. Based on field research and surveys, the impact during the pre-production, production, transportation, and end-of-life phases was calculated using the Equalizer method. First, the amount of materials used in each facade type was obtained, and the pollution amount caused by each facade type was calculated and compared with the mpt pollution index.

Results: According to the calculations, the brick facade produced less pollution than the composite facade. Therefore, between these two studied examples, the brick facade was the more suitable option for the city of Tabriz. The research focused on optimizing the brick facade with less pollution by using alternative materials with lower indicators and also recycled materials so that the facade could be used in the best possible way. By applying optimization methods in the production and transportation process of materials, the pollution level of the brick facade could be reduced by about 70 percent.

Conclusions: Based on the results, the optimal facade type in the study area is the one that, in addition to its availability, causes less damage to the environment. This study showed that choosing building construction materials with less pollution and implementing optimization programs can play an important role in reducing negative impacts on the environment and developing sustainable buildings. Also, issues such as the transportation of materials and supplies, which act as hidden factors in the calculations of the pollution level of the construction industry, are also important in this regard and should be considered in the calculations. This research indicates that before making a final decision on the design and implementation of construction projects, the environmental impacts of materials should be examined in order to control costs and resource consumption in addition to reducing pollution. Overall, this research is a useful step towards green construction and reducing environmental impacts at the urban level.

Cite this article: Memari, P., Golzaroodi, F., Sabaghian T., & Shahhoseini, A. (2025). Assessment of the Environmental Pollution Impacts of Brick and Composite Facades (Case Study: A Residential Building in Tabriz City), Journal of Environmental Studies, 51 (3), 393- 410. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.404057.1008644>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.404057.1008644>

Introduction

Nowadays, the world faces serious environmental issues, including ozone layer depletion and global warming (Chan, Masrom, and Yasin, 2022). Rapid climate change worldwide necessitates urgent action to prevent environmental destruction caused by human activities (Zheng, Imran, and Umair, 2025). In recent decades, global energy consumption has increased significantly due to population growth, rapid urbanization, and economic development (Vajdi and Aslani, 2023), which exerted intense pressure on energy resources and the environment. This growth has also been accompanied by a rapid increase in greenhouse gas emissions, especially carbon dioxide, leading to environmental problems such as global warming and climate change (Wang and Pan, 2023). Greenhouse gas emissions, especially CO₂, increase with economic growth. The construction sector is a major energy and material user and significantly contributes to pollution and climate change (Chan, Masrom, and Yasin, 2022). The construction sector uses 30 percent of global energy and produces over 60 percent of greenhouse gases, mainly CO₂, contributing to climate change and global warming (Jia, Guo, and Yang, 2024).

Embodied energy and emissions are the total energy and greenhouse gases in a product's lifecycle, divided into direct (operation) and indirect (production and transportation) types (Wang and Pan, 2023). Many services, such as electricity generation, transportation, manufacturing, construction, and agriculture, are responsible for high levels of climate-changing gases (Orsini and Marrone, 2019). The building materials industry contributes significantly to air pollution by emitting large amounts of SO₂, NO_x, and particulate matter such as PM_{2.5} and PM₁₀ (Cui, Guo, and Xo, 2023), and also releases greenhouse gases (between 3.5 and 4.6 kg of carbon annually) (Zhong, Hu, and Deetman, 2021), along with volatile organic compounds, which harm human health and the environment (Chepaitis, Zhang, and Kalafut, 2024). This phase accounts for over 80 percent of embodied energy, and high material use can hinder national efforts for energy saving, decarbonization, and pollution reduction (Wang and Pan, 2023). Building materials impact the environment throughout their lifecycle—from extraction to disposal and during use, as they consume energy and materials. Therefore, all lifecycle stages must be evaluated (Cabeza, Barreneche, and Miró, 2013).

During building construction, carbon emissions range from 372.43 to 525.88 kg of CO₂ per square meter, with the manufacturing phase of construction materials accounting for approximately 94.27 percent of total emissions, mainly due to concrete, steel, cement mortar, and lime production (Cheng and Zhou, 2023). The transportation sector is one of the main sources of CO₂ emissions due to fossil fuel combustion worldwide, requiring effective management and solutions to reduce it (Li, Ren, and Li, 2022). Road infrastructure supports economic growth but contributes significantly to environmental issues, with over 25 percent of transportation CO₂ emissions in 2020 related to roads. Construction waste, about 3-4 percent of total GHG emissions, also poses environmental and management challenges. Research focuses on recycling materials like concrete, asphalt, glass, and rubber to reduce impacts and promote sustainable infrastructure. Recycling helps optimize resource use and mitigate environmental harm (Ahmed, Lu, and Ng, 2025).

A building's total energy comprises embodied energy (from material production, construction, demolition, and disposal) and operational energy (for heating, cooling, lighting, and appliances) (Chen, Zhou, and Yang, 2019). Given the increasing greenhouse gas emissions, especially carbon dioxide, on our planet, the necessity for adopting optimized and sustainable construction methods has become more urgent than ever (Watkins, Casamayor, and Ramirez, 2021). The current global patterns of production and consumption have led to irreversible social and environmental damages. Reducing reliance on non-renewable energy sources in construction (Videras Rodríguez, Gómez Melgar, and Andújar Márquez, 2024), and using more durable, long-lasting materials and increasing concrete cover thickness can extend building lifespan and reduce emissions by up to 30 percent (Moran, Flynn, and Larkin, 2025).

Embodied carbon calculation is crucial, especially in early design stages, as it guides necessary adjustments. It involves multiplying material quantities by their carbon factors to estimate total embodied carbon, supporting sustainable decision-making and comparison of design options (Orr, Gibbons, and Arnold, 2020).

Method

Detailed information on the material quantities for brick and composite facades was collected through interviews with facade manufacturers. A four-story building was modeled with its south facade designed in both types, maintaining identical dimensions. Material quantities were calculated and analyzed using the material processing technique (MPT) index from the Ecolizer 2.0 system.

Ecolizer 2.0, a life cycle assessment (LCA) tool based on European databases, quantifies environmental impacts across raw material extraction, production, transportation, use, and end-of-life stages using point (pt) and milli-point (mpt) indicators. The mpt allows numerical comparison of environmental loads between materials. Data for both facade types were inputted into the four main life cycle stages, and total environmental impacts were calculated. Pollution levels for each facade were then computed for pre-production, production, transportation, and end-of-life stages, with total emissions obtained by summing the contributions of all stages.

Results

The results showed that the brick facade had lower environmental impacts than the composite facade in most stages, with total ecological footprints of 996,354 mpt and 1,027,198 mpt, respectively. Transportation impacts were significantly lower for the composite facade due to shorter distances. Despite recycling efforts for brick, the composite facade had a slightly higher overall footprint. To further reduce environmental impacts, an optimized brick facade was designed with modified materials, reduced weight, improved construction methods, and higher recyclability. This optimization reduced the total pollution index by about 70 percent to 310,231 mpt, compared to the composite facade. Notably, the end-of-life stage showed a negative index (−212,184 mpt), indicating that recycling and reintegration of materials could offset prior pollution.

Conclusions

One of the main contributing factors to pollution and carbon emissions in the construction sector is building facade design. Therefore, actions must be taken to reduce these impacts. Such measures include utilizing climate-appropriate materials, incorporating recycled materials, and modifying production processes to lower the carbon footprint. In this study, with quantified estimates of the material consumption for brick and composite facades and the calculation of their associated emissions using the ecolizer method, it was found that the emissions from brick facades were 3 percent lower than those from composite facades. Consequently, brick facades were more environmentally favorable in terms of emission levels. Nevertheless, brick facades could be optimized for better performance. To this end, a recycled-material-enhanced brick facade was developed, and transportation was conducted via train, which has a lower emission factor. The optimized brick facade's emissions were approximately 68 percent lower than those of a conventional brick facade. In conclusion, by selecting appropriate materials and production processes, the amount of pollution emitted from facade constructions can be significantly reduced. These results are based on the technical specifications of two specific facade systems, named Azarakhsh brick and Paya Composite panels, and should therefore be interpreted within this scope.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Not applicable.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere appreciation to “Azarakhsh Brick Company” and “Paya Composite Company” for providing technical data and essential information for this study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

بررسی تأثیرات آلودگی محیط‌زیستی نمای آجری و کامپوزیت (مطالعه موردی: ساختمانی مسکونی در شهر تبریز)

پریا معماری^۱، فاطمه گل زروودی^۲، طاها صباغیان^۳✉، احد شاه‌حسینی^۴

۱. گروه مهندسی معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: pa.memari@tabriziau.ac.ir
۲. گروه مهندسی معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: fa.golzaroodi@tabriziau.ac.ir
۳. نویسنده مسئول، گروه ساختمان، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: t_sabaghian@sbu.ac.ir
۴. گروه طراحی صنعتی، دانشکده طراحی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: ahad.shahhoseini@tabriziau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: امروزه آلاینده‌های محیط‌زیستی از مهم‌ترین مشکلات زندگی بشر به شمار می‌رود که یکی از بخش‌های تولیدکننده آن، صنعت ساختمان می‌باشد. استخراج مواد اولیه، تولید محصولات، حمل‌ونقل مصالح و بسیاری مسائل دیگر که عمدتاً به مصالح ساختمانی مربوط می‌شوند، دارای اثرات مخرب و جبران‌ناپذیری برای محیط‌زیست هستند؛ بنابراین توسعه و استفاده از مصالح سبز و روش‌های ساخت‌وساز پایدار دارای اهمیت زیادی می‌باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶	روش پژوهش: از آنجایی که یکی از بخش‌های مهم در فرایند ساخت یک ساختمان، نمای آن است، در این پژوهش با انتخاب دو نمای رایج آجری و کامپوزیت در شهر تبریز و طبق تحقیقات و بررسی‌های میدانی، به بررسی و محاسبات آلودگی ایجاد شده آن‌ها در بخش پیش‌تولید، تولید، حمل‌ونقل و مرگ محصول با استفاده از معیارهای روش اکولایزر پرداخته شد. ابتدا مقدار مصالح به‌کار رفته در هر نما به‌دست آمد و با شاخص آلودگی mpt مقدار آلودگی هر نما محاسبه و با هم مقایسه گردید.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱	یافته‌ها: طبق محاسبات انجام شده، نمای آجری آلودگی کمتری نسبت به نمای کامپوزیت تولید کرد؛ بنابراین بین این دو نمونه مورد مطالعه، نمای آجری نمای مناسب‌تری برای شهر تبریز است. در ادامه پژوهش، به بهینه‌سازی نمای آجری با آلودگی کمتر با استفاده از مصالح جایگزین با شاخص‌های پایین‌تر و همچنین مصالح بازیافتی پرداخته شد تا نما به بهترین حالت ممکن استفاده شود. با به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی در فرایند تولید و حمل‌ونقل مصالح، می‌توان میزان آلاینده‌های نمای آجری را تا حدود ۷۰ درصد کاهش داد.
کلیدواژه‌ها: اکولایزر، آلودگی، محیط‌زیست، نمای آجری، نمای کامپوزیت.	نتیجه‌گیری: با استفاده از این روش محاسبات می‌توان بهترین نما را انتخاب کرد که علاوه بر در دسترس بودن آن، به محیط‌زیست آسیب کمتری برساند. این نتایج نشان داد که انتخاب مصالح ساختمانی با آلاینده‌های کمتر و اجرای برنامه‌های بهینه‌سازی می‌تواند نقش مهمی در کاهش اثرات منفی بر محیط‌زیست و توسعه ساختمان‌های پایدار ایفا کند. همچنین مواردی مانند حمل‌ونقل مصالح و لوازم موردنیاز که به‌عنوان یک عامل پنهان در محاسبات میزان آلاینده‌های ساختمان است، نیز در این امر حائز اهمیت است و باید در محاسبات در نظر گرفته شود. یکی از نکاتی که از یافته‌های این پژوهش به شمار می‌رود این است که قبل از تصمیم‌گیری نهایی در طراحی و اجرای پروژه‌های ساختمانی، اثرات محیط‌زیستی مصالح مورد بررسی قرار گیرد تا علاوه بر کاهش آلودگی، هزینه‌ها و مصرف منابع نیز کنترل شود. به‌طور کلی، این تحقیق گام مفیدی در جهت ساخت‌وساز سبز و کاهش اثرات محیط‌زیستی در سطح شهری است.

استناد: معماری، پریا؛ گل‌زروودی، فاطمه؛ صباغیان، طاها؛ شاه‌حسینی، احد. (۱۴۰۴). بررسی تأثیرات آلودگی محیط‌زیستی نمای آجری و کامپوزیت (مطالعه موردی: ساختمانی مسکونی در شهر تبریز). نشریه محیط‌شناسی، ۵۱(۳)، ۳۹۳-۴۱۰.

<http://doi.org/10.22059/JES.2025.404057.1008644>

مقدمه

زمین تنها منزلگاه بشر است و برای تأمین نیازهای اساسی انسان‌ها، از جمله منابع طبیعی و مواد اولیه ساخت مسکن، حیاتی می‌باشد. منابعی مانند آب، خاک و مواد معدنی از زمین استخراج می‌شوند و در صورت عدم وجود آن، حیات و توسعه پایدار جوامع ممکن نیست؛ بنابراین مراقبت و مدیریت صحیح از زمین امری ضروری برای حفظ نسل‌ها و اکوسیستم‌ها است؛ اما بسیاری از عوامل انسانی باعث آلودگی محیط‌زیست شده‌اند.

امروزه جهان با مسائل محیط‌زیستی جدی از جمله نازک شدن لایه اوزون و گرم شدن کره زمین مواجه است (Chan, Masrom and Yasin, 2022). تغییرات شدید آب و هوا در سطح جهانی نیازمند اقدام فوری برای جلوگیری از تخریب محیط‌زیست ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌باشد (Zheng, Imran and Umair, 2025). در دهه‌های اخیر مصرف جهانی انرژی به دلیل افزایش جمعیت، رشد سریع شهرنشینی و توسعه اقتصادی به طرز چشمگیری افزایش یافته است (Vajdi and Aslani, 2023) و فشارهای شدیدی بر انرژی و محیط‌زیست تحمیل کرده است. این رشد همچنین با افزایش سریع انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه کربن‌دی‌اکسید، همراه بوده که به مشکلات محیط‌زیستی نظیر گرم شدن کره زمین و تغییرات آب‌وهوایی منجر می‌شود (Wang and Pan, 2023).

انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسید کربن، با رشد فعالیت‌های اقتصادی افزایش می‌یابد. این گاز نقش مهمی در تغییرات اقلیمی دارد و کشورها برای کاهش آن، اقداماتی مانند کاهش استفاده از زغال‌سنگ و بهبود بهره‌وری انرژی انجام می‌دهند. صنعت ساخت‌وساز یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان مصالح و انرژی است و از عوامل مهم انتشار آلودگی محسوب می‌شود (Chan, Masrom and Yasin, 2022). بخش ساخت‌وساز حدود ۳۰ درصد از مصرف انرژی جهانی و بیش از ۶۰ درصد از گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسید کربن را به خود اختصاص می‌دهد. یکی از دلایل تغییرات آب و هوایی، گرم شدن کره زمین، انتشار گازهای گلخانه‌ای و انتشار کربن ناشی از ساخت‌وساز سریع است (Jia, Guo and Yang, 2024).

انرژی نهفته و انتشار آلاینده‌ها اشاره به کل انرژی و گازهای گلخانه‌ای در طول چرخه حیات یک محصول شامل تولید، حمل‌ونقل، ساخت‌وساز و تخریب دارد. این موارد به دو دسته مستقیم (در مرحله بهره‌برداری) و غیرمستقیم (در مراحل دیگر مانند تولید مواد و حمل‌ونقل) تقسیم می‌شوند (Wang and Pan, 2023). بسیاری از خدمات مانند تولید برق، حمل‌ونقل، تولید و ساخت و کشاورزی مسئول سطح بالایی از گاز تغییردهنده آب‌وهوا هستند (Orsini and Marrone, 2019). صنعت مواد ساختمانی باعث انتشار مقادیر زیادی SO_2 ، NO_x و ذرات معلق مانند $PM_{2.5}$ و PM_{10} است که باعث آلودگی هوا می‌شوند (Cui, Guo and Xie, 2023). همچنین موجب انتشار گازهای گلخانه‌ای (سالانه بین ۳/۵ تا ۴/۶ کیلوگرم کربن) (Zhong, Hu and Deetman, 2021) و ترکیبات آلی فرار که به سلامت انسان و محیط‌زیست آسیب می‌زند، است (Chepaitis, Zhang and Kalafut, 2024). طبق مطالعات پیشین این مرحله بیش از ۸۰ درصد از کل انرژی نهفته را تشکیل می‌دهد. بنابراین مصرف مصالح به طور جدی می‌تواند به چالش کشیدن اهداف ملی در زمینه صرفه‌جویی انرژی، کربن‌زدایی و کنترل آلودگی کمک کند (Wang and Pan, 2023). بعد از استخراج مواد اولیه، محصولات تولید، توزیع و بسته‌بندی می‌شوند و پس از استفاده و گذر زمان مضمحل شده و در نهایت باید آن‌ها را دفع نمود. علاوه بر این اثرات محیط‌زیستی اغلب در طول استفاده از محصولات رخ می‌دهد؛ زیرا محصول خود انرژی یا مواد را مصرف می‌کند. برای ارزیابی اثرات محیط‌زیستی یک محصول باید تمام مراحل چرخه عمر آن مورد مطالعه قرار گیرد (Cabeza, Barreneche and Miró, 2013). در مرحله ساخت ساختمان، انتشار کربن بین ۳۷۲/۴۳ تا ۵۲۵/۸۸ کیلوگرم کربن‌دی‌اکسید بر مترمربع متغیر است و مرحله تولید مواد ساختمانی حدود ۹۴/۲۷ درصد از کل انتشارها را تشکیل می‌دهد که عمدتاً ناشی از تولید بتن، فولاد، ملات سیمان و آهک است (Cheng and Zhou, 2023).

بخش حمل‌ونقل یکی از مهم‌ترین منابع انتشار کربن‌دی‌اکسید از جهت سوختن سوخت‌های فسیلی در جهان است که نیازمند مدیریت و راه‌حل‌های مؤثری برای کاهش آن است (Li, Ren and Li, 2022). حمل و نقل جاده‌ای در توسعه اقتصادی اهمیت دارند؛ اما به دلیل ناپایداری و تأثیرات منفی بر محیط‌زیست مورد انتقاد قرار گرفته‌اند؛ در سال ۲۰۲۰ بیش از یک چهارم انتشار دی‌اکسید کربن، مربوط به حمل‌ونقل بود که بخش عمده‌ای از آن از زیرساخت‌های جاده‌ای ناشی می‌شد. همچنین رونق ساخت‌وساز و صنعت باعث تولید زباله‌های ساختمانی شده که مدیریت آن‌ها هزینه‌بر و آسیب‌زا است و حدود ۳ الی ۴ درصد از مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای را تشکیل می‌دهد.

تحقیقات زیادی در زمینه استفاده مجدد و بازیافت مواد مانند بتن، آسفالت، شیشه و لاستیک برای کاهش اثرات محیط‌زیستی و ساخت زیرساخت‌های پایدار در حال انجام است. ترویج بازیافت می‌تواند منابع را بهینه کند و اثرات منفی محیط‌زیستی را کاهش دهد (Ahmed, 2025). کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای هدف حیاتی و مهم است و دستیابی به اهداف بلندپایه در بخش ساختمان، نیازمند طراحی حساس به کربن از ابتدا است. پارامترهای متعدد طراحی و اثرات آن‌ها بر عملکرد ساختمان، همراه با محاسبه و مبادله مقادیر کربن تجسم‌یافته و عملیاتی، فرآیند مقایسه گزینه‌های طراحی در مراحل اولیه را برای معماران پیچیده و چالش‌برانگیز می‌سازد. اغلب ابزارها و روش‌ها بیشتر بر کارایی عملیاتی یا مواد متمرکز هستند و کمتر به تصمیم‌گیری کل‌نگر درباره طراحی حساس به کربن کمک می‌کنند (Torabi, Simonen and Evins, 2025). از آنجایی که صنعت ساخت‌وساز از ابتدای چرخه تولید تامین مصالح تا پس از زمان بهره‌برداری می‌تواند به عنوان یکی از صنایع آلوده‌کننده محیط‌زیست در نظر گرفته شود، در این پژوهش، میزان آلودگی ناشی از اجرای نمای ساختمان به عنوان یکی از اجزای اصلی آن بررسی شد و پس از تحلیل نتایج، راهکارهای بهینه‌سازی با تغییر در مصالح مورد استفاده پیشنهاد گردید.

پیشینه تحقیق

در حدود سال ۱۹۷۰، مفهوم توسعه پایدار معرفی شد و برای آن دو شاخص ردپای اکولوژیکی و ظرفیت زیستی مطرح گردید. ردپای اکولوژیکی نیاز زمین یک فرد یا جامعه را نشان می‌دهد و ظرفیت زیستی توانایی زمین‌های قابل بهره‌برداری را می‌سنجد. توسعه پایدار زمانی تحقق می‌یابد که ظرفیت زیستی بیش از ردپای اکولوژیکی باشد (Cabeza, Barreneche and Miró, 2013). در همین راستا مفهوم انرژی نهفته برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ در مقالات بیان شد و این گونه تعریف شد که انرژی نهفته بخش اصلی از کل انرژی تولیدی هر محصول است و مصالح ساختمان نیز شامل آن محصولات است (Reilly, Kinnane and O'Hegarty, 2020).

هنکوک و بوستد انرژی نهفته را به عنوان انرژی مورد نیاز ساخت‌وساز با تمام فرایندهای لازم مانند استخراج مواد از معدن، پالایش آن‌ها، تولید و حمل‌ونقل، در نظر گرفته‌اند. تعریف مفهومی که توسط دینگ ارائه شده است بیان می‌کند 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 انرژی‌هایی که در زمان ساخت و تخریب ساختمان مصرف می‌شود، است (Figueiredo and Barboza, 2024). کل انرژی مصرفی یک ساختمان به دو بخش اصلی، یعنی انرژی نهفته و انرژی عملیاتی، تقسیم می‌شود. انرژی نهفته به مجموع انرژی‌ای گفته می‌شود که در تمام مراحل چرخه عمر مصالح ساختمانی، از جمله استخراج مواد اولیه و تولید مصالح، تا حمل‌ونقل، اجرای آن‌ها در محل ساخت، و در نهایت تخریب ساختمان و دفع یا بازیافت مصالح مصرف می‌گردد. در مقابل، انرژی عملیاتی شامل انرژی مصرفی در دوره بهره‌برداری ساختمان است که برای تأمین آسایش محیط داخلی، از جمله گرمایش و سرمایش، روشنایی و استفاده از تجهیزات و لوازم مختلف، به کار می‌رود (Chen, 2019). (Zhou and Yang, 2019).

با توجه به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه کربن‌دی‌اکسید در کره زمین، ضرورت اتخاذ روش‌های ساخت‌وساز بهینه و پایدار بیشتر از هر زمان دیگری احساس می‌شود (Watkins, Casamayor and Ramirez, 2021). الگوهای تولید و مصرف جهانی امروز منجر به آسیب‌های اجتماعی و محیط‌زیستی جبران‌ناپذیری شده‌اند. کاهش استفاده از انرژی‌های غیرقابل تجدید در بخش ساخت‌وساز (Videras, 2024) و استفاده از مصالح بادوام‌تر و با طول عمر زیاد می‌تواند به کاهش آلاینده‌ها کمک کند، به‌طوری که مطالعات نشان داده‌اند افزایش عمر ساختمان و ضخامت پوشش بتن می‌تواند تا ۳۰ درصد این انتشار را کاهش دهد (Moran, Flynn and Larkin, 2025). از اقداماتی مانند انتخاب مصالح کارآمد و مناسب با اقلیم (Zhong, Hu and Deetman, 2021) و استفاده کمتر از مواد با انتشار بالا مثل فولاد و بتن، می‌توان میزان انتشار کربن را کاهش داد (Luo, Chang and Zhang, 2019). همچنین روش‌هایی مانند به کار بردن انرژی‌های پاک و مصالح ساختمانی کم‌کربن و مصالح سبز با فناوری جذب کربن تولید شود؛ برای مثال می‌توان از پنل‌های شفاف عایق‌بندی آبروژل به‌دلیل ویژگی‌های عایق حرارتی و ظرفیت عالی جذب کربن استفاده کرد (Jia, Guo and Yang, 2024).

مقدار قابل توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنعت ساختمان را دفع مواد زباله تشکیل می‌دهد که با به‌کارگیری مواد بازیافتی در ساخت‌وساز می‌توان میزان کربن در ساختمان‌ها را کاهش داد (Zhu, Liou and Chen, 2024). استفاده از پودر بتن بازیافتی و ضایعات پلاستیکی منجر به کاهش ۲۲ درصدی انتشار کربن‌دی‌اکسید و افزایش دوام و سختی مخلوط‌های بتنی می‌شود. همچنین مواد بازیافتی بتنی و پوشش آسفالت بازیافتی در درازمدت به منافع اقتصادی و حفظ منابع طبیعی کمک می‌کنند (Torabi, Simonen and Evins, 2025). استفاده از موادی مانند خاکستر بادی و مصالح بازیافتی می‌تواند اثر کربن در بتن تا ۵۲/۶۰ درصد کاهش دهد (Chen, Teng and Zhang, 2023) و به‌کارگیری بامبو و کاه‌گل‌های استرن‌دال به‌عنوان مصالحی پایدار، علاوه بر کاهش انتشار کربن، از نظر سازه‌ای نیز مزایای قابل توجهی دارند (Khoshboo and Mishra, 2023). فناوری‌های نوین مانند بتن خود ترمیم و بیوپلاستیک‌ها راه‌حل‌های پیشرفته‌ای هستند که دوام را افزایش و انتشار را کاهش می‌دهند (Chen, Huang and Hua, 2023). ملات‌های سیمانی دوستدار محیط‌زیست که از مواد بازیافتی؛ مانند مرمر و سرامیک ساخته شده‌اند، خواص مکانیکی بهبودیافته‌ای را نشان داده‌اند در حالی که در طول تولید، انتشار کربن‌دی‌اکسید را کاهش می‌دهند (Nasr, Shubbar and Raed Abed, 2020). مصالح پایدار مانند بتن خرد شده و آسفالت علاوه بر کاهش انتشار، استحکام سازه‌ای را نیز افزایش می‌دهند و به‌عنوان جایگزین‌های مناسب در ساخت‌وساز در نظر گرفته می‌شوند (Foda, Hassan and Abdelkader, 2024).

اما قبل از همه روش‌ها و راهکارهای بیان شده محاسبه آلودگی و کربن نهفته^۱ است. مهم‌ترین زمان برای محاسبه کربن نهفته در مراحل اولیه طراحی است؛ زیرا می‌توان همان موقع تغییرات لازم را انجام داد. محاسبه کربن نهفته از ضرب کردن مقدار هر ماده یا محصول در یک ضریب کربن (که معمولاً بر حسب کیلوگرم کربن‌دی‌اکسید به ازای هر کیلوگرم ماده اندازه‌گیری می‌شود) برای هر مدول، چرخه عمر در نظر گرفته شده است، به‌دست می‌آید. مقادیر مواد و فاکتورهای کربن، بر اساس اطلاعات پروژه بهتر تخمین زده می‌شوند. این محاسبه سریع و ساده امکان برآورد کربن نهفته کل سازه در مرحله مفهومی را فراهم می‌کند و به مقایسه کمی گزینه‌های طراحی پایدار کمک می‌کند (Orr, Gibbons and Arnold, 2020).

روش‌شناسی پژوهش

یکی از روش‌های ارزیابی اثرات محیط‌زیستی محصولات ساختمانی، محاسبه ردپای اکولوژیک است که برای کاهش آلودگی و انتخاب بهترین کالاها در ساخت‌وساز استفاده می‌شود. در این روش شاخص‌های محیط‌زیستی مواد و فرایندها وارد اکولایزر^۲ شده و آلودگی‌های ناشی از استخراج، تولید، مصرف و بازیافت بر اساس داده‌های موجود محاسبه می‌شود. این فرایند امکان مقایسه محصولات و انتخاب بهترین گزینه‌های سازگار با محیط‌زیست را فراهم می‌کند (Yu, Wiedmann and Crawford, 2017). با تحلیل کامل چرخه عمر مواد ساختمانی اکولایزر کمک می‌کند گزینه‌هایی انتخاب شوند که نه تنها اثرات اولیه کربن را کاهش دهند، بلکه بهره‌وری بلندمدت و پایداری را نیز تضمین کنند (Dighade, Gomase and Peshattiwar, 2024).

سامانه Ecolizer 2.0 یک ابزار ارزیابی چرخه عمر (LCA) است که بر پایه پایگاه‌داده‌های استاندارد اروپایی توسعه یافته و اثرات محیط‌زیستی مواد و فرایندهای ساختمانی را در قالب شاخص نقطه (pt) و میلی نقطه (mpt) محاسبه می‌کند. این شاخص نشان‌دهنده بار محیطی یک فرایند است. شاخص اکولایزر یک معیار کمی است که اثرات محیط‌زیستی مواد در مراحل مختلف فرایندهای پیش‌تولید، تولید، توزیع و بسته‌بندی، حمل‌ونقل و دفع را ارزیابی می‌نماید. افزایش مقدار این شاخص نشان‌دهنده بار منفی بیشتر بر محیط‌زیست است، بنابراین استفاده از آن امکان مقایسه و شناسایی مواد با تأثیر کمتر بر محیط و جایگزینی مناسب‌تر را فراهم می‌کند. واحد اندازه‌گیری این شاخص به‌عنوان ارقام بدون بعد در نظر گرفته شده است که به‌عنوان نقطه (pt) است. این عدد بر اساس داده‌های ارزیابی چرخه عمر،

1. Embodied Carbon

۲. اکولایزر یک معیار کمی برای محاسبه اثرات زیست‌محیطی مواد است.

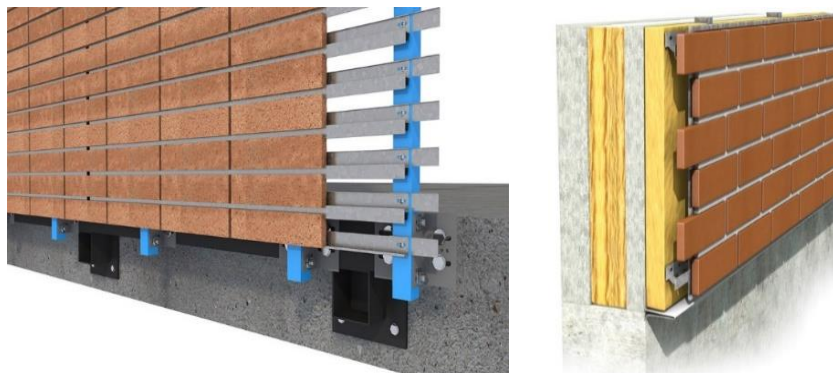
تأثیرات محیط‌زیستی یک ماده یا فرایند را نشان می‌دهد. در واقع مقدار یک pt نماینده یک هزارم بار محیطی یک ساکن اروپایی است. در جداول و محاسبات از میلی نقطه (mpt) استفاده می‌شود (Ovam, 2011:11).

برای به‌دست آوردن مقدار آلودگی هر نما، ابتدا یک ساختمان در شهر تبریز در نظر گرفته و مساحت نمای جنوبی آن محاسبه شد. یک‌بار نمای آجری و بار دیگر نمای کامپوزیت در نظر گرفته شد. مقدار و مشخصات مصالح مصرفی هر نما با مصاحبه از شرکت‌های دو برند آذرخش (آجر) و پایا کامپوزیت (ورق کامپوزیت) و مقدار شاخص mpt از جداول اکولایزر به‌دست آمد. بنابراین در ابتدا لازم بود به بررسی و تحلیل اطلاعات مربوط به دو نمای کامپوزیت و آجری پرداخته شده تا پایه و اساس درک بهتر از ویژگی‌ها و تفاوت‌های این نوع نماها فراهم گردد.

نماها علاوه بر محافظت از محیط داخلی، نقش ارتباط بصری و انتقال نور طبیعی را نیز ایفا می‌کنند که به بهبود کیفیت زندگی کمک می‌کند (Wang, Jia and Tao, 2024). امروزه با تنوع مصالح همچنان از آجر در نمای ساختمان استفاده می‌شود و با توجه به سنتی بودن و همسازی با اقلیم تبریز در ناسازی محبوبیت دارد. نمای کامپوزیت نیز به علت در دسترس بودن، قابلیت اجرا برای هر کاربری ساختمانی و تنوع رنگ و طرح آن در ناسازی استفاده می‌شود. به همین علت این دو نما که در کشور رایج هستند، انتخاب شده و به محاسبات کرین آن پرداخته شده است تا به بهترین نوع ناسازی بین این دو انتخاب شود. در ابتدا به بررسی ویژگی‌های دو نما پرداخته و با توجه به جداول اکولایزر مقدار انرژی صرف شده برای استخراج، تولید، مصرف و بازیافت آن‌ها را به دست آورده شده است.

۱. نمای آجری

طبق مصاحبه‌ها و تحقیقات انجام شده با شرکت آجر آذرخش، نمای آجری به سه روش ملات سیمان، چسب و خشک اجرا می‌شود. اجرا با ملات سیمان روشی قدیمی است که از گذشته تا به امروز کاربرد داشته؛ اما به علت زمان اجرای طولانی، میزان نخاله و ضایعات باقی‌مانده بیشتر، افزایش وزن نما و اجرای نامرتب این روش کمی منسوخ شده است. اجرا با چسب نیز با توجه به دردسرها و ظریف‌کاری آن در حین اجرا، کمتر مورد توجه است؛ اما اجرا با روش خشک یکی از جدیدترین و متداول‌ترین روش ناسازی است. این نما هم سنتی بودن خود را نشان می‌دهد و هم با توجه به اتصالات خود ویژگی‌های به‌خصوصی دارد که شامل: سرعت اجرای بالا، جلوگیری از هدررفت آب، تمیزی نما، جلوگیری از تنش هنگام زلزله و باد، ایجاد عایق صوتی و موارد دیگر است. مطابق شکل ۱ نمای آجری به روش خشک از اجزای مختلفی مثل آجرنما، سازه فلزی نگه‌دارنده آجر، اتصالات و عایق حرارتی تشکیل شده است. آجر استفاده شده در این نما مربوط به شرکت آذرخش قم است که ابعاد آن ۲۰ در ۹۰ سانتی‌متر است. سازه فلزی نگه‌دارنده بر روی سطح نما قرار می‌گیرد که شامل قوطی‌های ۴۰ در ۶۰ میلی‌متر شاسی‌کشی دور تا دور و قوطی‌های ۲۰ در ۴۰ میلی‌متر شاسی‌کشی‌های عمودی است. اتصالات این نما از طریق بسط دوطرفه استیل صورت می‌گیرد و قسمت زیرین و پشت کار با استفاده از ورق پلی‌استایرن و چسب مخصوص عایق می‌شود.

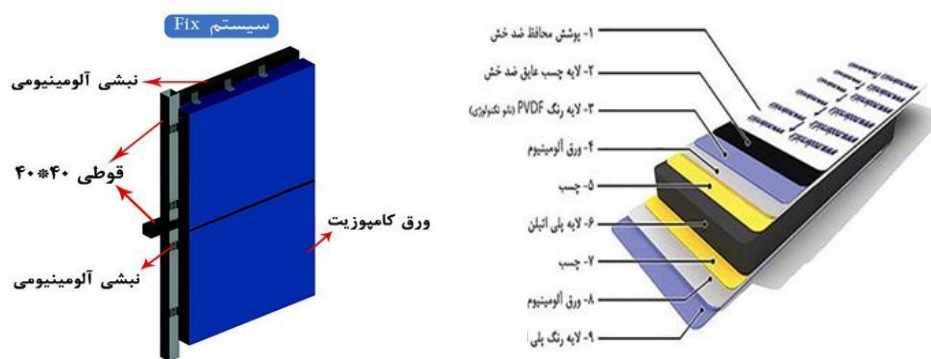


شکل ۱. اتصالات نمای آجری خشک (azarakhsh.ir, 1400)

۲. نمای کامپوزیت

طبق مصاحبه با شرکت پایا کامپوزیت تبریز، همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نمای کامپوزیت از اجزای مختلفی مثل ورق کامپوزیت، سازه فلزی نگه دارنده کامپوزیت و اتصالات تشکیل شده است. ورق کامپوزیت شامل دو لایه ورق آلومینیوم، یک لایه پلی‌اتیلن است که با چسب به هم متصل گردیده‌اند و همچنین روی ورق کامپوزیت یک لایه رنگ جهت جلوگیری از زنگ زدن و غیرقابل نفوذ بودن زده می‌شود. سازه فلزی نگه دارنده بر روی سطح نما قرار می‌گیرد که شامل قوطی‌هایی با ابعاد مقطع ۴۰ در ۴۰ میلی‌متر از جنس استیل به طور عمودی و قوطی‌هایی با ابعاد مقطع ۲۰ در ۴۰ میلی‌متر افقی است. اتصالات این نما به صورت نبشی با ابعاد مقطع ۳۰ در ۳۰ میلی‌متر و همچنین پیچ و پرچ می‌باشد. از بین روش‌های اجرای این نما، روش فیکس به دلیل قابلیت جایگزینی آسان در صورت خرابی کامپوزیت و عدم نیاز به تخریب کامل، رایج‌تر و مناسب‌تر است و برای مطالعه حاضر انتخاب شده است.

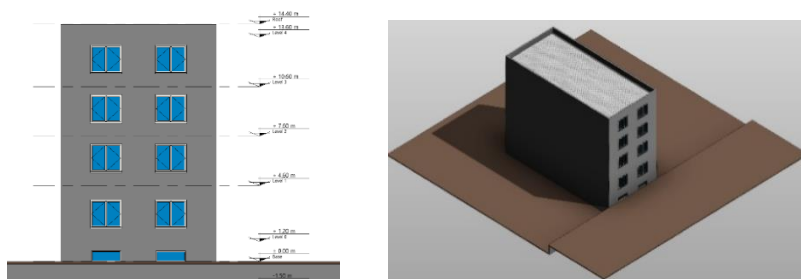
در این روش ابتدا زیرسازی نمای ساختمان صورت می‌گیرد و پس از آن پانل‌های کامپوزیت با دستگاه گروفرزنی خم داده شده و با استفاده از نبشی و براکتی که به زیرسازی آلومینیومی متصل شده است با پیچ و پرچ و به صورت کاستی^۱ نصب می‌شود. درز به وجود آمده بین پانل‌ها در این سیستم با استفاده از نوار یا چسب‌های مخصوص پر می‌شود. در شکل ۲ روش اجرای فیکس نشان داده شده است.



شکل ۲. جزئیات اجرای نمای کامپوزیت (nama.design, 1399)

۳. اطلاعات ساختمان مورد مطالعه

شکل ۳ نمای ایزومتریک از بنای مورد مطالعه و نمای جنوبی ساختمانی با ۴ طبقه و زیرزمین در شهر تبریز را نشان می‌دهد. عرض نما ۹/۴۵ متر و ارتفاع آن ۱۴/۴۰ متر می‌باشد و برای به دست آوردن دقیق مساحت نما، مساحت کل نمای جنوبی از مساحت پنجره‌ها کم شده و رقم ۱۱۰ مترمربع به دست آمده است.



شکل ۳. ایزومتریک (سمت راست) و نمای جنوبی (سمت چپ) ساختمان مورد مطالعه

یافته‌های پژوهش

برای محاسبه میزان آلودگی هر نما به مقدار مواد تشکیل‌دهنده و شاخص mpt هر ماده نیاز است، با استفاده از رابطه ۱ و ۲ که در روش اکولایزر آمده است، در ۴ مرحله به‌دست آورده و مجموع آن محاسبه می‌گردد. طبق فرمول با داشتن مقدار مواد با شاخص مقدار آلودگی را می‌توان محاسبه کرد.

رابطه ۱) {شاخص mpt × مقدار مواد تشکیل‌دهنده kg = مقدار آلودگی ایجاد شده در پیش تولید، تولید و مرگ محصول}

رابطه ۲) {شاخص mpt × مقدار مواد تشکیل‌دهنده ton × مسافت = مقدار آلودگی ایجاد شده در حمل‌ونقل}

روند تولید هر دو نمای مورد بررسی دارای مراحل متفاوتی است. نمای آجری شامل استخراج خاک رس، قالب‌گیری، خشک کردن و پخت در کوره‌های صنعتی است. در مقابل، تولید ورق‌های کامپوزیت شامل آماده‌سازی لایه‌های آلومینیومی، هسته پلیمری و فرایند اتصال و پرس گرم این لایه‌هاست. این خلاصه روند تولید و حمل‌ونقل، مبنای ورود داده‌ها به سامانه Ecolizer 2.0 قرار گرفت که در جدول ۱ روند محاسبات مقدار آلودگی نمای آجری و در جدول ۲ چگونگی محاسبات مقادیر آلاینده‌های نمای کامپوزیت در چهار مرحله پیش‌تولید، تولید، حمل و نقل و مرگ محصول نشان داده شده است.

جدول ۱. محاسبه مقدار آلودگی نمای آجری در چهار مرحله پیش تولید، تولید، حمل و نقل و مرگ محصول

پیش تولید					
نتیجه (mpt)	شاخص (mpt/kg)	مقدار (kg)	مواد و مصالح		
۷۰۶۳۲/۰۰	۱۸/۰۰	۳۹۲۴/۰۰	آجر نما		
۲۳۲۰۸۱/۲۰	۵۵۱/۰۰	۴۲۱/۲۰	قوطی استیل ۴۰*۶۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر		
۱۱۱۳۹۸/۹۸	۵۵۱/۰۰	۲۰۲/۱۸	قوطی استیل ۲۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر		
۲۵۳۴۶/۰۰	۵۵۱/۰۰	۴۶/۰۰	بست استیل دوطرفه		
۱۶۸۹۶/۰۰	۳۸۴/۰۰	۴۴/۰۰	ورق پلی‌استایرن		
۲۱۱۲۰۰/۰۰	۳۲۰/۰۰	۶۶۰/۰۰	چسب پلی‌استایرن		
تولید					
نتیجه (mpt)	شاخص (mpt/kg)	مقدار (kg)	مواد و مصالح		
۱۰۹۸۷۲/۰۰	۲۸/۰۰	۳۹۲۴/۰۰	آجرنما		
۳۲۴۳۲/۴۰	۷۷/۰۰	۴۲۱/۲۰	قوطی استیل ۴۰*۶۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر (ورق نورد)		
۱۱۰/۸۸	۰/۰۲	۷۲۰۰/۰۰	قوطی استیل ۴۰*۶۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر (خمش)		
۱۵۵۶۷/۵۵	۷۷/۰۰	۲۰۲/۱۸	قوطی استیل ۲۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر (ورق نورد)		
۳۱۲۰۰/۰۰	۲/۰۰	۱۵۶۰۰/۰۰	قوطی استیل ۲۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر (خمش)		
۵۹۰/۴۸	۰/۰۲	۳۸۳۴۳/۰۰	بست استیل دوطرفه (برش)		
۹۱۸۴/۰۰	۲/۰۰	۴۵۹۲/۰۰	بست استیل دوطرفه (خمش)		
۲۷۱۴/۰۰	۵۹/۰۰	۴۶/۰۰	بست استیل دوطرفه (ورق نورد)		
۵۵۴۴/۰۰	۱۲۶/۰۰	۴۴/۰۰	ورق پلی‌استایرن (قالب‌گیری تزریقی)		
۲۳۱۰/۰۰	۲۱/۰۰	۱۱۰/۰۰	چسب پلی‌استایرن		
حمل‌ونقل					
نتیجه (mpt)	شاخص (mpt/kg)	شیوه حمل	فاصله (km)	مقدار (kg)	مواد و مصالح
۵۱۹۷۳/۳۸	۱۵/۰۰	کامیون	۸۸۳/۰۰	۳/۹۲	آجرنما

ادامه جدول ۱. محاسبه مقدار آلودگی نمای آجری در چهار مرحله پیش تولید، تولید، حمل و نقل و مرگ محصول

۱۸۳/۲۲	۱۵/۰۰	کامیون	۲۹/۰۰	۰/۴۲	قوطی استیل ۴۰*۶۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر
۸۷/۹۵	۱۵/۰۰	کامیون	۲۹/۰۰	۰/۲۰	قوطی استیل ۲۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر
۲۰/۰۱	۱۵/۰۰	کامیون	۲۹/۰۰	۰/۰۵	بست استیل دوطرفه
۳۲/۳۴	۱۵/۰۰	کامیون	۴۹/۰۰	۰/۰۴	ورق پلی‌استایرن
۴۸۵/۱۰	۱۵/۰۰	کامیون	۴۹/۰۰	۰/۶۶	چسب پلی‌استایرن
مرگ محصول					
نتیجه (mpt)	شاخص (mpt/kg)	مقدار (kg)	مواد و مصالح		
۰	۰/۰۰	۳۹۲۴/۰۰	آجر نما		
۳۲۰۱۱/۲۰	۷۶/۰۰	۴۲۱/۲۰	قوطی استیل ۴۰*۶۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر		
۱۵۳۶۵/۳۸	۷۶/۰۰	۲۰۲/۱۸	قوطی استیل ۲۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر		
۳۴۹۶/۰۰	۷۶/۰۰	۴۶/۰۰	بست استیل دوطرفه		
۱۱۰/۰۰	۲۵/۰۰	۴۴/۰۰	ورق پلی‌استایرن		
۱۴۵۲۰/۰۰	۲۲/۰۰	۶۶۰/۰۰	چسب پلی‌استایرن		
۹۹۶۳۵۴/۰۶			جمع کل		

جدول ۲. محاسبه مقدار آلودگی نمای کامپوزیت در چهار مرحله پیش تولید، تولید، حمل و نقل و مرگ محصول

پیش تولید				
مواد و مصالح		مقدار (kg)	شاخص (mpt/kg)	نتیجه (mpt)
کامپوزیت	ورق آلومینیوم (۰/۴ میلی متر ضخامت)	۱۰۸/۵۳	۱۰۴۵/۰۰	۱۱۳۴۱۱/۷۶
کامپوزیت	هسته پلی اتیلن (۰/۳ میلی متر ضخامت)	۴۰۸/۰۰	۲۷۷/۰۰	۱۱۳۰۱۶/۰۰
کامپوزیت	رنگ اکریلیک	۶/۲۹	۲۰۵/۰۰	۱۲۹۰/۲۷
کامپوزیت	چسب رزین (۰/۰۰۸ میلی متر ضخامت)	۱/۳۱	۷۳۴/۰۰	۹۵۸/۳۱
قوطی استیل ۴۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی متر		۴۷۵/۲۰	۵۵۱/۰۰	۲۶۱۸۳۵/۲۰
قوطی استیل ۲۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی متر		۴۲۶/۰۰	۵۵۱/۰۰	۲۳۴۷۲۶/۰۰
نبشی ۳۰*۳۰ با ضخامت ۳ میلی متر		۲۴/۵۰	۵۵۱/۰۰	۱۳۴۹۹/۵۰
پیچ		۱/۲۶	۵۵۱/۰۰	۶۹۴/۲۶
پرچ		۱/۱۲	۵۵۱/۰۰	۶۱۷/۶۷
تولید				
مواد و مصالح		مقدار (kg)	شاخص (mpt/kg)	نتیجه (mpt)
کامپوزیت	ورق آلومینیوم (۰/۴ میلی متر ضخامت)	۱۰۸/۵۳	۱۱/۰۰	۱۱۹۳/۸۱
کامپوزیت	هسته پلی اتیلن (۰/۳ میلی متر ضخامت)	۴۰۸/۰۰	۴۹/۰۰	۱۹۹۹۲/۰۰
کامپوزیت	رنگ اکریلیک	۶/۲۹	۰/۰۰	۰/۰۰
کامپوزیت	چسب رزین (۰/۰۰۸ میلی متر ضخامت)	۱/۳۱	۴۶/۰۰	۶۰/۰۶
قوطی استیل ۴۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی متر (ورق نورد)		۴۷۵/۲۰	۵۹/۰۰	۲۸۰۳۶/۸۰
قوطی استیل ۴۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی متر (خمش)		۳۸۸۸۰/۰۰	۲/۰۰	۷۷۷۶۰/۰۰
قوطی استیل ۲۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی متر (ورق نورد)		۴۲۶/۰۰	۵۹/۰۰	۲۵۱۳۴/۰۰
قوطی استیل ۲۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی متر (خمش)		۴۲۲۶۴/۰۰	۲/۰۰	۸۴۵۲۸/۰۰

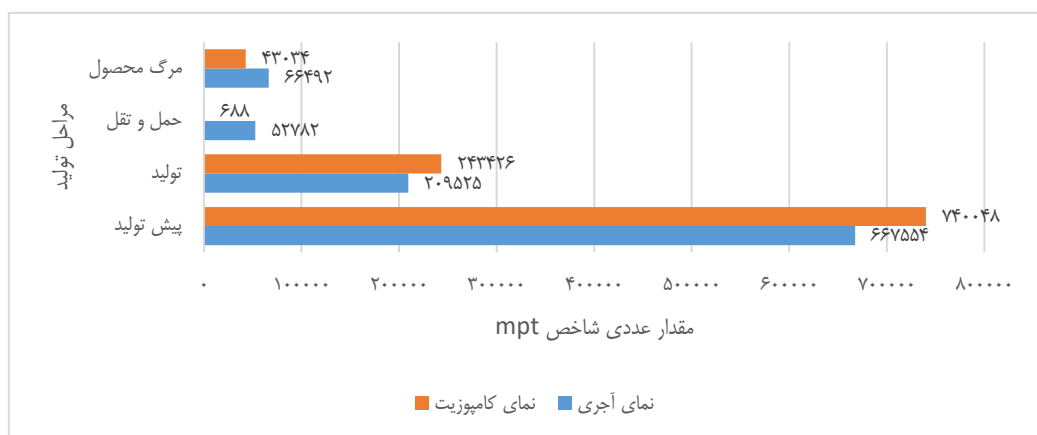
ادامه جدول ۲. محاسبه مقدار آلودگی نمای کامپوزیت در چهار مرحله پیش تولید، تولید، حمل و نقل و مرگ محصول

۱۴۴۵/۵۰	۵۹/۰۰	۲۴/۵۰	نبشی ۳۰*۳۰ با ضخامت ۳ میلی متر (ورق نورد)		
۳۶۰۰/۰۰	۲/۰۰	۱۸۰۰/۰۰	نبشی ۳۰*۳۰ با ضخامت ۳ میلی متر (خمش)		
۸۸۷/۰۴	۷۰۴/۰۰	۱/۲۶	پیچ		
۷۸۹/۱۸	۷۰۴/۰۰	۱/۱۲	پرچ		
حمل و نقل					
نتیجه (mpt)	شاخص (mpt/kg)	شیوه حمل	فاصله (km)	مقدار (kg)	مواد و مصالح
۲۸۴/۷۰	۱۵/۰۰	کامیون	۳۶/۵۰	۰/۵۲	کامپوزیت
۲۰۶/۶۳	۱۵/۰۰	کامیون	۲۹/۰۰	۰/۴۸	قوطی استیل ۴۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی متر
۱۸۵/۳۱	۱۵/۰۰	کامیون	۲۹/۰۰	۰/۴۳	قوطی استیل ۴۰*۲۰ با ضخامت ۳ میلی متر
۱۰/۶۶	۱۵/۰۰	کامیون	۲۹/۰۰	۰/۰۲۴۵	نبشی ۳۰*۳۰ با ضخامت ۳ میلی متر (خمش)
۰/۵۵	۱۵/۰۰	کامیون	۲۹/۰۰	۰/۰۰۱۲۶	پیچ
۰/۴۹	۱۵/۰۰	کامیون	۲۹/۰۰	۰/۰۰۱۱۲۱	پرچ
مرگ محصول					
نتیجه (mpt)	شاخص (mpt/kg)	مقدار (kg)	مواد و مصالح		
۲۸۲۱/۷۳	۲۶/۰۰	۱۰۸/۵۳	ورق آلومینیوم (۰/۴ میلی متر ضخامت)	کامپوزیت	
۱۵۹۱۲/۰۰	۳۹/۰۰	۴۰۸/۰۰	هسته پلی اتیلن (۰/۳ میلی متر ضخامت)	کامپوزیت	
۱۱۹/۵۹	۱۹/۰۰	۶/۲۹	رنگ اکریلیک	کامپوزیت	
۵۰/۹۲	۳۹/۰۰	۱/۳۱	چسب رزین (۰/۰۰۸ میلی متر ضخامت)	کامپوزیت	
۱۲۳۵۵/۲۰	۲۶/۰۰	۴۷۵/۲۰	قوطی استیل ۴۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی متر		
۱۱۰۷۶/۰۰	۲۶/۰۰	۴۲۶/۰۰	قوطی استیل ۴۰*۲۰ با ضخامت ۳ میلی متر		
۶۳۷/۰۰	۲۶/۰۰	۲۴/۵۰	نبشی ۳۰*۳۰ با ضخامت ۳ میلی متر		
۳۲/۷۶	۲۶/۰۰	۱/۲۶	پیچ		
۲۹/۱۵	۲۶/۰۰	۱/۱۲	پرچ		
۱۰۲۷۱۹۸/۰۳			جمع کل		

بحث

مطابق شکل ۴ در بخش پیش تولید، نمای آجری مقدار ردپای اکولوژیکی محیط زیستی حدود ۶۶۷۵۵۴ mpt است. همچنین در نمای کامپوزیت این عدد به ۷۴۰۰۴۸ mpt می رسد که در مقایسه با نمای آجری این عدد به مراتب بیشتر است. در بخش تولید نمای آجری مقدار ردپای اکولوژیکی محیط زیستی ۲۰۹۵۲۵ mpt می باشد و در نمای کامپوزیت این عدد به ۲۴۳۴۲۶ mpt می رسد. در بخش حمل و نقل سازگاری محیط زیستی نمای کامپوزیت بیشتر است؛ زیرا در این قسمت با توجه به فاصله کارخانه آجر در محمدآباد قم و کارخانه کامپوزیت در تبریز و نزدیکی بقیه مصالح به تبریز، حرکت مصالح با کامیون صورت می گیرد و مسیر کارخانه آجر طولانی تر است. بدین ترتیب ردپای اکولوژیکی در نمای آجری حمل و نقل دارای ۵۲۷۸۲ mpt و نمای کامپوزیت دارای ۶۸۸ mpt است. در بخش مرگ محصول نمای آجری با توجه به این که آجر نما جزو مصالح ساختمانی غیر قابل اشتعال است و این مواد معمولاً به محل دفن زباله می روند یا به عنوان خاکریز و یا در بتن استفاده می گردند؛ در هر صورت این مصالح بازیافت و دوباره به چرخه استفاده باز می گردند؛ در نتیجه ردپای این بخش ۶۶۴۹۲ mpt می باشد و ردپای کامپوزیت ۴۳۰۳۴ mpt است. در این بخش حتی با وجود بازیافت نمای آجری، نمای کامپوزیت سازگاری بیشتری با محیط زیست دارد. در نتیجه، با توجه به بررسی های به عمل آمده و جمع بندی این ۴ بخش نمای آجری با ردپای ۹۹۶۳۵۴ mpt نسبت به نمای کامپوزیت با ردپای ۱۰۲۷۱۹۸ mpt با محیط سازگاری بهتری دارد. در شکل ۴ مقایسه میان نماهای مذکور در چرخه چهارگانه

نشان داده شده است.



شکل ۴. نمودار مقایسه مقدار آلودگی دو نمای آجری و کامپوزیت

با در نظر گرفتن این که این تحلیل بر پایه اطلاعات دو برند آذرخش (آجر) و پایا کامپوزیت (کامپوزیت) انجام شده است و این که نمای آجری خشک شاخص آلودگی کمتری نسبت به نمای کامپوزیت دارد، این ایده مطرح شد که با انجام اصلاحات و بهینه‌سازی این سیستم به منظور بهره‌وری از منابع موجود و صرفه‌جویی در انرژی می‌توان آلودگی را به طور چشمگیری کاهش داد. بر این اساس، نسخه‌ای از نمای آجری با اصلاح در نوع مصالح، وزن مصالح، شیوه اجرا و قابلیت بازیافت در مرحله مرگ محصول طراحی و تحلیل شد. برای مثال در مرحله پیش‌تولید از آجر سفالی سبک با شاخص 17 mpt/kg به جای آجر نما با شاخص 18 mpt/kg استفاده شده است و قوطی‌های کرومی بازیافتی با شاخص 76 mpt/kg به جای قوطی‌های استیل بکر با شاخص 551 mpt/kg به کار رفته است. در مرحله حمل‌ونقل برای جابه‌جایی آجر قطار جایگزین کامیون شده است که به صرفه‌تر باشد و همچنین حمل ریلی روش رایج انتقال بارهای حجیم در صنعت آجر و ورق‌های کامپوزیت محسوب می‌شود و شاخص از 15 mpt/kg به $3/90 \text{ mpt/kg}$ کاهش یافته است (مسافت خط ریلی حمل‌ونقل آجر نما با قطار از قم به تبریز 883 کیلومتر می‌باشد). در مرحله مرگ محصول نیز به علت بازیافت دوباره مواد شاخص‌ها کاهش بسیار زیادی نسبت به حالت اولیه دارند. شاخص قوطی‌ها از 76 mpt/kg به 303 mpt/kg شاخص بست استیل دو طرفه از 76 mpt/kg به 475 mpt/kg و شاخص ورق پلی استایرن از 25 mpt/kg به 363 mpt/kg کاهش داشته است. همه این عوامل باعث کاهش چشم‌گیر آلودگی نسبت به حالت اولیه شده است. نتایج حاصل از تحلیل نمای آجری بهینه‌سازی شده در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. محاسبه مقدار آلودگی نمای آجری بهینه شده در چهار مرحله پیش تولید، تولید، حمل و نقل و مرگ محصول

پیش تولید			
نتیجه (mpt)	شاخص (mpt/kg)	مقدار (kg)	مواد و مصالح
۶۶۷۰۸/۰۰	۱۷/۰۰	۳۹۳۴/۰۰	آجر سفالی سبک
۳۲۰۱۱/۲۰	۷۶/۰۰	۴۲۱/۲۰	قوطی کروم ۴۰*۶۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر (بازیافتی)
۱۵۳۶۵/۳۸	۷۶/۰۰	۲۰۲/۱۸	قوطی کروم ۲۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی‌متر (بازیافتی)
۳۴۹۶/۰۰	۷۶/۰۰	۴۶/۰۰	بست استیل دو طرفه (بازیافتی)
۱۱۰۰/۰۰	۲۵/۰۰	۴۴/۰۰	ورق پلی استایرن (بازیافتی)
۲۱۱۲۰/۰۰	۳۲۰/۰۰	۶۶۰/۰۰	چسب پلی استایرن

ادامه جدول ۳. محاسبه مقدار آلودگی نمای آجری بهینه شده در چهار مرحله پیش تولید، تولید، حمل و نقل و مرگ محصول

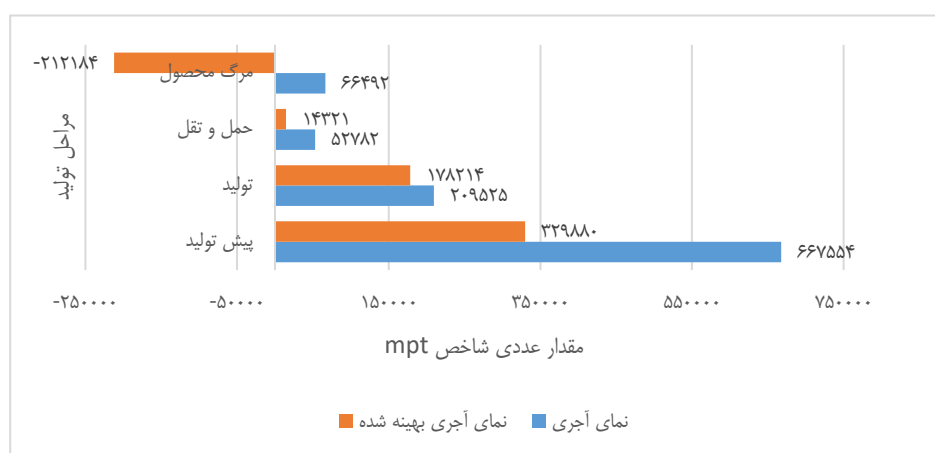
تولید						
مواد و مصالح		مقدار (kg)	شاخص (mpt/kg)	نتیجه (mpt)		
آجرنما		۳۹۲۴/۰۰	۲۸/۰۰	۱۰۹۸۷۲/۰۰		
قوطی کروم ۴۰*۶۰ با ضخامت ۳ میلی متر (ریخته گری صنعتی)		۴۲۱/۲۰	۷۷/۰۰	۳۲۴۳۲/۴۰		
قوطی کروم ۲۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی متر (ریخته گری صنعتی)		۲۰۲/۱۸	۷۷/۰۰	۱۵۵۶۷/۵۵		
بست استیل دوطرفه (برش)		۳۸۳۴۳/۰۰	۰/۰۲	۵۹۰/۴۸		
بست استیل دوطرفه (خمش)		۴۵۹۲/۰۰	۲/۰۰	۹۱۸۴/۰۰		
بست استیل دوطرفه (ورق نورد)		۴۶/۰۰	۵۹/۰۰	۲۷۱۴/۰۰		
ورق پلی استایرن (قالب گیری تزریقی)		۴۴/۰۰	۱۲۶/۰۰	۵۵۴۴/۰۰		
چسب پلی استایرن		۱۱۰/۰۰	۲۱/۰۰	۲۳۱۰/۰۰		
حمل و نقل						
مواد و مصالح		مقدار (kg)	فاصله (km)	شیوه حمل	شاخص (mpt/kg)	نتیجه (mpt)
آجرنما		۳/۹۲	۸۸۳/۰۰	قطار	۳/۹۰	۱۳۵۱۳/۰۸
قوطی کروم ۴۰*۶۰ و ۲۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی متر		۰/۶۲	۲۹/۰۰	کامیون	۱۵/۰۰	۲۷۱/۱۷
بست استیل دوطرفه		۰/۰۵	۲۹/۰۰	کامیون	۱۵/۰۰	۲۰/۰۱
ورق و چسب پلی استایرن		۰/۷۰	۴۹/۰۰	کامیون	۱۵/۰۰	۵۱۷/۴۴
مرگ محصول						
مواد و مصالح		مقدار (kg)	شاخص (mpt/kg)	نتیجه (mpt)		
آجرنما		۳۹۲۴/۰۰	۰/۰۰	۰		
قوطی کروم ۴۰*۶۰ با ضخامت ۳ میلی متر		۴۲۱/۲۰	-۳۰۳/۰۰	-۱۳۷۶۲۳/۶۰		
قوطی کروم ۲۰*۴۰ با ضخامت ۳ میلی متر		۲۰۲/۱۸	-۳۰۳/۰۰	-۶۱۲۵۹/۳۳		
بست استیل دوطرفه		۴۶/۰۰	-۴۷۵/۰۰	-۲۱۸۵۰/۰۰		
ورق پلی استایرن		۴۴/۰۰	-۳۶۳/۰۰	-۱۵۹۷۲/۰۰		
چسب پلی استایرن		۶۶۰/۰۰	۲۲/۰۰	۱۴۵۲۰/۰۰		
جمع کل		۳۱۰۲۳۱/۷۸				

همان‌طور که جدول ۳ و شکل ۵ نشان داده شد، مجموع شاخص آلودگی نمای آجری پس از بهینه‌سازی به ۳۱۰۲۳۱ mpt کاهش یافت، یعنی حدود ۷۰ درصد کمتر از نمای کامپوزیت است. ویژگی مهم این نسخه شاخص منفی در مرحله مرگ محصول ۲۱۲۱۸۴ mpt- است که نشان می‌دهد بازیافت و بازگشت برخی اجزا به چرخه تولید نه تنها آلودگی تولید نمی‌کنند بلکه بخشی از آلودگی‌های قبلی را نیز جبران می‌نمایند. این پژوهش تنها به آلاینده‌های محصول نهایی محدود نیست و تمامی مراحل چرخه عمر مصالح شامل استخراج مواد اولیه، تولید، حمل و نقل و پایان عمر را در بر می‌گیرد؛ بنابراین نتایج ارائه شده بر پایه یک ارزیابی کامل چرخه عمر (LCA) است.

نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین عوامل انتشار آلودگی و کربن، در بخش ساختمان‌سازی است. با توجه به این موضوع باید اقداماتی انجام داد تا این مقدار کمتر شود. اقداماتی مانند استفاده از مصالح مناسب اقلیم، مواد بازیافتی و تغییر روند تولید آن می‌تواند رد پای کربن را کم کند. در این پژوهش با متره و برآورد مقدار مصالح مصرفی در نمای آجری و کامپوزیت و محاسبه آلودگی آن‌ها با استفاده از روش اکولایزر نتیجه آن

شد که مقدار آلودگی انتشار یافته از نمای آجری حدود ۳ درصد کمتر از نمای کامپوزیت است و در نتیجه نمای آجری، نمای بهتری نسبت به نمای کامپوزیت از نظر میزان انتشار آلودگی است. این نتایج بر اساس مشخصات فنی دو برند مشخص، آجر آذرخش و پایا کامپوزیت، محاسبه شده است. با این وجود می‌توان نمای آجری را بهینه‌سازی کرد تا عملکرد بهتری داشته باشد؛ به همین علت نمای آجری با استفاده از مواد بازیافتی بهینه‌سازی شد و حمل‌ونقل آن از طریق قطار که شاخص آلودگی کمتری دارد، انجام شده است. آلودگی نمای آجری بهینه‌سازی شده حدود ۶۸ درصد کمتر از آلودگی نمای آجری معمولی است. در نتیجه با انتخاب درست مصالح و فرایند تولید آن می‌توان مقدار آلودگی کمتری را در بخش نما ایجاد کرد. لازم به ذکر است که سه مرحله پیش‌تولید، تولید و پایان عمر وابستگی اندکی به شرایط پروژه دارند و ماهیت آن‌ها مستقل از مکان پروژه است؛ در حالی که مرحله حمل‌ونقل به طور مستقیم تابع فاصله کارخانه تا محل اجرا محسوب می‌شود؛ بنابراین بخش قابل توجهی از نتایج این پژوهش، قابلیت تعمیم‌پذیری به پروژه‌های مشابه با روش‌های دیگر حمل‌ونقل را دارد.



شکل ۵. نمودار مقایسه مقدار آلودگی دو نمای آجری و بهینه سازی شده

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مراحل مختلف این تحقیق یکسان بوده است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این پژوهش فاقد حامی مالی بوده است.

سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از «شرکت آجر آذرخش» و «شرکت پایا کامپوزیت» برای ارائه اطلاعات فنی و همکاری در جمع‌آوری داده‌های پژوهش حاضر سپاسگزاری نمایند.

References

- Ahmed, W., Lu, G., Ng, S. T., & Liu, G. (2025). Innovative valorization of solid waste materials for production of sustainable low-carbon pavement: A systematic review and scientometric analysis. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04541. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04541>
- Azarakhsh brick industrt group.(2021).digital product catalog. Retrieved November 2021.from <https://www.azarakhsh.ir>
- Cabeza, L. F., Barreneche, C., Miró, L., Morera, J. M., Bartolí, E., & Inés Fernández, A. (2013). Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 536-542. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.017>
- Chan, M., Masrom, M. A., & Yasin, S. S. (2022). Selection of Low-Carbon Building Materials in Construction Projects: Construction Professionals' Perspectives. *Buildings*, 12(4), 486. <https://doi.org/10.3390/buildings12040486>
- Chen, J., Zhou, W., & Yang, H. (2019). Is Embodied Energy a Better Starting Point for Solving Energy Security Issues?—Based on an Overview of Embodied Energy-Related Research. *Sustainability*, 11(16), 4260.
- Chen, L., Huang, L., Hua, J., Chen, Z., Wei, L., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., Dong, L., & Yap, P.-S. (2023). Green construction for low-carbon cities: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1627-1657. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01544-4>
- Chen, S., Teng, Y., Zhang, Y., Leung, C. K. Y., & Pan, W. (2023). Reducing embodied carbon in concrete materials: A state-of-the-art review. *Resources, Conservation and Recycling*, 188, 106653. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106653>
- Cheng, S., Zhou, X., & Zhou, H. (2023). Study on Carbon Emission Measurement in Building Materialization Stage. *Sustainability*, 15(7), 5717.
- Chepaitis, P. S., Zhang, Q., Kalafut, D., Waddey, T., Wilson, M. J., & Black, M. (2024). The Effect of Moderate Temperature Rise on Emitted Chemicals from Modern Building Materials. *Buildings*, 14(11), 3683.
- Cui, J., Guo, Y., Xu, Q., Li, D., Chen, W., Shi, L., Ji, G., & Li, L. (2023). Extraction of Information on the Flooding Extent of Agricultural Land in Henan Province Based on Multi-Source Remote Sensing Images and Google Earth Engine. *Agronomy*, 13(2), 355.
- Dighade, R., Gomase, V., Peshattiwar, R., Selokar, A., Sangidwar, N., Peshattiwar, S., & Malve, S. (2024). Emission of carbon footprint from building construction materials: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1409, 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1409/1/012010>
- Figueiredo, N. L. B., Figueiredo, F. B., Barboza, C. S., & Reis, D. D. d. (2024). Embodied energy in the life cycle of construction materials: a bibliometric analysis and systematic review. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, 17(13), e14035. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.13-455>
- Foda, T., Hassan, H., Abdelkader, A., & el-hassan, K. (2024). Predictive modeling of sustainable recycled materials for stone column construction. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01700-5>
- Jia, G., Guo, J., Guo, Y., Yang, F., & Ma, Z. (2024). CO2 adsorption properties of aerogel and application prospects in low-carbon building materials: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03171. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03171>
- Kinnane, O., O'Hegarty, R., & Reilly, A. (2020). Energy embodied in, and transmitted through, walls of different type when accounting for the dynamic effects of thermal mass. *Journal of Green Building*, 15, 43-66. <https://doi.org/10.3992/jgb.15.4.43>
- Li, X., Ren, A., & Li, Q. (2022). Exploring Patterns of Transportation-Related CO2 Emissions Using Machine Learning Methods. *Sustainability*, 14(8), 4588.
- Luo, Z., Cang, Y., Zhang, N., Yang, L., & Liu, J. (2019). A Quantitative Process-Based Inventory Study on Material Embodied Carbon Emissions of Residential, Office, and Commercial Buildings in China. *Journal of Thermal Science*, 28. <https://doi.org/10.1007/s11630-019-1165-x>
- Nama.design.(1399).composite façade design project gallery.retrieved from: <https://nama.design/composite-facade-design>
- Moran, P., Flynn, J., Larkin, C., Goggins, J., & Elkhayat, Y. (2025). Materials and service lives alterations impacts on reducing the whole life embodied carbon of buildings: A case study of a student accommodation development in Ireland. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04514. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04514>
- Nasr, M., Shubbar, A., Abed, Z., & Ibrahim, M. (2020). Properties of eco-friendly cement mortar contained recycled materials from different sources. *Journal of Building Engineering*, 31, 101444. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101444>
- Orr, J., Gibbons, O., & Arnold, W. (2020). A brief guide to calculating embodied carbon. *The Structural Engineer*, 98, 22-27. <https://doi.org/10.56330/JZNX5709>
- Orsini, F., & Marrone, P. (2019). Approaches for a low-carbon production of building materials: A review. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118380. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118380>

- Ovam. (2011). *Ecolizer 2.0* (Public Flemish Waste Company (OVAM), Issue. <https://www.vlaanderen.be/publicaties/ecolizer-20-eng>
- Torabi, M., Simonen, K., & Evins, R. (2025). What matters the most in designing low-carbon buildings in Canada? Exploring the tradeoff between embodied and operational carbon in early stage design. *Energy and Buildings*, 334, 115482. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115482>
- Vajdi, S., & Aslani, A. (2023). Design and techno-economic analysis of direct CO2 capturing with integrated photobioreactors as a building façade. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103068. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103068>
- Videras Rodríguez, M., Gómez Melgar, S., & Andújar Márquez, J. M. (2024). Evaluation of aerial thermography for measuring the thermal transmittance (U-value) of a building façade. *Energy and Buildings*, 324, 114874. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114874>
- Wang, M., Jia, Z., Tao, L., & Xiang, C. (2024). Review of dynamic façade typologies, physical performance and control methods: Towards smarter and cleaner zero-energy buildings. *Journal of Building Engineering*, 98, 111310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111310>
- Wang, Y., & Pan, W. (2023). The contribution of cleaner production in the material industry to reducing embodied energy and emissions in China's building sector. *Building and Environment*, 242, 110555. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110555>
- Watkins, M., Casamayor, J. L., Ramirez, M., Moreno, M., Faludi, J., & Pigosso, D. C. A. (2021). Sustainable Product Design Education: Current Practice. *She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation*, 7(4), 611-637. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sheji.2021.11.003>
- Yadav, K., & Mishra, N. (2023). Low-Carbon Building Materials: An Overview of Innovative Alternatives to Traditional Materials. *International Journal for Multidisciplinary Research*, 5(3), 3934. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2023.v05i03.3934>
- Yu, M., Wiedmann, T., Crawford, R., & Tait, C. (2017). The Carbon Footprint of Australia's Construction Sector. *Procedia Engineering*, 180, 211-220. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.180>
- Zheng, X., et al. (2025). Modern Panelizing and Optimization Techniques for Renewable Energy Projects; Perspectives on How CO2 Emissions Impact the Circular Economy. *Energy*, 323, 135881. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135881>
- Zhong, X., Hu, M., Deetman, S., Steubing, B., Lin, H., Aguilar-Hernandez, G., Harpprecht, C., Zhang, C., Tukker, A., & Behrens, P. (2021). Global greenhouse gas emissions from residential and commercial building materials and mitigation strategies to 2060. *Nature Communications*, 12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26212-z>
- Zhu, H., Liou, S.-R., Chen, P.-C., He, X.-Y., & Sui, M.-L. (2024). Carbon Emissions Reduction of a Circular Architectural Practice: A Study on a Reversible Design Pavilion Using Recycled Materials. *Sustainability*, 16(5), 1729.