Journal of Strategic Value Chain Management, 3 (8), Spring 2026, 1-21.

Journal of Strategic Value Chain Management

Journal homepage: https://svcm.semnan.ac.ir/

ISSN: 3092-6386

Semnan University

A Framework for Integrating Life Cycle Assessment into Building Value Chain Management: An Environmental and Economic Analysis

Omid Rezayfar*
Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
orezayfar@semnan.ac.ir

Mohammad Sarjoughian
Ph.D. Student in Structural engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
mohammad.sarjoughian@semnan.ac.ir

Seyedeh Marzieh Qiyami Taklymi
Ph.D, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.
M.qiyami@semnan.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type: Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2025-10-24
Revised: 2025-11-24
Accepted: 2025-12-07

Keywords:
Life Cycle Assessment (LCA);
Building materials;
Energy;
Environmental impact;
Sustainable construction;
Value chain.

EXTENDED ABSTRACT

Background and Objectives: The consumption of raw materials in the construction industry, in addition to the excessive use of natural resources, results in a significant increase in energy demand across various construction stages. The selection of materials with high embodied energy not only leads to substantial energy demand during the production and construction phases but may also increase energy consumption for heating, cooling, and ventilation throughout the building's operational life. Given the growing importance of sustainability and environmental efficiency in the building industry value chain, a detailed examination of the life cycle of construction materials and their impacts on metrics such as energy, water, carbon emissions, transportation, and waste is essential. The objective of this study is to conduct a comprehensive analysis of the environmental impacts of common building materials based on international standard data and to determine their position within the value chain, aiming to enhance understanding and improve decision-making for sustainable development. From a value chain perspective, improving the performance of each stage production, transportation, use, and recycling of building materials directly influences the efficiency of the entire chain.

Materials and Methods: This study employs a life cycle assessment (LCA) approach using the international database Ecoinvent v3.10. This database provides comprehensive information on the environmental impacts of production processes, transportation, construction, and end-of-life disposal of materials. The assessment was conducted for widely used construction materials, including bricks, ceramics, tiles, thermal insulation, cementitious materials, wood products, steel, aluminum, copper, glass, and PVC. For each material, primary energy consumption, CO_2 emissions, water demand, transportation, and end-of-life scenarios were analyzed. Indicators such as primary energy demand, representing the total energy required to produce a product, were employed alongside global metrics like Global Warming Potential (GWP) and freshwater consumption during production and

* Corresponding author.
E-mail address: orezayfar@semnan.ac.ir
https://orcid.org/0000-0002-4753-7775

maintenance processes. Furthermore, the position of each indicator within the value chain hierarchy (materials, energy, environmental quality, waste, transportation, and economy) was analyzed, and their relative contributions were determined according to international standards.

Results: The results indicate that highly industrially processed materials, such as tiles and ceramics, exhibit the highest primary energy demand and greenhouse gas emissions, whereas natural materials like wood and cellulose fibers demonstrate the lowest environmental impacts. Natural insulations, compared to industrial insulations such as polystyrene, exhibit up to 98% lower carbon emissions. Within cementitious materials, the significant contribution of cement to CO_2 emissions was confirmed, and the substitution of fossil fuels with green fuels was suggested as an effective strategy to reduce environmental impacts. Wood products, due to their net carbon absorption, can play a significant role in improving carbon balance in the construction life cycle. Among industrial materials, aluminum and steel exhibit the highest energy- and transport-related impacts; however, the use of secondary and recycled products significantly reduces carbon emissions. Additionally, the findings indicate that efficient material transportation management and the adoption of new production technologies can play a key role in mitigating environmental impacts.

Conclusion: The study demonstrates that life cycle assessment of construction materials is a critical tool for informed decision-making within the building industry value chain. The development and implementation of innovative technologies, control of transportation, substitution of environmentally friendly fuels, and promotion of recycled materials can substantially reduce greenhouse gas emissions and energy consumption. Furthermore, establishing a national database of construction materials aligned with the characteristics of each country's industry is essential for formulating more precise environmental policies. Finally, encouraging manufacturers to use environmental labels and providing governmental support for sustainable materials can foster positive competition within the value chain and facilitate the transition toward sustainable construction.

Cite this article as:

Rezayfar, O., Sarjoughian, M. & Qiyami Taklymi, SM. (2026). A Framework for Integrating Life Cycle Assessment into Building Value Chain Management: An Environmental and Economic Analysis. *Journal of Strategic Value Chain Management*, *3*(8), 1-21.

DOI: https://doi.org/10.22075/svcm.2025.39486.1065

© 2024 authors retain the copyright and full publishing rights. Journal of Strategic Value Chain Management Published by **Semnan University Press**.

This is an open access article under the CC-BY-4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

مدیریت زنجیره ارزش راهبردی

https://svcm.semnan.ac.ir

ISSN: 3092-6386

چارچوبی برای تلفیق ارزیابی چرخه حیات در مدیریت زنجیره ارزش ساختمان: یک تحلیل زیست‌محیطی و اقتصادی

امید رضائی‌فر*

استاد، دانشکده مهندسی عمران-سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

orezayfar@semnan.ac.ir

محمد سرجوقیان

دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

mohammad.sarjoughian@semnan.ac.ir

سیده مرضیه قیامی تکلیمی

دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

m.qiyami@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۲-۰۸-۱٤۰٤

تاریخ بازنگری: ۰۳-۰۹-۱٤۰٤

تاریخ پذیرش: ۱٦-۰۹-۱٤۰٤

واژه‌های کلیدی:

ارزیابی چرخه حیات؛

مصالح ساختمانی؛

انرژی؛

تاثیر زیست محیطی؛

ساخت و ساز پایدار؛

زنجیره ارزش.

چکیده

سابقه و هدف: مصرف مواد خام در صنعت ساختمان علاوه بر استفاده بی‌رویه از منابع طبیعی، موجب افزایش چشمگیر مصرف انرژی در مراحل مختلف ساخت‌وساز می‌شود. انتخاب مصالحی با انرژی نهفته بالا نه‌تنها در مرحله تولید و ساخت ساختمان منجر به تقاضای انرژی زیادی می‌شود، بلکه در طول عمر بهره‌برداری نیز ممکن است سبب افزایش مصرف انرژی برای گرمایش، سرمایش و تهویه شود. با توجه به اهمیت روزافزون پایداری و کارایی زیست‌محیطی در زنجیره ارزش صنعت ساختمان، بررسی دقیق چرخه حیات مصالح و تأثیرات آن‌ها بر معیارهایی چون انرژی، آب، انتشار کربن، حمل‌ونقل و ضایعات، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. هدف این پژوهش، تحلیل جامع اثرات زیست‌محیطی مصالح متداول ساختمانی بر اساس داده‌های استاندارد بین‌المللی و تعیین جایگاه آن‌ها در زنجیره ارزش، به منظور شناخت بهتر و بهبود کیفیت تصمیم‌گیری در راستای توسعه پایدار است. از منظر زنجیره ارزش، می‌توان گفت که بهبود عملکرد هر یک از مراحل تولید، انتقال، استفاده و بازیافت مصالح ساختمانی، به شکل مستقیم بر کارایی کل زنجیره اثرگذار است.

روش: در این مطالعه از رویکرد ارزیابی چرخه حیات بر اساس پایگاه داده‌ی بین‌المللی Ecoinvent v3.10 استفاده شده است. این پایگاه داده اطلاعات کاملی درباره‌ی تأثیرات محیطی فرآیندهای تولید، حمل‌ونقل، ساخت و دفع نهایی مصالح فراهم می‌کند. ارزیابی برای مصالح پرکاربرد ساختمانی از قبیل آجر، سرامیک، کاشی، عایق‌های حرارتی، مصالح سیمانی، محصولات چوبی، فولاد، آلومینیوم، مس، شیشه و PVC انجام شده است. در هر مورد، مصرف انرژی اولیه،

میزان انتشار CO_2، تقاضای آب، حمل‌ونقل، و سناریوهای پایان عمر مورد بررسی قرار گرفته است. در راستای این بررسی‌ها از معیارهایی مانند، تقاضای انرژی اولیه، که بیانگر کل میزان انرژی مورد نیاز برای تولید یک محصول است استفاده شده است همچنین معیارهای جهانی دیگری نظیر شاخص گرمایش جهانی در ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و میزان مصرف آب شیرین در فرآیند تولید و نگهداری مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، جایگاه هر شاخص در هرم زنجیره ارزش (مواد، انرژی، کیفیت زیست‌محیطی، ضایعات، حمل‌ونقل و اقتصاد) تحلیل و نسبت آن‌ها بر اساس استانداردهای جهانی تعیین شده است.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مصالحی با فرآوری صنعتی بالا مانند کاشی و سرامیک دارای بیشترین تقاضای انرژی اولیه و انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند، در حالی‌که مصالح طبیعی نظیر چوب و الیاف سلولزی دارای پایین‌ترین اثرات زیست‌محیطی می‌باشند. عایق‌های طبیعی در مقایسه با عایق‌های صنعتی نظیر پلی‌استایرن، تا ۹۸٪ انتشار کربن کمتری دارند. در بخش مصالح سیمانی، سهم بالای سیمان در تولید گاز CO_2 تأیید شد و جایگزینی سوخت‌های سبز به جای سوخت‌های فسیلی به عنوان رویکرد مؤثر در کاهش اثرات محیطی پیشنهاد گردید. محصولات چوبی به دلیل جذب خالص دی‌اکسیدکربن، می‌توانند نقش مؤثری در بهبود تعادل کربن در چرخه ساخت‌وساز داشته باشند. در میان مصالح صنعتی، آلومینیوم و فولاد بیشترین اثرات ناشی از انرژی و حمل‌ونقل را دارند، اما استفاده از محصولات ثانویه و بازیافتی موجب کاهش قابل توجه انتشار کربن می‌شود. علاوه بر این، یافته‌ها نشان دادند که مدیریت کارآمد حمل‌ونقل مصالح و استفاده از فناوری‌های جدید تولید می‌تواند نقش بسزایی در کاهش اثرات زیست‌محیطی ایفا کند.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ارزیابی چرخه حیات مصالح ساختمانی ابزاری کلیدی برای تصمیم‌گیری آگاهانه در زنجیره ارزش صنعت ساختمان است. توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های نوین، کنترل میزان حمل و نقل، جایگزینی سوخت‌های سازگار با محیط زیست و ترویج استفاده از مواد بازیافتی می‌تواند به‌طور چشمگیری انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی را کاهش دهد. همچنین ایجاد پایگاه داده‌ی ملی مصالح ساختمانی با ویژگی‌های منطبق بر صنایع هر کشور، امری ضروری برای تدوین سیاست‌های زیست‌محیطی دقیق‌تر است. در نهایت، تشویق تولیدکنندگان به استفاده از برچسب‌های زیست‌محیطی و حمایت دولتی از مصالح پایدار، می‌تواند رقابت مثبت در زنجیره ارزش را افزایش داده و مسیر دستیابی به ساخت‌وساز پایدار را هموار کند.

استناد: رضائی‌فر، امید؛ سرجوفیان، محمد؛ و قیامی تکلیمی، سیده مرضیه (۱۴۰۵). چارچوبی برای تلفیق ارزیابی چرخه حیات در مدیریت زنجیره ارزش ساختمان: یک تحلیل زیست‌محیطی و اقتصادی. *مجله مدیریت زنجیره ارزش راهبردی*،۳ (۸)، ۱-۲۱.

DOI: https://doi.org/10.22075/svcm.2025.39486.1065

ناشر: دانشگاه سمنان

۱. مقدمه

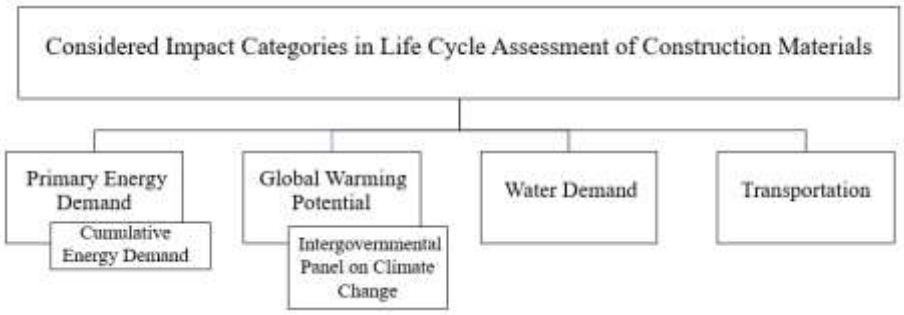
در سطح جهانی، پروژه‌های عمرانی حدود ۶۰ درصد از کل مواد خام استخراج شده از لایه‌های لیتوسفر را مصرف می‌کنند. این مواد شامل مصالحی نظیر سنگ، فلزات، سیمان، فولاد و شیشه هستند که در مراحل مختلف فرآیند ساخت‌وساز مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر، صنعت ساختمان یکی از اصلی‌ترین حلقه‌های زنجیره مصرف منابع طبیعی محسوب می‌شود و نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری جریان ارزش از استخراج تا بهره‌برداری دارد. برآوردها نشان می‌دهد که حدود ۴۰ درصد از این مواد به‌طور مستقیم در پروژه‌های ساختمانی به‌کار می‌روند (آمارال و همکاران، ۲۰۲۰)[1]، به این معنا که نزدیک به ۲۴ درصد از کل استخراجات زمین مستقیماً به ساختمان‌ها اختصاص دارد. به این معنا که میزان استخراجات معدنی مرتبط با صنعت ساختمان برای هر نفر سالانه به حدود ۴/۸ تن می‌رسد که معادل ۶۴ برابر وزن متوسط یک انسان است. این آمار نشان‌دهنده ضرورت بازنگری در ساختار زنجیره ارزش مصالح ساختمانی و حرکت به سمت راهکارهای کارآمدتر در مصرف منابع است. همچنین، درک این موضوع که اقتصاد ما باید در جهتی پایدارتر باشد و صرفه جویی در منابع توسعه یابد، در دهه‌های اخیر و با افزایش آگاهی از چالش‌های جهانی مانند تغییرات گسترده آب و هوا استوارتر شده است (پناهی گرجی‌محله و همکاران، ۲۰۲۴).

به‌طور میانگین، ساخت هر مترمربع فضای مفید در یک ساختمان معمولی مستلزم مصرف حدود ۲/۳ تن از بیش از ۱۰۰ نوع ماده مختلف است. این رقم در صورتی که مصرف منابع طبیعی را در کل زنجیره ارزش از تولید تا مصرف نهایی در نظر بگیریم، به بیش از ۶ تن به‌ازای هر مترمربع افزایش می‌یابد (آمارال و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، درک روابط میان مراحل مختلف این زنجیره از استخراج مواد خام، تولید و حمل‌ونقل تا اجرا و نگهداری، برای کاهش مصرف انرژی و بهبود بهره‌وری ضروری است.

مصرف انرژی نیز در بخش‌های مختلف این زنجیره نابرابر است. تولید، حمل‌ونقل و نصب مصالحی مانند فولاد، بتن و شیشه نیازمند مصرف مقادیر بالایی از انرژی فسیلی است، در حالی‌که سهم این مصالح در هزینه نهایی پروژه اندک است (هونیک و همکاران، ۲۰۱۹)[2]. این ناهماهنگی نشان می‌دهد که ارزش افزوده اقتصادی و زیست‌محیطی مصالح باید در چارچوبی یکپارچه و زنجیره‌ای مورد تحلیل قرار گیرد. استخراج و فرآوری مواد معدنی مانند سنگ‌آهن، آلمینیوم و مس نیز، که در مجموع بیش از ۹۰ درصد از مواد معدنی مصرفی در صنعت ساخت را تشکیل می‌دهند، به‌طور مستقیم با کاهش انرژی در دسترس منابع طبیعی در ارتباط‌اند (هازریکا و ژانگ، ۲۰۱۹)[3].

در این راستا، جمع آوری اطلاعات جامع و افزایش شناخت با تمرکز بر تحلیل چرخه حیات [4]و زنجیره ارزش مصالح ساختمانی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و طراحی پایدار داشته باشد. با در نظر گرفتن تمام مراحل از استخراج تا پایان عمر مفید مصالح، می‌توان نقاط اتلاف انرژی، انتشار کربن و فرصت‌های بازیافت را شناسایی و اصلاح کرد (بیمستربور و همکاران، ۲۰۲۵)[5]. در واقع، نگاه زنجیره‌ای به فرآیند ساخت، به جای تمرکز بر مراحل منفرد، امکان خلق ارزش افزوده واقعی را از طریق کاهش هزینه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی فراهم می‌کند. همچنین جمع آوری و دسته بندی اطلاعات کافی مدیران را توانمند میسازد تا در جهت تکمیل فرصت‌های رقابتی، سرمایه گذاری کرده، تهدیدات را کاسته و اثرات سوء آن‌ها را کاهش دهند (ابونوری و بهشتینیا، ۲۰۲۵). در راستای این بررسی‌ها معیارهای مورد نظر سنجش را در شکل ۱ می‌توان مشاهده کرد.

[1] (Amaral et al., 2020)
[2] (Honic et al., 2019)
[3] (Hazarika & Zhang, 2019)
[4] Life Cycle Assessment (LCA)
[5] (Beemsterboer et al., 2025)



شکل ۱. فلوچارت معیارهای مورد بررسی مصالح ساختمانی.

هدف مطالعه حاضر نه‌تنها ارزیابی تأثیرات انرژی و زیست‌محیطی مصالح رایج ساختمانی، بلکه بازتعریف جایگاه آن‌ها در زنجیره ارزش صنعت ساختمان است. در این پژوهش، با بهره‌گیری از رویکرد چرخه حیات و مقایسه مصالح متداول با نمونه‌های زیست‌محیطی نوین، راهکارهایی برای کاهش اثرات منفی در تمامی مراحل، از تولید و حمل‌ونقل تا استفاده و بازیافت، ارائه شده است. این رویکرد می‌تواند زمینه‌ساز حرکت به‌سوی صنعتی‌سازی هوشمند، کاهش ردپای کربن و تحقق ساخت‌وساز پایدار باشد.

با توجه به اهمیت جهانی این موضوع و توجه ویژه اتحادیه اروپا به مدیریت پایدار مصالح، در این پژوهش از استانداردها و داده‌های آماری ارائه شده در اروپا برای مقایسه و ارزیابی عملکرد مصالح ساختمانی بهره گرفته شده است. از منظر زنجیره ارزش صنعت ساخت‌وساز، تحلیل مصالح ساختمانی تنها محدود به مرحله تولید نمی‌شود، بلکه شامل تمامی مراحل چرخه عمر ساختمان از استخراج مواد اولیه، تولید، حمل‌ونقل، نصب، بهره‌برداری، نگهداری تا بازیافت است (کولیاس و همکاران، ۲۰۲۱)[1]. انتخاب مصالح با مصرف انرژی کمتر، دوام بالاتر و قابلیت بازیافت مناسب موجب کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش ارزش افزوده در کل زنجیره می‌شود. بنابراین، این رویکرد به‌عنوان ابزاری برای تصمیم‌گیری هوشمندانه در طراحی و مدیریت پروژه‌های ساخت‌وساز پایدار مورد توجه قرار گرفته است.

۲. پیشینه پژوهش

در پژوهش‌های متعددی میزان انرژی نهفته در مصالح ساختمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است؛ یافته‌های این مطالعات اهمیت استفاده از مصالح بازیافتی و سازگار با محیط زیست را، به‌ویژه زمانی که الزامات فنی و کیفی اجازه دهند، به دلیل سطح پایین انرژی نهفته در آن‌ها برجسته می‌سازد.

بر اساس نتایج حاصل از شصت مطالعه انجام‌شده بر روی ساختمان‌های مختلف در ۹ کشور از جمله سوئد، آلمان، استرالیا، کانادا، ژاپن و اسپانیا نسبت انرژی نهفته در مصالح مورد استفاده نسبت به کل انرژی مصرفی در طول چرخه عمر ساختمان بین ۹٪ تا ۴۶٪ برای ساختمان‌های کم‌مصرف و بین ۲٪ تا ۳۸٪ برای ساختمان‌های معمولی متغیر است (مینده و کوره، ۲۰۲۵)[2].

برخی تحقیقات دیگر نشان داده‌اند که در ساختمان‌های متداول، به‌ویژه در کشورهای شمالی و مرکزی اروپا، سهم انرژی نهفته در مصالح بین ۱۰٪ تا ۲۰٪ از کل انرژی مصرفی است، در حالی که ۸۰٪ تا ۹۰٪ به انرژی مصرف‌شده در مرحله بهره‌برداری و کمتر از ۱٪ به مرمت مصالح در پایان عمر آن‌ها اختصاص دارد (الهفناوی، ۲۰۲۱)[3].

[1] (Collias et al., 2021)
[2] (Minde & Kore, 2025)
[3] (Alhefnawi, 2021)

همچنین، عمر مفید ساختمان‌ها بسته به کشور و نوع کاربری متفاوت است؛ به عنوان نمونه، در هلند عمر مفید معمول ساختمان‌های مسکونی حدود ۷۵ سال و برای ساختمان‌های اداری ۲۰ سال است، در حالی که در بریتانیا برای هر دو نوع ساختمان مسکونی و تجاری ۶۰ سال در نظر گرفته می‌شود. این مقدار در فنلاند و سوئیس به ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۸۰ سال گزارش شده است. به‌طور کلی می‌توان گفت، دامنه گسترده نتایج به تفاوت در نوع ساختمان، مصالح مورد استفاده، طول عمر مفید در نظر گرفته‌شده و همچنین شرایط اقلیمی و جغرافیایی مرتبط است.

برای ارزیابی چرخه حیات مصالح ساختمانی، رویکردها و سطح‌های متفاوتی از ساده‌سازی و جزئی‌نگری می‌تواند به‌کار گرفته شود (باربهوئیا و داس، ۲۰۲۳)[1]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان انرژی مصرفی در فرآیند تولید برخی مصالح خاص به ازای هر مترمربع زیربنای ساختمان استاندارد، معادل انرژی حاصل از احتراق بیش از ۱۵۰ لیتر بنزین است (پیسلو و همکاران، ۲۰۱۷)[2]. به‌طور میانگین، ساخت هر مترمربع زیربنا منجر به انتشار حدود ۰/۵ تن گاز دی‌اکسیدکربن و مصرف تقریبی ۵۷۵۴ مگاژول انرژی می‌شود؛ رقمی که با توجه به نوع طراحی، مصالح و سیستم ساخت می‌تواند متغیر باشد. آنچه قابل تأمل است، این است که این مقدار تنها به مراحل مرتبط با تولید و استفاده از مصالح مربوط می‌شود و سایر جنبه‌های چرخه عمر نظیر بهره‌برداری، نگهداری یا بازیافت را شامل نمی‌گردد.

شکل ۲ و شکل ۳ به‌ترتیب سهم نسبی مصالح اصلی در تقاضای انرژی اولیه و انتشار گاز CO_2 مرتبط با هر مترمربع زیربنای ساختمان مسکونی استاندارد را نشان می‌دهند. مطابق این داده‌ها، تأثیر مصالح پرمصرفی همچون فولاد، بتن و سرامیک در مصرف انرژی و تولید آلاینده‌های کربنی بسیار قابل توجه است.

از منظر زنجیره ارزش، این یافته‌ها اهمیت بازنگری در انتخاب و مدیریت مصالح در تمام مراحل ساخت‌وساز را برجسته می‌کند. هر واحد انرژی یا ماده مصرف‌شده، تنها بخشی از هزینه مستقیم پروژه نیست، بلکه به کل زنجیره ارزش صنعت ساخت از استخراج مواد اولیه و تولید تا حمل‌ونقل، اجرا و بازیافت تأثیر می‌گذارد. بنابراین، شناخت و به‌کارگیری مصالح کم‌انرژی و بازیافتی نه‌تنها از دیدگاه زیست‌محیطی سودمند است، بلکه می‌تواند کارایی و پایداری اقتصادی زنجیره ارزش را نیز بهبود بخشد (نوروزی و همکاران، ۲۰۲۱)[3].

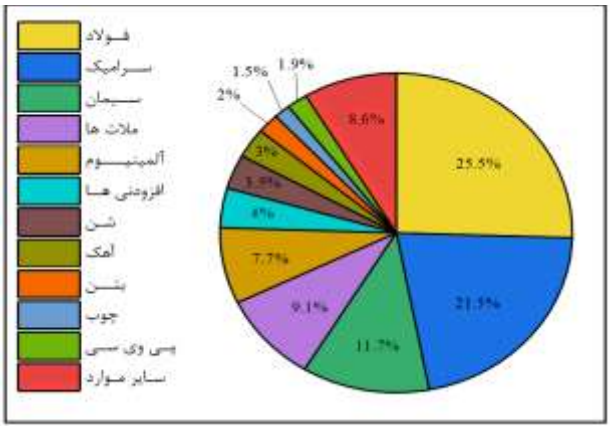
در دهه‌های اخیر، مطالعات متعددی به ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و انرژی مصالح ساختمانی و ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد آن‌ها پرداخته‌اند. در این میان، توجه ویژه‌ای به مرحله تولید و استفاده از مصالحی شده است که انرژی نهفته پایین‌تری دارند و می‌توانند جایگزین گزینه‌های سنتی شوند. برای نمونه، پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه عایق‌کاری حرارتی نشان داده‌اند که صفحات گچی کناف، به دلیل ترکیب بهینه مواد و قابلیت بازیافت بالا، نسبت به سایر عایق‌های مبتنی بر مواد مصنوعی تأثیرات زیست‌محیطی به‌مراتب کمتری دارند (کومار و همکاران، ۲۰۲۰)[4].

همچنین، ارزیابی چرخه حیات نشان داده است که استفاده از سیستم‌های ترکیبی عایق حرارتی خارجی، با در نظر گرفتن شاخص‌های انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های اقتصادی، می‌تواند مصرف انرژی، انتشار معادل CO_2 و هزینه کل چرخه عمر را تا حدود ۲۰ درصد نسبت به سیستم‌های مرسوم کاهش دهد (دیکسیت، ۲۰۱۷)[5].

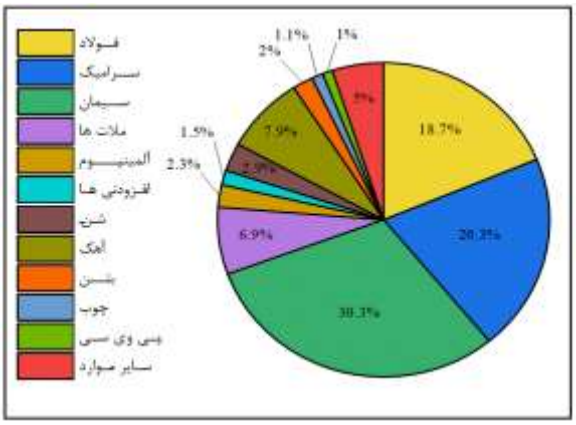
در زمینه مصالح طبیعی نیز مطالعات متعددی بر روی پوشش‌های چوبی کف انجام شده است که در آن‌ها، نه تنها اثرات زیست‌محیطی مواد مورد بررسی قرار گرفته، بلکه پیشنهاداتی در راستای بهینه‌سازی فرآیند نصب، نگهداری، و انتخاب چسب‌ها و پوشش‌های سازگارتر با محیط زیست ارائه شده است (اینگرائو و همکاران، ۲۰۱۸)[6]. علاوه بر این، استفاده از

[1] (Barbhuiya & Das, 2023)
[2] (Pisello et al., 2017)
[3] (Norouzi et al., 2021)
[4] (Kumar et al., 2020)
[5] (Dixit, 2017)
[6] (Ingrao et al., 2018)

مواد تغییر فازدهنده[1] نیز مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه این مواد موجب کاهش مصرف انرژی در طول دوره بهره‌برداری می‌شوند، اما به دلیل انرژی بالای موردنیاز در مرحله تولید، حدود ۲۵ سال زمان لازم است تا صرفه‌جویی حاصل از عملکرد آن‌ها بتواند انرژی مصرفی اولیه را جبران کند (سیمونسن و همکاران، ۲۰۲۳)[2].



شکل ۲. سهم نسبی مصالح در تقاضای انرژی اولیه مورد نیاز در ساخت ۱ متر مربع ساختمان مسکونی (پیسلو و همکاران، ۲۰۱۷)[3].



شکل ۳. سهم نسبی کربن دی اکسید آزاد شده برای ساخت ۱ متر مربع ساختمان مسکونی (پیسلو و همکاران، ۲۰۱۷).

در حوزه نوآوری‌های سبز، پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی بام‌های سبز انجام شده است که نشان می‌دهند این سیستم‌ها علاوه بر بهبود کارایی حرارتی ساختمان، نقش مؤثری در کاهش اثر جزیره حرارتی شهری و بهبود کیفیت زیست‌محیطی دارند (فال‌شتدت و همکاران، ۲۰۲۴)[4]. از سوی دیگر، مطالعات مرتبط با محصولات سرامیکی نشان داده‌اند که مرحله پخت این مصالح از انرژی‌برترین بخش‌های زنجیره ارزش به شمار می‌رود. در پاسخ به این چالش، راهکارهایی از جمله بهینه‌سازی فرآیندهای حرارتی، استفاده از سوخت‌های جایگزین و فناوری‌های کم‌کربن برای کاهش شدت انرژی پیشنهاد شده است (ژائو و لی، ۲۰۲۲)[5].

از منظر زنجیره ارزش، می‌توان گفت که بهبود عملکرد هر یک از مراحل تولید، انتقال، استفاده و بازیافت مصالح ساختمانی، به شکل مستقیم بر کارایی کل زنجیره اثرگذار است. مصالحی که با انرژی نهفته کمتر، قابلیت بازیافت بالا و دوام بیشتر طراحی می‌شوند، در واقع موجب افزایش ارزش افزوده در چرخه حیات ساختمان می‌گردند. به بیان دیگر، رویکردهای نوین در انتخاب و به‌کارگیری مصالح می‌توانند با کاهش هزینه‌های چرخه عمر، ارتقای بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار آلاینده‌ها، به بازتعریف زنجیره ارزش در صنعت ساخت‌وساز منجر شوند. این امر نه‌تنها از دیدگاه زیست‌محیطی، بلکه از منظر اقتصادی و اجتماعی نیز در مسیر دستیابی به توسعه پایدار، نقش بنیادینی ایفا می‌کند.

مطالعه‌ای نیز گزارش می‌کند که استفاده از آجر، علی‌رغم افزایش مصرف انرژی در مراحل تولید و حمل‌ونقل، در طول عمر مفید ساختمان منجر به کاهش چشمگیر نیاز به انرژی برای نگهداری و تعمیرات می‌شود؛ به‌طوری که می‌تواند تا دو برابر کارآمدتر از برخی جایگزین‌های متداول عمل کند (هوانگ و همکاران، ۲۰۲۴)[6]. به‌طور کلی، مصالح به‌کاررفته در مرحله ساخت ساختمان‌ها می‌توانند بیش از ۵۰ درصد از کل تقاضای انرژی در طول عمر مفید ساختمان را به خود

[1] Phase Change Material (PCM)
[2] (Simonsen et al., 2023)
[3] (Pisello et al., 2017)
[4] (Fahlstedt et al., 2024)
[5] (Zhao & Li, 2022)
[6] (Huang et al., 2024)

اختصاص دهند (نوودو و آنومبا، ۲۰۱۹)[1]. در این راستا، جایگزینی مصالحی با فرآیند تولید کم‌انرژی‌تر، مانند بلوک‌های بتنی به‌جای آجرهای پخته، می‌تواند تا حدود ۲۰ درصد صرفه‌جویی در انرژی تجمعی طی یک دوره ۵۰ ساله به همراه داشته باشد (گیسلینی و همکاران، ۲۰۱۸)[2]. افزون بر این، استفاده از مصالح بازیافتی، به‌ویژه فولاد و آلومینیوم بازیافتی، می‌تواند بیش از ۵۰ درصد از انرژی کلی مصرفی را کاهش دهد (کبیری فر و همکاران، ۲۰۲۰).

این یافته‌ها بیانگر آن است که بهینه‌سازی انتخاب مصالح، نه تنها در کاهش انرژی نهفته و اثرات زیست‌محیطی مؤثر است، بلکه بر کارایی کلی زنجیره ارزش ساخت‌وساز نیز تأثیر مستقیم دارد. هر مرحله از زنجیره، از استخراج مواد اولیه تا تولید، استفاده، نگهداری و بازیافت می‌تواند به فرصتی برای خلق ارزش افزوده و کاهش اتلاف منابع تبدیل شود. مصالحی که با انرژی کمتر تولید می‌شوند، دوام بالاتری دارند یا قابلیت بازیافت دارند، عملاً موجب ارتقای بازده کل زنجیره و افزایش پایداری اقتصادی پروژه می‌شوند. در نتیجه، رویکرد مبتنی بر زنجیره ارزش در انتخاب و مدیریت مصالح، ابزاری کلیدی برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار در صنعت ساختمان به شمار می‌آید.

نوع مصالح سازه‌ای تأثیر قابل توجهی بر ارزیابی زیست‌محیطی ساختمان دارد. به عنوان مثال، مطالعه‌ای مقایسه‌ای بین دو نوع مصالح سازه‌ای رایج، فولاد و بتن، در ساختمان‌های اداری نشان می‌دهد که اگرچه انرژی مورد نیاز برای تولید و آماده‌سازی مصالح در ساختمان فولادی به ازای هر متر مربع حدود ۲۵ درصد کمتر از ساختمان بتنی است، اما در صورت در نظر گرفتن چرخه کامل عمر ساختمان، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ساختمان فولادی بیش از ساختمان بتنی می‌شود (زابالزا بریبیان و همکاران، ۲۰۱۱)[3].

مطالعات بین‌المللی نیز نشان می‌دهند که ساختمان‌های با مصالح سازه‌ای چوبی نسبت به فولاد و بتن، در طول چرخه عمر خود انرژی کمتری مصرف کرده و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای آن‌ها به شکل قابل توجهی کمتر است (دوان و همکاران، ۲۰۲۲)[4]. به‌عنوان نمونه، در یک ساختمان اداری در کانادا، مصرف انرژی ساختمان فولادی حدود ۱/۶۱ برابر ساختمان بتنی مشابه و ساختمان بتنی حدود ۱/۲۷ برابر یک ساختمان چوبی مشابه بوده است (کابزا و همکاران، ۲۰۲۱)[5].

از منظر زنجیره ارزش صنعت ساخت‌وساز، این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب مصالح نه تنها در مرحله تولید، بلکه در کل چرخه عمر ساختمان از جمله استفاده، نگهداری و پایان عمر، نقش کلیدی در کاهش انرژی مصرفی و انتشار آلاینده‌ها دارد. مصالحی که انرژی نهفته کمتر، دوام بیشتر و قابلیت بازیافت بالاتری دارند، می‌توانند ارزش افزوده بیشتری ایجاد کرده و عملکرد زیست‌محیطی و اقتصادی کل پروژه را بهینه کنند. به این ترتیب، رویکرد مدیریت مصالح در طول چرخه عمر ساختمان، به‌عنوان ابزاری برای دستیابی به ساخت‌وساز پایدار و ارتقای بهره‌وری در زنجیره ارزش مطرح می‌شود.

در کشورهای شمالی اروپا نیز مطالعات متعددی بر روی چرخه عمر ساختمان‌های چوبی انجام شده است. برای نمونه، مطالعه‌ای در نروژ و سوئد نشان می‌دهد که جایگزینی یک ساختمان بتنی با یک ساختمان چوبی می‌تواند انتشار دی‌اکسید کربن را تا حدود ۸۸۰ گرم به ازای هر کیلوگرم چوب ورودی کاهش دهد. همچنین، جایگزینی یک ساختمان فولادی با ساختمان چوبی می‌تواند تا ۱/۷۷ کیلوگرم دی‌اکسید کربن به ازای هر کیلوگرم چوب ورودی صرفه‌جویی نماید (یوان و همکاران، ۲۰۲۴)[6]. با این حال، این مطالعه تأکید می‌کند که علی‌رغم کاهش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای، باید توجه ویژه‌ای به مواد شیمیایی و سمی افزوده‌شده در مراحل آماده‌سازی چوب نیز داشت.

[1] (Nwodo & Anumba, 2019)
[2] (Ghisellini et al., 2018)
[3] (Zabalza Bribián et al., 2011)
[4] (Duan et al., 2022)
[5] (Cabeza et al., 2021)
[6] (Yuan et al., 2024)

از منظر زنجیره ارزش صنعت ساخت‌وساز، این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب مصالح نه تنها بر مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها در طول چرخه عمر ساختمان تأثیر دارد، بلکه کیفیت مواد اولیه و فرآیندهای آماده‌سازی آن‌ها نیز می‌تواند ارزش افزوده پروژه و تأثیرات زیست‌محیطی کل زنجیره را تحت تأثیر قرار دهد. به این ترتیب، ارزیابی دقیق مصالح و در دسترس بودن آن‌ها و همچنین توجه به اقلیم و ساختگاه پروژه بخشی حیاتی از تصمیم‌گیری‌های پایدار در مدیریت زنجیره ارزش ساختمان به شمار می‌رود.

۳. روش

در چند دهه اخیر، اتحادیه اروپا چارچوب‌هایی استاندارد برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی در زنجیره ارزش محصولات و مصالح ساختمانی تدوین کرده است. این چارچوب‌ها اصول و الزامات لازم برای انجام ارزیابی چرخه حیات را مشخص می‌کنند. این ارزیابی، تمامی مراحل زنجیره ارزش مصالح ساختمانی را از استخراج مواد اولیه، فرآیندهای تولید، حمل‌ونقل، اجرا و بهره‌برداری تا بازیافت یا دفع نهایی در پایان عمر در بر می‌گیرد. به‌کارگیری این استانداردها در صنعت ساخت‌وساز، علاوه بر امکان مقایسه و بهینه‌سازی عملکرد زیست‌محیطی مصالح، موجب شفاف‌سازی ارزش افزوده هر مرحله از زنجیره تأمین و تولید نیز می‌شود. به بیان دیگر، رویکرد چرخه حیات در تعامل با مفهوم زنجیره ارزش، ابزاری کلیدی برای شناسایی نقاط بحرانی در مصرف انرژی، تولید پسماند و انتشار گازهای گلخانه‌ای فراهم می‌کند و مسیر حرکت به‌سوی صنعتی‌سازی سبز و تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر در حوزه ساخت‌وساز پایدار را هموار می‌سازد.

با توجه به اینکه هدف اصلی این مطالعه ارزیابی چرخه حیات مصالح ساختمانی است، تمرکز بر شناسایی و تحلیل ویژگی‌های انرژی و اثرات زیست‌محیطی هر یک از مصالح در طول زنجیره ارزش آن‌ها صورت گرفته است. در این راستا، مجموعه‌ای از شاخص‌ها و معیارها که همسو با اهداف جهانی توسعه پایدار و سیاست‌های زیست‌محیطی اتحادیه اروپا هستند، مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از این معیارها تقاضای انرژی اولیه[1] است که بیانگر کل میزان انرژی مورد نیاز برای تولید یک محصول، از استخراج مواد خام تا مرحله نصب در ساختمان است. این شاخص با واحد مگاژول اندازه‌گیری می‌شود و در این مطالعه از روش تقاضای تجمعی انرژی[2] برای محاسبه آن استفاده شده است. این روش، انرژی مصرفی در تمامی مراحل زنجیره ارزش مصالح را شامل می‌شود و به شناسایی نقاطی از فرآیند تولید که بیشترین مصرف انرژی را دارند، کمک می‌کند.

علاوه بر این، شاخص پتانسیل گرمایش جهانی[3] به‌عنوان معیار کلیدی در ارزیابی اثرات زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گرفته است. این شاخص نشان‌دهنده سهم هر ماده یا فرآیند در انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نتیجه در پدیده گرمایش زمین است و معمولاً بر اساس مقدار معادل دی‌اکسیدکربن بیان می‌شود. در کنار این موارد، میزان مصرف آب نیز به‌عنوان یکی از عوامل مهم در تحلیل چرخه حیات در نظر گرفته شده است. این شاخص که بر حسب لیتر اندازه‌گیری می‌شود، بیانگر مقدار آب مورد نیاز در کل زنجیره ارزش یک ماده، از مرحله استخراج و فرآوری تا تولید و اجرا است. به‌طور کلی، به‌کارگیری این شاخص‌ها امکان ارزیابی جامع‌تری از عملکرد زیست‌محیطی مصالح ساختمانی را فراهم می‌سازد و به تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد تا در هر بخش از زنجیره ارزش، راهکارهایی برای کاهش مصرف انرژی، مدیریت منابع آب و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای اتخاذ کنند.

روش تقاضای تجمعی انرژی از دهه ۱۹۷۰ میلادی به‌عنوان یکی از شاخص‌های بنیادین در ارزیابی سیستم‌های انرژی معرفی شد و از آن زمان تاکنون به‌طور گسترده در تحلیل چرخه حیات محصولات مورد استفاده قرار گرفته است. این

[1] Primary Energy Demand
[2] Cumulative Energy Demand (CED)
[3] Global Warming Potential (GWP)

روش مجموع کل انرژی مصرف‌شده را در تمامی مراحل زنجیره ارزش یک محصول از استخراج مواد اولیه، فرآوری و تولید تا مرحله استفاده و دفع نهایی محاسبه می‌کند. این روش میان انرژی‌های تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر (فسیلی) تمایز قائل می‌شود و بدین ترتیب امکان شناسایی بخش‌های پرمصرف در زنجیره ارزش و تدوین راهبردهایی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی را فراهم می‌سازد (فارینا و همکاران، ۲۰۱۷)[1].

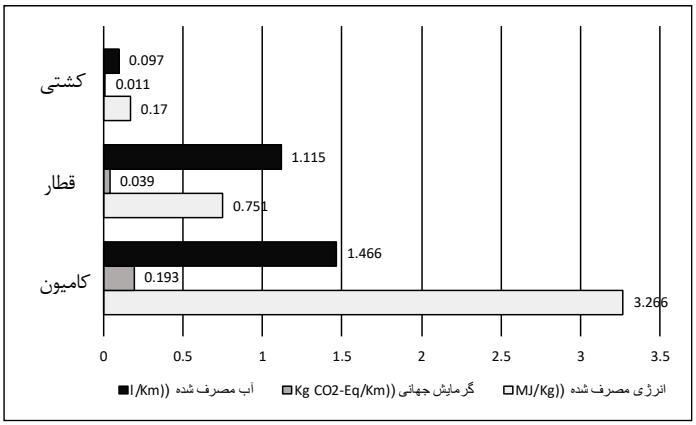
افزون بر تحلیل انرژی، بررسی اثر گازهای گلخانه‌ای نیز بخش مهمی از ارزیابی چرخه حیات را تشکیل می‌دهد. در این راستا، شاخص پتانسیل گرمایش جهانی که معمولاً بر اساس میزان معادل دی‌اکسیدکربن (CO_2-eq) بیان می‌شود، برای ارزیابی تأثیرات انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، بر اساس معیارهای ارائه‌شده توسط IPCC 2007[2] و با لحاظ دوره زمانی ۱۰۰ سال، میزان تأثیرگذاری هر یک از فرآیندهای زنجیره ارزش مصالح ساختمانی بر تغییرات اقلیمی بررسی شده است (هونکلر، ۲۰۱۶)[3]. در حال حاضر، استاندارد مشخص و مورد توافقی برای ارزیابی مصرف آب در تحلیل چرخه حیات محصولات وجود ندارد. با این حال، با توجه به اهمیت بالای منابع آب در بخش ساخت‌وساز و نقش آن در پایداری محیطی، در این مطالعه شاخصی مبتنی بر مجموع مصرف آب شیرین در کل زنجیره ارزش ساختمان در نظر گرفته شده است. این شاخص شامل آب مصرفی در مراحل استخراج، تولید، حمل‌ونقل، اجرا و حتی فرآیندهای جانبی مانند سیستم‌های سرمایشی و کنترل دما نیز می‌شود (ساکّی و همکاران، ۲۰۲۲)[4]. به‌طور کلی، تلفیق ارزیابی‌های مبتنی بر CED، GWP و مصرف آب در چارچوب زنجیره ارزش مصالح ساختمانی، رویکردی یکپارچه برای شناسایی نقاط بحرانی و ارتقای کارایی زیست‌محیطی ارائه می‌دهد. این رویکرد می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری در طراحی و انتخاب مصالح سازگار با محیط‌زیست و توسعه سیاست‌های کلان در جهت کاهش اثرات زیست‌محیطی ساختمان‌ها در کل چرخه حیات آن‌ها باشد.

در راستای انجام ارزیابی چرخه حیات، تمامی مراحل مؤثر در زنجیره ارزش مصالح ساختمانی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این مراحل شامل تولید مواد اولیه، حمل‌ونقل از کارخانه تا محل اجرای ساختمان، فرآیند ساخت، دوره بهره‌برداری، تخریب و نهایتاً دفع نهایی محصول می‌باشند. هر یک از این مراحل نقش مشخصی در ایجاد یا کاهش اثرات زیست‌محیطی داشته و به عنوان حلقه‌ای از زنجیره ارزش، بر کارایی کلی سیستم ساخت‌وساز تأثیرگذارند. برای انجام این تحلیل، از پایگاه داده‌ی معتبر Ecoinvent v3.10 (زوندرگر و استویکو، ۲۰۲۳)[5] استفاده شده است که یکی از جامع‌ترین منابع جهانی در حوزه ارزیابی چرخه حیات محسوب می‌شود. این پایگاه داده شامل اطلاعات کمی و کیفی دقیق درباره جریان مواد، مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی فرآیندهای صنعتی و اقتصادی است و به عنوان مرجع اصلی در مدل‌سازی چرخه حیات مصالح و سیستم‌های ساختمانی به‌کار گرفته می‌شود.

در این مطالعه، با توجه به ماهیت داده‌های اروپایی، تطابق آن‌ها با ویژگی‌های صنعتی و شرایط حمل‌ونقل در سایر مناطق به‌عنوان یک عامل محدودکننده در تحلیل نتایج در نظر گرفته شده است (دیتمن و همکاران، ۲۰۲۰)[6]. بدین منظور، اثرات زیست‌محیطی ناشی از حمل‌ونقل مصالح در زنجیره ارزش نیز به‌صورت مجزا بررسی شده است. برای این بخش، یک کامیون باری با ظرفیت ۲۰ تا ۲۸ تن که مسافتی حدود ۱۰۰ کیلومتر را طی می‌کند، به‌عنوان مبنای محاسبات در نظر گرفته شده است. همچنین، تحلیل حساسیت[7] برای سایر وسایل نقلیه حمل‌ونقل نیز انجام گرفته تا تأثیر نوع و مسافت حمل‌ونقل بر شاخص‌های محیطی مشخص شود. در همین راستا، شکل ۴ مقادیر مورد استفاده برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی سه

[1] (Farina et al., 2017)
[2] Intergovernmental Panel on Climate Change
[3] (Hunkeler, 2016)
[4] (Sacchi et al., 2022)
[5] (Sonderegger & Stoikou, 2023)
[6] (Deetman et al., 2020)
[7] Sensitivity Analysis

نوع کلی از حمل‌ونقل یک تن مصالح توسط وسایل نقلیه مختلف را نشان می‌دهد. نتایج این بخش به شناسایی نقاط پرریسک در زنجیره ارزش مصالح کمک کرده و می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری در انتخاب مسیرهای تأمین، نوع وسیله حمل و استراتژی‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش حمل‌ونقل قرار گیرد.



شکل ٤. میزان تأثیرگذاری محیطی برای مرحله حمل و نقل از کارخانه به محل ساختمان برای یک تن محصول تولید شده.

در مرحله نهایی چرخه حیات، اثرات زیست‌محیطی مرتبط با تخریب ساختمان، فرآیندهای جداسازی مصالح و انرژی مورد نیاز در این مرحله نیز مورد بررسی قرار گرفته است. این مرحله بخش پایانی زنجیره ارزش مصالح ساختمانی محسوب می‌شود و نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزیابی پایداری کل سیستم دارد، زیرا تصمیمات مرتبط با بازیافت، بازاستفاده و دفع مواد می‌تواند بر میزان صرفه‌جویی انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در چرخه‌های بعدی تولید تأثیرگذار باشد.در این راستا، رایج‌ترین روش‌های دفع نهایی مصالح شامل دفن در محل‌های زباله[1] و سوزاندن[2] به‌عنوان سناریوهای پایه در تحلیل در نظر گرفته شده‌اند (دی ماریا و همکاران، ۲۰۱۸)[3].

علاوه بر این، تأثیرات بالقوه بازیافت نیز در مدل لحاظ شده است تا مسیر جریان مواد در زنجیره ارزش به‌صورت کامل مورد ارزیابی قرار گیرد. مطابق با روش توصیه‌شده در پایگاه داده Ecoinvent، مزایای زیست‌محیطی حاصل از فرآیند بازیافت، به‌طور کامل به ماده ثانویه تولیدشده اختصاص داده می‌شود، نه به ماده اولیه‌ای که از آن بازیافت صورت گرفته است. این رویکرد سبب می‌شود اثرات زیست‌محیطی به‌طور دقیق‌تر در امتداد زنجیره ارزش مواد توزیع گردد و از دوباره محاسبه منافع زیست‌محیطی جلوگیری شود. به‌طور کلی، مرحله تخریب و دفع مصالح آخرین حلقه از زنجیره ارزش در صنعت ساختمان را تشکیل داده و در تحلیل جامع چرخه حیات، توجه به فرصت‌های بازیافت و باز استفاده در این مرحله می‌تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد زیست‌محیطی و کاهش اثرات منفی کل چرخه داشته باشد.

٤. یافته‌ها

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۱، که مربوط به میزان تأثیرات زیست‌محیطی مصالحی همچون آجر، کاشی و سرامیک است، می‌توان مشاهده کرد فرآیندهای تولید و پخت این مصالح سهم قابل‌توجهی در شاخص‌های انرژی اولیه و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. این موضوع به‌ویژه در مورد محصولات سرامیکی که نیازمند دمای بالای پخت و مصرف انرژی زیاد هستند، محسوس‌تر است. مقایسه داده‌ها نشان می‌دهد که انتخاب نوع ماده خام، فناوری تولید و بازدهی انرژی در فرایند پخت می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش آثار منفی زیست‌محیطی داشته باشد.

[1] landfilling
[2] incineration
[3] (Di Maria et al., 2018)

جدول ۱. میزان تأثیرگذاری محیطی برای انواع آجر، کاشی و سرامیک.

محصول ساختمانی	چگالی (kg/m^3)	هدایت حرارتی (W/mK)	تقاضای انرژی اولیه (MJ/kg)	پتانسیل گرمایش جهانی (kg CO2/kg)	تقاضای آب (l/kg)
آجر معمولی	۱۸۰۰	۰/۹۵	۳/۵۶۲	۰/۲۷۱	۰/۸۹
آجر سفالی	۱۰۲۰	۰/۲۹	۶/۲۶۵	-۰/۰۰۴	۱/۴۱۵
آجر ماسه آهکی	۱۵۳۰	۰/۷	۲/۱۸۲	۰/۱۲	۳/۰۰۹
سرامیک	۲۰۰۰	۱	۱۵/۶۴۹	۰/۸۵۷	۱۴/۴۵۳
کاشی	۲۱۰۰	۱/۵	۲/۲	۰/۲۹	۳/۰۰۹

از منظر زنجیره ارزش، این نتایج بیانگر آن است که مرحله تولید در این گروه از مصالح، گلوگاه اصلی اثرات زیست‌محیطی محسوب می‌شود و بهبود کارایی انرژی، استفاده از سوخت‌های جایگزین و بازیافت ضایعات تولیدی می‌تواند ارزش افزوده قابل‌توجهی در کل چرخه عمر این محصولات ایجاد کند. بنابراین، رویکردی یکپارچه در مدیریت زنجیره ارزش، از استخراج مواد اولیه تا بازیافت و بازاستفاده، برای کاهش ردپای زیست‌محیطی این مصالح ضروری است.

نتایج حاصل از ارزیابی نشان می‌دهد که در میان مصالح مورد بررسی، کاشی‌ها بیشترین سهم را در تقاضای انرژی اولیه دارند. این موضوع به‌طور عمده ناشی از مصرف بالای گاز در مرحله پخت است که می‌تواند تا حدود ۸۰ درصد از کل انرژی تولید را شامل شود. همچنین، فرآیند خنک‌سازی در تولید کاشی‌ها موجب مصرف آب قابل توجهی می‌شود، به‌طوری‌که میزان مصرف آب در این مصالح حدود ۷/۵ برابر بیش از سرامیک‌ها و آجرها برآورد می‌گردد. از سوی دیگر، واردات برخی مواد اولیه از کشورهای دیگر نیز منجر به افزایش تقاضای انرژی اولیه تا حدود ۱/۶ برابر می‌شود که این مسئله نشان‌دهنده اهمیت بعد حمل‌ونقل در کل زنجیره ارزش این مصالح است.

در این میان، جایگزینی کاشی‌ها با سرامیک‌ها می‌تواند منجر به کاهش حدود ۸۶ درصدی در مصرف انرژی اولیه و ۶۶ درصدی در میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای گردد، که نشان‌دهنده ظرفیت بالای بهینه‌سازی در زنجیره ارزش مصالح ساختمانی است. در خصوص آجر نیز استفاده از آجرهای سفالی سبک یا آجرهای ماسه‌آهکی، تأثیرات زیست‌محیطی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. به‌ویژه آجرهای سفالی، با داشتن تراز تقریباً خنثی از نظر انتشار CO_2، می‌توانند از تولید حدود ۰/۲۷ کیلوگرم CO_2 به ازای هر کیلوگرم محصول نهایی جلوگیری کنند.

در سطح کلان، ارتقای فناوری در بخش تولید این مصالح، نقشی کلیدی در بهبود عملکرد زیست‌محیطی زنجیره ارزش دارد. به‌عنوان نمونه، جایگزینی کوره‌های متناوب با کوره‌های تونلی، استفاده از مشعل‌های پرفشار، بازیابی حرارت از گازهای خروجی برای خشک‌کردن اولیه محصولات، و نصب سیستم‌های تولید هم‌زمان برق و حرارت، می‌تواند به ترتیب موجب کاهش ۵ تا ۲۰ درصدی در مصرف انرژی و حدود ۱۰ درصد در انرژی اولیه شود. چنین اقداماتی نه‌تنها در بهینه‌سازی فرآیند تولید، بلکه در ارتقای ارزش‌افزوده نهایی مصالح و کاهش ردپای کربنی در کل زنجیره ارزش ساخت‌وساز مؤثر است. یافته‌ها بیانگر آن است که عایق‌های تولیدشده در فرآیندهای صنعتی با مصرف انرژی بالا، مانند پلی‌استایرن، تأثیرات زیست‌محیطی بیشتری نسبت به عایق‌های طبیعی نظیر الیاف چوب و یا مواد بازیافتی مانند الیاف سلولزی دارند. مقادیر مربوط به این تأثیرات در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ تأثیرات زیست‌محیطی انواع عایق‌های ساختمانی را در طول چرخه حیات آن‌ها نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، عایق‌های صنعتی مانند پلی‌استایرن و پلی‌یورتان بیشترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و تقاضای انرژی اولیه را در زنجیره ارزش ساختمان دارند. این مسئله عمدتاً ناشی از ماهیت انرژی‌بر فرآیندهای تولید آن‌ها و وابستگی به

منابع فسیلی نظیر گاز طبیعی و نفت است. این محصولات به‌طور میانگین حدود ۷ کیلوگرم CO_2 به ازای هر کیلوگرم عایق منتشر می‌کنند و در فرآیندهای خنک‌سازی نیز مقادیر قابل توجهی آب مصرف می‌کنند.

جدول ۲. میزان تأثیرگذاری محیطی برای انواع محصولات عایق بندی.

محصول ساختمانی	چگالی (kg/m^3)	هدایت حرارتی (W/mK)	تقاضای انرژی اولیه (MJ/kg)	پتانسیل گرمایش جهانی (kg CO2/kg)	تقاضای آب (l/kg)
پلی‌استایرن	۳۰	۰/۰۳۷۵	۱۰۵/۴۸۶	۷/۳۳۶	۱۹۲/۷۲۹
پشم سنگ	۶۰	۰/۰۴	۲۶/۳۹۳	۱/۵۱۱	۳۲/۳۸۴
فوم پلی‌یورتان جامد	۳۰	۰/۰۳۲	۱۰۳/۷۸۲	۶/۷۸۸	۳۵۰/۹۸۲
الیاف سلولزی	۵۰	۰/۰۴	۱۰/۴۸۷	۱/۸۳۱	۲۰/۷۸۹
الیاف چوب	۱۸۰	۰/۰۷	۲۰/۲۶۷	۰/۱۲۴	۲/۷۶۳

در مقابل، عایق‌های طبیعی همچون الیاف چوب، پشم گوسفند و الیاف سلولزی، حتی در صورت سوزاندن در مرحله دفع نهایی، تا ۹۸٪ انتشار CO_2 کمتری دارند و در صورت بازیافت، می‌توانند ارزش افزوده زیست‌محیطی بیشتری ایجاد کنند. استفاده از این مصالح علاوه بر کاهش بار محیطی در مراحل تولید و پایان عمر، موجب تقویت حلقه‌های پایین‌دستی زنجیره ارزش نظیر صنایع کشاورزی و بازیافت نیز می‌شود. در این میان، پشم سنگ عملکرد زیست‌محیطی بهتری نسبت به عایق‌های فسیلی دارد؛ به طوری که مصرف انرژی و انتشار CO_2 آن به ترتیب حدود ۴ و ۷/۴ برابر کمتر است. با این حال، وابستگی این محصول به زغال‌سنگ در مرحله تولید همچنان می‌تواند اثرات منفی قابل توجهی بر محیط زیست برجای گذارد. در مجموع، اگرچه هنوز در صنعت ساختمان گرایش محدودی به استفاده از عایق‌های طبیعی وجود دارد، اما ترویج این محصولات از طریق سیاست‌های تشویقی و استانداردهای سبز می‌تواند موجب بهبود عملکرد زیست‌محیطی کل زنجیره ارزش ساختمان و کاهش چشمگیر ردپای کربنی در بخش ساخت‌وساز شود.

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، تأثیرات زیست‌محیطی سیمان به‌مراتب بیشتر از ملات و بتن است. این موضوع به آن دلیل است که در ترکیب ملات و بتن، سیمان با مواد کم‌تأثیرتری همچون شن و ماسه مخلوط می‌شود و در نتیجه، در ارزیابی بر مبنای واحد وزنی، شدت اثرات زیست‌محیطی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، افزودن مصالح طبیعی و کم‌انرژی در زنجیره ارزش تولید بتن، موجب رقیق شدن سهم پرانرژی‌ترین جزء یعنی سیمان و در نهایت کاهش ردپای زیست‌محیطی کل محصول می‌شود.

جدول ۳. میزان تأثیرگذاری محیطی برای انواع محصولات سیمانی.

محصول ساختمانی	چگالی (kg/m^3)	هدایت حرارتی (W/mK)	تقاضای انرژی اولیه (MJ/kg)	پتانسیل گرمایش جهانی (kg CO2/kg)	تقاضای آب (l/kg)
سیمان	۳۱۵۰	۱/۴	۴/۲۳۵	۰/۸۱۹	۳/۹۳۷
ملات سیمانی	۱۵۲۵	۰/۷	۲/۱۷۱	۰/۲۴۱	۳/۳۲۹
بتن مسلح	۲۵۴۶	۲/۳	۱/۸۰۲	۰/۱۷۹	۲/۷۶۸
بتن	۲۳۸۰	۱/۶۵	۱/۱۰۵	۰/۱۳۷	۲/۰۴۵

شایان ذکر است که مقادیر ارائه‌شده مربوط به یک کیلوگرم از محصول نهایی هستند و از آنجا که مصالح سیمانی معمولاً بین ۴۰ تا ۶۰ درصد از وزن کل ساختمان را تشکیل می‌دهند، توجه به اثرات زیست‌محیطی آن‌ها در زنجیره ارزش ساخت‌وساز اهمیت ویژه‌ای دارد به همین دلیل، بهبود فرآیندهای تولید سیمان نقش کلیدی در کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی در کل زنجیره ارزش صنعت ساختمان دارد. یکی از راهکارهای مؤثر، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با

سوخت‌های کم‌کربن یا تجدیدپذیر در مراحل تولید سیمان است؛ اقدامی که در بسیاری از کشورهای اروپایی با موفقیت در حال اجراست. براساس پیش‌بینی‌ها، با تداوم نوآوری‌های فناورانه در بخش تولید، می‌توان تا سال ۲۰۵۰ میزان انتشار CO_2ناشی از تولید سیمان را تا ۵۰ درصد نسبت به سطح سال ۱۹۹۰ کاهش داد (دی ماریا و همکاران، ۲۰۱۸). از این‌رو، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک و بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحدهای تولید سیمان، گامی اساسی در جهت ارتقای پایداری زنجیره ارزش مصالح ساختمانی به شمار می‌آید.

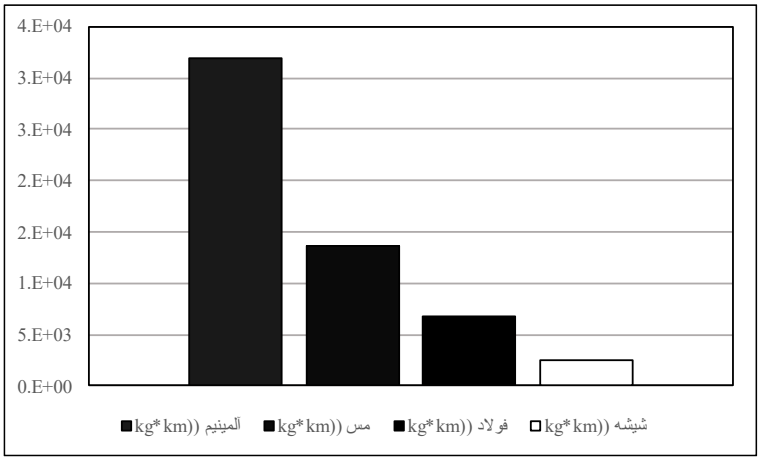
به طور کلی، مصالح ساختمانی مبتنی بر چوب از کم‌ترین میزان آلایندگی زیست‌محیطی در میان انواع مصالح برخوردارند، به‌ویژه آن دسته از محصولات چوبی که فرآوری صنعتی محدودی دارند. بخش عمده‌ای از تقاضای انرژی اولیه در این مصالح از منابع طبیعی و تجدیدپذیر تأمین می‌شود و حدود ۶۹ تا ۸۳ درصد از کل انرژی مصرفی را شامل می‌گردد. از منظر انتشار گازهای گلخانه‌ای، چوب به‌عنوان یک منبع کربن خنثی شناخته می‌شود و حتی در صورت بازیافت در پایان عمر مفید، می‌تواند به جذب خالص دی‌اکسیدکربن منجر شود. برای مثال، هر مترمکعب چوب لمینت‌شده که در پایان عمر خود سوزانده نشود، حدود ۵۸۲ کیلوگرم CO_2 جذب می‌کند؛ در حالی که بتن مسلح و فولاد به‌ترتیب حدود ۴۵۸ و ۱۲ کیلوگرم CO_2 در هر مترمکعب منتشر می‌کنند.

این مقایسه نشان می‌دهد که گسترش استفاده از مصالح چوبی می‌تواند سهم مهمی در تحقق اهداف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در زنجیره ارزش صنعت ساختمان داشته باشد. در شرایطی که بخش قابل توجهی از سرمایه‌گذاری‌های جهانی صرف توسعه فناوری‌های جذب و ذخیره‌سازی کربن در صنایع انرژی می‌شود، کاربرد چوب در ساختمان‌ها در واقع روشی طبیعی و پایدار برای ذخیره کربن طی کل عمر مفید سازه است. این مزیت حتی می‌تواند با استفاده مجدد از چوب پس از پایان عمر ساختمان نیز ادامه یابد. از این‌رو، حمایت‌های سیاستی و اقتصادی دولت‌ها برای ترویج کاربرد مصالح چوبی در پروژه‌های ساختمانی ضرورتی اساسی به‌شمار می‌آید.

با وجود اثرات زیست‌محیطی پایین چوب، فرصت‌های بهبود قابل‌توجهی نیز در زنجیره ارزش این محصولات وجود دارد. یکی از این موارد، جایگزینی رزین‌های شیمیایی پرانرژی با رزین‌های طبیعی است که می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در انتشار CO_2 شود. بر اساس برآوردها، این کاهش برای چوب لمینت‌شده حدود ۱۶ درصد و برای محصولات فیبری تا ۴۶ درصد است. علاوه بر این، احیای صنعت استخراج رزین‌های طبیعی ضمن ارتقای پایداری زیست‌محیطی، می‌تواند به اشتغال‌زایی و توسعه اقتصادی مناطق روستایی کمک کند.

در نهایت، بهبود فرآیندهای تولید در مرحله خشک‌کردن چوب نیز بخش دیگری از زنجیره ارزش است که پتانسیل بالایی در کاهش اثرات زیست‌محیطی دارد. به عنوان نمونه، خشک‌کردن طبیعی چوب در هوای آزاد، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک، می‌تواند تا ۱۱ درصد از میزان انتشار دی‌اکسیدکربن نسبت به خشک‌کردن در کوره بکاهد.

بسیاری از مصالح مورد استفاده در ساخت ساختمان‌ها، مانند فولاد، آلومینیوم، مس، پی‌وی‌سی و شیشه، به دلیل مصرف بالای انرژی و مواد خام و همچنین فرآیندهای پیچیده تولید، دارای اثرات زیست‌محیطی قابل توجهی در طول چرخه حیات خود هستند. این مصالح عموماً در زنجیره‌های تأمین جهانی تولید و توزیع می‌شوند، امری که نه تنها وابستگی شدیدی به منابع انرژی ایجاد می‌کند بلکه میزان انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از حمل‌ونقل را نیز به شکل چشمگیری افزایش می‌دهد. به عنوان نمونه، میزان حمل‌ونقل مورد نیاز برای پرکاربرد در شکل ۵ گزارش شده است. در این میان، آلمینیوم به دلیل وابستگی شدید به برق در فرآیند الکترولیز، بیشترین سهم را در تقاضای انرژی اولیه و پتانسیل گرمایش جهانی دارد.



شکل ۵. میزان حمل‌ونقل مورد نیاز مصالح پرکاربرد ساختمانی.

در کنار آن، مصالح پلیمری مانند پی‌وی‌سی نیز در فرآیند تولید به مقادیر قابل توجهی آب برای خنک‌سازی نیاز دارند. این مصرف بالا نه تنها موجب افزایش مصرف آب در چرخه ارزش این محصولات می‌شود، بلکه در مناطقی با محدودیت منابع آبی می‌تواند به عنوان چالشی زیست‌محیطی تلقی شود. علاوه بر این، مصرف آب در صنایع فلزی نظیر فولاد و مس نیز به دلیل نیاز به خنک‌سازی مداوم تجهیزات و کنترل دما در فرآیندهای ذوب و شکل‌دهی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از منظر زنجیره ارزش، استخراج گسترده مواد خام برای تولید این مصالح، ضمن کاهش ذخایر طبیعی جهانی، هزینه و انرژی مورد نیاز برای استخراج و فرآوری را نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد؛ موضوعی که در تضاد با اهداف توسعه پایدار و کاهش مصرف انرژی در بخش ساختمان است. با این حال، ارتقای سهم بازیافت در زنجیره ارزش می‌تواند تأثیر چشمگیری در بهبود عملکرد زیست‌محیطی این مصالح داشته باشد. برای مثال، تولید فولاد ثانویه می‌تواند از انتشار حدود ۱/۲ کیلوگرم CO_2 به ازای هر کیلوگرم محصول نسبت به فولاد اولیه جلوگیری کند. این میزان کاهش برای مس ثانویه حدود ۱/۷ کیلوگرم و برای آلومینیوم بازیافتی حدود ۱۱/۳ کیلوگرم CO_2 به ازای هر کیلوگرم محصول گزارش شده است. بنابراین، تقویت حلقه‌های پایانی زنجیره ارزش از جمله بازیافت، استفاده مجدد و بازتولید مصالح، نقشی کلیدی در کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت ساختمان ایفا می‌کند. این رویکرد نه تنها مصرف انرژی و منابع را کاهش می‌دهد، بلکه موجب ایجاد ارزش افزوده اقتصادی از طریق بازگرداندن مواد به چرخه تولید نیز می‌شود.

هدف از تحلیل و داده‌های ارائه شده در این مطالعه، ارزیابی معیارهای مختلف برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری بهینه در سازگار کردن مصالح و فناوری‌های ساختمانی با شرایط اقلیمی و اهداف یک جامعه در حال توسعه بوده است. تمامی معیارهای مطرح شده در راستای افزایش سازگاری با محیط زیست طراحی شده‌اند، اما بسته به شرایط منطقه‌ای، برخی معیارها می‌توانند اهمیت بیشتری پیدا کنند و در اولویت قرار گیرند. برای مثال، در کشورهایی که کمبود آب مشکل اصلی است، مدیریت منابع آب شیرین اهمیت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها دارد (چای و نِگای، ۲۰۲۰)[1]. اما نوآوری این مطالعه در تلفیق معیارهای بررسی چرخه حیات و اثرات زیست محیطی بدون در نظر قرار دادن ساختگاهی مشخص و صرفا در جهت سازگاری محیطی در راستای شناخت مصالح سازگارتر و روش‌های الویت بندی مصرف انرژی با توجه به اقلیم است.

[1] (Chai & Ngai, 2020)

در مقابل، روش‌هایی که بر اساس نمره‌دهی و ارزیابی موازی معیارها عمل می‌کنند، امکان مقایسه مناسب بین اقلیم‌ها و شرایط مختلف را محدود می‌کنند. از سوی دیگر، مقادیر گزارش شده در این مطالعه عمدتاً بر حسب کیلوگرم ارائه شده‌اند، که مقایسه دو محصول با ویژگی‌های متفاوت را بدون توجه به واحد مصرفی می‌تواند به اشتباه بیندازد. با این حال، این ارقام برای ارزیابی جایگزینی مصالح و بررسی تأثیرات نسبی آن‌ها در چرخه ارزش، مناسب و کارآمد هستند. در راستای تحلیل زنجیره ارزش مصالح ساختمانی، مجموعه‌ای از شاخص‌های کلیدی شامل مواد، انرژی، کیفیت زیست‌محیطی، ضایعات، ساخت، حمل‌ونقل و اقتصاد در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هر یک از این شاخص‌ها نمایانگر بخشی از مراحل چرخه حیات ساختمان هستند و میزان مشارکت آن‌ها در ارتقای پایداری و ارزش نهایی سیستم متفاوت است. مقادیر ارائه شده در جدول ۴ بر اساس استانداردهای بین‌المللی ارزیابی چرخه حیات و دستورالعمل‌های معتبر جهانی محاسبه شده‌اند و بیانگر سهم نسبی هر شاخص در زنجیره ارزش می‌باشند. این طبقه‌بندی امکان تحلیل مقایسه‌ای میان مراحل مختلف چرخه حیات را فراهم کرده و موقعیت هر شاخص را در ساختار سلسله‌مراتبی هرم زنجیره ارزش، از استخراج مواد اولیه تا مرحله نهایی بازیافت و دفع، مشخص می‌کند.

برای درک بهتر ارتباط میان شاخص‌های بررسی‌شده و موقعیت آن‌ها در چرخه حیات، ساختار سلسله‌مراتبی زنجیره ارزش در قالب یک هرم مفهومی ترسیم شده است. در این هرم، شاخص‌های مواد و انرژی به‌عنوان پایه اصلی زنجیره ارزش در تمامی مراحل چرخه حیات حضور دارند، در حالی‌که شاخص‌های ساخت و حمل‌ونقل در لایه میانی و شاخص‌های زیست‌محیطی و اقتصادی در سطوح بالاتر قرار گرفته‌اند (شکل ۶).

جدول ٤. مقایسه سیستم‌های رتبه‌بندی براساس استانداردها.

شاخص / استاندارد	CASBEE	HQE	Green Star	DGNB	LEED	BREEAM	Total	محل قرار گیری در هرم زنجیره
انرژی	٪۲۰	٪۱۸	٪۲۲	٪۵	٪۳۲	٪۱۷	۱۱۴٪	سرتاسر هرم
کیفیت زیست محیطی داخلی	٪۲۰	۳۸٪	٪۱۸	٪۱۴	٪۱۴	٪۱۳	٪۱۱۷	پایین هرم
آب	٪۵	٪۱۱	٪۶	٪۱	٪۹	٪۶	٪۳۸	بالای هرم
مواد	٪۱۰	٪۴	٪۸	٪۱	٪۱۳	٪۱۱	٪۴۷	سرتاسر هرم
ضایعات و زباله‌ها	٪۱<	٪۳	٪۲	٪۴	–	٪۷	٪۱۶	پایین هرم
ساخت	٪۲۲	٪۴	٪۱۰	٪۱	٪۱۱	٪۷	٪۵۵	میان هرم
سایت	٪۲۲	٪۴	٪۱۰	٪۱۰	٪۱۳	٪۱۳	٪۷۲	پایین هرم
حمل و نقل	٪۱<	٪۲	٪۱۰	٪۲	٪۱۱	٪۷	٪۳۲	میان هرم
اقتصاد	–	–	٪۵	٪۲۰	٪۵	٪۹	٪۳۹	بالای هرم

شکل ٦. هرم زنجیره ارزش.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثرات زیست‌محیطی مصالح پرکاربرد ساختمانی بر اساس شاخص‌های مختلف از جمله مصرف مواد، انرژی، کیفیت زیست‌محیطی، ضایعات، فرآیند ساخت، حمل‌ونقل و جنبه‌های اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، ارزیابی کلی اثرات چرخه حیات مصالح و ارائه‌ی راهکارهایی در جهت کاهش تأثیرات منفی آن‌ها با توجه به شرایط اقلیمی و نیازهای یک جامعه در حال توسعه بود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل شاخص‌ها و مقایسه‌ی مصالح مختلف، می‌توان پیشنهادهایی را نیز جهت بهبود عملکرد زیست‌محیطی در صنعت ساختمان ارائه داد.

با توجه به داده‌های دسته بندی شده و مورد مقایسه قرار داده شده این مطالعه میتوان پاسخ را همانند معیارهای بررسی به چهار بخش دسته بندی کرد، ابتدا آن که به‌منظور جلوگیری از تولید مصالحی که موجب بهره‌برداری بیش از حد از منابع طبیعی می‌شوند، لازم است استفاده از بهترین تکنیک‌های موجود و نوآوری در فرآیندهای تولید ترویج یابد. همچنین، بهره‌گیری از ضایعات صنعتی و مصالح بازیافتی به‌جای منابع طبیعی محدود می‌تواند نقش قابل‌توجهی در کاهش فشار زیست‌محیطی ایفا کند. تحقق این هدف نیازمند ایجاد زیرساخت‌های مناسب برای بازیافت و حمایت دولت از تولیدکنندگانی است که در این مسیر گام برمی‌دارند.

به عنوان پاسخ یافت شده دوم، کاهش مسافت حمل‌ونقل و انرژی‌های مرتبط با آن می‌تواند در تمامی شاخص‌های ارزیابی‌شده بهبود محسوسی ایجاد کند. به همین سبب استفاده از مصالحی که نیاز کمتری به حمل و نقل دارند و حتی نوع حمل و نقل میتواند به چرخه کلی انرژی کمک محسوسی داشته باشد.

در بخش سوم پاسخ، بی شک باید به میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمای جهانی در نتیجه آن اشاره کرد که فارق از هر اقلیمی باید در انتخاب و جایگذینی مصالح مورد استفاده مد نظر قرار گیرند و از نگاهی دیگر فارق از نوع مصالح در مراحل تولیدی جایگذینی سوخت‌های فسیلی با سوخت‌هایی با آلودگی کمتر بسیار در این فرایند تاثیر گذار است.

در بخش چهارم پاسخ نیز، میزان آب شیرین مصرفی در فرایندهای تولیدی نیاز به کنترل و پایش دارد اما این پایش به اقلیم و جغرافیای محصول نیز وابسته است. نکته بسیار مهم در این موضوع آن است که میزان آب مصرفی تنها مربوط به پروسه های تولید و نصب باشد و پایش شود که منابع آب شیرین دیگری به واسته قرابت با پروسه‌های تولید دچار آلودگی محیطی نشود.

لازم به ذکر است که نتایج این مطالعه باید به‌عنوان برآوردی تقریبی از اثرات واقعی زیست‌محیطی مصالح ساختمانی در نظر گرفته شوند، زیرا هدف آن، بررسی کلی مصالح رایج بوده و به محصول خاصی محدود نمی‌شود. ازاین‌رو، میزان دقت نتایج ممکن است بسته به کیفیت مصالح، عمر مفید، شرایط حمل‌ونقل و سناریوی پایان عمر متفاوت باشد.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش اهمیت ایجاد پایگاه‌های داده‌ی دقیق و بومی برای مصالح ساختمانی را نشان می‌دهد تا ویژگی‌های صنعتی و زیست‌محیطی مصالح در چارچوب شرایط واقعی هر کشور ارزیابی شود. نهادهای دولتی می‌توانند با الزام به استفاده از برچسب‌های زیست‌محیطی مطابق با استانداردهای جهانی و نظارت بر اجرای آن، زمینه‌ی رقابت سازنده میان تولیدکنندگان را فراهم سازند. این امر می‌تواند موجب ارتقای کیفیت و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی مصالح ساختمانی شود. در نهایت، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با تمرکز بر مصالح خاص، ترکیب داده‌های آزمایشگاهی و عددی، و تحلیل سناریوهای مختلف پایان عمر، مسیر دستیابی به ساخت‌وساز پایدار را دقیق‌تر و کارآمدتر نمایند.

تعارض منافع

تعارض منافع ندارم.

منابع

ابونوری، دیبا و بهشتی نیا، محمدعلی. (۱۴۰۴). تحلیل SWOT-QSPM مبتنی بر زنجیره ارزش برای اولویت‌بندی استراتژی‌های تأمین‌کنندگان صنعت خودرو: مطالعه موردی شرکت گسترش تک. مدیریت زنجیره ارزش راهبردی. ۱-۲۷، (۲)۲

doi: 10.22075/svcm.2025.37968.1028

پناهی گرجی محله، یوسف، نوذر اصل، کاوه و علی اکبری نوری، فهیمه. (۱۴۰۳). شناسایی فعالیتهای دستیابی به پایداری در تأمین مالی زنجیره ارزش. مدیریت زنجیره ارزش راهبردی. ۹۳-۱۰۶، (۲)۱.

doi: 10.22075/svcm.2024.34985.1001

References

Abonori, D., & Beheshtinia, M. A. (2025). Prioritizing Strategies for Automotive Industry Suppliers: A Value Chain-Based SWOT-QSPM Analysis. *Journal of Strategic Value Chain Management*, *2*(2), 1–27. https://doi.org/ 10.22075/svcm.2025.37968.1028, [In Persian].

Alhefnawi, M. A. M. (2021). Energy budget in an educational building in KSA: The case of cladding with terracotta and aluminium. *Ain Shams Engineering Journal*, *12*(3), 3255–3261. https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.01.024.

Amaral, R. E. C., Brito, J., Buckman, M., Drake, E., Ilatova, E., Rice, P., Sabbagh, C., Voronkin, S., & Abraham, Y. S. (2020). Waste Management and Operational Energy for Sustainable Buildings: A Review. *Sustainability*, *12*(13), 5337. https://doi.org/10.3390/su12135337.

Barbhuiya, S., & Das, B. B. (2023). Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making. *Case Studies in Construction Materials*, *19*, e02326. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02326.

Beemsterboer, S., Baumann, H., & Wallbaum, H. (2025). The myth of informed decision-making: explaining the substantive effectiveness of LCA use in a building product development project. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. https://doi.org/10.1007/s11367-025-02472-5.

Cabeza, L. F., Boquera, L., Chàfer, M., & Vérez, D. (2021). Embodied energy and embodied carbon of structural building materials: Worldwide progress and barriers through literature map analysis. *Energy and Buildings*, *231*, 110612. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110612.

Chai, J., & Ngai, E. W. T. (2020). Decision-making techniques in supplier selection: Recent accomplishments and what lies ahead. *Expert Systems with Applications*, *140*, 112903. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112903.

Collias, D. I., James, M. I., & Layman, J. M. (2021). *Introduction—Circular Economy of Polymers and Recycling Technologies* (pp. 1–21). https://doi.org/10.1021/bk-2021-1391.ch001.

Deetman, S., Marinova, S., van der Voet, E., van Vuuren, D. P., Edelenbosch, O., & Heijungs, R. (2020). Modelling global material stocks and flows for residential and service sector buildings towards 2050. *Journal of Cleaner Production*, *245*, 118658. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118658.

Di Maria, A., Eyckmans, J., & Van Acker, K. (2018). Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. *Waste Management*, *75*, 3–21. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.028.

Dixit, M. K. (2017). Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *79*, 390–413. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.051.

Duan, Z., Huang, Q., & Zhang, Q. (2022). Life cycle assessment of mass timber construction: A review. *Building and Environment*, *221*, 109320. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109320.

Fahlstedt, O., Rasmussen, F. N., Temeljotov-Salaj, A., Huang, L., & Bohne, R. A. (2024). Building renovations and life cycle assessment - A scoping literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *203*, 114774. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114774.

Farina, A., Zanetti, M. C., Santagata, E., & Blengini, G. A. (2017). Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt

pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, *117*, 204–212. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.015.

Ghisellini, P., Ripa, M., & Ulgiati, S. (2018). Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. *Journal of Cleaner Production*, *178*, 618–643. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.207

Hazarika, N., & Zhang, X. (2019). Factors that drive and sustain eco-innovation in the construction industry: The case of Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, *238*, 117816. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117816.

Honic, M., Kovacic, I., & Rechberger, H. (2019). Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study. *Journal of Cleaner Production*, *217*, 787–797. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.212.

Huang, Z., Zhou, H., Miao, Z., Tang, H., Lin, B., & Zhuang, W. (2024). Life-Cycle Carbon Emissions (LCCE) of Buildings: Implications, Calculations, and Reductions. *Engineering*, *35*, 115–139. https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.08.019.

Hunkeler, D. (2016). Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(7), 1063–1066. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1083-z.

Ingrao, C., Messineo, A., Beltramo, R., Yigitcanlar, T., & Ioppolo, G. (2018). How can life cycle thinking support sustainability of buildings? Investigating life cycle assessment applications for energy efficiency and environmental performance. *Journal of Cleaner Production*, *201*, 556–569. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.080.

Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., & Tam, V. W. Y. (2020). Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. *Journal of Cleaner Production*, *263*, 121265. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265.

Kumar, D., Alam, M., Zou, P. X. W., Sanjayan, J. G., & Memon, R. A. (2020). Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *131*, 110038. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038.

Minde, P., & Kore, K. (2025). Life cycle energy assessment of conventional and modular buildings: a case study analysis in the Indian context. *Energy Efficiency*, *18*(8), 98. https://doi.org/10.1007/s12053-025-10392-4.

Norouzi, M., Chàfer, M., Cabeza, L. F., Jiménez, L., & Boer, D. (2021). Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis. *Journal of Building Engineering*, *44*, 102704. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102704.

Nwodo, M. N., & Anumba, C. J. (2019). A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach. *Building and Environment*, *162*, 106290. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106290.

Panahi Gorji Mahalleh, Y., Nowzarasl, K., & Aliakbari Nouri, F. (2024). Identifying practices to achieve sustainability in value chain finance. *Journal of Strategic Value Chain Management*, *1*(2), 93–106. https://doi.org/10.22075/svcm.2024.34985.1001, [In Persian].

Pisello, A. L., D'Alessandro, A., Sambuco, S., Rallini, M., Ubertini, F., Asdrubali, F., Materazzi, A. L., & Cotana, F. (2017). Multipurpose experimental characterization of smart nanocomposite cement-based materials for thermal-energy efficiency and strain-sensing capability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *161*, 77–88. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.11.030.

Sacchi, R., Terlouw, T., Siala, K., Dirnaichner, A., Bauer, C., Cox, B., Mutel, C., Daioglou, V., & Luderer, G. (2022). PRospective EnvironMental Impact asSEment (premise): A streamlined approach to producing databases for prospective life cycle assessment using integrated assessment models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *160*, 112311. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112311.

Simonsen, G., Ravotti, R., O'Neill, P., & Stamatiou, A. (2023). Biobased phase change materials in energy storage and thermal management technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *184*, 113546. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113546.

Sonderegger, T., & Stoikou, N. (2023). Implementation of life cycle impact assessment methods in the ecoinvent database v3. 10. *Ecoinvent Association: Zürich, Switzerland*.

Yuan, L., Yang, B., Lu, W., & Peng, Z. (2024). Carbon footprint accounting across the construction waste lifecycle: A critical review of research. *Environmental Impact Assessment Review*, *107*, 107551. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107551.

Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., & Aranda Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, *46*(5), 1133–1140. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002.

Zhao, J., & Li, S. (2022). Life cycle cost assessment and multi-criteria decision analysis of environment-friendly building insulation materials - A review. *Energy and Buildings*, *254*, 111582. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111582.