Civil and Project Journal, 2024, 6(5), 11-35
https://doi.org/10.22034/cpj.2024.457939.1291

Civil and Project Journal
http://www.cpjournals.com/

Research Article

Building Information Modelling (BIM) application in evaluating and comparing the amount of embodied carbon in the retrofitting of educational buildings with different building materials

Zahra Movaghar[1], Roohollah Taherkhani[2]* , Saeed Banihashemi

1- M.Sc. of Engineering & Construction Management, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran

2*- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran

3-Asociate Professor, School of Design & Built Environment, University of Canberra, Canberra, Australia

Received: 22 April 2024; Revised: 20 May 2024; Accepted: 23 May 2024; Published: 23 May 2024

Abstract:

Today, the global community is facing two fundamental phenomena: global warming and climate change, both of which result from greenhouse gas emissions. Studies show that buildings and the construction industry play a major role in creating these conditions. Therefore, the risks arising from these conditions have led to an emphasis on designing and planning to achieve environmentally friendly buildings that adhere to sustainability principles. In this context, the present study aims to assess and compare the embodied carbon of selected materials during the retrofitting and rehabilitation of educational buildings based on the integration of Building Information Modeling (BIM) technology and sustainable development. In this research, using BIM technology, an educational building was simulated in Revit software. By extracting the dimensions and quantities of materials used for proposed models with different construction materials, the cost of each model and the amount of embodied carbon emissions were analyzed and compared. The results indicate that, in general, compared to the model retrofitted with the same materials as the existing model, retrofitting with conventional materials results in 15.08% less embodied carbon, retrofitting with modern materials results in 35.71% less embodied carbon, and retrofitting with traditional materials results in 82.49% less embodied carbon. Therefore, retrofitting using traditional materials significantly reduces the embodied carbon of a building. This method of retrofitting, in terms of sustainable development environmental indicators and cost savings, is the most suitable method for the studied building with an educational function.

Keywords: *Sustainable Construction, Building Information Modelling (BIM), Embodied Carbon, Building Material, Retrofitting, Educational Buildings*

Cite this article as: Movaghar, Z., Taherkhani, R., & Banihashemi, S. (2024). Building Information Modelling (BIM) application in evaluating and comparing the amount of embodied carbon in the retrofitting of educational buildings with different building materials. Civil and Project, 6(5), 11-35. doi: https://doi.org/10.22034/cpj.2024.457939.1291

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2023 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Corresponding author E-mail address: roohollah.taherkhani@gmail.com*

نشریه عمران و پروژه، ۱۴۰۲، ۵(۴)، ۲۰-۱۱
https://doi.org/10.22034/CPJ.2023.04.03.1133

نشریه عمران و پروژه
http://www.cpjournals.com/

کاربرد مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM) در ارزیابی و مقایسه میزان کربن نهفته در بازسازی ساختمان های آموزشی با مصالح ساختمانی مختلف

زهرا موقر[۱]، روح اله طاهرخانی[۲*]، سعید بنی هاشمی

۱-کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
*۲-استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
۳-دانشیار، دانشکده طراحی و محیط ساخته شده، دانشگاه کانبرا، کانبرا، استرالیا

تاریخ دریافت: ۰۳ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۳۱ اردیبهشت ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۰۳ خرداد ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۳ خرداد ۱۴۰۳

چکیده:

امروزه جامعه جهانی با دو پدیده اساسی گرمایش زمین و تغییرات اقلیمی که در پی انتشار گازهای گلخانه‌ای رخ می‌دهند روبروست. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ساختمان‌ها و صنعت ساخت سهم عمده‌ای در ایجاد این شرایط دارند. لذا مخاطرات ناشی از این شرایط، موجب تاکید بر طراحی‌ها و برنامه‌ریزی‌های مختلف برای دستیابی به ساختمان‌های سازگار با محیط زیست و مطابق با اصول پایداری شده‌است. در همین راستا، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه میزان کربن نهفته مصالح انتخابی در هنگام بازسازی و ترمیم ساختمان‌های آموزشی برمبنای یکپارچگی فناوری مدلسازی اطلاعات ساختمان[۱] و توسعه پایدار انجام شده‌است. در این پژوهش با بکارگیری فناوری مدلسازی اطلاعات ساختمان، یک ساختمان آموزشی در نرم افزار رویت[۲] شبیه‌سازی شده و سپس با استخراج ابعاد و مقادیر مصالح استفاده شده برای مدل‌های پیشنهادی با مصالح ساختمانی مختلف، هزینه هر یک از مدل‌ها و همینطور میزان انتشار کربن نهفته در آنها آنالیز و مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در حالت کلی در مقایسه با مدل بازسازی شده با مصالح یکسان با مدل موجود، بازسازی با مصالح متداول ۱۵/۰۸ درصد، بازسازی با مصالح مدرن ۳۵/۷۱ درصد و بازسازی با مصالح سنتی ۸۲/۴۹ درصد کربن نهفته کمتر ایجاد خواهد کرد. در نتیجه در بازسازی با استفاده از مصالح سنتی کاهش قابل توجهی در میزان کربن نهفته یک ساختمان پدید می‌آید و این شیوه از بازسازی از نظر شاخص‌های زیست‌محیطی توسعه پایدار و همچنین صرفه‌جویی در هزینه، مناسب‌ترین شیوه برای بازسازی ساختمان مورد مطالعه با کاربری آموزشی می‌باشد.

کلمات کلیدی:

ساخت و ساز پایدار، مدلسازی اطلاعات ساختمان، کربن نهفته، مصالح ساختمانی، بازسازی، ساختمان آموزشی

[1] Building Information Modelling
[2] Revit

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: roohollah.taherkhani@gmail.com

۱- مقدمه

بخش بزرگی از انتشار گازهای گلخانه‌ای در مقیاس جهانی مرتبط با ساختمان‌هاست و مصالح ساختمانی و فرایندهای مرتبط با ساخت، بخش قابل توجهی از آن را تشکیل می‌دهند (Resch et al. 2020). بگونه‌ای که این صنعت مسئول انتشار حدود یک سوم از گازهای گلخانه‌ای جهانی و تقریباً ۳۵ درصد دی اکسید کربن است (Aram and Taherkhani 2022). بدین ترتیب ساختمان‌ها نقش ویژه و موثری در بروز مشکلات زیست محیطی دارند (Roohollah. Taherkhani et al. 2022). مجموعه این شرایط موجب شده‌است تا گفتمان متخصصان و تصمیم گیرندگان صنعت ساخت در سراسر جهان شروع به درک و تصدیق مزایای ساختمان پایدار کند (Roohollah. Taherkhani 2022). بنابراین تلاش برای کاهش این میزان از اثرگذاری نامطلوب صنعت ساخت در انتشار گازهای گلخانه‌ای، می‌تواند راهکار بالقوه‌ای برای دستیابی به پایداری محیط زیستی بحساب بیاید. ضرورت پرداختن به تاثیرات مخرب محیط زیستی حوزه ساخت و ساز و ارائه راهکارهایی برای کاهش آنها، موجب شده‌است که این مقوله علی‌الخصوص در سال‌های اخیر، مورد توجه محققین صنعت ساختمان قرار گیرد. شایان ذکر است که اغلب مطالعات در بخش ساختمان، بر کاهش کربن عملیاتی (OC[1]) متمرکز شده‌اند و تعداد کمی از آنها به بررسی کربن نهفته (EC[2]) در بخش ساختمان می‌پردازند. تجزیه و تحلیل سطح پروژه و مطالعات موردی‌ای که طی پژوهش‌های محدود پیرامون کربن نهفته صورت پذیرفته‌است، بیانگر این واقعیت است که با وجود باور عامه به اندک بودن مقدار کربن نهفته در مقایسه با کربن عملیاتی در چرخه عمر ساختمان‌ها، به عنوان نمونه در سال ۲۰۱۵، کربن نهفته سالانه تقریباً نیمی از کل انتشار دی اکسید کربن در بخش ساخت را تشکیل داده‌است (Zhu et al. 2020). لذا اهمیت کربن نهفته و عواقب سودمند کاهش آن، مشهود و غیرقابل انکار است. همانطورکه پیدایش فن آوری‌های مدرن تحولات اساسی صنعت ساختمان را تحت تاثیر قرار داده‌است (Roohollah Taherkhani and Saleh 2019). پیش بینی و محاسبه دقیق کمیت انتشار کربن نهان یک روش مؤثر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است (Cang et al. 2020). بنابراین نگاهی جامع به پروژه‌های ساخت، مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM) به عنوان یکی از فناوری‌های به‌روز دنیا با ارائه جزییات و اطلاعات کامل هر جز پروژه و ساختمان، به مهندسین در حالت سه بعدی، به طور موثر و مفهومی می‌تواند دستیابی به ساختمان پایدار و سازگار با محیط زیست را تسهیل کند (Jalaei and Jrade 2015)، و بستری برای ایجاد و نظارت بر اطلاعات دیجیتالی پروژه در طول عمر آن را فراهم نماید (Chong and Wang 2016).

با عنایت به اینکه یکی از مهمترین راهکارها برای دستیابی به ساختمان‌های پایدار با میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتر، طراحی و ساخت کم کربن است، این فناوری می‌تواند مدلی یکپارچه از جزییات ویژگی‌های کاربردی و فیزیکی و شاخص‌های زیست محیطی ارائه دهد تا دستیابی به ساختمان با میزان کربن نهفته کمتر را محقق سازد (Pomponi and Moncaster 2018). از دیگر سو امروزه تقاضای زیادی برای بازسازی ساختمان‌های موجود، وجود دارد و این امر باعث می‌شود تا به جای ساختن ساختمان‌های جدید، زندگی جدیدی به ساختمان‌های موجود اهدا شود (Zhu et al. 2020). در بازسازی با توجه به تخریب المان‌های غیرسازه‌ای و نوسازی آنها بسیاری از عملیات‌های مربوط به فرآیندهای ساخت و ساز کاهش می‌یابد و همچنین مصالح کمتری جهت احیای یک ساختمان مورد نیاز خواهند بود. علاوه بر آن، به منظور کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، می توان در طی فرآیند بازسازی از مصالح کم کربن‌تر بهره گرفت. همچنین از نقطه نظر اقتصادی نیز بازسازی بسیار حائز اهمیت است، چرا که علاوه بر مقرون به‌صرفه بودن، در کاهش چشمگیر هزینه‌ها نسبت به ساخت مجدد بنا نیز بسیار تاثیرگذار می‌باشد. به طور معمول برای تخریب ساختمان فرسوده و ساختن مجدد یک بنا نوساز، نیاز به صرف هزینه‌های هنگفت و بالایی می‌باشد. اما با استفاده از مقوله بازسازی ضمن صرفه‌جویی در هزینه‌ها، تغییرات مد نظر برای افزایش عمر مفید ساختمان به سهولت و در مدت زمان کمتری صورت می‌گیرد. بر همین اساس امروزه بازسازی به نسبت

[1] Operational Carbon
[2] Embodied Carbon

ساخت مجدد به گزینه ارجح تبدیل شده‌است. از آنجا که در زندگی روزمره انسان امروز، یادگیری به امری جدایی ناپذیر بدل گشته‌است، ساخت ساختمان‌ها با کاربری آموزشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ساختمان‌ها با کاربری آموزشی در مقیاس دانشگاهی اغلب زیربنا و ظرفیت بالایی دارند و همچنین با مدنظر قرار دادن طول عمر زیاد ساخته می‌شوند. بنابراین پرداختن به بازسازی به منظور افزایش طول عمر مفید ساختمان‌های دانشگاهی و کاهش اثرات مخرب محیط زیستی آنها مقوله مهم و اثرگذاری محسوب می‌گردد. با توجه به گستردگی و کثرت پژوهش‌های انجام شده در صنعت ساختمان، اهمیت و ضرورت پژوهش حاضر با عنایت به اهمیت کاهش گاز کربن دی اکسید حاصل از صنعت ساخت، مورد بررسی قرار گرفته‌است و تعیین موضوع پژوهش حاضر و شناسایی خلا تحقیق، با توجه به محدوده و شرایط کشور ایران، مرحله کاری و نوع کاربری ساختمان مورد تاکید قرار گرفته‌است. با این وجود بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اغلب آنها، ساختمان‌های مسکونی را در مرحله طراحی اولیه مورد بررسی قرار داده‌اند. با توجه به آنکه در اغلب مطالعات پیشین با زمینه مشترک، ساختمان‌های مسکونی در مرحله طراحی اولیه مورد بررسی قرار گرفته‌اند، و مقالات معتبری در زمینه ارزیابی و کاهش میزان کربن نهفته در بازسازی ساختمان‌های آموزشی در کشورمان به چاپ نرسیده‌است، لذا در راستای پرداختن به خلا تحقیق در این زمینه، پژوهش حاضر ساختمانی با کاربری آموزشی در مرحله بازسازی را مورد ارزیابی قرار داده‌است. همچنین با توجه به اینکه مقالات معتبری در زمینه ارزیابی و کاهش میزان کربن نهفته در بازسازی ساختمان‌های آموزشی در کشور ایران به چاپ نرسیده‌است، ضرورت انجام تحقیق پیش رو در کشور بشدت احساس می‌شود. بدین منظور ردپای کربن (کربن نهفته) با در نظر گرفتن فاکتور پتانسیل گرمایش جهانی در ارزیابی چرخه حیات و با بهره گیری از مدلسازی اطلاعات ساختمان در نرم افزار رویت، مورد سنجش قرار گرفته و برای هر کدام از مصالح پیشنهادیِ مورد استفاده در بازسازی، میزان کربن نهفته محاسبه شده تا در نهایت مناسب ترین مصالح مورد استفاده قرار گیرند و تصمیم‌گیری ذینفعان سازگار با محیط زیست و پایداری ساختمان رقم بخورد. لذا پژوهش حاضر با هدف اصلی ارزیابی و مقایسه میزان کربن نهفته مصالح انتخابی در هنگام بازسازی ساختمان‌های آموزشی انجام شده‌است. بدین منظور اهداف فرعی زیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

- مدلسازی اطلاعات ساختمان موجود در نرم افزار رویت و تعیین میزان مصالح مورد استفاده در ساختمان
- محاسبه میزان کربن نهفته معادل با مصالح ساختمان موجود
- ارائه مصالح جایگزین جهت بازسازی ساختمان
- محاسبه میزان کربن نهفته ساختمان با فرض تغییر مصالح مصرفی جهت بازسازی ساختمان

همچنین فرضیات این مطالعه عبارتند از:

- اگر مصالحی با میزان کربن نهفته کمتر جایگزین شود هزینه ساخت بالا می‌رود.
- اگر مصالح سنتی استفاده شوند، میزان کربن نهفته کم می‌شود .
- هرچه میزان استفاده از مصالح سنتی با پایه طبیعی بیشتر بالاتر باشد، میزان کربن نهفته کاهش بیشتری می‌یابد.
- استفاده از مصالح پایدار باعث کاهش میزان کربن نهفته خواهد شد.
- استفاده از مصالح مدرن باعث افزایش میزان کربن نهان خواهد شد.

۱-۱- مبانی نظری

کربن نهفته

کربن نهفته ردپای کربن یک ماده است و نشانگر آن است که چه میزان گاز گلخانه‌ای در سراسر زنجیره تأمین آزاد می‌شود و اغلب از گهواره تا دروازه (کارخانه)، یا گهواره تا محل (استفاده) اندازه گیری می‌شود. کربن نهفته نیز ممکن است با مرز گهواره تا گور اندازه گیری شود که کاملترین شرایط مرزی است. این مرز شامل استخراج مواد از زمین، حمل و نقل، پالایش، پردازش، مونتاژ در استفاده (از محصول) و سرانجام پایان عمر آن، است. کربن نهفته، کربن منتشر شده در تمام فرآیندهای

مرتبط با احداث یک ساختمان، از معدن و فرآوری منابع طبیعی گرفته تا تولید، حمل و نقل و تحویل محصول، است. بر خلاف کربن عملیاتی که می‌تواند با گذشت زمان کاهش یابد، کربن نهفته قابل برگشت نیست (De Wolf et al. 2015). اخیراً تحقیقات بر روی کربن نهفته موجود در مصالح ساختمانی متمرکز شده‌اند و محققین بر این عقیده‌اند که برای کاهش انرژی نهفته کل، موثرترین راه کاهش کربن نهفته مصالح مصرفی می‌باشد.

ارزیابی چرخه حیات

ارزیابی چرخه حیات تجزیه و تحلیل کل چرخه زندگی یک محصول از نظر پایداری است. LCA یک ارزیابی جامع است که تمام ویژگی‌ها یا جنبه‌های محیط طبیعی، سلامت انسان و منابع را در نظر می‌گیرد (R. Taherkhani et al. 2023). هر بخشی از چرخه عمر یک محصول، استخراج مواد از معادن، تولید محصول، مرحله استفاده و آنچه پس از استفاده نکردن برای محصول اتفاق می‌افتد، می‌تواند از بسیاری جهات بر محیط زیست تأثیر بگذارد (Ortiz, Castellsa, and Sonnemannc 2009). شکل ۱ چرخه حیات مصالح ساخت را نشان می‌دهد. ارزیابی چرخه حیات یک تکنیک تنظیم شده توسط ISO 14040 و ISO 14044 است که امکان محاسبه و ارزیابی ردپای کربن، در کلیه مراحل این چرخه حیات را فراهم می‌کند (Crippa et al. 2018). میزان انتشار دی اکسید کربن جهانی در سال ۲۰۱۹ حدود ۳۳ گیگاتون برآورد شده‌است.

شکل۱-چرخه حیات مصالح ساخت (Puskas and Moga 2015)

ساخت و ساز پایدار

صنعت ساختمان متهم به ایجاد مشکلات زیست محیطی بعلت مصرف بیش از حد منابع جهانی شده‌است، زیرا حجم فعالیت‌های صنعت ساخت و ساز بیش از دیگر صنایع است (Zandiye, Taherkhani, and Moayed 2016). آمارهای رسمی نشان می‌دهد که بخش ساختمان همچنان به عنوان مصرف کننده اصلی انرژی شناخته می‌شود (P Rode, R Burdett 2011). ساختمان‌ها و صنعت ساخت نقش عمده‌ای در انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می کنند، بطوریکه منبع حدود ۴۰٪ از میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده، ساختمان‌ها و فعالیت‌های عمرانی هستند (Gan et al. 2018). از سال ۱۹۷۰، انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با انرژی ناشی از عملیات ساخت و ساز بیش از دو برابر شده‌است (Cavalliere et al. 2019)، بدین ترتیب اثرات مخرب زیست محیطی صنعت ساختمان را نمی‌توان نادیده گرفت (Roohollah. Taherkhani 2023). در سال‌های اخیر دولت‌ها و سازمان‌های فعال در حوزه‌ی محیط زیست فشارهای زیادی مبنی بر رعایت اصول، جهت جلوگیری از انتشار بی رویه گازهای گلخانه‌ای بر صنعت ساخت وارد کرده‌اند و همین موضوع باعث شده تا طراحی‌ها و برنامه‌ریزی‌ها بر مبنای دستیابی به ساختمان‌های سازگار با محیط زیست و مطابق با شاخص‌های محیط زیستی توسعه پایدار پیش روند (Abanda, Oti, and Tah 2017). در حقیقت بدلیل افزایش آلودگی هوا (وجود کربن دی اکسید و گازهای دیگر) و اثرات منفی آن

مانندگازهای گلخانه‌ای، تخریب لایه اوزون، بارش باران‌های اسیدی که باعث بیماری‌های لاعلاج می‌گردد، توسعه پایدار و محیط زیست در فعالیت‌های صنعت ساختمان بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است. فشار همه‌جانبه بر روی تمامی صنایع از جمله صنعت ساخت برای اتخاذ رویکرد فعال در زمینه ساخت و سازهای پایدار و سبز وجود دارد و البته متخصصان صنعت ساخت در سراسر جهان به مزایای ساخت و ساز پایدار اذعان دارند (Roohollah Taherkhani 2013). در واقع با افزایش هزینه انرژی و افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، تقاضا برای ساختمان‌های پایدار با حداقل تأثیرات منفی زیست محیطی در حال افزایش است (Azhar and Brown 2009). لذا سیاست‌ها، قوانین و مقررات در سراسر جهان، صنعت ساخت و ساز را برای پیشبرد توسعه پایدار از نظر دستاوردها و فرآیندها ملزم می‌سازند (Nizam, Zhang, and Tian 2018). ساخت و ساز پایدار یک حوزه علمی نو ظهور است که هدف آن ادغام مفاهیم عمومی توسعه پایدار در شیوه‌های ساخت و ساز متداول است. در واقع ساخت و ساز پایدار به ادغام شاخص‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی در استراتژی‌ها و شیوه‌های اجرایی ساخت و ساز می‌پردازد. این استفاده از اصول توسعه پایدار در چرخه حیات ساختمان، از استخراج مواد اولیه، برنامه‌ریزی، طراحی و ساخت ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها، تا تخریب نهایی و مدیریت پسماندهای حاصل از آن را شامل می‌شود (Rahim et al. 2014). ساخت و ساز پایدار مفهومیست که در حالی که از کیفیت زندگی کاربران اطمینان حاصل می‌کند، اثرات زیست محیطی خود را نیز کنترل کرده و عملکرد مطلوب انرژی در هر مرحله را با استفاده از حداکثر انرژی تجدید پذیر و منابع طبیعی تضمین می‌کند. بنابراین، لازم است روش‌های ارزیابی شاخص‌های ساخت و ساز پایدار اجرا گردد.

مدلسازی اطلاعات ساختمان

صنعت ساخت برای رسیدن به توسعه پایدار از تکنولوژی‌های جدید به عنوان ابزاری برای تحقق ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی پایداری بهره می‌برد. در این میان مدلسازی اطلاعات ساختمان را می‌توان ابزاری سودمند برای رسیدن به توسعه پایدار در صنعت ساختمان به شمار آورد (Fani and Taherkhani 2018). این فنآوری ابزاری جدید برای پیش بینی، مدیریت و نظارت بر اثرات زیست‌محیطی ساخت و توسعه پروژه را از طریق فناوری شبیه‌سازی و تجسم مجازی فراهم می‌کند. استفاده از فناوری مدلسازی اطلاعات ساختمان وسیله‌ای برای افزایش کیفیت کل پروژه، فراهم آوردن برآوردهای دقیق از مقدار، و بهبود برنامه‌ریزی، و در نتیجه کاهش کل احتمالات پروژه و هزینه‌ها فراهم آورده‌است. BIM اجازه می‌دهد تا اطلاعات زمینه‌های مختلف در یک مدل قرار بگیرد، لذا این رویکرد فرصتی را برای تجزیه و تحلیل عملکرد محیطی و اقدامات تقویت پایداری به طور دقیق و کارآمد فراهم می‌کند (Schlueter and Thesseling 2009). وجود ابعاد مختلف بیم (BIM) امکان مدل‌سازی دقیق سه‌بعدی، مدیریت موثر پروژه، بهینه‌سازی هزینه و زمان، تحلیل عملکرد انرژی و پایداری، افزایش ایمنی و تجزیه و تحلیل خطرات احتمالی را در تمامی مراحل طراحی، ساخت و بهره‌برداری فراهم می‌کند. شکل ۲ ابعاد مختلف مدل‌های BIM را با ویژگی‌های مختصر آنها نشان می‌دهد.

شکل ۲- قابلیت‌های ابعاد مختلف مدلسازی اطلاعات ساختمان (Raza et al. 2023)

از آنجایی که BIM یک تحول در دهه اخیر است، تحقیقات زیادی برای تقویت هر چه بیشتر قابلیت‌های BIM در طراحی و ساخت انجام شده و در حال انجام است. قدرت مدلسازی اطلاعات ساختمان در دستیابی به ساختمان‌های پایدار به خوبی توسط صنعت ساخت و ساز جهانی شناخته شده و به همین منظور در این پژوهش از این ابزار قدرتمند استفاده شده‌است.

فنر و کیلبرت (۲۰۲۰) در مطالعه خود با توجه به این نکته که تحرک و جا به جایی مستاجرین، توسط چندین مطالعه به عنوان کانون انتشار کربن نشان داده شده‌است، سعی در مدیریت این فاکتور تأثیرگذار داشتند. مطالعه آنها در یک ساختمان آموزشی در ایالات متحده صورت گرفته‌است. نتایج حاصل از این تحقیق به درک بهتر میزان انتشارات کربن نهفته در محیط ساخت کمک می‌کند و در حقیقت نشان می‌دهد که تحرک و حمل و نقل، کربن عملیاتی و کربن نهفته باید به عنوان خط پایین سه گانه ارزیابی ردپای کربن ساختمان مورد هدف قرار گرفته و کاهش آنها در استانداردهای صدور گواهینامه ساختمان سبز بسیار مورد تشویق قرار گیرد (Fenner et al. 2020). کیستین و تانیر (۲۰۲۰) نیز در مطالعه‌ای با هدف ایجاد یک چارچوب ارزیابی چرخه حیات (LCA) برای ارزیابی کربن نهفته محیط ساخت در مقیاس شهرک انجام دادند. این تحقیق نتایج را در سه پروژه مسکن انبوه در مقیاس محله (شهرک) در آنکارای ترکیه تأیید می‌کند. براساس نتایج بدست آمده، به طور متوسط ۴۰۹/۲ $kgCO_2$-eq / m^2 در سطح محله از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای از ساختمان‌ها، چشم انداز ساختاری و زیرساخت های حمل و نقل منشأ یافته‌است. ساختمان‌ها با حدود ۲۷۲/۴ کیلوگرم معادل دی اکسید کربن بر هر مترمربع ($kgCO_2$-eq / m^2) ، ۶۶/۶٪ از کل انتشارات را تشکیل می‌دهند. از سوی دیگر، ۳۷/۴ کیلوگرم معادل دی اکسید کربن بر هر مترمربع، ۹/۱٪ از منظر ساختاری و ۲۴/۳ کیلوگرم معادل دی اکسید کربن بر هر مترمربع، ۶٪ از زیرساخت‌های حمل و نقل سرچشمه می‌گیرد. نتایج حاکی از لزوم گسترش مرزهای ارزیابی هنگام بررسی کربن نهفته در یک شهرک ساخته شده در مقیاس بزرگتر برای نتیجه گیری عادلانه‌تر است (Kayaçetin and Tanyer 2020).

فاضلی و همکاران (۲۰۱۹)، روشی ارائه کرده‌اند که BIM را با رویکردهای تصمیم‌گیری و حل مسئله از جمله فازی و تاپسیس به منظور بهینه سازی انتخاب مؤلفه‌های ساختمان پایدار در طرح مفهومی ادغام می‌کند. استفاده از این روش نوآورانه باعث می‌شود روش تصمیم‌گیری راحت‌تر و همچنین در نهایت گزینه‌ای بهینه و مطمئن تر ارائه شود. مطالعه آنها به منظور بررسی امکان ادغام BIM، DSS3 و LCC انجام شده‌است. از طریق آن، یک رویکرد کارآمد و جدید ارائه شده و نیازهای طراحی پایدار را در ابزارهای BIM در نظر می‌گیرد. سرانجام، این چارچوب در ساختمان مورد مطالعه مورد آزمایش قرار گرفته‌است. در نتیجه، طراحی پیشنهادی این چارچوب ۲۵٪ از مزایای انرژی و هزینه چرخه عمر را به دست آورد که می‌تواند گزینه‌های بهینه را توسعه داده و اعتبار چارچوب یکپارچه DSS-BIM را تأیید کند (Fazeli et al. 2022). در نیتجه تحقیق فیگردو و همکارانش (۲۰۱۹) مشخص می‌شود که فناوری BIM به کاربران این امکان را می‌دهد تا خواص مربوط به پایداری اشیاء را اضافه کنند، و سپس این امکان را فراهم می‌کند تا تجزیه و تحلیل بسیاری از جنبه‌های مرتبط با پایداری، مانند انتشار کربن، راندمان آب، روشنایی و غیره را ایجاد کند، اما برای اینکه این تحلیل‌ها به درستی کار کنند، سطح مشخصی از بلوغ قابلیت همکاری لازم است (Muller et al. 2019).

همچنین پژوهشی توسط گان و همکارانش (۲۰۱۷) ارائه شده‌است که هدف از آن بررسی تأثیر انتخاب مصالح ساختمانی و ساختارهای سازه‌ای مختلف بر میزان کربن نهفته و هزینه ساخت و ساز ساختمان های بلندمرتبه است. نتایج نشان می‌دهد که ساختمان‌های مرتفع با سازه فولادی بالاترین هزینه ساخت را به ترتیب ۴۵۷۵ دلار هنگ کنگ بر مترمربع (HK $ / M²) و بیشترین کربن نهفته با ۷۶۰ کیلوگرم کربن در متر مربع را دارند. استفاده از بتن مسلح برای ساختمان‌های مرتفع، میزان کربن نهفته را۳۰٪ یعنی به مقدار ۴۱۹۴ (دلار هنگ کنگ بر مترمربع) و هزینه ساخت را ۷٪ به ۵۳۷ کیلوگرم معادل دی اکسید کربن بر هر مترمربع کاهش می‌دهد. ساختمان‌های مرتفع با استفاده از مصالح کامپوزیت کمترین هزینه ساخت معادل ۳۷۴۰ (دلار هنگ کنگ بر مترمربع) را دارند، اما نسبت به ساختمان‌های بتنی به میزان ۵۵۷ معادل دی اکسید کربن بر مترمربع ($CO2-e / m^2$)کربن نهفته بیشتری تولید می‌کنند. برای یک ساختار سازه‌ای خاص، هزینه ساخت و ساز و کربن نهان به عنوان

تابعی از ارتفاع ساختمان از روند صعودی مقعر پیروی می‌کنند، این نشان می‌دهد که هر سازه دارای یک ارتفاع پیشنهادی با هزینه و کربن نسبتاً کمتر است. ۵۰-۷۰ طبقه برای سازه هسته‌ای کامپوزیت در حدود ۳۷۰۰ – ۳۹۰۰ (دلار هنگ کنگ بر مترمربع) به طور مشابه، ارتفاع پیشنهادی برای ساختار لوله در لوله کامپوزیت ۶۰-۸۰ طبقه در ۳۹۰۰ – ۴۱۰۰ (دلار هنگ کنگ بر مترمربع) است، در حالی که ساختار لوله بازدارنده دارای ارتفاع پیشنهادی ۶۰-۸۰ طبقه در ۳۵۰۰-۳۶۰۰ (دلار هنگ کنگ بر مترمربع) می‌باشد (Gan et al. 2017).

۲- روش تحقیق

تحقیق حاضر یک تحقیقات کاربردی است، که می‌تواند راهگشای تصمیم‌گیری صحیح‌تر ذینفعان به منظور بازسازی ساختمان‌ها با رویکرد پایدار و در راستای حفاظت از محیط زیست باشد. بدین منظور در تحقیق حاضر، ابتدا مدل ساختمان آموزشی موجود در نرم افزار رویت، شبیه‌سازی شده و کربن نهفته ناشی از تخریب ساختمان موجود محاسبه گردید. سپس ساختمان مورد مطالعه با فرض بازسازی با چهار مدل پیشنهادی مختلف (مشابه با مدل موجود، مدرن، متداول و سنتی) در نرم افزار پیاده گردید. در قدم بعدی ابعاد و احجام جهت انجام محاسبات از مدل رویت استخراج شده و همچنین متره و برآورد همه مدل‌های پیشنهادی با کمک نرم افزار رویت انجام شد. برای بهره‌گیری از ابزار محاسبه کربن نهفته مبتنی بر BIM از فایل‌های خروجی نرم افزار رویت استفاده شد و میزان کربن نهفته هر چهار مدل محاسبه گردید. شایان ذکر است، برای تخمین زمان مورد نیاز جهت بازسازی مدل‌های مورد مطالعه از نرم افزار مایکروسافت پراجکت استفاده شده‌است. روند انجام کار مطالعه حاضر در شکل (۳) خلاصه شده‌است. برای دستیابی به داده‌های مربوط به فرمول‌های محاسباتی و ضرایب و فاکتورهای میزان انتشار کربن نهان هر کدام از مصالح ساختمانی، از اطلاعات پایگاه‌های داده‌ای بهره گرفته شده‌است؛ ICE[1] (یک پایگاه داده برجسته انرژی و کربن برای مصالح ساختمانی که بصورت فهرست ضرایب انتشار کربن و انرژی مواد و مصالح مختلف در دسترس است)، بانک اطلاعات کربن ساختمان RICS[2] (تحولی در بانک اطلاعاتی کربن نهفته WRAP است که توسط WRAP و شورای سبز ساختمان انگلستان برای گرفتن داده‌های کربن نهفته، برای کل ساختمان‌ها سفارش داده شده‌است)، آژانس حفاظت از محیط زیست (EPA[3]) (یک آژانس اجرایی مستقل از دولت فدرال ایالات متحده است که وظیفه آن محافظت از محیط زیست است). ابزار (EC3[4])، ابزاری با دسترسی آزاد است که اجازه می‌دهد تا ارزیابی معیارهای کاهش کربن نهفته متمرکز بر ارزیابی چرخه حیات مصالح ساخت و ساز صورت گیرد.

در مطالعه حاضر، فرمول ها و نحوه محاسبات کربن نهفته در مراحل مختلف ساخت با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه گردیده اند:

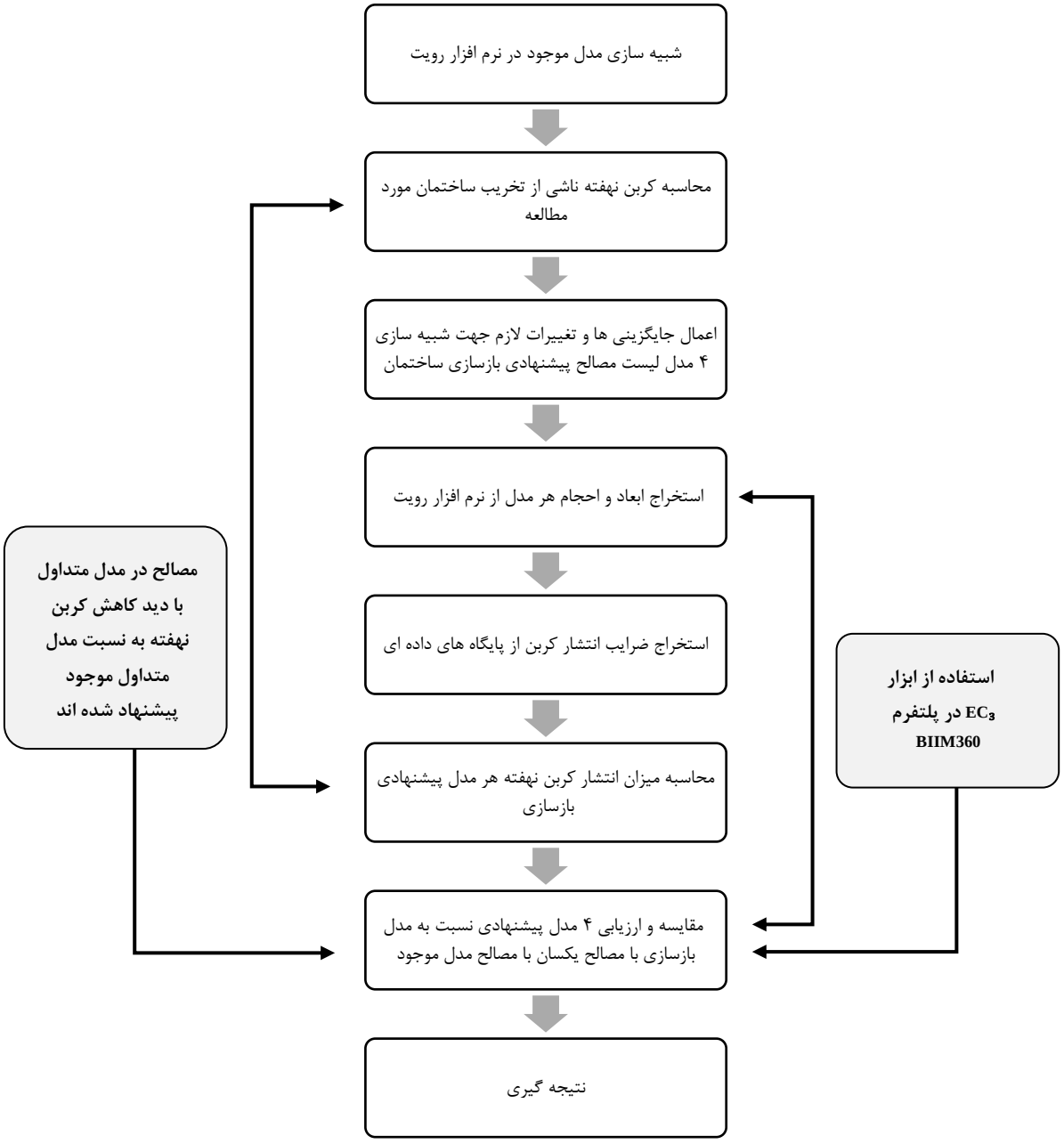
۲-۱- فرمول محاسبه کربن نهفته ناشی از تولید مصالح ساختمانی

مطابق مستندات پایگاه داده‌ای RICS میزان انتشار کربن نهفته حاصل از فرآیند تولید مصالح ساختمانی(ECм) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$ECм=\sum_{i=1}^{I} QijEFij \qquad (۱)$$

که در آن j یک مصالح ساختمانی خاص است، i مخفف حالت حمل و نقل است که توسط آن مواد به سایت ساخت و ساز تحویل داده می‌شود. Qij مقدار مواد j به دست آمده از محل i است که با واحد کیلوگرم در فرمول قرار داده می‌شود. EFij بیانگر انتشار کربن برای تولید مواد j بدست آمده از محل I است که می‌توان از یک پایگاه داده ضریب انتشار کربن نهفته را بدست آورد. واحد این المان کیلوگرم کربن دی اکسید بر مترمربع می‌باشد.

[1] Inventory of Carbon and Energy
[2] Royal Institution of Chartered Surveyors
[3] United States Environmental Protection Agency
[4] Embodied Carbon in Construction Calculator



شکل۳-روند اجرای تحقیق

۲-۲- فرمول محاسبه کربن نهفته ناشی از حمل مصالح ساختمانی به سایت پروژه

طبق مستندات پایگاه داده‌ای RICS، میزان انتشار کربن نهفته حاصل از فرآیند حمل مصالح ساختمانی به کارگاه (EC_T) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$EC_T=\sum_{i=1}^{l} QijDiLEFl \qquad (۲)$$

که در آن Dil به کل فاصله حمل و نقل از محل I به سایت ساخت و ساز با روش حمل و نقل l، اشاره دارد. واحد این المان کیلومتر می‌باشد. EFl نماد ضریب انتشار کربن نهفته برای وسیله مدنظر برای حمل و نقل l است. واحد آن کیلوگرم

کربن دی اکسید بر هر کیلومتر می‌باشد. j یک مصالح ساختمانی خاص است، i مخفف حالت حمل و نقل است که توسط آن مواد به سایت ساخت و ساز تحویل داده می‌شود. Qij مقدار مواد j به دست آمده از محل i است.واحد آن کیلوگرم می‌باشد.

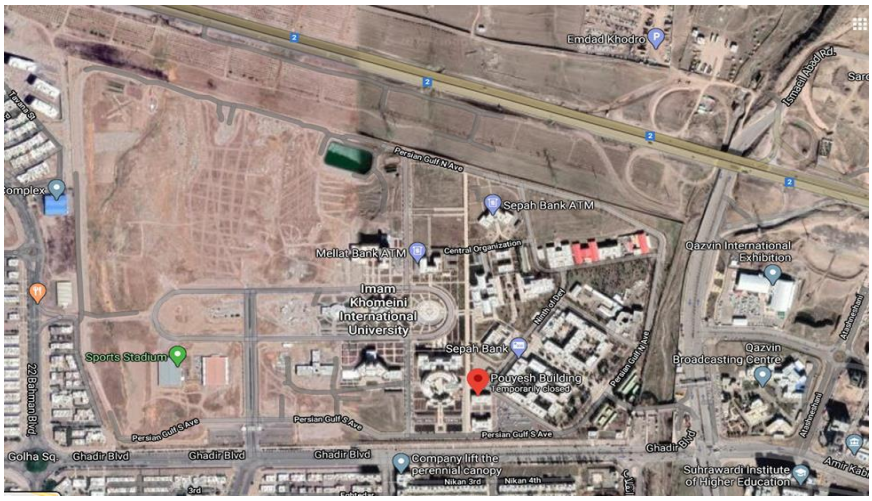
۲-۳- فرمول محاسبه انتشار کل کربن نهفته مصالح ساختمانی

$$EC = \sum_{j=1}^{J}\left[\sum_{j=1}^{I} QijEFij + \sum_{i=1}^{I}\sum_{L=1}^{L} QijDilEFl\right] \quad (۳)$$

که در آن j یک مصالح ساختمانی خاص است، i مخفف حالت حمل و نقل است که توسط آن مواد به سایت ساخت و ساز تحویل داده می‌شود. Qij مقدار مواد j به دست آمده از محل i است به کیلوگرم. EFij بیانگر انتشار کربن برای تولید مواد j بدست آمده از محل I است که می توان از یک پایگاه داده ضریب انتشار کربن نهان را بر حسب کیلوگرم دی اکسیدکربن بر هر مترمربع بدست آورد. Dil به کل فاصله حمل و نقل از محل I به سایت ساخت و ساز با روش حمل و نقل l اشاره دارد. در تخریب این فاصله مربوط به فاصله حمل مصالح تخریب شده به خارج از کارگاه بر حسب کیلومتر می‌باشد. EFl نماد ضریب انتشار برای حالت حمل و نقل l بر حسب کیلوگرم دی اکسید کربن بر هر کیلومتر است

۲-۴- مشخصات ساختمان مورد مطالعه

ساختمان پویش با زیربنای هزار و چهارصد مترمربع با اسکلت بتنی و در دوطبقه در سال ۱۳۹۵ افتتاح شد. این ساختمان به منظور فعالیت‌های آموزشی، پژوهشی احداث شده و کانون‌های فرهنگی، هنری و اجتماعی، انجمن‌های علمی و مرکز رشد و کارآفرینی در این ساختمان مستقر هستند. این ساختمان که در ابتدا تنها به منظور کاربری آموزشی احداث شده بود که اکنون بدلیل کمبود دانشگاه برای ایجاد فضای اداری، بصورت موقت کاربری اداری نیز دارد. تصویر هوایی این ساختمان که از گوگل ارث قابل مشاهده است، در شکل (۴) مشخص شده‌است. در این ساختمان دیوارهای پیرامونی بیرونی به ضخامت ۲۵ سانتی متر، ۲۰ سانتی متر آجر و ۳ سانتی متر ملات وآجر سه سانت نما، ساخته شده‌اند. همچنین دیوارهای داخلی با ضخامت ۱۵ سانتی متر، ۱۰ سانتی متر آجر و ۳ سانتی متر گچ و خاک و ۲ سانتی متر گچ سفید، تا ارتفاع یک متر از زمین سنگ با ضخامت ۲ سانتی متر و لایه زیرین ۳ سانتی متری ملات در زیر آن، بنا شده‌اند. دیوار راه پله ضخامت ۲۵ سانتی متر، ۲۰ سانتی متر آجر و ۳ سانتی متر ملات و ۲ سانتی متر آجر نما، ساخته شده‌اند. دیوارهای سرویس های بهداشتی با ضخامت ۱۵ سانتی متر، ۱۰ سانتی متر آجر و ۳ سانتی متر ملات و ۲ سانتی متر کاشی بنا شده‌اند.کف طبقات با ضخامت ۴۰ سانتی متر، ۳۰ سانتی متر کف سازه‌ای، ۵ سانتی متر پوکه، ۳ سانتی متر ملات و ۲ سانتی متر سنگ تراورتن و همچنین کف بام با ضخامت کلی ۴۸ سانتی متر متشکل از کف سازه‌ای ۳۰ سانتی متری، عایق حرارتی ۵ سانتی متری، ۵ سانتی متر پوکه، ۳ سانتی متر عایق رطوبتی، ۳ سانتی متر ملات و ۲ سانتی متر موزاییک ساخته شده‌اند. همچنین سقف نیز بصورت سقف کاذب اجرا شده‌است.

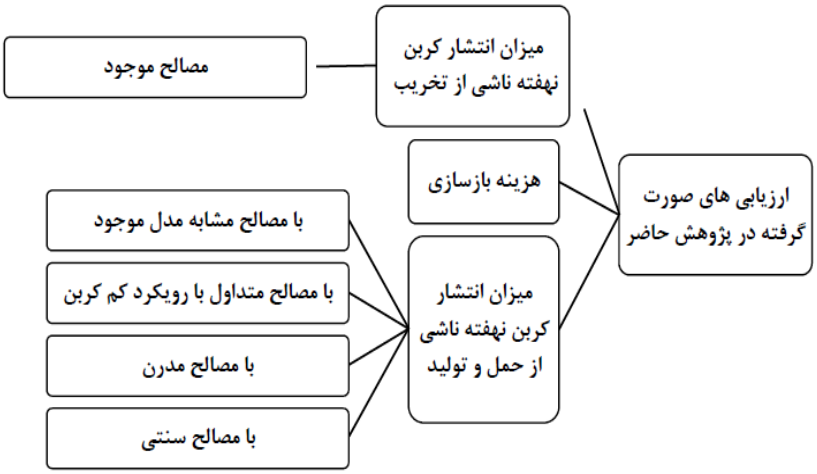


شکل ۴- موقعیت مکانی ساختمان پویش در تصویر هوایی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۳- یافته ها

۳-۱- مدلسازی و ارزیابی

در این بخش مشخصات مدل‌های پیشنهادی جهت رسیدن به اهداف این پژوهش ارائه و مورد بررسی قرار گرفتند. پس از آنالیز مدل موجود با اعمال تغییرات پیشنهادی در آن، بررسی وضعیت مدل‌های بازسازی پیشنهاد شده از لحاظ میزان کربن نهفته و هزینه صورت می گیرد. جایگزینی پیشنهادی در مصالح کفسازی، نما، نازک کاری و تیغه‌های داخلی و دیوارهای پیرامونی، مصالح درب‌ها و قاب پنجره‌ها می‌باشد. شکل (۵) ارزیابی‌های صورت گرفته در پژوهش حاضر برای مقایسه میزان انتشار کربن نهفته ناشی از بازسازی با گزینه‌های محتمل را نشان می‌دهد.



شکل ۵- ارزیابی های صورت گرفته در پژوهش حاضر برای مقایسه میزان انتشار کربن نهفته ناشی از بازسازی

الف) آنالیز مدل موجود و مدل بازسازی با مصالح یکسان با ساختمان مورد مطالعه

ساختمان مورد بررسی مطابق شکل ۶ در نرم افزار رویت شبیه‌سازی شده و مشخصات آن مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۶-شبیه‌سازی نمای بیرونی و داخلی ساختمان موجود در نرم افزار رویت

۱. میزان انتشار کربن نهفته ناشی از تخریب مدل موجود

با توجه به اینکه در قدم اول برای بازسازی یک بنا باید تخریب آن صورت پذیرد، محاسبات مربوط به انتشار کربن نهفته ناشی از تخریب مدل موجود نیز انجام شد. در نهایت به میزان ۲۳۸۴/۵۳۶۹ کیلوگرم کربن نهفته از عملیات تخریب (حمل نخاله‌های ساختمانی مدل موجود به خارج از سایت) تولید خواهد شد.

۲. آنالیز میزان کربن نهفته حاصل از تولید مصالح ساختمانی

میزان کربن نهفته حاصل از تولید مصالح ساختمانی با توجه به خروجی های مورد نیاز از نرم افزار رویت و پلتفرم BIM 360 و ابزار EC_3 محاسبه شده‌است. در مدل بازسازی مشابه با مصالح مدل موجود در مجموع ۴۲۳۷۵۴/۳۱ کیلوگرم کربن نهفته از تولید مصالح حاصل می‌شود و بلوک سیمانی با ۷۷٪، به علت دارا بودن بیشترین جرم در میان سایر مصالح، بیشترین سهم انتشار کربن نهفته در این مدل را دارد و بعد از آن ملات، بدلیل دارا بودن وزن بالایی نسبت به سایر مصالح، با ۸ درصد سهم ببیشتری در انتشار کربن نهفته حاصل از تولید مصالح ساختمانی ایفا می‌کند.

۳. آنالیز میزان کربن نهفته حاصل از حمل مصالح ساختمانی به کارگاه

در مدل بازسازی با مصالح مشابه مصالح موجود در مجموع ۴۳۸۰/۴۲۲۰ کیلوگرم کربن نهفته از حمل مواد و مصالح ساختمانی به سایت منتشر شده‌است. بلوک سیمان به علت آنکه وزن بیشتری نسبت به سایر مصالح داشته با ۴۸٪، درصد بیشتری را به خود اختصاص داده‌است و بعد از آن ماسه که جهت ساخت ملات به کار گرفته شده‌است، با ۲۸ درصد بیشترین سهم را در انتشار کربن نهفته حاصل از حمل مصالح ساختمانی به سایت ایفا کرده‌است.

۴. بررسی میزان انتشار کربن نهفته مدل بازسازی مشابه مصالح مدل موجود در حالت کلی

میزان انتشار کربن نهفته به صورت کلی در مرحله بازسازی حاصل از مجموع دو فاکتور تولید مصالح و حمل آنها به سایت می‌باشد و افزودن میزان کربن نهفته حاصل از تخریب در مجموع ۴۲۹۴۹۹ کیلوگرم کربن نهفته در مدل موجود منتشر شده‌است. و بدلیل جرم زیاد بلوک های سیمانی با ۷۶ درصد نقش عمده‌ای در انتشار کربن نهفته در مدل موجود دارا بوده‌است و بعد از آن ملات سیمانی(۱:۶) با ۸ درصد بیشترین نقش را در انتشار کربن نهفته در مدل مشابه با مصالح مدل موجود دارد.

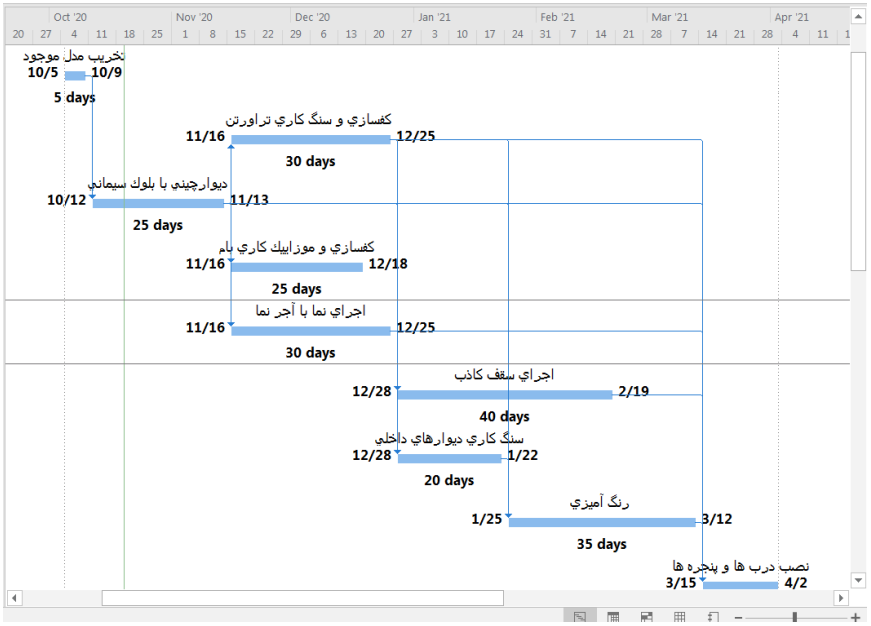
۵. آنالیز هزینه مدل بازسازی مشابه مدل موجود

هزینه محاسبه شده نمایشگرمجموع هزینه خرید، حمل، اجرا می‌باشد و هزینه تخریب و حمل نخاله ها به خارج از سایت که هزینه‌ای ثابت در تمامی مدل‌ها می‌باشد ۳۳۹۵۸۴۰۰ تومان است که باید با هزینه مجموع نمایش داده شده جمع شود. تمامی هزینه‌ها بر مبنای هزینه در سال ۱۳۹۹ محاسبه شده‌است. این هزینه با بهره گیری از خروجی های نرم افزار رویت

جهت متره و برآورد محاسبه شده‌است که در مدل موجود هزینه کل جهت تهیه کل مصالح حدود ۱۴۱۳۳۰۷۴۹۵ تومان می‌باشد.

۶.آنالیز مدت زمان بازسازی مشابه مدل موجود

به منظور آنالیز زمانبندی بازسازی مدل‌های پیشنهادی جهت بازسازی ساختمان مورد مطالعه از نرم افزار مایکروسافت پراجکت استفاده شده‌است. در بازسازی مشابه مدل موجود ۱۴۶ روز زمان لازم است تا عملیات بازسازی به طور



کامل صورت گیرد (شکل ۷).

شکل ۷-گانت مدل مشابه مدل موجود

۷. آنالیز عمر مفید مصالح ساختمانی مدل مشابه مدل موجود

دوام و عمر مفید هر یک از مصالح ساختمانی مدل مشابه مدل موجود مورد ارزیابی قرار گرفته و مقادیر زیر بدست آمده‌است؛ سنگ تراورتن کف: بیش از ۱۰۰ سال، سنگ مرمر: ۵۰-۱۰۰ سال، بلوک سیمانی و آجرنما: ۱۰۰ سال، سقف کاذب: ۲۵ سال (Bowyer 2013)

ب) آنالیز مدل بازسازی به شیوه مدرن

با پیشرفت تکنولوژی و بهره مندی از فناوری‌های روز تحولات فراوانی در زمینه شیوه‌های ساخت و ساز پدید آمده است و امروزه، ساختمان‌های بسیار زیادی با استفاده از مصالح ساختمانی مدرن، ساخته می‌شوند. در این پژوهش نیز مدلی مبتنی بر استفاده از مصالح ساختمانی مدرن و به روز جهت بازسازی ساختمان موجود ارائه و در نرم افزار رویت شبیه‌سازی شده‌است (تصاویر شکل ۸).

شکل ۸-شبیه‌سازی نمای بیرونی و داخلی مدل مدرن در نرم افزار رویت

۱. آنالیز میزان انتشار کربن نهفته حاصل از تولید مصالح در مدل مدرن

در مدل بازسازی به شیوه مدرن در مجموع ۲۷۲۱۶۹/۸۶ کیلوگرم کربن نهفته از تولید مصالح حاصل می‌شود، کرتین وال با حدود ۸۰ درصد، به علت بالا بودن ضریب انتشار کربن پروفیل آلومینیومی، بیشترین سهم انتشار کربن نهفته را در این مدل دارد و بعد از آن پنل های D3 با حدود ۸ درصد و سقف PVC با ۶ درصد و بتن کفسازی با ۲ درصد، در انتشار کربن نهفته حاصل از تولید مصالح ساختمانی در مدل مدرن سهم دارند.

۲. آنالیز میزان انتشار کربن نهفته ناشی از حمل مصالح به سایت در مدل مدرن

در مدل بازسازی به شیوه مدرن در مجموع ۱۱۷۳/۴۹۲۷ کیلوگرم کربن نهفته از حمل مصالح به سایت حاصل می‌شود، پنلهای 3d با ۴۶ درصد، بیشترین سهم انتشار کربن نهفته حمل را در این مدل دارد .

۳. آنالیز میزان کل انتشار کربن نهفته در مدل مدرن

میزان انتشار کربن نهفته به صورت کلی در مرحله بازسازی حاصل از مجموع دو فاکتور تولید مصالح و حمل آنها به سایت می‌باشد بعلاوه کربن نهفته حاصل از تخریب مدل موجود می‌باشد، در مجموع ۲۷۶۰۸۲/۷۸۹۸ کیلوگرم کربن نهفته در مدل متداول موجود منتشر شده‌است. کرتین وال با ۷۹ درصد بدلیل بالا بودن ضریب انتشار آلومینیوم در ترکیبات آن، عمده ترین سهم را در انتشار کربن نهان در بازسازی با مصالح غیر سازه‌ای مدرن ایفا میکند.

۴. آنالیز هزینه بازسازی با مصالح مدرن

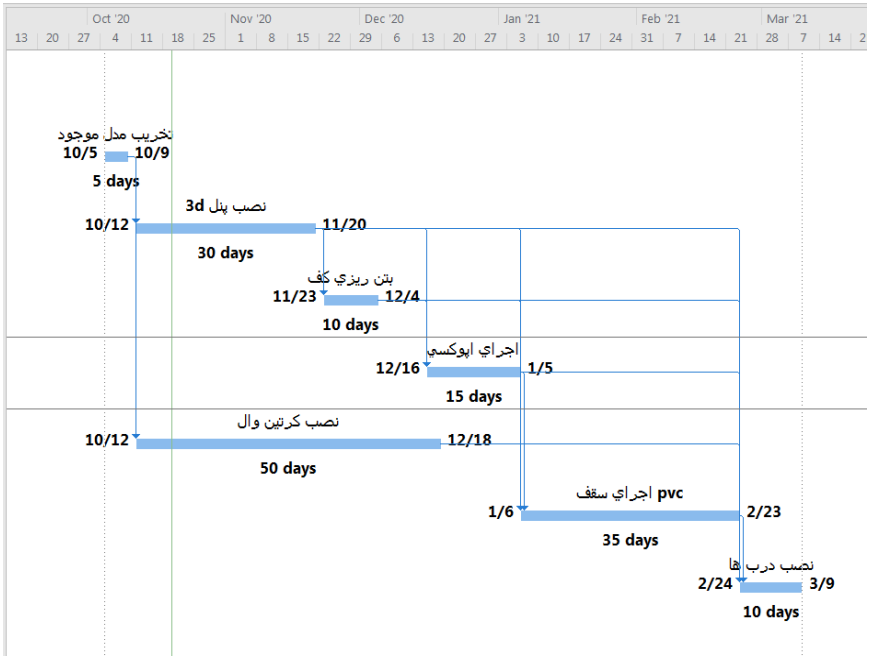
هزینه محاسبه شده نمایشگرمجموع هزینه خرید، حمل، اجرا می‌باشد و هزینه تخریب و حمل نخاله ها به خارج از سایت که هزینه‌ای ثابت در تمامی مدل‌ها می‌باشد ۳۳۹۵۸۴۰۰ تومان است که باید با هزینه مجموع نمایش داده شده جمع شود. تمامی هزینه‌ها بر مبنای هزینه در سال ۱۳۹۹ محاسبه شده‌است. این هزینه با بهره گیری از خروجی‌های نرم افزار رویت جهت متره و برآورد محاسبه شده‌است و هزینه کل جهت تهیه کل مصالح ۲۴۶۹۱۸۵۰۰۰ تومان می‌باشد.

۵. آنالیز مدت زمان بازسازی مطابق مدل مدرن

به منظور آنالیز زمانبندی بازسازی مدل‌های پیشنهادی جهت بازسازی ساختمان مورد مطالعه از نرم افزار مایکروسافت پراجکت استفاده شده‌است. در بازسازی مشابه مدل مدرن ۱۲۲ روز زمان لازم است تا عملیات بازسازی به طور کامل صورت گیرد. نمودار گانت مربوط به بازسازی مطابق مدل مدرن در شکل ارائه شده‌است (شکل ۹).

۶. آنالیز عمر مفید مصالح ساختمانی مدل مدرن

دوام و عمر مفید هر یک از مصالح ساختمانی مدل مدرن به این ترتیب مورد ارزیابی قرار گرفته‌است که کرتین وال ۱۰-۱۵ سال، پنل 3d ، ۷۰ الی ۱۰۰ سال، سقف PVC ، ۲۵ الی ۳۰ سال، و کف اپوکسی ۳۰ سال (Bowyer 2013).



شکل ۹- گانت مدل مدرن

ج) آنالیز مدل سنتی

امروزه با وجود پیشرفت صنعت ساخت و ساز، استفاده و بهره گیری از مصالح سنتی و بومی تقریبا رو به انقراض رفته و یا این مصالح تنها در ساختمان‌هایی با اهمیت کم و یا صرفا جهت تزیینات مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه فمیلی بلوک کاه در نرم افزار رویت بصورت پیش فرض وجود ندارد، برای شبیه‌سازی مدل سنتی در نرم افزار رویت، در ابتدا این مصالح در نرم افزار ساخته شده و سپس از آن برای مدلسازی بهره گرفته شده‌است (شکل ۱۰).

شکل ۱۰-شبیه‌سازی نمای بیرونی و داخلی مدل سنتی در نرم افزار رویت

۱. آنالیز انتشار کربن نهفته ناشی از تولید مصالح ساختمانی در مدل سنتی

در مدل بازسازی با مصالح سنتی در مجموع ۷۱۶۱۴/۷۲ کیلوگرم کربن نهان از تولید مصالح حاصل می‌شود، وکفسازی با موزاییک با حدود ۷۳ درصد، به علت بالا بودن وزن آن نسبت به سایر مصالح، بیشترین سهم انتشار کربن نهفته را در این مدل دارد.

۲. آنالیز انتشار کربن نهفته ناشی از حمل مصالح ساختمانی به کارگاه در مدل سنتی

در مدل بازسازی به شیوه سنتی در مجموع ۱۰۴۸/۶۴۰۳ کیلوگرم کربن نهان از حمل مواد به سایت منتشر می‌شود، بلوک کاه با ۳۸ درصد و کف موزاییک با ۳۶ درصد نقش عمده‌ای در انتشار کربن نهان ازین طریق را در این مدل بازسازی دارند.

۳. آنالیز میزان کل انتشار کربن نهفته در مدل سنتی

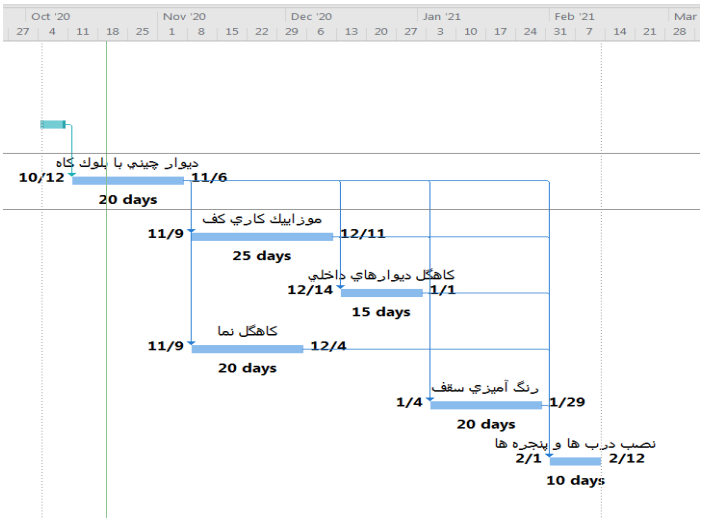
در مجموع ۷۵۱۹۳/۶۴ کیلوگرم کربن نهفته در بازسازی با مصالح غیر سازه‌ای سنتی منتشر می‌شود، و کف موزاییک با ۷۰ درصد بدلیل دارا بودن وزن بیشتر نسبت به سایر مصالح در این مدل، بیشترین سهم را در انتشار این گاز گلخانه‌ای به صورت نهفته دارد.

۴. آنالیز هزینه بازسازی به شیوه مدل سنتی

هزینه محاسبه شده نمایشگر مجموع هزینه خرید، حمل، اجرا می‌باشد و هزینه تخریب و حمل نخاله ها به خارج از سایت که هزینه‌ای ثابت در تمامی مدل‌ها می‌باشد ۳۳۹۵۸۴۰۰ تومان است که باید با هزینه مجموع نمایش داده شده جمع شود. تمامی هزینه‌ها بر مبنای هزینه در سال ۱۳۹۹ محاسبه شده‌است .این هزینه با بهره گیری از خروجی‌های نرم افزار رویت جهت متره و برآورد محاسبه شده‌است و هزینه کل جهت تهیه کل مصالح ۴۰۳۲۶۵۹۴۰ تومان می‌باشد.

۵. آنالیز مدت زمان بازسازی مطابق مدل سنتی

به منظور آنالیز زمانبندی بازسازی مدل‌های پیشنهادی جهت بازسازی ساختمان مورد مطالعه از نرم افزار مایکروسافت پراجکت استفاده شده‌است. در بازسازی مطابق مدل سنتی ۹۵ روز زمان لازم است تا عملیات بازسازی به طور کامل صورت گیرد. نمودار گانت مربوط به بازسازی مطابق مدل سنتی ارائه شده‌است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- گانت مدل سنتی

۶. آنالیز دوام و عمر مفید مصالح ساختمانی مدل سنتی

دوام و عمر مفید هر یک از مصالح ساختمانی مدل سنتی به شرح ذیل مورد ارزیابی قرار گرفته است:

بلوک کاه ۱۰۰ سال، موزائیک ۷۰-۱۰۰ سال، و کاهگل ۵۰ سال (Bowyer 2013).

د) آنالیز مدل متداول

این مدل با در نظر گرفتن نتایج حاصل از ارزیابی مدل مشابه با مدل موجود پیشنهاد شده‌است. همانطور که از نتایج مدل بازسازی مشابه ساختمان موجود پیداست وزن زیاد بلوک‌های سیمانی و همچنین استفاده زیاد از ملات سیمانی موجب بالا بودن کربن نهفته مدل موجود شده‌است. بنابراین در شبیه‌سازی و بازسازی مدل موجود به شیوه متداول سعی برآنست که با استفاده از بلوک‌های لیکا وزن دیوارها را کم و با رنگ آمیزی کامل سطح دیوارها از میزان بکارگیری ملات بکاهیم. همچنین برای کاستن از میزان حمل و نقل به سایت، تنوع و تعداد مصالح کمتر شده‌است (شکل ۱۲).

شکل ۱۲- شبیه‌سازی نمای داخلی و بیرونی مدل متداول در نرم افزار رویت

۱. آنالیز میزان انتشار کربن نهفته ناشی از تولید مصالح در مدل متداول

در مدل بازسازی با مصالح متداول امروزی در مجموع ۳۵۸۴۱۰/۵۷۹۳ کیلوگرم کربن نهفته از تولید مصالح حاصل می‌شود، و دیوارچینی با بلوک لیکا با حدود ۸۰ درصد، بیشترین سهم انتشار کربن نهفته را در این مدل دارد.

۲. آنالیز انتشار کربن نهفته ناشی از حمل مصالح ساختمانی به سایت در مدل متداول

در مدل بازسازی به شیوه متداول در مجموع ۳۳۲۵/۴۱۳۷ کیلوگرم کربن نهان از حمل مواد به سایت منتشر می‌شود و ماسه با ۴۲ درصد، نقش عمده‌ای در انتشار کربن نهفته از این طریق را در این شیوه بازسازی دارند.

۳. آنالیز میزان انتشار کل کربن نهفته در مدل متداول

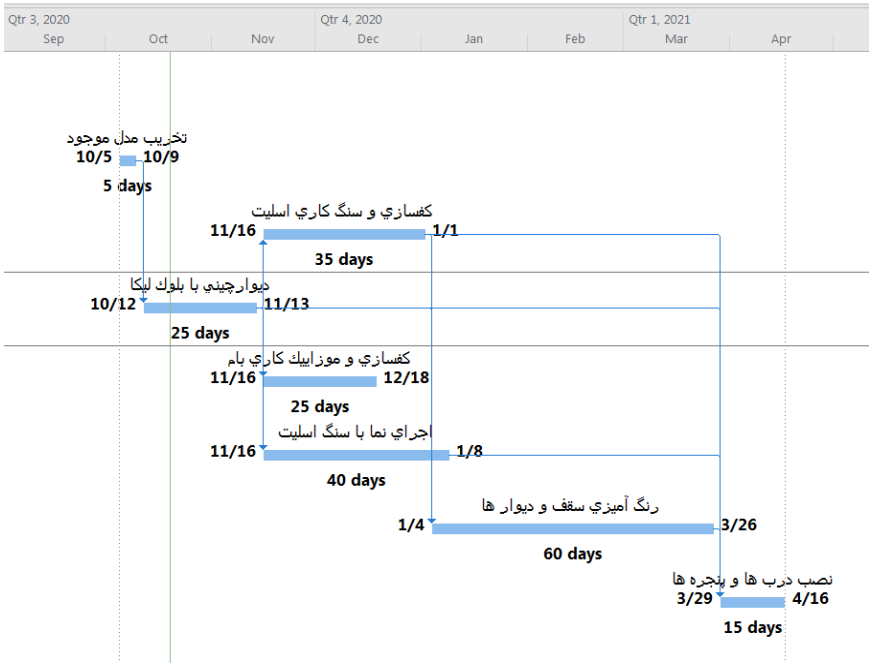
میزان انتشار کربن نهفته به صورت کلی در مرحله بازسازی حاصل از مجموع دو فاکتور تولید مصالح و حمل آنها به سایت بعلاوه کربن نهفته حاصل از تخریب مدل موجود می‌باشد، در مجموع ۳۶۴۷۰۶/۷۰۳۵ کیلوگرم کربن نهفته در بازسازی مدل متداول منتشر شده‌است. که دیوارچینی با بلوک لیکا با ۷۸ درصد عمده ترین سهم را در انتشار کربن نهفته در بازسازی با مصالح متداول با رویکرد کم کربن تر ایفا می‌کند.

۴. آنالیز هزینه بازسازی به شیوه مدل متداول

هزینه محاسبه شده نمایشگرمجموع هزینه خرید، حمل، اجرا می‌باشد و هزینه تخریب و حمل نخاله ها به خارج از سایت که هزینه‌ای ثابت در تمامی مدل‌ها می‌باشد ۳۳۹۵۸۴۰۰ تومان است که باید با هزینه مجموع نمایش داده شده جمع شود. تمامی هزینه‌ها بر مبنای هزینه در سال ۱۳۹۹ محاسبه شده‌است .این هزینه با بهره گیری از خروجی های نرم افزار رویت جهت متره و برآورد محاسبه شده‌است که در مدل متداول هزینه کل جهت تهیه کل مصالح ۱۰۰۵۱۶۸۰۳۰ تومان می‌باشد.

۵. آنالیز مدت زمان بازسازی مطابق مدل متداول

به منظور آنالیز زمانبندی بازسازی مدل‌های پیشنهادی جهت بازسازی ساختمان مورد مطالعه از نرم افزار مایکروسافت پراجکت استفاده شده‌است. در بازسازی مطابق مدل متداول ۱۲۹ روز زمان لازم است تا عملیات بازسازی به طور کامل صورت گیرد. نمودار گانت مربوط به بازسازی مطابق مدل متداول در ادامه ارائه شده‌است (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- گانت مدل متداول

۶. آنالیز دوام و عمر مفید مصالح ساختمانی مدل متداول

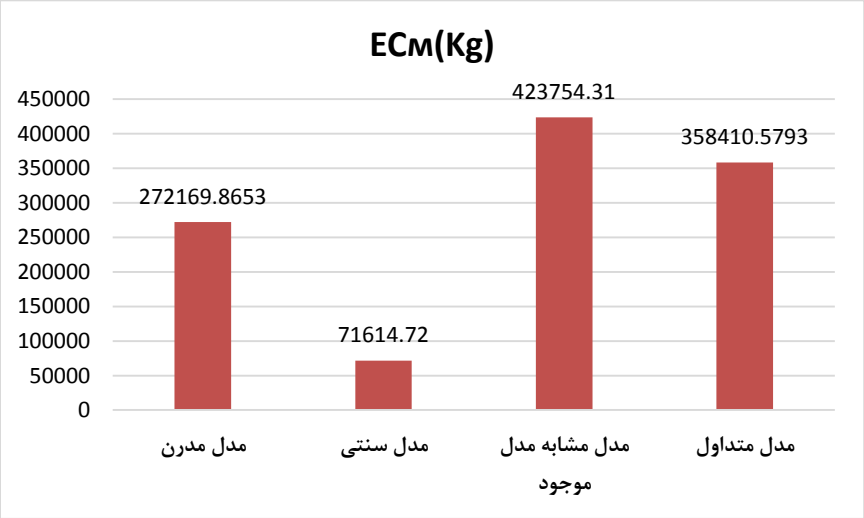
دوام و عمر مفید هر یک از مصالح ساختمانی مدل متداول بصورت زیر مورد ارزیابی قرار گرفته است:

سنگ اسلیت (ماسه سنگ) و بلوک لیکا: ۱۰۰ سال (Bowyer 2013).

۴- بحث، نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مطالعه تلاش بر این بوده است که با پیشنهاد مصالح مصرفی جهت بازسازی غیر سازه‌ای ساختمان آموزشی مورد مطالعه میزان انتشار کربن نهفته هریک از مدل‌های پیشنهادی بررسی و با بازسازی با ترکیب مصالح مشابه مدل موجود به عنوان مدل مبنا مقایسه شوند تا مناسب ترین مدل پیشنهادی جهت بازسازی غیر سازه‌ای ساختمان مورد مطالعه شناسایی شود. چرخه عمر ساختمان شامل مرحله نهان، مرحله بهره برداری، و مرحله پایان زندگی می‌باشد، اگرچه کربن نهفته تنها ۱۴٪ الی ۲۱٪ از چرخه عمر ساختمان را به خود اختصاص می‌دهد، اما ساخت و سازهای انبوه و سریع ساختمان‌ها در سال‌های اخیر باعث تولید گاز کربن دی اکسید نهفته گسترده در مدت زمان کوتاهی می‌شود .ازین سو اقدام جهت کاهش انتشار کربن نهفته در صنعت ساختمان ضروری است. نتایج در این تحقیق با رویکرد ارزیابی چرخه حیات با توجه به پتانسیل اثرگذاری در پدیده گرمایش زمین (GWP) متمرکز بر میزان انتشار کربن نهفته بررسی شده‌اند. مقایسه میزان انتشار کربن نهفته حاصل از تولید مواد و مصالح ساختمانی در بازسازی با مصالح مشابه مدل موجود و سه مدل پیشنهادی متداول، مدرن و سنتی، مطابق نمودار شکل (۱۲) می‌باشد. با توجه به نمودار مذکور، کمترین میزان انتشار کربن نهفته حاصل از تولید مصالح مربوط به مدل سنتی به مقدار ۷۱۶۱۴/۷۲ کیلوگرم، بدلیل کم بودن ضرایب انتشار کربن و ساده‌تر بودن مراحل ساخت در فرآیند تولید مصالح

سنتی، می‌باشد. هرچند که در ابتدای تحقیق پیش بینی می‌شد مدل مدرن بدلیل پیچیدگی ساخت مصالح نوین بیشترین میزان کربن نهفته حاصل از تولید مصالح را به خود اختصاص دهند اما با توجه به میزان بالای سیمان و وزن زیاد مصالح در مدل مشابه با مدل موجود، بیشترین میزان انتشار کربن نهفته حاصل از تولید مصالح مربوط به بازسازی با مصالح مشابه مدل موجود به مقدار ۴۲۳۷۵۴/۳۱ کیلوگرم، است. مطابق شکل (۱۴) و جدول (۱) در انتشار کربن نهفته ناشی از تولید مصالح با بازسازی به مصالح متداول، ساختمان با ۱۵/۴۲ درصد کربن نهان کمتر،در بازسازی با مصالح مدرن با ۳۵/۷۱ درصد کربن نهفته کمتر و در بازسازی با مصالح سنتی، بومی با ۸۳/۱ درصد کربن نهفته کمتر نسبت به مدل مشابه با مدل موجود، بازسازی می‌شود.

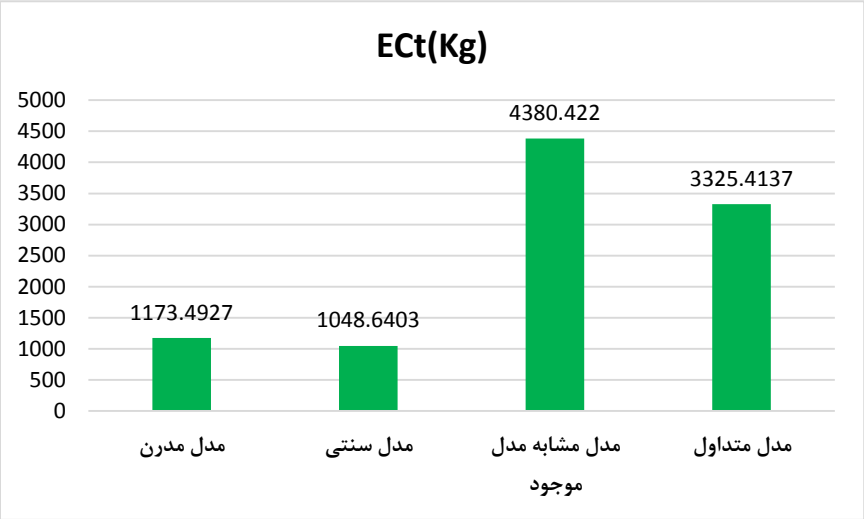


شکل ۱۴- مقایسه میزان انتشار کربن نهفته حاصل از تولید مصالح در بازسازی با ۴ مدل پیشنهادی

جدول ۱ : کاهش میزان انتشار کربن نهفته حاصل از تولید به نسبت بازسازی با مصالح یکسان با مصالح موجود

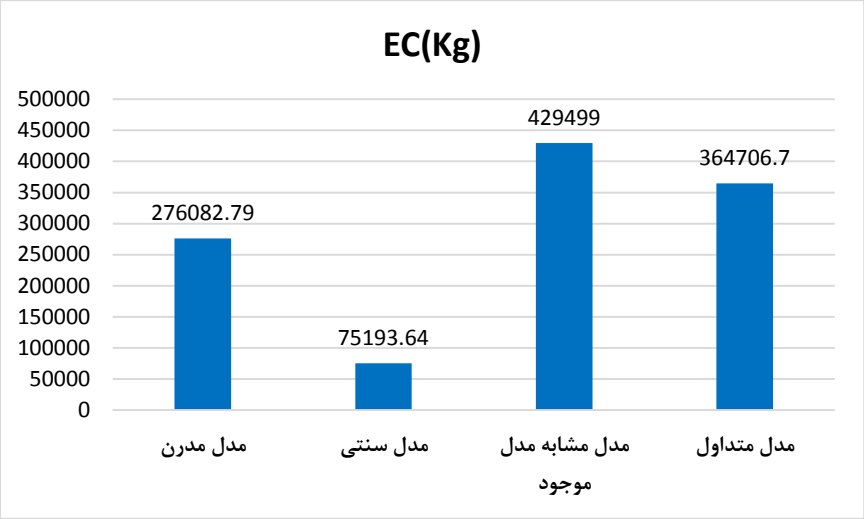
نوع مدل	متداول	مدرن	سنتی
مقایسه سه مدل پیشنهادی با بازسازی با مصالح یکسان با مدل موجود در تولید مصالح	۱۵/۴۲	۳۵/۷۱	۸۳/۱
مقایسه سه مدل پیشنهادی با بازسازی با مصالح یکسان با مدل موجود در حمل مصالح به سایت	۲۴/۰۸	۷۳/۲۱	۷۶/۰۶
مقایسه سه مدل پیشنهادی با بازسازی با مصالح یکسان با مدل موجود در کل انتشار کربن نهفته	٪۱۵/۰۸	٪۳۵/۷۱	٪۸۲/۴۹

مقایسه میزان انتشار کربن نهفته حاصل از حمل مصالح ساختمانی به سایت در بازسازی با مصالح مشابه مدل موجود و سه مدل پیشنهادی متداول، مدرن و سنتی، مطابق نمودار شکل (۱۳) می‌باشد. با توجه به این نمودار کمترین میزان انتشار کربن نهفته حاصل از حمل مصالح ساختمانی به سایت مربوط به مدل سنتی به مقدار ۱۰۴۸۶۴۰۳/۶۴ کیلوگرم، بدلیل کم بودن وزن و تعداد مصالح مصرفی، می‌باشد و بیشترین میزان انتشار کربن نهفته حاصل از حمل مصالح ساختمانی با سایت مربوط به مدل مشابه با مدل موجود به مقدار ۴۳۸۰۴۲۲۰/۰۱ کیلوگرم، به دلیل تعدد مصالح مصرفی نسبت به سه مدل دیگر می‌باشد .مطابق شکل (۱۵) و جدول (۱) در انتشار کربن نهفته ناشی از حمل مصالح به سایت در بازسازی به شیوه متداول، ساختمان با ۲۴/۰۸ درصد کربن نهان کمتر،در بازسازی با مصالح مدرن با ۷۳/۲۱ درصد کربن نهفته کمتر و در بازسازی با مصالح سنتی، بومی با ۷۶/۰۶ درصد کربن هفته کمتر نسبت به مدل بازسازی با مصالح یکسان با مدل موجود، نوسازی می‌شود.



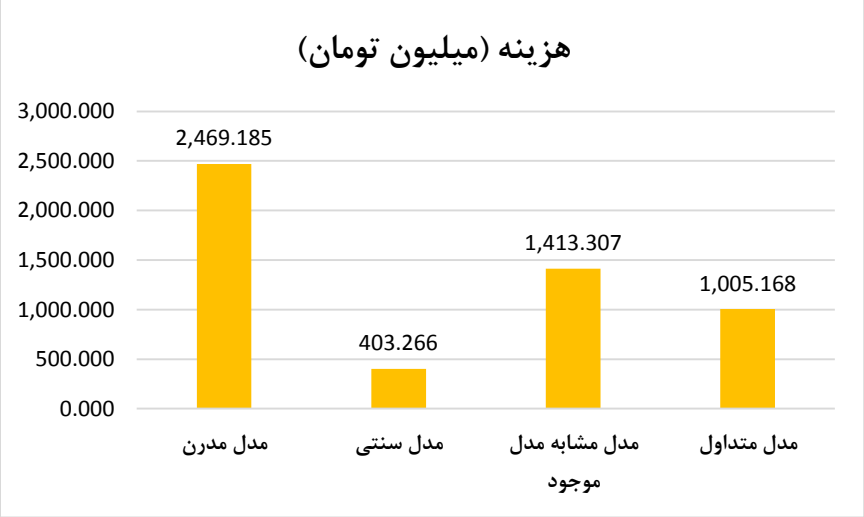
شکل ۱۳- مقایسه میزان انتشار کربن نهفته ناشی از حمل مواد و مصالح ساختمانی به سایت پروژه

مقایسه میزان کل انتشار کربن نهفته حاصل از تولید مواد و مصالح ساختمانی در بازسازی با مصالح مشابه مدل موجود و سه مدل پیشنهادی متداول، مدرن و سنتی، مطابق شکل (۱۶) می‌باشد. در مجموع کمترین میزان انتشار کربن نهفته مربوط به مدل سنتی به مقدار ۷۵۱۹۳/۶۴ کیلوگرم و در مجموع بیشترین میزان انتشار کربن نهفته حاصل از بازسازی به مدل مشابه مدل موجود به مقدار ۴۲۹۴۹۹ کیلوگرم است. در حالت کلی انتشار کربن نهفته در بازسازی با مصالح متداول، ساختمان با ۱۵/۰۸ درصد کربن نهفته کمتر به نسبت بازسازی با مصالح یکسان با مصالح موجود، در بازسازی با مصالح مدرن، ساختمان با ۳۵/۷۱ درصد کربن نهفته کمتر در مقایسه با بازسازی با مصالح یکسان با مدل موجود، در بازسازی با مصالح سنتی ساختمان با ۸۲/۴۹ درصد کربن نهفته کمتر نسبت به مدل بازسازی با مصالح یکسان با مدل موجود، بازسازی می‌شود.



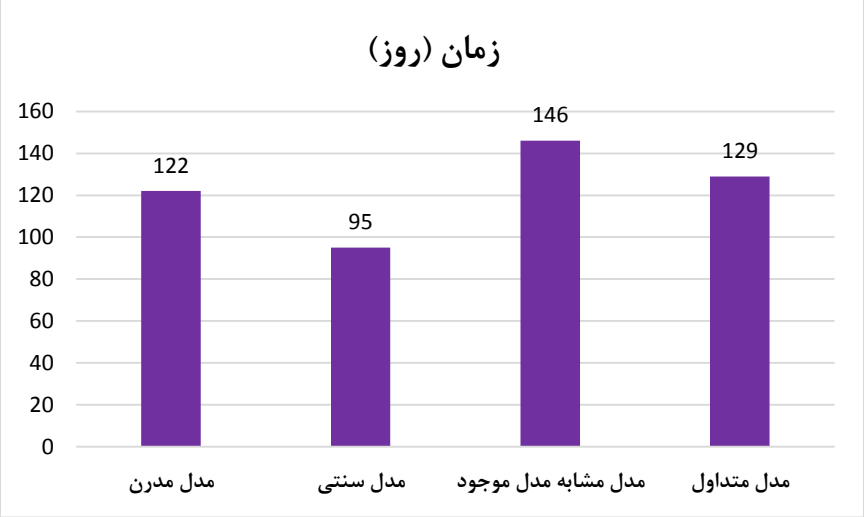
شکل ۱۴- مقایسه میزان کل انتشار کربن نهفته بازسازی مصالح در مدل بازسازی مشابه با موجود و سایر مدلهای پیشنهادی

از لحاظ هزینه‌ای با توجه به نمودار شکل (۱۷) مدل موجود کمترین هزینه بازسازی را در پی دارد، این هزینه مربوط به تهیه و اجرا و حمل مصالح غیر سازه‌ای می‌باشد، و هزینه تخریب در این مقایسه در نظر گرفته نشده‌است، چرا که هزینه تخریب برای تمامی مدل‌های پیشنهادی یکسان می‌باشد و در مقام مقایسه نمی‌آید.



شکل ۱۵- مقایسه هزینه بازسازی مصالح در مدل بازسازی مشابه با موجود و سایر مدلهای پیشنهادی

مطابق شکل (۱۸) مدت زمان لازم برای بازسازی مطابق مصالح پیشنهادی سنتی ۹۵ روز، مطابق مدل مدرن ۱۲۲ روز، مطابق مدل متداول ۱۲۹ روز و مطابق مدل ماشبه مدل موجود ۱۴۶ روز، می‌باشد.



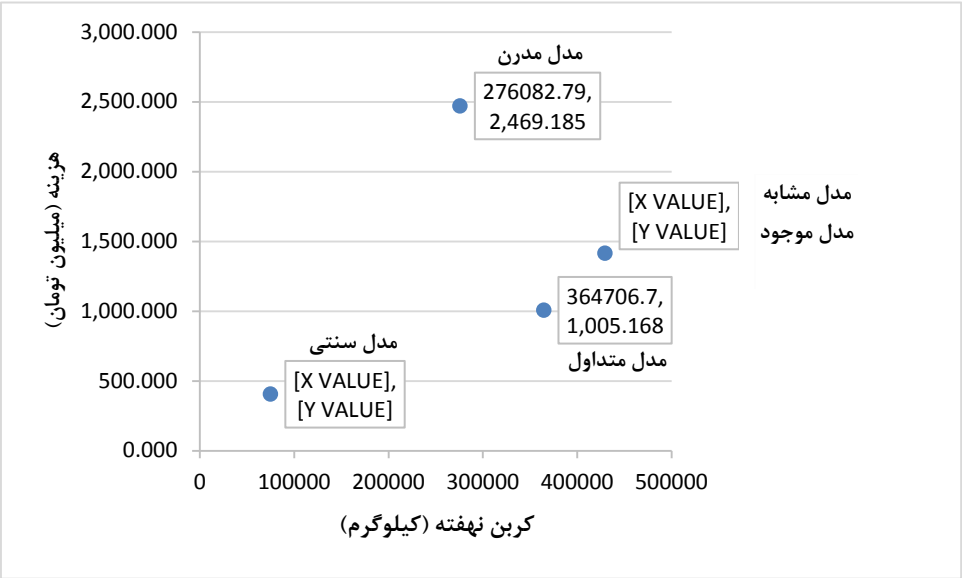
شکل ۱۶- نمودار مقایسه مدت زمان لازم بازسازی در مدل بازسازی مشابه با موجود و سایر مدلهای پیشنهادی

طبق جدول (۲) مصالح ساختمانی در مدل مدرن در یک بازه عمر مفید ۵۰ ساله نیاز به ۵ مرتبه جایگزینی دارند و همچنین مصالح ساختمانی مدل مشابه مدل موجود ۲ مرتبه باید جایگزین شوند. سایر مدل‌های بازسازی نیازی به جایگزینی مصالح ندارند.

جدول ۲ : مقایسه عمر مفید سه مدل پیشنهادی با بازسازی با مصالح یکسان با مدل موجود در تولید مصالح

مدل پیشنهادی	دفعات لازم جهات جایگزینی مصالح در طول ۵۰ سال عمر مفید
مدل سنتی	---
مدل مدرن	۵ بار
مدل مشابه مدل موجود	۲ بار
مدل متداول	---

در مورد مقایسه هزینه در بازسازی با مصالح متداول با بازسازی با مصالح مشابه مصالح مدل موجود، ساختمان با ۲۸/۷۸٪ هزینه کمتر،در بازسازی با مصالح سنتی با ۷۱/۴۷ درصد هزینه کمتر و در بازسازی با مصالح مدرن ساختمان با هزینه حدود ۱/۷ برابر مدل متداول موجود، بازسازی می‌شود. از لحاظ مقایسه مدت زمان لازم جهت بازسازی، مدل سنتی با ۹۰ روز کمترین مدت زمان جهت بازسازی را نیاز دارد و مدل مشابه مدل موجود با ۱۴ روز بیشترین زمان را می برد. همچنین مطابق شکل (۱۹) میتوان میزان هزینه و کربن نهفته کل هر مدل پیشنهادی را به صورت توأمان دید. مدل مدرن با وجود اینکه هزینه بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد اما نسبت به بازسازی با مصالح یکسان با مدل موجود کربن نهفته کل کمتری منتشر می‌کند. مدل سنتی در بین تمامی مدل‌ها هم کربن نهفته کل کمتری منتشر می‌کند و هم صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه بازسازی را رقم می زند.



شکل ۱۷- نقطه‌ای هزینه و میزان انتشار کربن نهفته

نتایج حاصل نشانگر آن است که:

- با عنایت به اهمیت پرداختن به مشکل گرمایش زمین و کاهش میزان کربن نهفته، نتایج نشان می‌دهد بازسازی ساختمان آموزشی مورد مطالعه به روش سنتی، هم از لحاظ زیست محیطی و هم از لحاظ صرفه‌جویی در هزینه‌ها، مناسب‌ترین مدل بازسازی این ساختمان می‌باشد.
- به صورت کلی، استفاده از مصالحی که ضریب انتشار کربن کمتری دارند، استفاده از مصالح ساختمانی سبک، استفاده از مصالحی که فاصله حمل کوتاه‌تری به محل اجرای پروژه دارند و همچنین کاهش تنوع مصالح مصرفی (که می‌تواند از گسترش تعداد حمل و نقل به سایت پروژه بکاهد)، می‌تواند به کاهش میزان انتشار کربن نهفته کمک کند.
- محققان در تحقیقات آتی می توانند ساختمان‌ها با کاربری‌های مختلف را مورد بررسی قرار دهند و نتایج را با نتایج ساختمان آموزشی که مورد مطالعه این پژوهش بوده است مقایسه نمایند.
- همچنین مقایسه و آنالیز توأمان بازسازی و ساخت مجدد ساختمان های آموزشی از لحاظ میزان کربن نهفته و هزینه و زمان در مطالعات آتی قابل انجام است، که این مطالعات می‌تواند بر یافتن ترکیبی بهینه از مدل‌های مصرف مصالح سنتی، مدرن و متداول، تمرکز یابد.

مراجع

Abanda, F H, A H Oti, and J H M Tah. 2017. "Integrating BIM and New Rules of Measurement for Embodied Energy and CO2 Assessment." *Journal of Building Engineering* 12: 288–305. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710216302571.

Aram, K, and R Taherkhani. 2022. "An Optimized Solution for Tackling Effects of Climate Change on an Educational Building Based on Net Zero Energy Technique." *Journal of Engineering & Construction Management (JECM)* 7(1): 8–15.

Azhar, Salman, and Justin Brown. 2009. "BIM for Sustainability Analyses." *International Journal of Construction Education and Research* 5(4): 276–92. https://doi.org/10.1080/15578770903355657.

Bowyer, Jim. 2013. *Life Cycle Cost Analysis of Non-Residential Buildings*. Dovetail Partners.

Cang, Yujie, Liu Yang, Zhixing Luo, and Nan Zhang. 2020. "Prediction of Embodied Carbon Emissions from Residential Buildings with Different Structural Forms." *Sustainable Cities and Society* 54: 101946. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670719310819.

Cavalliere, Carmine, Guillaume Habert, Guido Raffaele Dell'Osso, and Alexander Hollberg. 2019. "Continuous BIM-Based Assessment of Embodied Environmental Impacts throughout the Design Process." *Journal of Cleaner Production* 211: 941–52. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618336485.

Chong, Heap-Yih, and Xiangyu Wang. 2016. "The Outlook of Building Information Modeling for Sustainable Development." *Clean Technologies and Environmental Policy* 18(6): 1877–87. https://doi.org/10.1007/s10098-016-1170-7.

Crippa, Julianna et al. 2018. "A BIM–LCA Integration Technique to Embodied Carbon Estimation Applied on Wall Systems in Brazil." *Built Environment Project and Asset Management* 8(5): 491–503. https://doi.org/10.1108/BEPAM-10-2017-0093.

Fani, Farzad, and Roohollah Taherkhani. 2018. "Four-Dimensional Building Information Modeling (4D BIM) in Construction Project Management (in Farsi)." *Journal of Engineering and Construction Management (JECM)* 3(2): 1–6.

Fazeli, Abdulwahed, Farzad Jalaei, Mostafa Khanzadi, and Saeed Banihashemi. 2022. "BIM-Integrated TOPSIS-Fuzzy Framework to Optimize Selection of Sustainable Building Components." *International Journal of Construction Management* 22(7): 1240–59. https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1686836.

Fenner, Andriel Evandro et al. 2020. "Embodied, Operation, and Commuting Emissions: A Case Study Comparing the Carbon Hotspots of an Educational Building." *Journal of Cleaner Production* 268: 122081. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620321284.

Gan, Vincent J L et al. 2017. "Sustainability Analyses of Embodied Carbon and Construction Cost in High-Rise Buildings Using Different Materials and Structural Forms." *HKIE Transactions* 24(4): 216–27. https://doi.org/10.1080/1023697X.2017.1375436.

———. 2018. "Holistic BIM Framework for Sustainable Low Carbon Design of High-Rise Buildings." *Journal of Cleaner Production* 195: 1091–1104. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618316251.

Jalaei, F, and A Jrade. 2015. "Integrating Building Information Modeling (BIM) and LEED System at the Conceptual Design Stage of Sustainable Buildings." *Sustainable Cities and Society* 18: 95–107.

Kayaçetin, N C, and A M Tanyer. 2020. "Embodied Carbon Assessment of Residential Housing at Urban Scale." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 117: 109470.

Muller, Marina Figueiredo et al. 2019. "A Systematic Literature Review of Interoperability in the Green Building Information Modeling Lifecycle." *Journal of Cleaner Production* 223: 397–412. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619308054.

Nizam, Raja Shahmir, Cheng Zhang, and Lu Tian. 2018. "A BIM Based Tool for Assessing Embodied Energy for Buildings." *Energy and Buildings* 170: 1–14.

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817325719.

Ortiz, Oscar., Francesc. Castellsa, and Guido. Sonnemannc. 2009. "Sustainability in the Construction Industry: A Review of Recent Developments Based on LCA." *Construction and Building Materials* 23: 28–39.

P Rode, R Burdett, JC Soares Gonçalves. 2011. "Buildings: Investing in Energy and Resource Efficiency." In *Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication, ,* 331–73.

Pomponi, Francesco, and Alice Moncaster. 2018. "Scrutinising Embodied Carbon in Buildings: The next Performance Gap Made Manifest." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81: 2431–42. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211730998X.

Puskas, Attila, and Ligia Moga. 2015. "Sustainability of Reinforced Concrete Frame Structures - A Case Study." *International Journal of Sustainable Development and Planning* 10: 165–76.

Rahim, FA et al. 2014. "Sustainable Construction through Life Cycle Costing." *Journal of building performance* 5(1).

Raza, Muhammad Saleem, Bassam A Tayeh, Yazan I Abu Aisheh, and Ahmed M Maglad. 2023. "Potential Features of Building Information Modeling (BIM) for Application of Project Management Knowledge Areas in the Construction Industry." *Heliyon* 9(9): e19697. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023069050.

Resch, Eirik, Carine Lausselet, Helge Brattebø, and Inger Andresen. 2020. "An Analytical Method for Evaluating and Visualizing Embodied Carbon Emissions of Buildings." *Building and Environment* 168: 106476. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319306882.

Schlueter, Arno, and Frank Thesseling. 2009. "Building Information Model Based Energy/Exergy Performance Assessment in Early Design Stages." *Automation in Construction* 18(2): 153–63. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580508001064.

Taherkhani, R., M. Alviri, P. Panahi, and N. Hashempour. 2023. "Low Embodied Carbon and Energy Materials in Building Systems: A Case Study of Reinforcing Clay Houses in Desert Regions." *International Journal of Engineering* 36(8): 1409–28.

Taherkhani, Roohollah. 2022. "An Integrated Social Sustainability Assessment Framework: The Case of Construction Industry." *Open House International* 48(2): 206–36.

Taherkhani, Roohollah. 2023. "Barriers to Green Building Implementation in Developing Countries: The Case of Iran." *Environment, Development and Sustainability*. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03816-7.

Taherkhani, Roohollah., Saaed. Shaahnazari, Najme. Hashempour, and Faezeh. Taherkhani. 2022. "Sustainable Cities through the Right Selection of Vegetation Types for Green Roofs." *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development* 13(3): 365–88.

Taherkhani, Roohollah. 2013. "Development of a Social Sustainability Model in Industrial Building System." Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, Malaysia.

Taherkhani, Roohollah, and A.L. Saleh. 2019. "Awareness and Prevalence of Industrialized Building System (IBS) in Iran." *Jurnal Teknologi* 81(6): 13–23. https://journals.utm.my/jurnalteknologi/article/view/13364.

De Wolf, Catherine et al. 2015. "Material Quantities and Embodied Carbon Dioxide in Structures." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability* 0(0): null. https://doi.org/10.1680/jensu.15.00033.

Zandiye, Keyvan, Roohollah Taherkhani, and Reza Ziaie Moayed. 2016. "History of Safety in Iranian Construction Industry (in Farsi)." *Journal of Engineering and Construction Management (JECM)* 1(1): 13–20.

Zhu, Weina, Wei Feng, Xiaodong Li, and Zhihui Zhang. 2020. "Analysis of the Embodied Carbon Dioxide in the Building Sector: A Case of China." *Journal of Cleaner Production* 269: 122438. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620324859.