

Evaluating the amount of carbon dioxide produced in the construction of low-rise buildings with concrete, steel and LSF frames and comparison of roof types

Mohammad Afshari Nezhad Roudsari¹, Javad Majrouhi Sardroud^{2*}, Mohsen Jafari Nadoushan³

1- MSc in Civil Engineering and Construction Management, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Global warming, weather changes and the gradual destruction of the environment are caused by the emission of greenhouse gases, including carbon dioxide. In the past, many studies have been conducted on the contribution of the construction industry in the emission of greenhouse gases, and most of these studies were related to the operation phase, and so far, many studies have not been presented to evaluate the amount of carbon dioxide emissions during the construction phase in Iran. In this research, the goal is to evaluate the amount of carbon dioxide produced by the construction of buildings with concrete, steel and LSF frames. In order to fulfill this goal, three residential buildings have been studied in Gilan province, the coastal strip of the Caspian Sea. The amount of materials used in each section was obtained through quantity estimating with Microsoft Excel. The amount of carbon of different materials per unit weight of consumed materials was extracted from a reliable source. Based on the calculations, the amount of carbon produced in the construction phase for three buildings with concrete, steel and LSF frames per structural material was 335.46, 186.89 and 134.29 kgCO₂/m², respectively. The comparison shows that the amount of carbon produced for the construction of an LSF structure is less than that of concrete and steel structures. Also, the effect of replacing different types of roofs on the amount of carbon reduction for concrete and steel buildings was studied. The amount of carbon produced in the construction of a concrete structure with a pre-stressed beam roof compared to a block beam roof is about 27% reduction, and the amount of carbon produced in the construction of a steel structure with a composite roof compared to a steel deck roof is about 5% reduction

ARTICLE INFO

Receive Date: 26 September 2024

Revise Date: 02 December 2024

Accept Date: 04 March 2025

Keywords:

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.469672.3477

*Corresponding author:

Email address:

ارزیابی میزان دی اکسید کربن تولید شده در ساخت ساختمان های کوتاه مرتبه با اسکلت بتنی، فولادی و LSF و مقایسه انواع سقف

محمد افشاری نژاد رودسری^۱، جواد مجروحی سردرود^{۲*}، محسن جعفری ندوشن^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران گرایش مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

گرم شدن کره زمین، تغییرات هوا و نابودی تدریجی محیط زیست، ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله گاز دی اکسید کربن است. صنایع تولیدی و وسایل حمل و نقل از یک سو و از سوی دیگر صنعت ساختمان عامل چنین فاجعه زیست محیطی و در نتیجه فاجعه انسانی هستند. در گذشته مطالعات بسیاری در مورد سهم صنعت ساختمان در انتشار گازهای گلخانه‌ای انجام شده است که بیشتر این مطالعات مربوط به دوره بهره‌برداری بوده و تاکنون مطالعات زیادی برای ارزیابی میزان انتشار دی اکسید کربن در مرحله‌ی ساخت در ایران ارائه نشده است. در این پژوهش هدف، ارزیابی میزان دی اکسید کربن تولید شده حاصل از ساخت ساختمان‌های با اسکلت بتنی، فولادی و LSF است. در راستای برآورده شدن این هدف سه ساختمان مسکونی به عنوان نمونه‌های موردی در استان گیلان، نوار ساحلی دریای خزر مورد مطالعه قرار گرفته است. میزان مصالح مورد استفاده در هر بخش از طریق متره به کمک نرم افزار اکسل، بدست آمد. میزان کربن مصالح مختلف به ازای واحد وزن مصالح مصرفی از منبع معتبر استخراج گردید. براساس محاسبات انجام شده میزان کربن تولیدی در مرحله ساخت برای سه ساختمان با اسکلت بتنی، فولادی و LSF به ازای مصالح سازه‌ای به ترتیب برابر ۳۳۵/۴۶، ۱۸۶/۸۹ و ۱۳۴/۲۹ کیلوگرم کربن بر مترمربع به دست آمد. بررسی مقایسه بیانگر آن است که میزان کربن تولیدی برای ساخت یک سازه LSF کمتر از سازه بتنی و فلزی است. همچنین تأثیر جایگزینی انواع سقف در میزان کاهش کربن برای ساختمان بتنی و فلزی مورد مطالعه قرار گرفت. میزان کربن تولیدی در ساخت سازه بتنی با سقف تیرچه پیش تنیده در مقایسه با سقف تیرچه بلوک حدود ۲۷ درصد کاهش و میزان کربن تولیدی در ساخت سازه فلزی با سقف کامپوزیت در مقایسه با سقف عرشه فولادی حدود ۵ درصد کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: انتشار دی اکسید کربن، ساختمان سازی، اسکلت بتنی، اسکلت فولادی، اسکلت LSF، انواع سقف

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
10.22065/jsce.2025.469672.3477	10.22065/jsce.2025.469672.3477	۱۴۰۲/۰۷/۰۵	۱۴۰۲/۰۹/۱۲	۱۴۰۳/۱۲/۱۴	۱۴۰۳/۱۲/۱۴	۱۴۰۴/۰۹/۳۰
		*نویسنده مسئول:		جواد مجروحی سردرود		
		پست الکترونیکی:		Ja.majrouhi@iau.ac.ir		

۱- مقدمه

در نتیجه انتشار گازهای گلخانه‌ای^۱ ناشی از فعالیت‌های انسانی، به ویژه دی‌اکسید کربن^۲ ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی و جنگل زدایی، گرم شدن کره زمین و تغییرات آب و هوایی به موضوعات مهم بحث در قرن بیست و یکم تبدیل شده‌اند [۱]. پیش‌بینی می‌شود که افزایش مداوم انتشار دی‌اکسید کربن نتایج فاجعه‌باری برای سیستم آب و هوای جهان داشته باشد و پیامدهایی در تمام بخش‌های جامعه احساس شود [۲]. دانشمندان در مورد اثرات منفی بسیاری از جمله بالا آمدن سطح آب دریاها، افزایش دفعات بلایای طبیعی، از دست دادن تنوع زیستی و غیره هشدار داده‌اند. به منظور تضمین رشد بلندمدت و کاهش پیامدهای منفی تغییرات آب و هوایی، کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و بهبود شرایط محیطی به نگرانی‌های جهانی تبدیل شده است [۳]. از آغاز دوران صنعتی، غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفر به دلیل انتشار دی‌اکسید کربن انسانی به طور چشمگیری افزایش یافته است. حجم قابل توجهی از گازهای گلخانه‌ای از صنایع پتروشیمی، فولاد و سیمان منتشر می‌شود [۴]. هیئت بین‌دولتی تغییرات اقلیمی سازمان ملل پیش‌بینی کرده است که غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفر تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۵۵۰ پی پی ام می‌رسد که ممکن است میانگین دمای کره زمین را حدود ۱/۴ تا ۵/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش دهد. این هدف به عنوان یکی از نقاط اوج اعلام شده است که ممکن است تغییرات برگشت‌ناپذیری در اقلیم و محیط زیست ایجاد شود [۵].

انتقال انرژی از سوخت‌های فسیلی به راه‌حل‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر با توجه به افزایش روزافزون کشورها، شهرها و شرکت‌ها برای اهداف پایداری و انتشار صفر مورد توجه قرار گرفته است [۶]. در اواخر دهه ۸۰، جنبش جهانی شروع به طی کردن مسیر پایداری کرده است. در این میان، محققان در تلاش برای معرفی فناوری‌ها و استراتژی‌های سبز جدید برای به کارگیری منابع تجدیدپذیر و پایدار و کاهش ردپای کربن^۳ و انتشار گازهای گلخانه‌ای بوده‌اند [۷]. مفهوم پایداری به دلیل تأثیر قابل توجهی که بر محیط طبیعی دارد، به بخشی ضروری از صنعت ساختمان تبدیل شده است. صنعت ساختمان یکی از منابع اصلی انتشار دی‌اکسید کربن است [۸]. بیش از یک سوم کل مصرف انرژی جهان و انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق چرخه عمر ساختمان‌ها از ساخت^۴ تا بهره‌برداری^۵، تخریب^۶ و دفع^۷ تولید می‌شود [۹]. در این راستا، نیاز فوری به کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در تمام صنایع، از جمله ساختمان‌سازی وجود دارد [۱۰]. از این رو، ساختمان‌های پایدار (سبز) به رسمیت شناخته شده‌اند تا با انجام اقدامات مناسب بر این مسائل غلبه کنند. بسیاری از مطالعات تحقیقاتی به نگرانی‌های گرمایش جهانی^۸ و پتانسیل کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در مراحل مختلف فرآیند ساختمان‌سازی پرداخته‌اند [۱۱]. انتشار کربن در سراسر جهان در سال ۲۰۱۸ معادل ۵۱/۱۹۹ میلیون تن بود که نسبت به سال ۲۰۰۵ افزایش ۲۷ درصدی را نشان داد [۱۲]. صنعت ساختمان در چین بیشترین مصرف انرژی و انتشار کربن را دارند که ۵۱/۳ درصد از کل انتشار کربن در سال ۲۰۱۸ را تشکیل می‌دهند. همچنین تحقیقات صورت گرفته توسط پنگ [۱۳] بر روی یک نمونه موردی در چین نشان داد که میزان انتشار دی‌اکسید کربن حاصل از مراحل ساختمان‌سازی، بهره‌برداری و تخریب در چرخه عمر ساختمان به ترتیب ۱۲/۶، ۸۵/۴ و ۲ درصد از کل انتشار دی‌اکسید کربن است. در حالی که در دهه‌های گذشته توجه برای کاهش میزان انتشار دی‌اکسید کربن حاصل از ساختمان‌سازی معطوف به مرحله بهره‌برداری بود ولی در سال‌های اخیر محققان متوجه اهمیت مرحله ساختمان‌سازی در کاهش کربن شده‌اند [۱۴]. با وجود این واقعیت که بیش از ۸۰ درصد کل مصرف انرژی در یک چرخه عمر ساختمان در مرحله بهره‌برداری قرار دارد انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول ساختمان‌سازی، مهمترین بخش از انتشار گازها در کل دوره عمر ساختمان‌ها است زیرا ساختمان‌سازی مقدار زیادی از منابع را مصرف و از

¹ Greenhouse Gases (GHGs)

² Carbon Dioxide (CO₂)

³ Carbon Footprint

⁴ Construction

⁵ Operational

⁶ Demolition

⁷ Disposal

⁸ Global Warming

انواع مختلف تجهیزات ساخت و حمل و نقل^۹ استفاده می‌کند همچنین مقدار زیادی از گازهای گلخانه‌ای را در مدت زمان نسبتاً کوتاه منتشر می‌کند. بنابراین، انتشار در طول مدت ساخت شدید و متمرکز است. تا به امروز در کشور ما به انتشار گاز دی‌اکسید کربن حاصل از فعالیت‌های ساختمانی به ویژه در مرحله ساخت توجه چندانی نشده است؛ در حالی که اهمیت این موضوع با توجه به شرایط محیط زیست کشور و افزایش میزان آلاینده‌های گاز دی‌اکسید کربن حاصل از ساخت به طور چشمگیری رو به افزایش است.

۲- شرح مفاهیم

۲-۱- انتشار کربن در کل چرخه حیات ساختمان

انتشار کربن پیش از بهره‌برداری: انتشار کربن ناشی از تولید مصالح و مرحله ساخت ساختمان و پیش از مرحله بهره‌برداری ساختمان را شامل می‌شود. برخلاف سایر انواع انتشار کربن، این نوع انتشار پیش از بهره‌برداری از ساختمان به جو وارد می‌شود. در این مطالعه، محدوده تحقیق در مورد انتشار گاز دی‌اکسید کربن پیش از بهره‌برداری ساختمان می‌باشد.

انتشار کربن در دوره بهره‌برداری: انتشار در ارتباط با مصالح و فرآیندهای مورد نیاز برای نگهداری ساختمان در طول دوره بهره‌برداری. این موارد اضافه بر انتشار کربن ناشی از مصرف انرژی برای گرمایش، سرمایش، تجهیزات و... است.

انتشار کربن در پایان چرخه حیات: انتشار کربن در ارتباط با تخریب، انتقال به محل دفن فرآورده‌های ساختمانی، فراوری دورریز، دفن و به عبارت دیگر مرحله‌ای که بعد از مرحله بهره‌برداری قرار دارد [۱۵].

۲-۲- پایگاه داده ICE

پایگاه داده ICE^{۱۰} یک پایگاه داده برجسته انرژی و کربن برای مصالح ساختمانی است که به صورت فهرست ضرایب انتشار کربن و انرژی مواد و مصالح مختلف در دسترس است. مرز انتشار کربن این پایگاه داده از گهواره تا دروازه می‌باشد. اولین نسخه از پایگاه داده ICE توسط کریگ جونز، کارشناس پایداری محیط زیستی و مدیر اکولوژی مدور^{۱۱}، در حالیکه در سمت قبلی خود به عنوان محقق دانشگاه بث انگلستان و در حال همکاری با پروفیسور جف هموند در تیم تحقیقاتی انرژی پایدار^{۱۲} بود، ایجاد شد. نسخه اول در سال ۲۰۰۵ پس از بررسی گسترده ادبیات موضوع منتشر شد و در فواصل دوره‌ای به روز شده است. این بانک اطلاعاتی پس از دریافت بودجه از طرف آژانس محیط زیست^{۱۳}، فرودگاه هیترو^{۱۴} و هیئت استاندارد و ایمنی راه‌آهن^{۱۵} به طور قابل توجهی به روز شده است [۹].

بانک اطلاعاتی رایگان برای استفاده توسط بیش از ۳۰۰۰۰ متخصص از سراسر جهان بارگذاری شده است و در گزارش‌ها، ژورنال‌ها، کتاب‌ها، سخنرانی‌ها، ماشین حساب‌های انرژی و کربن و... نشان داده می‌شود^{۱۶}. در این مطالعه از آخرین نسخه منتشر شده این پایگاه داده که مربوط به نوامبر سال ۲۰۱۹ می‌باشد، استفاده شده است. این مرکز داده به صورت اجتماع و مرجعی از هر پایگاه داده در این زمینه می‌باشد. از این مرکز داده به منظور استخراج ضرایب انتشار کربن استفاده شده است.

⁹ Transportation

¹⁰ Inventory of Carbon and Energy (ICE database)

¹¹ Circular Ecology

¹² Sustainable Energy Research Team (SERT)

¹³ Environment Agency

¹⁴ Heathrow Airport

¹⁵ Rail Safety and Standards Board (RSSB)

¹⁶ <http://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>

۳- مروری بر پیشینه پژوهش

گل زاده و رمضانیان پور در پژوهشی در سال ۱۳۹۴ به بررسی نقش جداره‌های ساختمان در مصرف انرژی و انتشار دی اکسید کربن با استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر^{۱۷} پرداخته‌اند. بررسی‌ها نشان داده است، جداره‌های ساختمان تأثیرگذارترین بخش ساختمان از لحاظ انرژی نهفته^{۱۸} (۲۲ درصد) و انتشار کربن (۱۱ درصد) در مرحله ساخت و تولید هستند. همچنین از لحاظ اثرگذاری بر انرژی مصرفی در دوره بهره‌برداری حائز اهمیت می‌باشند. نتایج ارزیابی چرخه عمر نشان داد، در میان انواع مصالح ساختمانی رایج بکار رفته در جداره ساختمان، بلوک سیمانی سبک (پوکه ای) در مقایسه با سایر مصالح بررسی شده، با در نظر گرفتن کل چرخه عمر ساختمان عملکرد بهتری دارد [۱۶].

مطالعه ای تحت عنوان محاسبه انتشار کربن چرخه عمر ساختمان بر اساس اکوتکت^{۱۹} و مدل سازی اطلاعات ساختمان^{۲۰} صورت گرفت. مقایسه انتشار کربن چرخه حیات برای هر مرحله نشان داد که مرحله بهره‌برداری بزرگترین عامل انتشار کربن است. تقریباً ۸۵/۴ درصد از کل انتشار کربن در طول بهره‌برداری تولید شد. مرحله ساختمان‌سازی ۱۲/۶ درصد از کل انتشار کربن را به خود اختصاص داده است. تقریباً ۲ درصد از کل انتشار کربن در مرحله تخریب رخ داده است. در مقایسه با کل انتشار کربن در کل چرخه حیات ساختمان، ترسیب کربن^{۲۱} توسط پوشش گیاهی حداقل بود [۱۳].

شکوهیان و همکارانش تحقیقی با موضوع ارزیابی ردپای کربن در ساخت و ساز مطالعه موردی: پروژه مرکز آموزشی رفاهی امام علی (ع) شماره ۲ فرهنگیان مشهد انجام دادند. با محاسبه میزان ردپای کربن در ساختمان‌سازی این هتل این نتیجه حاصل گردید که میزان کل رد پای کربن ۱۰۹۸۲۹ کیلوگرم کربن بر سال می‌باشد. نتیجه نهایی این بود که تنها مصرف مصالح ساختمانی در میزان رد پای کربن قابل ملاحظه است و بر این نوع فعالیت، حمل و نقل و سایر منابعی که باعث رد پای کربن می‌شوند تأثیر کمی دارند [۱۷].

یاراحمدی و همکارانش تحقیقی با موضوع محاسبه مقداری انتشار دی اکسید کربن در مرحله‌ی ساخت پروژه‌های ساختمانی و ارائه راهکار جهت کاهش آلاینده دی اکسید کربن انجام دادند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ۸۷ درصد انتشارات مربوط به مواد و مصالح، ۹ درصد مصرف سوخت و انرژی الکتریکی تجهیزات مورد استفاده در طول ساخت، ۳ درصد حمل و نقل مواد و مصالح و نزدیک به ۱ درصد حمل تجهیزات و برق مصرفی در کارگاه بوده است [۱۸].

کومانایکه و همکارانش در پژوهشی در سال ۲۰۱۸ تحت عنوان ارزیابی کربن نهفته^{۲۲} مرتبط با مصالح یک ساختمان اداری در سریلانکا پرداخته‌اند. کربن نهفته در مرحله تولید مصالح ۶۲۹/۶ کیلوگرم کربن بر مترمربع از مساحت ناخالص ساختمان است. بتن مسلح و آجرهای سفالی مصالح اصلی انتشار کربن هستند که بیش از ۷۰ درصد از کل کربن نهفته را تشکیل می‌دهند [۱۹].

تحقیقی درباره توسعه یک چارچوب تجزیه و تحلیل انتشار کربن با استفاده از مدل سازی اطلاعات ساختمان و ارزیابی چرخه حیات برای ساخت پروژه‌های بیمارستانی صورت گرفت. نتایج نشان داد که بتن مسلح بیشترین سهم انتشار کربن (حدود ۴۹/۶۴ درصد) را در مرحله ساختمان‌سازی دارد و گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع^{۲۳} بیشترین سهم (حدود ۵۳/۶۳ درصد) را در مرحله بهره‌برداری تولید می‌کند [۲۰].

¹⁷ Life Cycle Assessment (LCA)

¹⁸ Embodied Energy

¹⁹ Ecotect

²⁰ Building Information Modeling (BIM)

²¹ Carbon Sequestration

²² Embodied Carbon

²³ Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC)

برکی و همکارانش در پژوهشی در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی ردپای کربن اسکلت‌های فولادی^{۲۴} در سازه‌های ساختمانی پرداخته‌اند. اسکلت‌های فولادی مورد مطالعه به طور متوسط ۲/۶۶ برابر بیشتر از اسکلت‌های چوبی^{۲۵} مورد مطالعه که مدت زمان بهره‌برداری سازه‌ها ۱۰۰ سال تعیین شده بود، انتشار داشتند. علاوه بر این، ثابت شده است که اتصالات مسئول ۱۳ تا ۳۳ درصد انتشار کربن در قاب‌های مورد مطالعه هستند [۲۱].

مطالعه ای توسط کفشی و همکارانش در سال ۱۴۰۱ تحت عنوان بررسی مقدار کاهش کربن دی اکسید از طریق انتخاب صحیح مصالح در ساختمان‌های مسکونی انجام شد. یافته‌های پژوهش نمایان می‌کند که در ساختمان‌سازی در هر سه مرحله اسکلت سازه، دیوارچینی و نازک کاری با انتخاب صحیح مصالح میتوان به طرز چشمگیری در کاهش تولید کربن مؤثر واقع شد. نتایج تجزیه و تحلیل‌ها نشان از کاهش چشمگیر (۶۳۷۶۷/۲۱) مقدار کربن دارد [۲۲].

لیو و لنگ در پژوهشی در سال ۲۰۲۲ به تحقیق کمی در مورد انتشار کربن نهفته در مرحله طراحی: مطالعه موردی از یک ساختمان آموزشی در چین پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که انتشار کربن حاصل از تولید مصالح بسیار بیشتر از انتشار ناشی از حمل و نقل مواد و مصالح است. فولاد و بتن دو مصالحی هستند که بیشترین انتشار کربن را در سازه اسکلت بتن آرمه ساختمان آموزشی دارند. استفاده از مصالح محلی و استفاده مجدد دو معیار اصلی بهینه‌سازی کم کربن هستند، با نرخ سهم کاهش انتشار کربن به ترتیب ۱۹/۷ درصد و ۸۰/۳ درصد، که استفاده مجدد و مصالح ساختمانی بازیافتی باید در اولویت کاهش انتشار کربن ساختمان‌ها در نظر گرفته شوند [۲۳].

حسینیان و همکارانش تحقیقی با موضوع تحلیل ردپای آب آبی و خاکستری ساخت سازه‌های بومی با تأکید بر مناطق مختلف آب وهوایی ایران: یک مطالعه ی مقایسه‌ای انجام دادند. نتایج نشان می‌دهند که احداث ساختمان‌های بومی، الگوهایی را برای صنعت ساخت فراهم می‌کند تا به جای آسیب رساندن به طبیعت، با آن تعامل داشته و در نتیجه مصرف آب و آلودگی آن را به حداقل رساند. بنابراین، استفاده از الگوهای بومی در روستاها نیاز است تقویت شود. در ساخت خانه‌های شهری یک یا دو طبقه می‌توان از الگوهای بومی متناسب با مصالح در دسترس منطقه استفاده کرد [۲۴].

جهانی و حسینیان در پژوهشی در سال ۱۴۰۲ به بررسی اثر خطر نسبی زلزله و نوع خاک بستر بر ردپای کربن در ساختمان‌های بلند پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که انتخاب نوع سازه بیشترین و لرزه‌خیزی کمترین تأثیر را بر افزایش میزان ردپای کربن در مرحله مصرف مصالح دارد. باتوجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که ساختمان‌های بلند فولادی نسبت به ساختمان‌های بلند بتنی نقش مهمی در افزایش میزان ردپای کربن دارند. این افزایش میزان ردپای کربن حدود ۱۱ درصد (۶۳ کیلوگرم بر مترمربع) تخمین زده شد. در مرحله حمل‌ونقل، نوع سازه کمترین تأثیر و لرزه‌خیزی منطقه بیشترین تأثیر را بر افزایش این مقدار دارد. همچنین، در مرحله کارگاه ساخت، میزان افزایش ردپای کربن ناشی از مشخصات سازه‌ای از جمله نوع سازه بیشترین و ارتفاع کمترین پارامتر مؤثر گزارش شد [۲۵].

گرین و همکارانش در پژوهشی در سال ۲۰۲۳ به کل عمر انتشار گازهای گلخانه‌ای نهفته و پتانسیل انتشار خالص صفر برای یک ساختمان اداری میان مرتبه^{۲۶} ساخته شده با الوار توده ای^{۲۷} پرداخته‌اند. نتایج برای تجزیه و تحلیل انتشار کربن نهفته از گهواره تا گور^{۲۸} نشان داد که طراحی فولادی دارای ۳۹۹۹ تن دی اکسید کربن (۳۹۸/۵ کیلوگرم کربن درهرمترمربع) است. در حالی که طراحی الوار توده ای کاهش ۸۰ تا ۹۹ درصد در کربن نهفته در مجموع ۵۰ تا ۷۹۵ تن کربن (۵ تا ۷۹ کیلوگرم کربن درهرمترمربع) را ارائه داد [۲۶].

تحقیقی درباره ارزیابی چرخه عمر ساختمان جهانی: بررسی تطبیقی قاب‌های فولادی و بتنی^{۲۹} در سراسر اتحادیه اروپا، ایالات متحده آمریکا، کانادا و قوانین ساختمانی استرالیا صورت گرفت. نتایج نشان داد که در میان سازه‌های اسکلت فلزی که بر اساس

24 Steel Frames

25 Wooden Frames

26 Mid Rise Office Building

27 Mass Timber

28 Cradle to Grave

29 Concrete Frames

آیین‌نامه‌های مختلف ساختمانی طراحی شده‌اند، سازه‌ای که بر اساس آیین‌نامه‌های اتحادیه اروپا طراحی شده است، دارای بیشترین انتشار کربن (۱۴۲ کیلوگرم کربن بر مترمربع) و اسکلت طراحی شده بر اساس قوانین استرالیا کمترین انتشار کربن (۱۱۹ کیلوگرم کربن بر مترمربع) را دارد. در میان سازه‌های اسکلت بتنی، سازه‌ای که بر اساس آیین‌نامه‌های کانادا طراحی شده بود، دارای بیشترین انتشار کربن (۲۲۱ کیلوگرم کربن بر مترمربع) بود، اما مجدداً، سازه طراحی شده بر اساس آیین‌نامه استرالیا کمترین انتشار کربن (۱۳۴ کیلوگرم کربن بر مترمربع) را داشت [۲۷].

مطالعات گذشته در مورد سهم صنعت ساختمان در انتشار گازهای گلخانه‌ای برای ساختمان‌های بتنی، فولادی و چوبی انجام شده که بیشتر این مطالعات مربوط به دوره بهره‌برداری بوده است. سازه‌های فولادی سبک³⁰ به یکی از رقبای اصلی سیستم‌های ساخت سنتی تبدیل شده‌اند. استفاده بهینه از مصالح، سبکی آن و صرفه‌جویی در زمان مرحله ساخت، پتانسیل این فناوری را برای کاهش اثرات زیست‌محیطی نشان می‌دهد. در این پژوهش هدف، ارزیابی میزان دی‌اکسید کربن تولید شده حاصل از ساخت ساختمان‌های با اسکلت بتنی، فولادی و LSF است. همچنین تأثیر جایگزینی انواع سقف در میزان کاهش کربن برای ساختمان بتنی و فلزی مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه، محدوده تحقیق در مورد انتشار گازی اکسید کربن پیش از بهره‌برداری ساختمان و مرز انتشار کربن از گهواره تا دروازه می‌باشد.

۴- روش پژوهش

هدف این مطالعه مقایسه سه ساختمان بتنی، فولادی و LSF به لحاظ مسائل زیست محیطی از نظر میزان انتشار کربن حین احداث ساختمان می‌باشد. در این مطالعه بهترین نوع سیستم سازه‌ای از نظر کمترین میزان انتشار کربن و همچنین تأثیر جایگزینی انواع سقف در میزان کاهش کربن نشان داده شده است. برای این منظور سه ساختمان دوطبقه به عنوان نمونه‌های موردی با رعایت یکسان بودن میزان مساحت در استان گیلان، نوار ساحلی دریای خزر در نظر گرفته شده است. سه ساختمان بتنی، فولادی و LSF از نوع مسکونی بوده و مساحت آنها به ترتیب برابر ۱۷۰/۹۸، ۱۷۳/۹۶ و ۱۷۴ مترمربع می‌باشد. در این پژوهش میزان مصالح مورد استفاده در هر بخش با استفاده از نقشه‌های سازه و معماری با انجام متره به کمک نرم افزار اکسل مشخص شد. پس از محاسبه میزان مصالح، وزن هر کدام با توجه به میزان چگالی هریک از آنها محاسبه شد. میزان کربن تولیدی به ازای واحد وزن مصالح نیز از پایگاه داده ICE استخراج شده است.

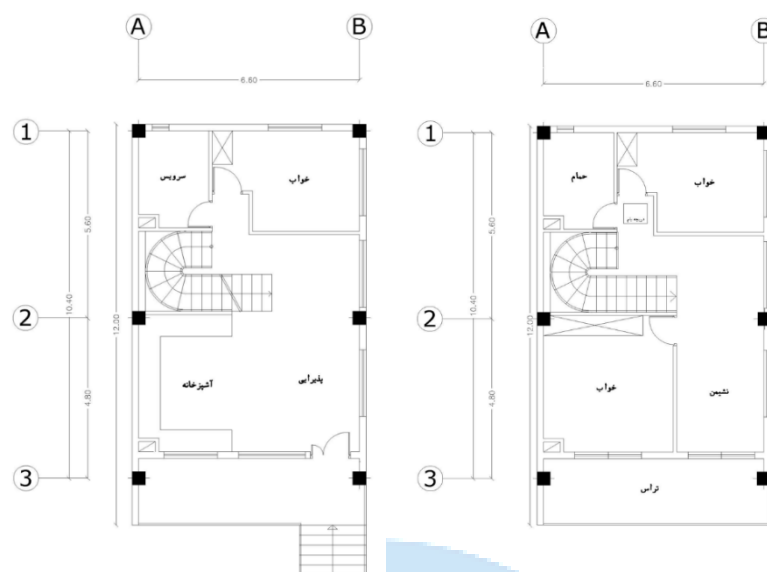
ساختمان‌سازی بیش از ۲۰۰ فعالیت عمده و ۵۰ نوع مصالح مختلف را در بر دارد. در نتیجه لازم است جهت ساده کردن مسأله، مصالح ساختمانی که در پژوهش‌های پیشین انتخاب شده [۱۸] و همچنین مصالحی ساختمانی که تأثیر به‌سزایی در ارزیابی زیست محیطی دارند [۲۸]، انتخاب شوند. این مصالح انتخابی در زمان اجرا در کنار یکدیگر یا دیگر مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مصالح مورد نظر شامل: (۱) سیمان، (۲) سنگدانه، (۳) بتن، (۴) فولاد، (۵) بلوک، (۶) آجر می‌باشند. سقف‌های مدنظر به جهت بررسی و مقایسه شامل: (۱) سقف تیرچه بلوک، (۲) سقف عرشه فولادی، (۳) سقف تیرچه کرومیت، (۴) سقف تیرچه پیش‌تنیده، (۵) سقف کامپوزیت، (۶) سقف وافل، (۷) سقف یوبوت، (۸) سقف اینتل دک می‌باشند.

۵- یافته‌های پژوهش

۵-۱- ساختمان مسکونی بتنی

ساختمان مسکونی دو طبقه بتنی با مساحت ۱۷۰/۹۸ مترمربع واقع در شهر بندرانزلی می‌باشد. پلان طبقه اول و دوم ساختمان بتنی در شکل ۱ آمده است. میزان انتشار کربن هریک از مصالح ساختمانی مورد استفاده در ساختمان بتنی، محاسبه و در جدول ۱ آورده شده است.

³⁰ Light Steel Frame (LSF)

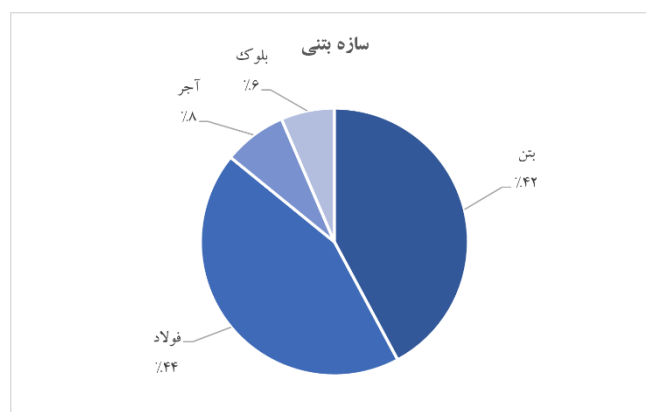


شکل ۱: پلان طبقه اول و دوم ساختمان بتنی.

جدول ۱: میزان انتشار کربن مصالح مورد استفاده برای ساختمان بتنی

نوع سازه	نوع سقف	مراحل ساخت	مصالح ساختمانی	میزان کل ماده (کیلوگرم)	کربن واحد (کیلوگرم کربن معادل)	میزان کربن (کیلوگرم)	کربن کل (کیلوگرم)	درهرمترمربع (کیلوگرم برمترمربع)
بتنی	تیرچه بلوک	اسکلت سازه	بتن	۱۸۸۹۹۸/۲	۰/۱۴۹	۲۸۱۶۰/۷۳	۵۷۳۵۷/۷۶	۳۳۵/۴۶
			فولاد	۱۰۵۷۸/۶۳	۲/۷۶	۲۹۱۹۷/۰۳		
			آجر	۲۳۹۸۸	۰/۲۱۳	۵۱۰۹/۴۴		
	دیوارچینی	بلوک سیمانی	۴۶۴۲۰	۰/۰۹۳	۴۳۱۷/۰۶	۹۴۲۶/۵	۵۵/۱۳	

با محاسبه مقادیر کربن تولیدی مصالح، میزان کربن تولیدی در هر بخش ساختمان مشخص گردید. با تقسیم این اعداد بر مساحت سازه میزان کربن واحد سطح نیز محاسبه شد. بر اساس این محاسبات، میزان کربن تولیدی مصالح اسکلت سازه ۵۷۳۵۷/۷۶ کیلوگرم و میزان کربن تولیدی در واحد سطح ۳۳۵/۴۶ کیلوگرم به ازای مترمربع ساختمان احداث شده می‌باشد. شکل ۲ سهم انتشار دی اکسید کربن به تفکیک هر یک از مصالح مصرفی در ساختمان با اسکلت بتنی را نشان داده شده است.

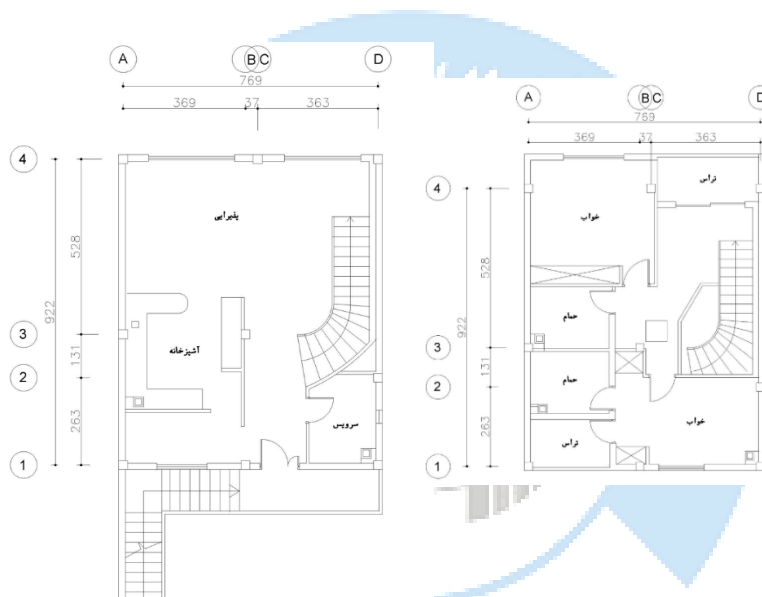


شکل ۲: سهم انتشار کربن هریک از مصالح مصرفی در ساختمان بتنی.

مشاهده می‌شود که مصالح سازه‌ای سهم بیشتری از کربن تولیدی را به خود اختصاص داده‌اند. میزان بتن مصرفی (از پی تا سقف) ۱۸۸۹۹۸/۲ کیلوگرم به دست آمد که این خود نشان دهنده تولید بالای کربن در این بخش است. فولاد یکی دیگر از مصالح سازه‌ای پرمصرف با کربن تولیدی در حدود ۴۴ درصد از کل کربن تولیدی را به خود اختصاص داده است. اما دیوارچینی با توجه به حجم کمتر مصالح، درصد کمتری کربن تولید می‌کند که این میزان در حدود ۱۴ درصد می‌باشد. به این ترتیب نتایج این بخش نشان داد که در حدود ۸۶ درصد از سهم کربن تولیدی در مصالح اسکلت سازه مربوط به بتن و فولاد است.

۲-۵- ساختمان مسکونی فلزی

ساختمان مسکونی دو طبقه فلزی با مساحت ۱۷۳/۹۶ مترمربع واقع در شهر بندرانزلی می‌باشد. پلان طبقه اول و دوم ساختمان فلزی در شکل ۳ آمده است. میزان انتشار کربن هریک از مصالح ساختمانی مورد استفاده در ساختمان فلزی، محاسبه و در جدول ۲ آورده شده است.

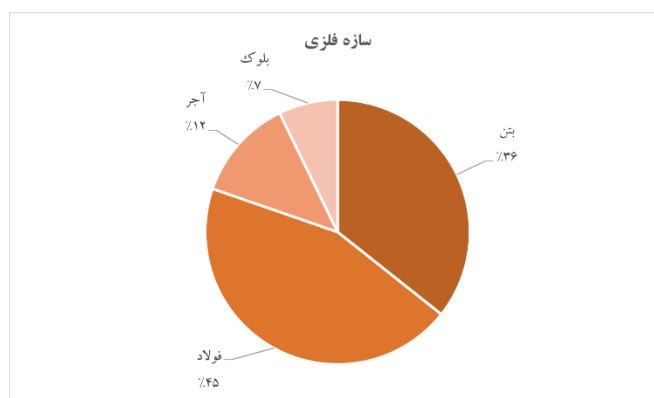


شکل ۳: پلان طبقه اول و دوم ساختمان فلزی.

جدول ۲: میزان انتشار کربن مصالح مورد استفاده برای ساختمان فلزی

نوع سازه	نوع سقف	مراحل ساخت	مصالح ساختمانی	میزان کل ماده (کیلوگرم)	کربن واحد (کیلوگرم کربن معادل)	میزان کربن (کیلوگرم)	کربن کل (کیلوگرم)	درهم‌ترمربع (برمترمربع)
فلزی	عرشه فولادی	اسکلت سازه	بتن	۹۶۹۳۶	۰/۱۴۹	۱۴۴۴۳/۴۶	۱۸۶/۸۹	۱۸۶/۸۹
			فولاد	۶۵۴۶/۸۵	۲/۷۶	۱۸۰۶۹/۳۱	۳۲۵۱۲/۷۷	۳۲۵۱۲/۷۷
فلزی	دیوارچینی	دیوارچینی	آجر	۲۳۷۰۶	۰/۲۱۳	۵۰۴۹/۳۸	۴۵/۸۴	۴۵/۸۴
			بلوک سیمانی	۳۱۴۶۰	۰/۰۹۳	۲۹۲۵/۷۸	۷۹۷۵/۱۶	۷۹۷۵/۱۶

با محاسبه مقادیر کربن تولیدی مصالح، میزان کربن تولیدی در هر بخش ساختمان مشخص گردید. با تقسیم این اعداد بر مساحت سازه میزان کربن واحد سطح نیز محاسبه شد. بر اساس این محاسبات، میزان کربن تولیدی مصالح اسکلت سازه ۳۲۵۱۲/۷۷ کیلوگرم و میزان کربن تولیدی در واحد سطح ۱۸۶/۸۹ کیلوگرم به ازای مترمربع ساختمان احداث شده می‌باشد. شکل ۴ سهم انتشار دی اکسید کربن به تفکیک هر یک از مصالح مصرفی در ساختمان با اسکلت فلزی را نشان داده شده است.



شکل ۴: سهم انتشار کربن هر یک از مصالح مصرفی در ساختمان فلزی.

مشاهده می‌شود که مصالح سازه‌ای سهم بیشتری از کربن تولیدی را به خود اختصاص داده‌اند. میزان بتن مصرفی (از پی تا سقف) ۹۶۹۳۶ کیلوگرم به دست آمد که این خود نشان دهنده تولید بالای کربن در این بخش است. فولاد یکی دیگر از مصالح سازه‌ای پرمصرف با کربن تولیدی در حدود ۴۵ درصد از کل کربن تولیدی را به خود اختصاص داده است. اما دیوارچینی با توجه به حجم کمتر مصالح، درصد کمتری کربن تولید می‌کند که این میزان در حدود ۱۹ درصد می‌باشد. به این ترتیب نتایج این بخش نشان داد که در حدود ۸۱ درصد از سهم کربن تولیدی در مصالح اسکلت سازه مربوط به بتن و فولاد است. با مقایسه کربن مصالح سازه‌ای در نمونه‌ی بتنی ملاحظه شده است که میزان کربن تولیدی در یک سازه بتنی به علت مصرف بالای سیمان و بتن بیشتر از سازه فولادی است و این میزان در حدود ۱۴۸/۵۷ کیلوگرم در مترمربع و حدود ۴۴ درصد می‌باشد.

۳-۵ - ساختمان مسکونی LSF

ساختمان مسکونی دو طبقه LSF با مساحت ۱۷۴ مترمربع واقع در شهر بندرکیش می‌باشد. پلان طبقه اول و دوم ساختمان LSF در شکل ۵ آمده است. میزان انتشار کربن هر یک از مصالح ساختمانی مورد استفاده در ساختمان LSF، محاسبه و در جدول ۳ آورده شده است.

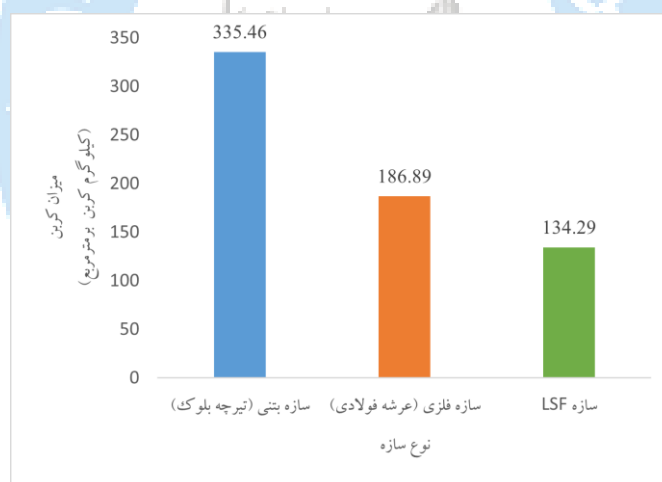


شکل ۵: پلان طبقه اول و دوم ساختمان LSF.

جدول 3: میزان انتشار کربن مصالح مورد استفاده برای ساختمان LSF

نوع سازه	مراحل ساخت	مصالح ساختمانی	میزان کل ماده (کیلوگرم)	کربن واحد (کیلوگرم کربن معادل)	میزان کربن (کیلوگرم)	کربن کل در هر مترمربع (کیلوگرم)	کربن بر مترمربع (بر مترمربع)
LSF	اسکلت سازه	بتن پی فولاد پی	۶۹۱۲۰ ۸۲۱/۲	۰/۱۴۹ ۲/۷۶	۱۰۲۹۸/۹ ۲۲۶۶/۵۱	۲۳۳۶۷/۱۱	۱۳۴/۲۹
	فولاد سازه	فولاد سازه	۳۹۵۶/۶۶	۲/۷۳	۱۰۸۰۱/۷	۵۳۴	۳/۰۷
	دیوارچینی	بلوک سیمانی پی	۵۷۴۲	۰/۰۹۳	۵۳۴	۵۳۴	۳/۰۷

با محاسبه مقادیر کربن تولیدی مصالح، میزان کربن تولیدی در هر بخش ساختمان مشخص گردید. با تقسیم این اعداد بر مساحت سازه میزان کربن واحد سطح نیز محاسبه شد. بر اساس این محاسبات، میزان کربن تولیدی مصالح اسکلت سازه ۲۳۳۶۷/۱۱ کیلوگرم می‌باشد و میزان کربن تولیدی در واحد سطح ۱۳۴/۲۹ کیلوگرم به ازای مترمربع ساختمان احداث شده می‌باشد. مقایسه میزان کربن تولیدی در سه ساختمان مورد مطالعه در شکل ۶ آورده شده است.

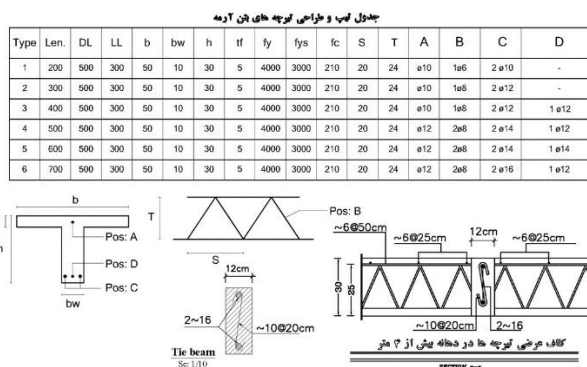


شکل ۶: مقایسه میزان کربن تولیدی در سه سازه مورد مطالعه.

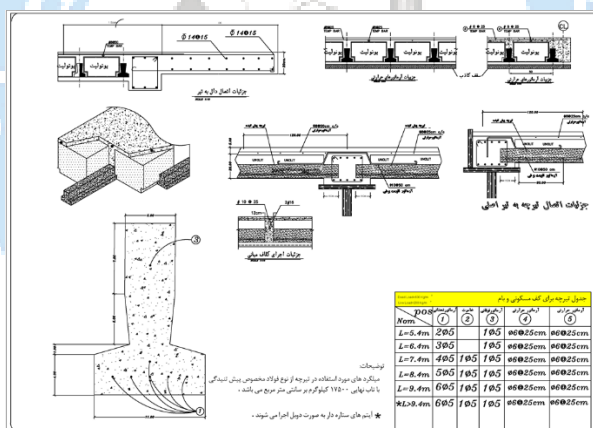
در محاسبه میزان کربن تولیدی در سه ساختمان مورد مطالعه مشاهده شده است که بیشترین انتشار کربن مربوط به ساخت سازه بتنی با سقف تیرچه بلوک به میزان ۳۳۵/۴۶ کیلوگرم بر مترمربع و کمترین انتشار کربن مربوط به ساخت سازه LSF به میزان ۱۳۴/۲۹ کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد. میزان کربن تولیدی در ساخت سازه LSF در مقایسه با سازه بتنی با سقف تیرچه بلوک در حدود ۲۰۱ کیلوگرم بر مترمربع و حدود ۶۰ درصد کاهش و در مقایسه با سازه فلزی با سقف عرشه فولادی در حدود ۵۲ کیلوگرم بر مترمربع و حدود ۲۸ درصد کاهش یافته است. مصرف بالای سیمان و بتن در ساختمان‌های با اسکلت بتنی، دلیل میزان بالای کربن برای این ساختمان‌ها بوده و نشان داد تعداد بسیار زیاد ساختمان‌های بتنی ساخته شده در مجموع می‌توانند برای محیط زیست بسیار مخرب و تشدید کننده مشکلات گرمایش جهانی زمین باشند.

۴-۵ - مقایسه سقف ها در ساختمان بتنی

ساختمان مسکونی دو طبقه بتنی با مساحت ۱۷۰/۹۸ مترمربع واقع در شهر بندرانزلی می باشد. دتایل سقف تیرچه بلوک و تیرچه پیش تنیده در شکل ۷ و ۸ آمده است. میزان انتشار کربن هر یک از مصالح انواع سقف در ساختمان بتنی، محاسبه و در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۷: دتایل سقف تیرچه بلوک.



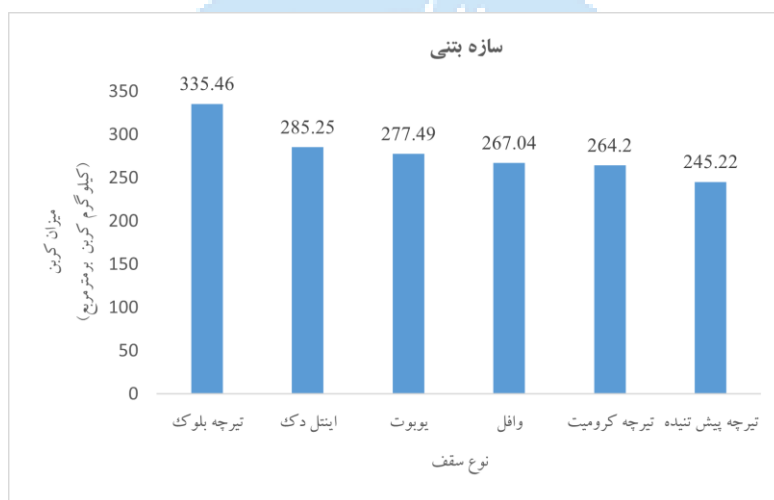
شکل ۸: دتایل سقف تیرچه پیش تنیده.

جدول ۴: میزان انتشار کربن مصالح انواع سقف برای ساختمان بتنی

نوع سازه	انواع سقف	مصالح ساختمانی	میزان کل ماده (کیلوگرم)	کربن واحد (کیلوگرم کربن معادل)	میزان کربن (کیلوگرم)	کربن کل (کیلوگرم)	نوع سازه
بتنی	تیرچه بلوک	بتن	۱۸۸۹۹۸/۲	۰/۱۴۹	۲۸۱۶۰/۷۳	۳۳۵/۴۶	بتنی
		فولاد	۱۰۵۷۸/۶۳	۲/۷۶	۲۹۱۳۷/۰۳	۵۷۳۵۷/۷۶	
	اینتل دک	بتن	۱۸۱۵۸۲/۲	۰/۱۴۹	۲۷۰۵۵/۷۵	۲۸۵/۲۵	

		۲۱۷۱۶/۶	۲/۷۶	۷۸۶۸/۳۳	فولاد	
		۲۵۱۵۶/۸۹	۰/۱۴۹	۱۶۸۸۳/۸۲	بتن	یوبوت
۲۷۷/۴۹	۴۷۴۴۶/۴۴	۲۲۲۸۹/۵۵	۲/۷۶	۸۰۷۵/۹۲۴	فولاد	
		۲۶۰۷۹/۵	۰/۱۴۹	۱۷۵۰۳۰/۲	بتن	وافل
۲۶۷/۰۴	۴۵۶۵۸/۶۷	۱۹۵۷۹/۱۷	۲/۷۶	۷۰۹۳/۹۰	فولاد	
		۲۲۱۷۴/۵۱	۰/۱۴۹	۱۴۸۸۲/۲	بتن	تیرچه کرومیت
۲۶۴/۲	۴۵۱۷۳/۸۲	۲۲۹۹۹/۳۱	۲/۷۶	۸۳۳۳/۰۸	فولاد	
		۲۳۶۳۷/۰۹	۰/۱۴۹	۱۵۸۶۳/۸۲	بتن	تیرچه پیش تنیده
۲۴۵/۲۲	۴۱۹۲۷/۱۸	۱۸۲۹۰/۰۹	۲/۷۶	۶۶۲۶/۸۴	فولاد	

با محاسبه مقادیر کربن تولیدی مصالح انواع سقف، میزان کربن تولیدی در هر سقف ساختمان مشخص گردید. با تقسیم این اعداد بر مساحت سازه میزان کربن واحد سطح نیز محاسبه شد. بر اساس این محاسبات، بیشترین انتشار کربن مربوط به ساخت سازه بتنی با سقف تیرچه بلوک به میزان ۳۳۵/۴۶ کیلوگرم بر مترمربع و کمترین انتشار کربن مربوط به ساخت سازه بتنی با سقف تیرچه پیش تنیده به میزان ۲۴۵/۲۲ کیلوگرم بر مترمربع می باشد. مقایسه میزان کربن تولیدی انواع سقف در سازه بتنی در شکل ۹ آورده شده است.



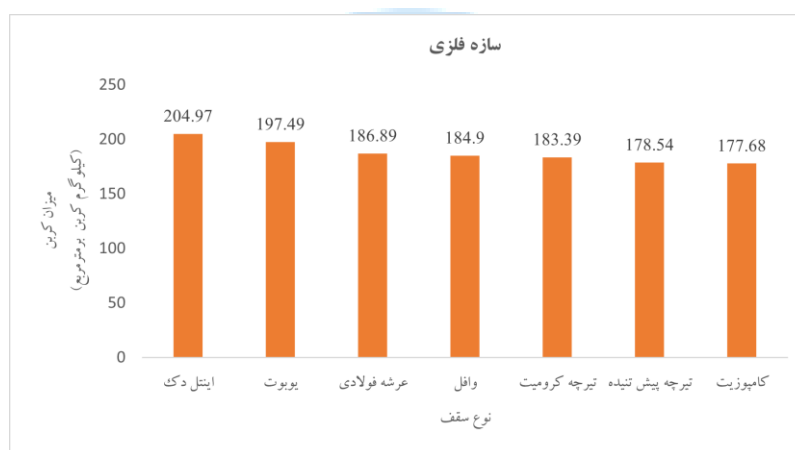
شکل ۹: مقایسه میزان کربن تولیدی انواع سقف در سازه بتنی.

۵-۵- مقایسه سقف ها در ساختمان فلزی

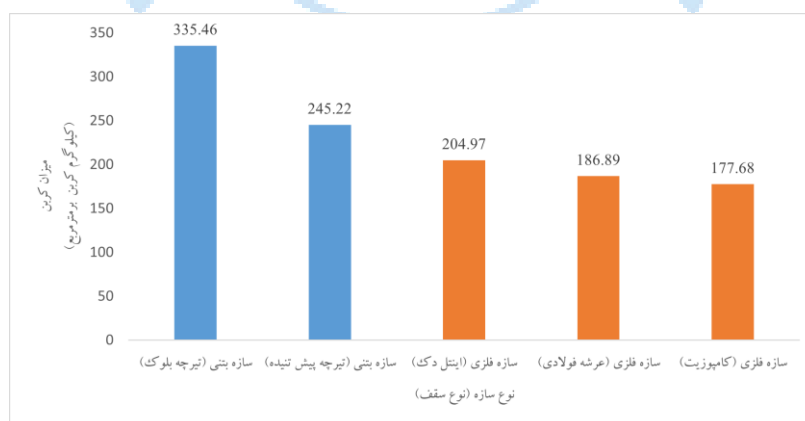
ساختمان مسکونی دو طبقه فلزی با مساحت ۱۷۳/۹۶ مترمربع واقع در شهر بندرانزلی می باشد. دتایل سقف عرشه فولادی و کامپوزیت در شکل ۱۰ و ۱۱ آمده است. میزان انتشار کربن هریک از مصالح انواع سقف در ساختمان فلزی، محاسبه و در جدول ۵ آورده شده است.

۱۸۳/۳۹	۳۱۹۰۳/۳۶	۱۴۶۰۷/۹۶	۰/۱۴۹	۹۸۰۴۰	بتن	تیرچه کرومیت
		۱۷۲۹۵/۴	۲/۷۶	۶۲۶۶/۴۵	فولاد	
۱۷۸/۵۴	۳۱۰۵۸/۷۸	۱۷۹۰۵/۰۳	۰/۱۴۹	۱۲۰۱۶۸	بتن	تیرچه پیش تنیده
		۱۳۱۵۳/۷۵	۲/۷۶	۴۷۶۵/۸۵	فولاد	
۱۷۷/۶۸	۳۰۹۰۹/۳۱	۱۶۳۸۸/۸۱	۰/۱۴۹	۱۰۹۹۹۲	بتن	کامپوزیت
		۱۴۵۲۰/۵	۲/۷۶	۵۲۶۱/۰۵	فولاد	

با محاسبه مقادیر کربن تولیدی مصالح انواع سقف، میزان کربن تولیدی در هر سقف ساختمان مشخص گردید. با تقسیم این اعداد بر مساحت سازه میزان کربن واحد سطح نیز محاسبه شد. بر اساس این محاسبات، بیشترین انتشار کربن مربوط به ساخت سازه فلزی با سقف اینتل دک به میزان ۲۰۴/۹۷ کیلوگرم بر مترمربع و کمترین انتشار کربن مربوط به ساخت سازه فلزی با سقف کامپوزیت به میزان ۱۷۷/۶۸ کیلوگرم بر مترمربع می باشد. مقایسه میزان کربن تولیدی انواع سقف در سازه فلزی در شکل ۱۲ آورده شده است. مقایسه میزان کربن تولید شده انواع سقف در سازه بتنی و فلزی در شکل ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۲: مقایسه میزان کربن تولیدی انواع سقف در سازه فلزی.



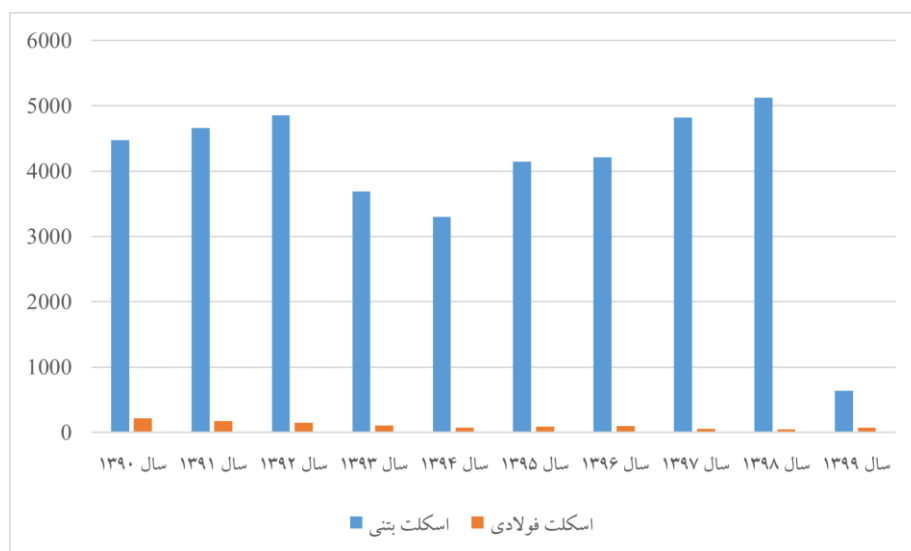
شکل ۱۳: مقایسه میزان کربن تولید شده انواع سقف در سازه بتنی و فلزی.

در محاسبه میزان کربن تولیدی انواع سقف در ساختمان بتنی مشاهده شده است که میزان کربن تولیدی در ساخت سازه بتنی با سقف تیرچه پیش تنیده در مقایسه با سقف تیرچه بلوک در حدود ۹۰ کیلوگرم بر مترمربع و حدود ۲۷ درصد کاهش یافته است. در محاسبه میزان کربن تولیدی انواع سقف در ساختمان فلزی مشاهده شده است که میزان کربن تولیدی در ساخت سازه فلزی با سقف کامپوزیت در

مقایسه با سقف اینتل دک در حدود ۲۷ کیلوگرم بر مترمربع و حدود ۱۳ درصد کاهش و در مقایسه با سقف عرشه فولادی در حدود ۹ کیلوگرم بر مترمربع و حدود ۵ درصد کاهش یافته است.

۵-۶- آمار ساختمان‌های بتنی و فولادی کشور

بر اساس سرشماری مرکز آمار ایران، مقایسه تعداد ساختمان‌های ساخته شده با اسکلت بتنی و فلزی استان گیلان از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ در شکل ۱۴ و مجموع آن‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۴: مقایسه تعداد ساختمان‌های اسکلت بتنی و فولادی استان گیلان [۲۹].

جدول ۶: مجموع تعداد ساختمان‌های اسکلت بتنی و فولادی استان گیلان از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ [۲۹]

نوع سازه	تعداد ساختمان‌ها	درصد
اسکلت بتنی	۳۹۹۴۱	۹۷
اسکلت فلزی	۱۰۸۴	۳
کل	۴۱۰۲۵	۱۰۰

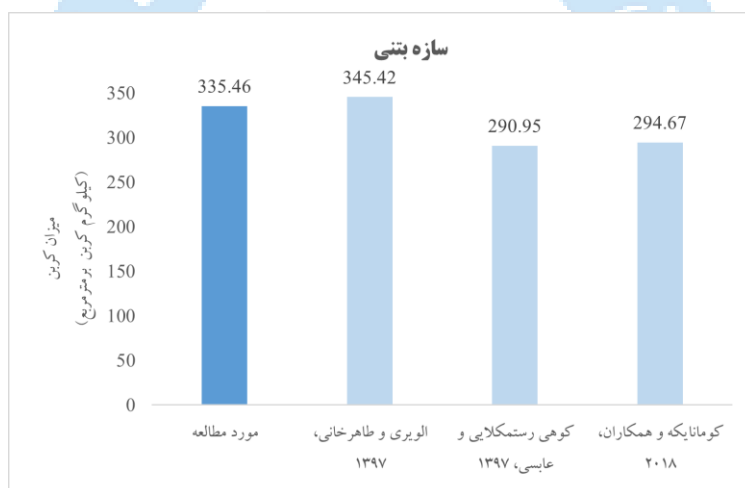
۶- نتایج و بحث

از مقایسه نتایج به دست آمده در این پژوهش با دیگر پژوهش‌های مرتبط با موضوع مورد نظر می‌توان نتیجه گرفت که اعداد و ارقام به دست آمده از این مطالعه به دور از نتایج پژوهش‌های پیشین نیست. همانطور که در شکل ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. در این مطالعه علاوه بر ساختمان بتنی و فلزی ساختمان LSF نیز بررسی شده است که نتایج نشان می‌دهد میزان کربن تولیدی در ساخت سازه LSF در مقایسه با سازه بتنی در حدود ۶۰ درصد کاهش و در مقایسه با سازه فولادی در حدود ۲۸ درصد کاهش یافته است. همچنین تأثیر جایگزینی انواع سقف در میزان کاهش کربن برای ساختمان بتنی و فلزی مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج نشان می‌دهد میزان کربن تولیدی در ساخت سازه بتنی با سقف تیرچه پیش تنیده در مقایسه با سقف تیرچه بلوک در حدود ۲۷ درصد کاهش و میزان کربن تولیدی در ساخت سازه فلزی با سقف کامپوزیت در مقایسه با سقف عرشه فولادی در حدود ۵ درصد کاهش یافته است.

الویری و طاهرخانی در پژوهشی در سال ۱۳۹۷ به مقایسه میزان انرژی نهفته و کربن نهفته^{۳۱} ساختمان‌های مرسوم و سنتی مناطق کویری ایران (نمونه موردی خانه احرامیان پور-یزد) پرداخته‌اند. با توجه به تحلیل انجام‌شده، ساختمان سنتی دارای ۲۶۳/۴۲ کیلوگرم کربن در هر مترمربع می‌باشد؛ این در حالی است که این مقادیر برای ساختمان بتنی برابر ۵۹۹/۹۴ کیلوگرم کربن (و به ازای مصالح سازه ای ۳۴۵/۴۲ کیلوگرم کربن بر مترمربع) به دست آمد. در پایان با بررسی نقاط قوت و ضعف سازه‌های بتنی در جدول سوات^{۳۲} استراتژی تلفیق سیستم سازه‌های سنتی و بتنی برای بافت تاریخی ارائه گردید که مقدار ۳۶۳/۶۸ کیلوگرم کربن برای این سیستم سازه‌ای به دست آمد [۲۸].

کوهی رستمکلائی و عابسی تحقیقی با موضوع عملکرد اکولوژیکی ساختمان سبز در اقلیم مازندران انجام دادند. براساس محاسبات انجام شده میزان کربن تولیدی در مرحله ساخت برای واحد سطح ساختمان با اسکلت بتنی ۴۶۳/۵۵ کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد و به ازای مصالح سازه ای ۲۹۰/۹۵ به دست آمد. میزان کربن تولیدی برای ساختمان با اسکلت فولادی به ازای مصالح مربوط به سازه ۲۸۳/۹۶ کیلوگرم بر متر مربع است. بررسی مقایسه بیانگر آن است که میزان کربن تولیدی برای ساخت یک سازه بتنی بیشتر از سازه فولادی است. در محاسبه ردپای آب نیز در سازه فولادی میزان آب مصرفی در مصالح سازه ای ساختمان فولادی حدود ۱۸ درصد کمتر از ساختمان بتنی بوده است. همچنین در مقایسه با دو سازه ویلایی و بلندمرتبه نیز نتایج مشابهی مشاهده شده است [۳۰].

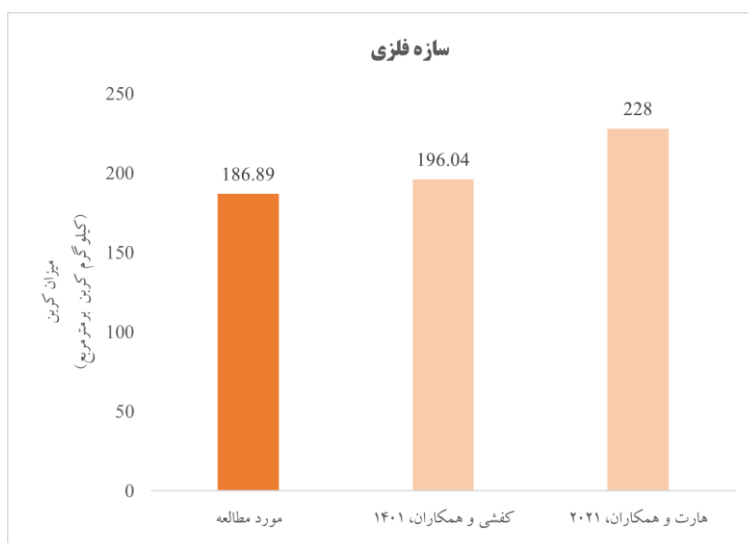
تحقیقی درباره کربن نهفته در ساختمان‌های چند طبقه: سازه‌های فولادی، بتنی و چوبی صورت گرفت. نتایج مربوط به کربن نهفته با مقادیر متوسط برای اسکلت چوبی، اسکلت بتنی و اسکلت فولادی به ترتیب برابر ۱۱۹، ۱۸۵ و ۲۲۸ کیلوگرم کربن بر مترمربع است [۳۱].



شکل ۱۵: مقایسه نتایج پژوهش با دیگر پژوهش‌ها در سازه بتنی.

³¹ Embodied Carbon

³² SWOT



شکل ۱۶: مقایسه نتایج پژوهش با دیگر پژوهش‌ها در سازه فلزی.

۷- نتیجه گیری

باتوجه به یافته‌های بدست آمده از این پژوهش نتایج نشان می‌دهد:

۱- در محاسبه میزان کربن تولیدی سه ساختمان بتنی، فولادی و LSF مشاهده شده است که میزان کربن تولیدی در ساخت سازه LSF در مقایسه با سازه بتنی با سقف تیرچه بلوک در حدود ۲۰۱ کیلوگرم بر مترمربع و حدود ۶۰ درصد کاهش و در مقایسه با سازه فلزی با سقف عرشه فولادی در حدود ۵۲ کیلوگرم بر مترمربع و حدود ۲۸ درصد کاهش یافته است. سه سازه مختلف در ساخت ساختمان‌های کوتاه مرتبه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داد ساختمان LSF بهترین انتخاب است چون انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتری نسبت به سایر سیستم‌های سازه‌ای دارد. بنابراین به عنوان یک سیاست جدید برای ایران در توسعه پایدار ساختمان‌سازی پیشنهاد می‌شود.

۲- در محاسبه میزان کربن تولیدی انواع سقف در ساختمان بتنی مشاهده شده است که میزان کربن تولیدی در ساخت سازه بتنی با سقف تیرچه پیش تنیده در مقایسه با سقف تیرچه بلوک در حدود ۹۰ کیلوگرم بر مترمربع و حدود ۲۷ درصد کاهش یافته است.

۳- در محاسبه میزان کربن تولیدی انواع سقف در ساختمان فلزی مشاهده شده است که میزان کربن تولیدی در ساخت سازه فلزی با سقف کامپوزیت در مقایسه با سقف اینتل دک در حدود ۲۷ کیلوگرم بر مترمربع و حدود ۱۳ درصد کاهش و در مقایسه با سقف عرشه فولادی در حدود ۹ کیلوگرم بر مترمربع و حدود ۵ درصد کاهش یافته است.

موارد زیر به عنوان خلاءهای تحقیقاتی به پژوهشگران آینده پیشنهاد می‌شود:

- ۱- ارزیابی تأثیر استفاده از تکنولوژی‌های جدید و پیشرفته ساختمان‌سازی مانند ساختمان‌های با فناوری چاپ سه‌بعدی^{۳۳}، ساختمان‌های با اسکلت ICF^{۳۴} و پانل (دیوار)های پیش ساخته سه‌بعدی^{۳۵} بر کاهش مصرف انرژی و کربن.
- ۲- ارزیابی تأثیر استفاده از مواد پوزولانی در بتن در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای.

³³ Construction 3D Printing

³⁴ Insulating Concrete Formwork (ICF)

³⁵ 3D Panel

۳- بررسی تأثیر سیاست‌های حمایتی بر ساخت ساختمان‌های پایدار مانند تسهیلات مالی، میزان سرمایه‌گذاری‌ها و نقش اقتصادی این فعالیت‌ها در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای.

مراجع

- [1] Anjomshoa, E., Tabatabaei Mirhosseini, R. (2023). Identify and ranking of effective factors in changing urban infrastructure for a carbon-free and sustainable future. *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 22-45.
- [2] Isfat, M., Raihan, A. (2022). Current practices, challenges, and future directions of climate change adaptation in Bangladesh. *International Journal of Research Publication and Reviews*, vol. 2582, p. 7421.
- [3] Rahman, S., Ali, A., Raihan, A. (2022). Soil carbon sequestration in agroforestry systems as a mitigation strategy of climate change: a case study from Dinajpur, Bangladesh. *Advances in Environmental and Engineering Research*, vol. 3, no. 4, pp. 1-13.
- [4] Abdel-Gawwad, H.A., Rashad, A. M., Heikal, M. (2019). Sustainable utilization of pretreated concrete waste in the production of one-part alkali-activated cement. *Journal of cleaner production*, vol. 232, pp. 318-328.
- [5] Lenton, T. M., et al. (2019). Climate tipping points—too risky to bet against. *Nature*, vol. 575, no. 7784, pp. 592-595.
- [6] Raihan, A., Tuspekova, A. (2022). The nexus between economic growth, renewable energy use, agricultural land expansion, and carbon emissions: New insights from Peru. *Energy Nexus*, vol. 6, p. 100067.
- [7] Afshari Nezhad Roudsari, M., et al. (2023). A Review of Green Buildings Investment. *13th International Congress on Civil Engineering*. Iran University of Science and Technology.
- [8] Talebipour, K., Mirvalad, S. S. (2020). *Comprehensive framework based on building information modeling system in order to optimize energy costs (latent and operational) in the course of conceptual design of construction projects*. Master's thesis. Iran University of Science and Technology.
- [9] Movaghar, Z., Taherkhani, R., Banihashemi, S. (2020). *Evaluation and comparison of the amount of carbon hidden in the reconstruction of an educational building with different building materials, based on the integration of building information modeling technology and sustainable development*. Master's thesis. Imam Khomeini International University.
- [10] Shin, B., Kim, S. (2022). CO2 emission and construction cost reduction effect in cases of recycled aggregate utilized for nonstructural building materials in South Korea. *Journal of Cleaner Production*, vol. 360, p. 131962.
- [11] Robles, J. F. V., Picó, E. C., Hosseini, S. A. (2022). Environmental performance assessment: A comparison and improvement of three existing social housing projects. *Cleaner Environmental Systems*, vol. 5, p. 100077.
- [12] Crippa, M., et al. (2021). *GHG emissions of all world countries*. Publications Office of the European Union.
- [13] Peng, C. (2016). Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling. *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 453-465.
- [14] Chou, J. S., Yeh, K. C. (2015). Life cycle carbon dioxide emissions simulation and environmental cost analysis for building construction. *Journal of Cleaner production*, vol. 101, pp. 137-147.
- [15] Abolhasani, N., et al. (2021). *Developing a decision-making framework for low-carbon building design in Iran*, Ph.D. dissertation, Tehran University of Art, Tehran.
- [16] Golzadeh, P., Ramzaniannpour, A. M. (2015). Investigating the role of building walls in energy consumption and carbon dioxide emissions using the life cycle assessment method. *3rd International Congress On Civil Engineering, Architecture & Urban Development*. Shahid Beheshti University.
- [17] Shokohian, M., Fatehi Tarshiz, M., Rahimi, E. (2017). Evaluation of carbon footprint in construction, case study: Project of Imam Ali Welfare Educational Center No. 2, Farhangian, Mashhad. *13th International Conference on Modern Research in Civil Engineering, Architecture, Urban Management and Environment*. Tehran.

- [18] Yar Ahmadi, S., Hossein Alipour, M., Hafezi, M. R. (2019). *Calculating the amount of carbon dioxide emissions in the construction phase of construction projects and providing a solution to reduce crane dioxide pollution*. Master's thesis. Shahid Beheshti University.
- [19] Kumanayake, R., Luo, H., Paulusz, N. (2018). Assessment of material related embodied carbon of an office building in Sri Lanka. *Energy and Buildings*, vol. 166, pp. 250-257.
- [20] Lu, K., et al. (2019). Development of a carbon emissions analysis framework using building information modeling and life cycle assessment for the construction of hospital projects. *Sustainability*, vol. 11, no. 22, p. 6274.
- [21] Berki, E., et al. (2020). *Assessment on carbon footprint of steel frames for building structures*. Master's thesis. Aalto University.
- [22] Kafshi, M., Sadeghpourhaji, M., Khorasani, M. (2022). Investigating the amount of carbon dioxide reduction through the correct selection of materials in residential buildings. *8th International Conference on Interdisciplinary Researches in Civil Engineering, Architecture and Urban Management in 21st Century*. Tehran.
- [23] Liu, K., Leng, J. (2022). Quantitative research on embodied carbon emissions in the design stage: A case study from an educational building in China. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 1182-1192.
- [24] Hosseinian, S. M., Sabouri Ghochan Atiq, A., Karimipour, M. (2023). Analysis of blue and grey water footprint in the construction of vernacular structures with a focus on different climatic regions of Iran: A comparative study, *Civil Engineering Sharif*, vol. 39, no. 4.
- [25] Jahani, M. j., Hosseinian, S. M. (2023). *Investigation of the Effect of Relative Earthquake Risk and Soil Type on the Carbon Footprint of High-Rise Buildings*, Master's thesis, Bu-Ali Sina University, Hamedan.
- [26] Greene, J. M., et al. (2023). Whole life embodied emissions and net-zero emissions potential for a mid-rise office building constructed with mass timber. *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 35, p. e00528.
- [27] Seyedabadi, M. R., et al. (2024). Global building life cycle assessment: Comparative study of steel and concrete frames across European Union, USA, Canada, and Australia building codes. *Energy and Buildings*, vol. 304, p. 113875.
- [28] Alviri, M., Taherkhani, A. (2018). *Comparison of embodied energy and embodied carbon in conventional and traditional buildings in desert regions of Iran (Case Study: Ahramianpour House, Yazd)*, Master's thesis, Alborz University, Qazvin.
- [29] Jolayan, A., Bahraini, A. (2021). Investigation of the number of steel-frame buildings compared to concrete-frame buildings from 2011 to 2020, *1st National Conference on Civil Engineering, Architecture, Urban Planning, Environment, and Related Sciences*, kerman, Iran.
- [30] Rostamkolai, M., Abesi, A. (2018). *Ecological Performance of Green Buildings in the Mazandaran Climate*, Master's thesis, Noshirvani University of Technology, Babol.
- [31] Hart, J., et al. (2021). Whole-life embodied carbon in multistory buildings: Steel, concrete and timber structures, *Journal of Industrial Ecology*, vol. 25, no. 2, pp. 403-418.