Journal of Structural and Construction Engineering, 10(6), 2023, pp. 170-185

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

energy and carbon footprint in Vila The comparative evaluation of per capita houses and apartment buildings using computer modeling and its validation with field data

Fatemeh Esfandyari [1], Ozeair Abessi [2]*, Mahtab Koohi [3]

1- M.Sc. School of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
2- Assistant Professor, School of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
3- M.Sc. Student, School of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

Building and their related activities are important sources of environmental pollutants, regarding the fact that during the process of building and materials manufacturing a considerable amount of carbon is produced and disposed to the atmosphere. Virtual carbon footprint related to this industry is not confined to the process of building and manufacturing, it actually includes the operation time and dismantling too. In this study, the per capita energy consumption and the carbon footprint of three buildings in Mazandaran province during one year of operation have been estimated and compared with each other. So, a house, two-story, and five-story apartments with the same structure in Babolsar have been modeled in Design-Builder, and energy consumption and carbon footprint during one year of operation have been assessed comparatively. The results of modeling indicate that along the one-year operation of the house, two-story and five-story apartments, 8490, 4878, and 4881kg carbon (kg per occupant) have been produced and released into the atmosphere. Furthermore, the per capita, energy consumption of the house has been estimated more than those of apartments significantly, and this fact illustrates a vast difference between the detrimental effects of houses and those of apartments during operation time on the environment.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Receive Date: 30 July 2022
Revise Date: 30 October 2022
Accept Date: 19 November 2022

Keywords:
Carbon footprint
Green building
Modelling
Energy consumption
Concrete structures

doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2022.350016.2865

*Corresponding author: Ozeair Abessi.
Email address: Oabessi@nit.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

بررسی مقایسه‌ای سرانه مصرف انرژی و ردپای کربن در ساختمان‌های ویلایی و آپارتمانی از طریق مدلسازی کامپیوتری و اعتبارسنجی آن با داده‌های میدانی

فاطمه اسفندیار[۱]، عزیر عابسی[۲*]، مهتاب کوهی[۳]

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

چکیده

ساختمان‌سازی و فعالیت‌های وابسته نقش بسزایی در ورود گازهای گلخانه به جو زمین دارند و همه ساله مقدار قابل توجهی کربن در نتیجه فرایندهای ساخت و ساز و تامین مصالح تولید و وارد محیط زیست می‌گردد. ردپای کربن صنعت ساختمان تنها به فرآیند ساخت و تهیه مصالح ساختمانی محدود نبوده و طول مدت بهره‌برداری و حتی بعد از آن را نیز در برمی‌گیرد. در این پژوهش سعی شده تا برآوردی از سرانه مصرف انرژی و ردپای کربن در طول مدت بهره‌برداری از ساختمان‌های ویلایی و آپارتمانی برای اقلیم مازندران ارائه شده و مورد بررسی مقایسه ای قرار گیرد. سه ساختمان ویلایی و آپارتمانی دو و پنج طبقه با ساختاری مشابه در شهرستان بابلسر انتخاب و از طریق مدلسازی کامپیوتری فرایند بهره‌برداری در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، از منظر مصرف انرژی و ردپای کربن تولیدی در طول یک سال به صورت مقایسه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج مدلسازی‌ها نشان می‌دهد که در طول یک سال بهره‌برداری، به ترتیب ۸۴۹۰، ۴۸۷۸ و ۴۸۸۱ کیلوگرم کربن به ازای هر فرد ساکن در ساختمان ویلایی و آپارتمانی ۲ و ۵ طبقه تولید و وارد اتمسفر می شود. همچنین سرانه مصرف انرژی در ساختمان ویلایی به طور چشمگیری بیشتر از مقدار آن در ساختمان‌های آپارتمانی برآورد شده و این موضوع تفاوت قابل ملاحظه در پیامدهای محیط زیست ناشی از بهره‌برداری از ساختمان‌های ویلایی در مقایسه با ساختمان‌های مسکونی با ساختار متراکم را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: ردپای کربن، ساخت و ساز سبز، مدلسازی، مصرف انرژی، ساختمان بتنی

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۴۰۱/۰۵/۰۸	۱۴۰۱/۰۸/۰۸	۱۴۰۱/۰۸/۲۸	۱۴۰۱/۰۸/۲۸	۱۴۰۲/۰۶/۳۱	doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2022.350016.2865
					10.22065/jsce.2022.350016.2865

*نویسنده مسئول: عزیر عابسی

پست الکترونیکی: Oabessi@nit.ac.ir

۱- مقدمه

افزایش جمعیت و توسعه فعالیت‌های انسان، سبب افزایش آلودگی محیط زیست و ورود گازهای گلخانه‌ای به جو زمین شده و این موضوع، موجب گرمایش زمین در ابعاد کل سیاره زمین شده است. بیشتر مردم مهم‌ترین عامل آلودگی محیط‌زیست را دود و پساب ناشی از فعالیت خوردها و صنایع می‌دانند، درحالی‌که ساختمان‌سازی و صنایع وابسته به آن جزء اصلی‌ترین صنایع پرمصرف و آلوده‌کننده محیط زیست در دنیا شناخته می‌شوند. در واقع آلودگی‌های ناشی از سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها از آنچه به عنوان نمونه، صنعت خودرو مسبب آن شده، بسیار فراتر می‌رود، چراکه بهره‌برداری از ساختمان‌های مسکونی و تجاری همه ساله سهم عظیمی از منابع انرژی مصرفی انسان را به خود اختصاص می‌دهد. سازمان اطلاعات انرژی ایالات متحده امریکا (USEPA[1]) گزارش نموده است که به ترتیب ۲۱ و ۱۸ درصد از کل مصرف انرژی کشور امریکا در سال ۲۰۱۹ به بخش‌های مسکونی و تجاری این کشور اختصاص یافته است. برآوردها نشان داده که در این سال در ساختمان‌های مسکونی، سرمایش و گرمایش جمعا ۴۴/۹ درصد، تامین نور ساختمان ۳/۹ درصد، گرمایش آب، یخچال و فریز و خشکن‌ها جمعا ۱۰/۳ درصد، کامپیوتر و وسایل الکترونیکی ۴/۱ درصد و سایر موارد ۲۵/۵ درصد مصرف انرژی ساختمان را به خود اختصاص داده است [۱]. مصرف این میزان انرژی به تولید حجم بسیار زیادی از انواع گازهای گلخانه‌ای مخصوصا دی اکسید کربن منجر خواهد شد. تولید آلاینده‌های محیط زیستی برای یک ساختمان مشخص با هر عملکردی، چه در زمان ساخت و چه در شرایط بهره‌برداری و در نهایت اتمام عمر ساختمان و تخریب آن، همواره به عنوان یک چالش محیط زیستی عمده مطرح بوده است. از این‌رو طراحی، ساخت و بهره‌برداری از ساختمان‌های سبز با هدف کاهش آلایندگی آن بر محیط زیست همواره از اهم فصول تعریف شده در مباحث توسعه پایدار شهرها محسوب گردیده است[۲].

تاثیر ساختمان‌سازی به عنوان یک اقدام مخرب برای محیط زیست را مانند سایر فعالیت‌های انسانی، با سنجش ردپاهای اکولوژیکی آن می‌توان مورد ارزیابی قرار داد. نخستین بار ماتیس واکرناگل و ویلیام ریز (۱۹۹۵) در کتاب "ردپای اکولوژیکی ما: کاهش تأثیر انسان بر زمین" اصطلاح Ecological Footprint را معرفی نموده اند. از منظر این دو اندیشمند، هر واحد انسانی (اعم از فرد، شهر و یا کشور) تأثیری بر محیط زیست زمین به دنبال خواهد داشت، چراکه این تولیدات و خدمات طبیعت را مورد استفاده قرار می‌دهند و تأثیر اکولوژیکی آنها برابر با مقدار طبیعتی است که آنها برای تداوم زندگی اشغال کرده‌اند[۳]. به این ترتیب در سال‌های اخیر برآورد ردپای اکولوژیکی به عنوان یک ابزار سودمند و کاربردی برای ارزیابی میزان ارتباط انسان با طبیعت مورد توجه قرار گرفته است. ردپای اکولوژیکی نیاز انسان با مقدار مشخصی از زمین و آب برای رفع نیازهای زندگی و دفع مواد زائد را نشان می‌دهد. کاهش و افزایش این شاخص به تغییر رفتار افراد جامعه بستگی دارد و از مهم‌ترین شاخص‌هایی محسوب شده که امروزه برای ارزیابی ردپای انسان در طبیعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این میان رد پای آب و کربن مهم‌ترین این شاخص‌ها محسوب می‌گردند. ردپای کربن در ابتدا به صورت مجموعه‌ای از گازهای گلخانه‌ای تعریف می‌گردید. از آنجایی که دی‌اکسیدکربن به وسیله رویدادهای طبیعی هم تولید می‌شود و محاسبه‌ی آن ناممکن است، در تعریف جدید ردپای کربن به صورت مقیاسی از مقدار کل خروج دی‌اکسیدکربن (CO_2) و متان (CH_4) از یک جمعیت، سیستم یا فعالیت معین که در یک محدوده زمانی و مکانی مشخص اتفاق می‌افتد، تعریف شده است [۴].

در این پژوهش تلاش شده تا ردپای کربن و سرانه مصرف انرژی ساختمان‌های ویلایی و آپارتمانی در مرحله بهره‌برداری از طریق مدلسازی کامپیوتری و اعتبارسنجی آن با داده‌های میدانی برآورد شده و مورد بررسی مقایسه‌ای قرار گیرد. برای این منظور یک ساختمان ویلایی و دو ساختمان آپارتمانی دو و پنج طبقه با اسکلت بتنی در شهرستان بابلسر در استان مازندران، از طریق مدلسازی کامپیوتری در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفته‌اند. در ابتدا، اعتبارسنجی مدل با توجه به قبوض برق و گاز مصرفی برای یک ساختمان ویلایی در بابلسر که داده‌های میدانی از مصرف انرژی آن در دسترس بوده، انجام گرفته و سپس میزان تولید دی‌اکسیدکربن حین

[1] U.S. Energy Information Administration

بهره‌برداری از ساختمان‌های مورد مطالعه، با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر برای مدلسازی اقلیمی در دوره‌ی یک ساله محاسبه و سرانه مصرف انرژی در بخش‌های مختلف به صورت مقایسه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- سابقه مطالعات

توجه به بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساخت و ساز سبز و دوست‌دار محیط زیست از اوایل دهه ۱۹۷۰ آغاز شده و در پی آن محققان و سازمان‌های مختلفی اقدام به جست‌وجو و پژوهش در این حوزه نوین نموده‌اند. در سال ۱۹۹۰ در انگلستان و برای اولین بار سیستمی جامع برای ارزیابی عملکرد ساختمان ها از منظر مصرف انرژی و اثرات محیط زیستی توسعه داده شده است. این سیستم با نام BREEM[۱] چهارچوبی برای ارائه گواهی‌نامه تایید کیفیت ساختمان‌ها وضع نموده است [۵]. فاکتورهای تاثیرگذار در معیار BREEM عواملی چون انرژی، مدیریت، آب، اقلیم، مصالح، حمل و نقل، مدیریت، آلودگی و ... می‌باشد. بر اساس این روش سیستم‌های دیگری نیز در کشورهای مختلف مطرح شده که از جمله آنها می‌توان به معیار LEED[۲] در امریکا اشاره نمود. اولین ویرایش این معیار که توسط انجمن سبز ایالات متحده امریکا مطرح شده است، نخستین بار در سال ۱۹۹۸ برای ارزیابی ساختمان‌های سبز مورد استفاده قرار گرفته است. معیار LEED که طی سالیان گذشته بارها ویرایش شده، بر اصل بهینه‌سازی مصرف انرژی و حفاظت از محیط زیست استوار بوده و به دنبال برقراری توازنی موثر بین عملکردهای ضروری و موثر در فرایندهای ساخت و ساز می‌باشد[۶]. امتیازدهی این شاخص بر اساس معیارهای مکانیابی پایدار، انرژی و اتمسفر، مصالح و منابع، نوآوری در فرآیند طراحی، الویت منطقه ای و ... می‌باشد که در نهایت پس از بررسی توسط چک لیست‌های متعدد توسط ارزیاب در چهار درجه مختلف امتیازدهی می‌گردد. در ایران نیز در این زمینه مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان در سال ۱۳۷۰ توسط هیات وزیران به تصویب رسید و اجرای آن الزامی گردید. این مبحث پس از بازنگری‌های متعدد در سال ۱۳۸۱ در قالب آخرین بازنگری به چاپ رسید. این مبحث دارای راهکارها و تمهیداتی است که که اجرای آن سبب کاهش بار سرمایش و گرمایش ساختمان و نهایتا افزایش سطح آسایش افراد می‌گردد. توجه به پایداری در مباحث ساخت و ساز سبز در سال‌های اخیر توسط محققین بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات زیر اشاره نمود:

هویی‌یان و همکاران[۴] (۲۰۱۰) به بررسی ردپای کربن ساختمانی در هنگ‌کنگ پرداخته و میزان کربن تولیدی در بخش‌های تولید و حمل و نقل مصالح ساختمانی، انرژی مصرفی نجهیزات ساخت و عمل‌آوری و نهایتا انرژی مصرفی ماشین‌آلات جهت خروج ضایعات ساختمانی را مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق بیانگر آن بود که بیشترین ردپای کربن در حین ساخت ساختمان مربوط به تولید مصالح ساختمانی بوده که حدود ۸۰٪ از میزان کل کربن تولیدی را شامل می‌شود [۷]. تینگ و وو[۵] (۲۰۱۴) با توجه به سرعت رشد پروژه‌های ساختمانی و افزایش اثرات نامطلوب آن بر محیط زیست، بر ضرورت ارزیابی سبک زندگی و اثرات آن بر محیط‌های متاثر تاکید نمودند. آنها در این مطالعه، ردپای اکولوژیک در مراحل ساخت پروژه‌های ساختمانی و ملاحظات مرتبط با توسعه پایدار و سبک زندگی جهت کاهش اثرات محیط زیستی پروژه‌های ساختمانی را مورد بررسی قرار دادند[۸]. سولیس گازمن[۶] و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعات خود میزان ردپای کربن در ساخت و ساز ساختمان‌های اسپانیا را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مطالعه برای تعیین میزان ردپای کربن، به منظور سنجش گازهای گلخانه‌ای تولیدی برای یک پروژه ساختمانی، روش چرخه عمر محصولات (LCA[۷]) مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، میزان ردپای کربن در مصالح استفاده شده و ضایعات تولیدی محاسبه و برای هرکدام از عناصر (آب، انرژی، غذا، حمل و نقل، مصالح ساخت و ساز و ضایعات) به صورت جداگانه، مورد ارزیابی قرار گرفته است. یافته‌های این تحقیق بیانگر آن است که ردپای کربن در فرایند ساخت هر متر مربع از ساختمان به ترتیب در حوزه انرژی، آب، غذا، حمل و نقل، مصالح و ضایعات ساخت و ساز به

[1] Building Research Establishment Environmental Assessment Method
[2] Leadership in Energy and Environmental Design
[4] Hui Yan
[5] Teng and Wu
[1] Solis-Guzman
[7] Life Cycle assessment

ترتیب ۳۸۴/۷۹، ۰/۰۷، ۳۵/۳۲، ۰/۰۳، ۶۶۷/۲۲، ۴۹/۸۳ کیلوگرم است. این مطالعه نشان داده مشخصا مصالح مورد نیاز برای ساخت و ساز در میزان ردپای کربن نقش قابل توجهی داشته‌اند. در نتیجه در پروژه‌های ساختمانی نقل و انتقال منابع در مقایسه با سایر موارد، دارای تأثیر تعیین‌کننده‌ای برمیزان رد پای کربن نمی‌باشد [۹]. موسوی و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهش خود اهمیت توجه به چرخه حیات کربن در انتخاب روش مناسب ساخت و ساز و اثرات قابل توجه آن را مورد تاکید قرار دادند. ۱۵ مدل مختلف از سازه‌های بتنی و فولادی شامل قاب‌های مقاوم در برابر زلزله، قاب‌های تقویت شده، سیستم‌های دیوار برشی و سیستم‌های دوگانه برای ساختمان‌های ۳، ۱۰ و ۱۵ طبقه مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت ردپای کربن این سازه‌ها ناشی از استخراج مواد، حمل و نقل، ساخت و ساز و پایان عمر سازه تخمین زده شد. نتایج بیانگر آن بوده که تفاوت قابل توجهی بین کربن تولیدی در انتهای عمر این سیستم‌ها وجود دارد. این تفاوت در مراحل مختلف چرخه عمر، نشان دهنده اهمیت توجه به چرخه حیات کربن در انتخاب مناسب یک سازه خاص است [۱۰]. جین و لینگ[8] (۲۰۱۵) در پژوهش خود در یکی از مناطق سرد و از نظر اقتصادی ضعیف چین، نقش مصالح دیوار خارجی در دمای داخلی ساختمان و ردپاهای اکولوژیکی آن را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، چرخه حیات مصالح و ردپاهای اکولوژیک آن در یک دیوار سبز، که متناسب با اکوسیستم روستایی و مصالح معمول منطقه ساخته شده، در مقایسه با ساختار سنتی موجود، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بیانگر آن است که یک ساختار مناسب و مدرن، از نظر اقتصادی بسیار بهتر از ساختارهای سنتی است. بطوری‌که میزان سالانه مصرف انرژی، تولید دی‌اکسیدکربن و ردپای اکولوژیکی در ساختار اصلاح شده تا میزان ۶۹/۶۱٪ و ۱۷/۵٪ و ۹۹/۴۷٪ کاهش یافته است [۱۱]. من‌یو[9] و همکاران (۲۰۱۶) نیز در پژوهش خود به ارزیابی میزان ردپای کربن در ساخت و سازهای کشور استرالیا در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که این بخش به تنهایی ۱۸/۱ درصد از تولید کربن استرالیا را به خود اختصاص می‌دهد [۱۲]. کومار پال[10] و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهش خود به شبیه‌سازی چرخه حیات با رویکرد ترکیب ردیابی کربن عملیاتی و ردپای کربن ساختمان‌ها پرداختند. در این مطالعه هدف اصلی پیدا نمودن و تجزیه و تحلیل تفاوت بین این دو چرخه و همچنین بهینه‌سازی طراحی بر مبنی آن بود. در این مطالعه خانه‌ای در شرق فنلاند جهت تعیین هزینه کربن و بهینه‌سازی چرخه حیات مورد مطالعه قرار گرفت. گزینه‌های مختلف در ساختمان اعم از ضخامت عایق، انواع پنجره‌ها، سیستم‌های گرمایشی و واحدهای بازیابی گرما به عنوان متغیرهای طراحی مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم گرمایشی یک متغیر طراحی غالب بوده و ردپای کربن بدون طرح بهینه‌سازی تا ۳۹٪ از سهم کل کربن را شامل شده ولی با استفاده از طرح بهینه‌سازی سهم ۲۸٪ از کل را دربر می‌گیرد [۱۳]. فنتیلی[11] و همکاران (۲۰۱۹) تاثیر استفاده از بتن با مقاومت بالا (HSC[12]) و بتن با مقاومت معمولی (NSC[13]) در ساختمانهای بلند مرتبه ۱۶، ۳۰ و۶۰ طبقه بر کاهش ردپای کربن حاصل از فرایند ساخت را مورد مطالعه قرار دادند. در نتیجه این مطالعه مشاهده شده است استفاده از بتن های با مقاومت معمول در ساختمانهای کم ارتفاع و استفاده از بتنهای با مقاومت بالا در ساختمانهای بلند مرتبه تاثیر کمتری بر محیط زیست از منظر ردپای کربن به دنبال خواهد داشت [۱۴].

۳- مواد و روش‌ها

در این مطالعه همانطور که اشاره شد به منظور پیش‌بینی ردپای کربن و میزان مصرف انرژی در حین بهره‌برداری از ساختمان از مدلسازی کامپیوتری در نرم‌افزار دیزان‌بیلدر استفاده شده است. جهت صحت‌سنجی مدل، ابتدا یک ساختمان ویلایی به عنوان نمونه در

[3] Jin and Ling
[4] Man Yu
[5] Kumar Pal
[11] Fantilli
[12] High-Strength Concrete
[13] Normal-Strength Concrete

شهرستان بابلسر انتخاب و با مدلسازی کامپیوتری برای سال مورد نظر، میزان انرژی مصرفی در طول دوره مدلسازی برآورد گردیده است. میزان انرژی مصرفی در هر دو بخش برق و گاز با اعداد موجود در قبوض مقایسه شده و دقت مدلسازی برای قابلیت پیش‌بینی انرژی مصرفی تعین گردید. در نهایت با اعتبارسنجی و ارزیابی دقت مدل، یک ساختمان ویلایی و دو ساختمان آپارتمانی دو و پنج طبقه به عنوان ساختمان‌های معمول در منطقه، با الگوی ساخت سنتی، مورد شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند. در نهایت میزان سرانه دی اکسید کربن تولیدی حین بهره‌برداری از این ساختمان‌ها در ارتباط با مصارف گرمایشی و سرمایشی، روشنایی و غیره برای دوره یکساله برآورد و همراه با سرانه مصرف انرژی محاسبه شده برای دوره بهره‌برداری در ساختمانهای مورد مطالعه، مورد مقایسه قرار گرفت.

دیزاین بیلدر نرم افزاری قدرتمند با قابلیتهای فراوان است که در سالهای اخیر برای مدلسازی ساختمانها از جنبه‌های مختلف هندسی و فیزیک ساختمان، معماری، سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی، سیستم روشنایی و غیره بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این نرم‌افزار که یکی از بروزترین نرم‌افزارهای دنیا برای مدل‌سازی جنبه‌های مختلف ساختمان می‌باشد، به جز مدل‌سازی بار گرمایشی و سرمایشی ساختمان، مصارف مختلف ساختمان از قبیل مصرف انرژی گرمایشی، سرمایشی، روشنایی، لوازم خانگی، آب گرم مصرفی و غیره را بطور دینامیک شبیه سازی می‌نماید. این نرم افزار همچنین قابلیت محاسبه میزان روشنایی روز و مدل‌سازی رفتار دینامیک جریان سیالات و حرکت هوا در ساختمان را دارا می‌باشد. مدل همچنین دارای قابلیت مدل‌سازی تهویه طبیعی و مکانیکی، محاسبه آسایش حرارتی در فضاهای داخلی ساختمان، میزان اتلاف و دریافت انرژی از عناصر مختلف ساختمانی و غیره می‌باشد[۱۵].

موتور شبیه‌سازی دیزاین‌بیلدر، نرم افزار دیگری به نام انرژی پلاس است که توسط دپارتمان انرژی آمریکا توسعه داده شده و به عنوان یکی از معتبرترین نرم افزارهای شبیه‌سازی انرژی مورد پذیرش و استفاده جهانی قرار گرفته است. انرژی‌پلاس یکی از قدرتمندترین نرم افزارهای شبیه‌سازی انرژی حال حاضر دنیا می‌باشد. این نرم‌افزار یک شبیه‌سازی جامع انرژی ساختمان بوده و به منظور کاربرد در مدل‌سازی مصرف انرژی و آب در ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱۶]. استفاده از این شبیه‌ساز توسط متخصصین بخش ساختمان آنها را نسبت به بهینه کردن طراحی برای استفاده کمتر از منابع انرژی و آب قادر خواهد ساخت. انرژی‌پلاس، سیستم‌های گرمایشی، سرمایشی، روشنایی، تهویه و دیگر جریان‌های انرژی را در کنار نیاز به آب مدل می‌نماید و دارای توان شبیه‌سازی همچون آنالیز با بازه زمانی کمتر از یک ساعت، سیستم مدولار، جریانات هوایی چند منطقه‌ای، شرایط آسایش، تهویه طبیعی و سیستم‌های فتوولتائیک می‌باشد[۱۷].

برای محاسبه انرژی مصرفی گرمایش و سرمایش، نرم‌افزار انرژی‌پلاس از روابط زیر استفاده می‌کند:

انرژی گرمایش = Energyplus load / cop سیستم گرمایش

انرژی سرمایش = Energyplus load / cop سیستم سرمایش

cop[۱۴] ضریب عملکرد سیستم مورد نظر است، این مقدار برای محاسبه مصرف سوخت مورد نیاز برای تامین نیاز گرمایشی استفاده می‌شود و شامل کل انرژی‌های مصرف شده برای گرمایش و دیگر موارد مرتبط به گرمایش و سرمایش ساختمان از جمله فن و پمپ، تجهیزات کنترل و غیره می‌باشد.

بارهای حرارتی طبق مرجع مهندسی انرژی‌پلاس به روش زیر محاسبه می‌شود:

[14] coefficient of performance

$$\frac{C_z dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p (T_{zi} - T_z) + m_{inf} C_p (T_\infty - T_z) + Q_{sys} \quad (۱)$$

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i$ = مجموع انتقال همرفتی حرارت از ناحیه سطوح

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ = انتقال همرفتی حرارت از ناحیه سطوح

که در آن:

$m_{inf} C_p (T_\infty - T_z)$ = انتقال حرارت در اثر نفوذ هوای خارجی

$\sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p (T_{zi} - T_z)$ = انتقال حرارت در اثر ترکیب هوای بین ناحیه‌ها

Q_{sys} = خروجی ذخیره شده سیستم های هوا

$\frac{C_z dT_z}{dt}$ = انرژی ذخیره شده ناحیه هوا

$C_z = Pair * C_P * C_T$

در این رابطه:

Pair: چگالی هوا

C_P: گرمای مخصوص هوا

C_T: ضریب افزاینده ظرفیت گرمایی حساس

اگر ظرفیت هوا ناچیز باشد خروجی سیستم در حال ماندگار[15] می تواند از روش زیر محاسبه گردد:

$$-Q_{sys} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p (T_{zi} - T_z) + m_{inf} C_p (T_\infty - T_z) \quad (۲)$$

معادله زیر روش محاسبه بار حرارتی و برودتی بدون ترم سیستم هوا را نشان می‌دهد.

$$Q_{load} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} Q_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} m_i C_p (T_{zi} - T_z) + m_{inf} C_p (T_\infty - T_z) \quad (۳)$$

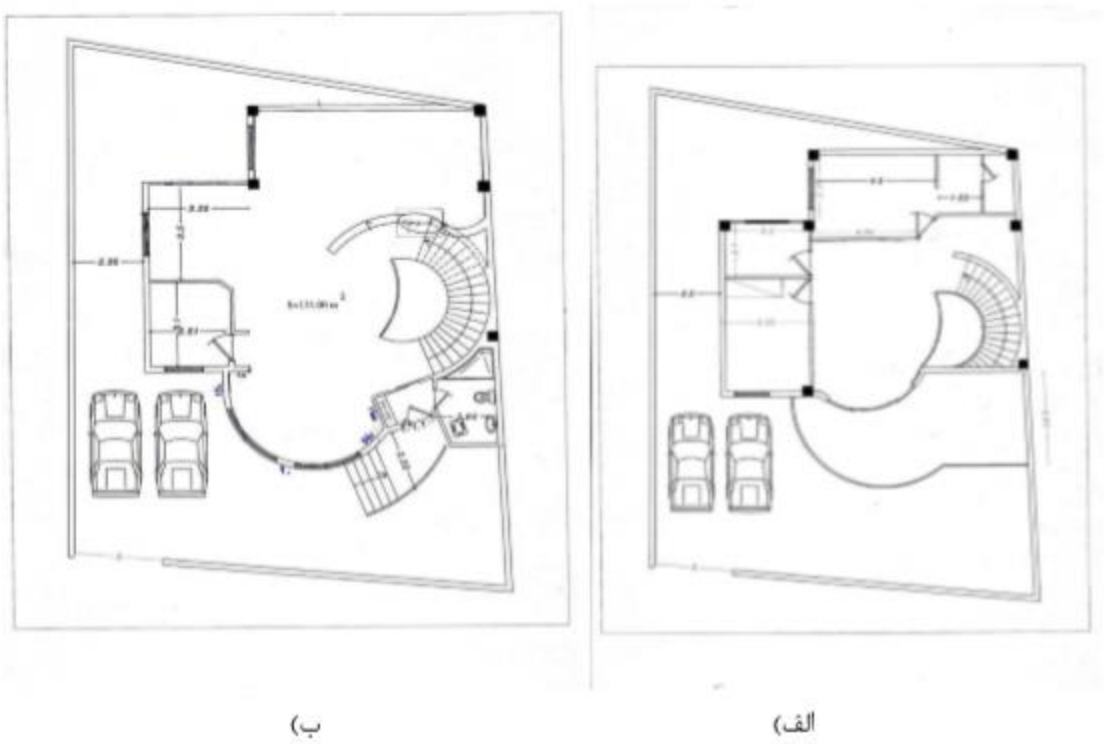
در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، میزان دی اکسیدکربن که یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف انرژی در ساختمان‌ها است، با استفاده از فاکتور انتشار[16] برای انواع سوخت‌ها که به صورت پیش‌فرض در نرم‌افزار وجود دارد، محاسبه می‌شود. فاکتور انتشار در مدل فوق برای گاز ۵۰/۲۳ g/MJ و برای برق ۱۶۸/۳۳ g/MJ درنظر گرفته شده است. همچنین لازم به ذکر است که در ایران و در ساختمان مورد مطالعه، گاز و برق، منابع اصلی انرژی ورودی محسوب گردیده اند[۱۵].

۱-۳- اعتبارسنجی مدل

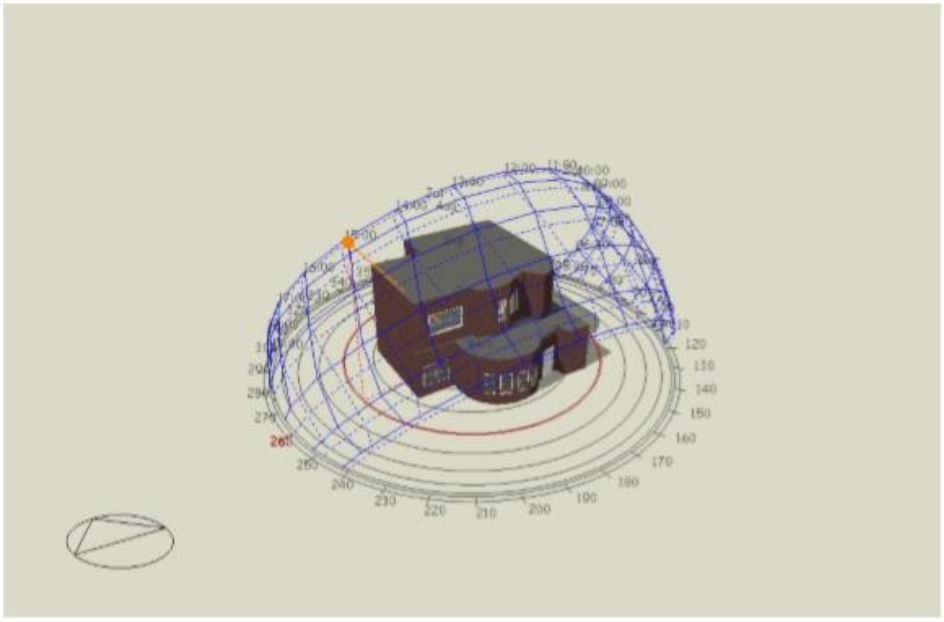
ساختمان مورد مطالعه برای اعتبارسنجی مدل، یک سازه ویلایی دو طبقه با زیر بنایی برابر با ۲۳۰ متر مربع در شهر بابلسر می-باشد. طبقه اول دارای پذیرایی، یک آشپزخانه و یک اتاق خواب و سرویس بهداشتی می‌باشد و طبقه دوم ساختمان نیز دارای دو اتاق خواب

[15] Steady State
[2] Emission Factor

و سرویس بهداشتی است. این ساختمان از سمت جنوب دارای نما و مشرف به کوچه می‌باشد. پلان طبقات در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱- الف) پلان طبقه اول ب) پلان طبقه دوم ساختمان ویلایی



شکل ۲- هندسه ساختمان ویلایی مورد استفاده برای اعتبارسنجی مدل

تمام بخش‌های داخلی ساختمان از جمله اتاق‌ها، آشپزخانه، سرویس‌های بهداشتی و غیره در این مدلسازی به طور مجزا در نظرگرفته شده و کاربری آن‌ها مشخص شده‌است. برای مدلسازی ساختمان، ابتدا هندسه ساختمان مدل شده و ابعاد دقیق اتاق‌ها و بازشوها و محل در و پنجره‌ها شبیه سازی می‌گردد. این ساختمان با کاربری مسکونی و حضور ۲ نفر برای شرایط گرمایش و سرمایش مورد نیاز و نور استاندارد مدل شده و گاز و برق به عنوان منابع اصلی انرژی مصرفی در آن مورد استفاده قرار گرفته است. ساختمان دارای اسکلت بتنی بوده و مصالح ساختمان و لایه بندی آنها به ترتیب گچ سفید، خاک گچ، ملات ماسه سیمان، بلوک سیمانی و سنگ در نظر گرفته شده است. پنجره‌های ساختمان به صورت دوجداره و با قاب UPVC و لامپ ها از نوع LED در مدل وارد گردیده است.

در ساختمان مسکونی مورد مطالعه اطلاعات مربوط به حضور افراد در محل به صورت زیر ثبت شده است.

Occpancy: 0.009 people per m2

Metabolic factor: 0.9

Clothing: 1 clo (winter), 0.5 clo (summer)

Minimum fresh air: 10 L s21 per person

بخش‌های مختلف ساختمان دارای تجهیزات متفاوتی هستند که به طور مجزا تعریف شده‌اند. در قسمت گرمایش و سرمایش نوع سیستم سرمایشی و گرمایشی مورد استفاده، مشابه شرایط واقعی این ساختمان، رادیاتور و کولر تعریف شده که با سوخت گاز طبیعی و برق کار می‌کنند. ساختار جداره‌های ساختمان در نرم افزار دیزاین بیلدر مشابه جدول ۱ تعریف شده است. پنجره‌ها نیز به صورت پنجره تک جداره با فریم آلومینیوم تعریف شده‌اند.

جدول ۱-خواص حرارتی و فیزیکی مصالح به کار رفته در جداره های ساختمان

جداره	جزئیات	ضریب هدایت حرارتی (w/m k)	چگالی (m3/kg)
دیوار خارجی	سنگ مرمر	۳/۵	۲۸۰۰
	ملات ماسه سیمان	۱	۱۸۰۰
	بلوک سیمانی	۰/۱۵۳	۲۲۰۰
	خاک گچ	۱/۱	۱۵۰۰
	گچ سفید	۰/۵۷	۱۱۰۰
دیوار داخلی	گچ سفید	۰/۵۷	۱۱۰۰
	خاک گچ	۱/۱	۱۵۰۰
	بلوک سیمانی	۰/۱۵۳	۲۲۰۰
	آجر	۰/۷۲	۱۸۵۰

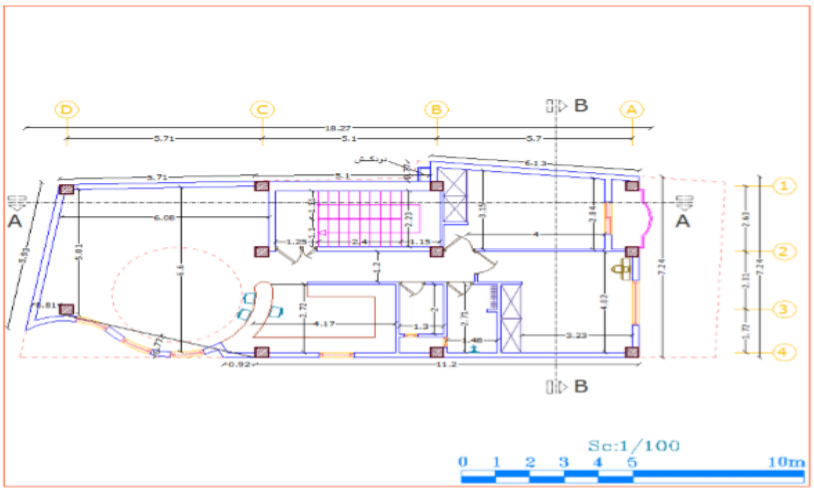
اطلاعات آب و هوایی برای شهر بابلسر برای بازه یک سال (۲۰۱۸) از طریق نرم‌افزار متئونورم با فرمت epw دریافت شد و در نرم افزار دیزاین‌بیلدر برای مدلسازی سازه مورد نظر وارد شده است. این فایل آب و هوایی بخش اصلی داده‌های ورودی موتور محاسب انرژی‌پلاس در نرم‌افزار را شامل می‌شود شامل اطلاعاتی نظیر جهت وزش باد، سرعت باد، دما و فشار هوا، جهت تابش نور خورشید و غیره می‌باشد.

در نتیجه شبیه‌سازی انرژی ساختمان تحت شرایط فوق، مدل توسعه داده شده میزان مصرف معادل گاز را برابر با kWh ۶۱۷۵/۱۳ و مصرف برق را kWh ۷۳۷۲/۰۵ برآورد نموده‌اند. در شرایط واقعی و با اندازه‌گیری برق مصرفی از روی فیش‌های دریافتی، میزان مصرف گاز ساختمان ۶۵۲۰kWh و مصرف برق آن kWh ۷۸۰۹ برآورد گردیده است که بیانگر دقت حداقل ۹۰ درصدی مدل در برآورد

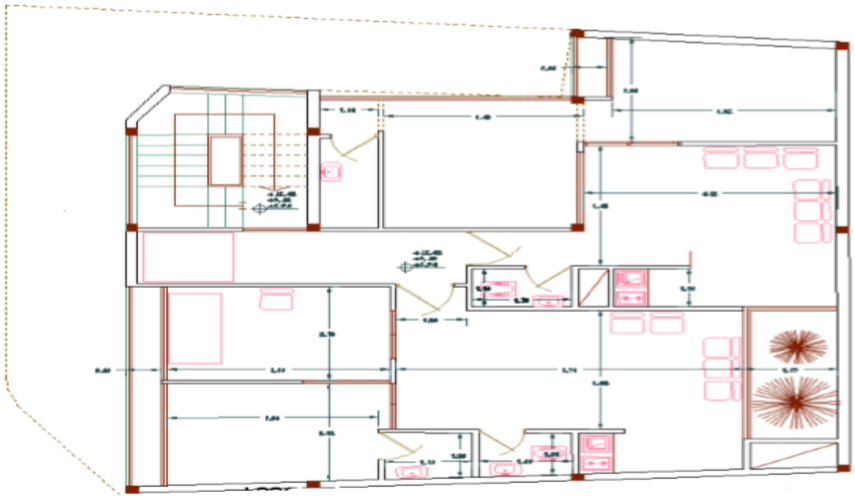
مصارف انرژی این ساختمان است. به این ترتیب اعتبار نسبی ارزیابی شده برای مدلسازی حاضر امکان برآورد مقایسه ای میزان مصرف انرژی و ردپای کربن برای ساختمانهای مورد مطالعه را با دقت مطلوب ممکن خواهد ساخت.

۲-۳- ساختمان مورد مطالعه

ساختمان‌های مورد بررسی در این مطالعه سه ساختمان ویلایی و آپارتمانی دو و پنج طبقه می‌باشند که الگوی ساخت آنها سنتی و غیرسبز (از منظر عایق‌بندی و مصرف انرژی) در نظر گرفته شده است. ساختمان ویلایی با نقشه مشابه ساختمان بالا و ساختمان دو طبقه، ملکی به مساحت کل ۴۲۰/۴۸ متر مربع (هر واحد ۲۰۰ مترمربع) که طبقات آن هریک دارای یک واحد شامل حال و پذیرای، دو اتاق خواب، یک آشپزخانه و یک سرویس بهداشتی می‌باشد که در هر طبقه آن، ۶ بازشو تعبیه شده است (شکل ۳). ساختمان بلندمرتبه مورد مطالعه یک سازه آپارتمانی پنج طبقه و ده واحده (هر واحد در حدود ۹۰ مترمربع) با پارکینگی با مساحتی ۹۱۵/۳ مترمربع می‌باشد. واحدها دارای یک حال و پذیرای، دو اتاق خواب، یک آشپزخانه و یک سرویس بهداشتی می‌باشد و در هر طبقه ۶ بازشو تعبیه شده است (شکل ۴). خواص حرارتی و فیزیکی مصالح ساختمانی بکار رفته در جداره سازه‌های مورد نظر از جمله گچ سفید، خاک گچ، ملات ماسه سیمان، بلوک سیمانی، سنگ در جدول ۱ آورده شده است. پنجره ساختمان‌ها تک جداره و با قاب آلومینیومی و لامپ‌ها تنگستن در نظر گرفته شده‌اند که نوع آن در نرم‌افزار مشخص شده است. بخش‌های مختلف ساختمان‌ها دارای تجهیزات رفاهی متفاوتی هستند که به طور مجزا تعریف شده‌اند. در قسمت گرمایش و سرمایش نوع سیستم مورد استفاده، رادیاتور و کولر تعریف شده که با سوخت گاز طبیعی و برق کار می‌کنند. اطلاعات آب و هوایی منطقه در قالب فایل‌هایی با پسوندهای مختلف، توسط نرم‌افزار متئونورم برای دوره‌ی یک ساله (۲۰۱۸) تهیه و وارد مدل شده است.

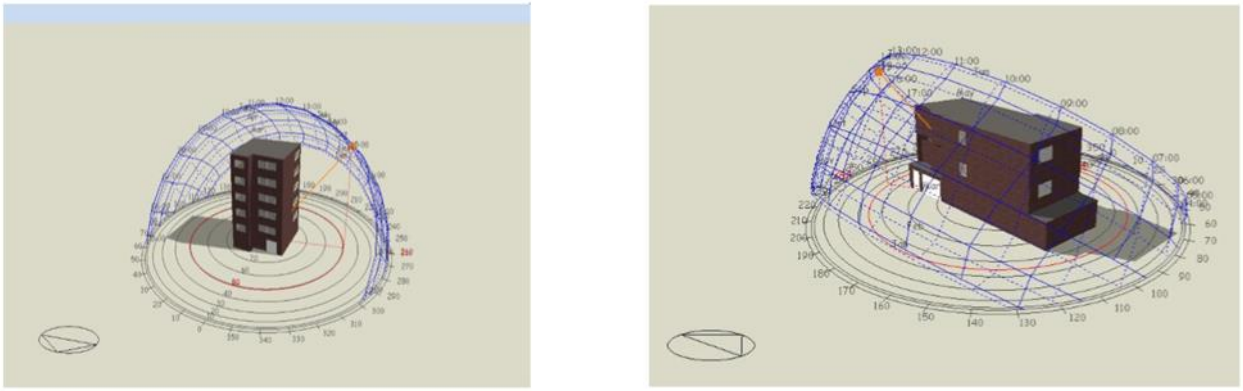


شکل ۳- پلان طبقات ساختمان آپارتمانی دو طبقه



شکل ۴- پلان طبقات ساختمان آپارتمانی پنج طبقه

با وارد کردن پلان دو بعدی در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر مدل سه بعدی ساختمان‌های آپارتمانی به صورت شکل ۵ ترسیم شده است.



الف) **ب)**

شکل ۵- هندسه ساختمان آپارتمانی الف) دو طبقه ب) پنج طبقه

در بخش کاربری، این ساختمان‌ها با کاربری مسکونی تعریف شده و میزان افراد ساکن در ساختمان ویلایی ۲ نفر، ساختمان دو طبقه، ۴ نفر (۲ نفر به ازای هر واحد) و برای ساختمان پنج طبقه، ۲۰ نفر (۲ نفر به ازای هر واحد) تعریف شده است. در انتخاب ساختمانهای سعی شده نمونه هایی واقعی از ساختمانهای مسکونی منطقه در نظر گرفته شده و با توجه به اهمیت تاثیر افراد ساکن، ساختمانها با مساحت متفاوت و تعداد ساکنین یکسان فرض شده اند تا در نهایت سرانه مصرف انرژی و تولید گاز دی اکسید کربن به ازای هر فرد برآورد گردد. اگرچه امکان در نظرگرفتن ساختمانهایی با مساحت یکسان و تعداد ساکنین برابر وجود داشته، اما به نظر می رسد فرض آپارتمانهایی با مساحت یک ساختمان ویلایی دور از واقع باشد. از اینرو شرایط واقعی مشاهده شده در سطح شهر معیار انتخاب برای مدلسازی بوده است. در این ساختمانها منبع گرمایش و سرمایش (برای تعیین دمای مورد نیاز) و نور مصرفی به صورت پیش فرض گاز و برق مشخص شده است.

در ساختمان دو طبقه، اطلاعات مربوط به حضور افراد در محل به صورت زیر ثبت شده است.

Occpancy: 0.009 people per m2

Metabolic factor: 0.9

Clothing: 1 clo (winter), 0.5 clo (summer)

Minimum fresh air: 10 L s21 per person

در ساختمان ۵ طبقه، اطلاعات مربوط به حضور افراد در محل به صورت زیر ثبت شده است.

Occpancy: 0.021 people per m2

Metabolic factor: 0.9

Clothing: 1 clo (winter), 0.5 clo (summer)

Minimum fresh air: 10 L s21 per person

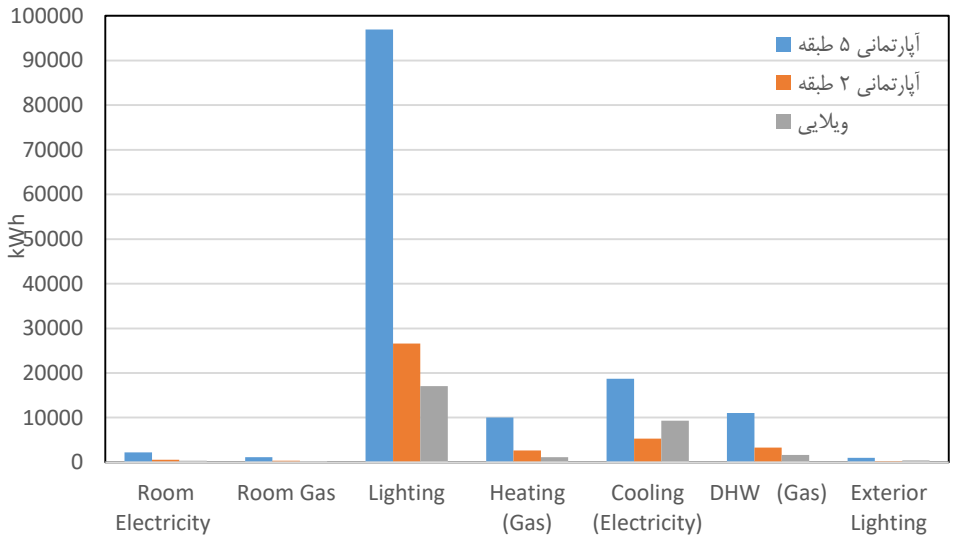
۴- نتایج و بحث

با مدلسازی کامپیوتری، انرژی مصرفی در بخش‌های مختلف ساختمان حین بهره‌برداری یک ساله برای اقلیم بابلسر به صورت جدول ۲ به دست آمده است. مقادیر جدول حاضر به صورت نمودار شکل ۵ برای سه ساختمان مورد مطالعه ترسیم شده است. همانطور که اشاره شد واحدهای مورد مطالعه دارای مساحت متفاوت و تعداد ۲ نفر ساکن فرض شده اند. اگرچه مساحت متفاوت ساختمانها، امکان مقایسه سرانه مصرف انرژی را پیچیده می سازد اما در نظر گرفتن شرایط واقعی امکان درنظرگرفتن سطح متفاوت رفاه ساکنین ساختمانهای ویلایی نسبت به ساختمانهای آپارتمانی را در عین پیچیدگی، امکان پذیر می سازد. به این ترتیب با تقسیم انرژی کل مصرفی ساختمان بر تعداد ساکنین، مقدار سرانه انرژی مصرفی به ازای هر افراد محاسبه گردیده است. مقدار سرانه انرژی مصرفی هر ساختمان برای سال مورد مطالعه، در شکل ۶ آورده شده است. در این جدول و نمودارهای مرتبط، جزئیات بدست آمده برای مقدار الکتریسیته و گاز مصرفی در اتاق‌ها، انرژی مصرفی جهت روشنایی، سرمایش و گرمایش سایر بخش‌های ساختمان، آب گرم خانگی و انرژی مورد نیاز برای روشنایی فضاهای خارجی ساختمان آورده شده است.

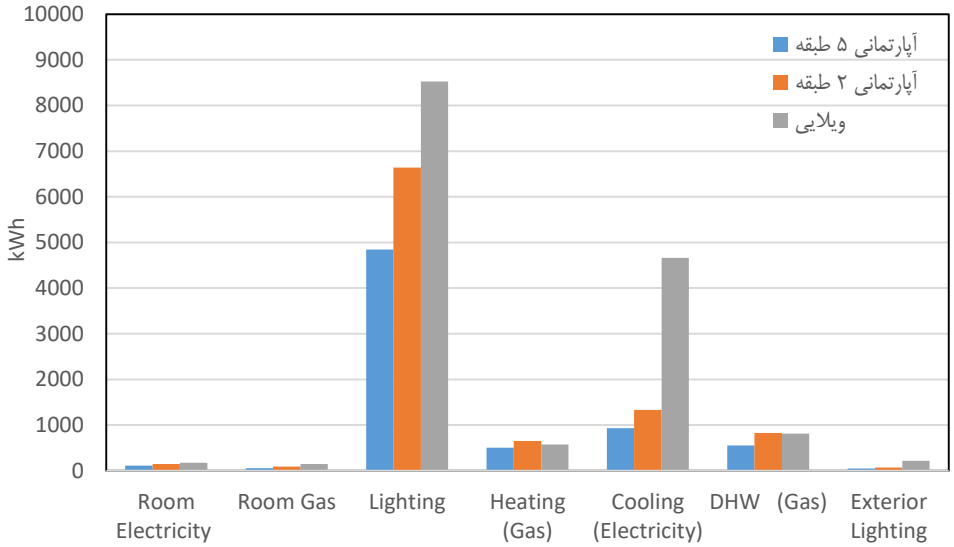
همانطور که مشاهده می‌شود به دلیل عدم عایق‌بندی مناسب جداره و پنجره‌ها و همچنین استفاده از سسیستم روشنایی تنگستنی در این ساختمان‌ها، بیشترین مصرف انرژی مربوط به سیستم‌های سرمایش و روشنایی می‌باشد. انرژی مصرفی مربوط به سرمایش در ساختمان ویلایی و آپارتمان‌های دو و پنج طبقه به ترتیب ۹۳۲۳، ۵۳۲۱ و ۱۸۶۸۷ کیلووات ساعت می‌باشد. هم‌چنین میزان مجموع انرژی مصرفی برای روشنایی خارجی و داخلی ساختمان ویلایی و آپارتمان‌های دو و پنج طبقه نیز ۱۷۴۸۶، ۲۶۸۴۲ و ۹۷۸۹۸ کیلووات ساعت می‌باشد که این مقدار به علت استفاده از لامپ‌های پر مصرف تنگستنی و هم‌چنین تحت کنترل نبودن روشنایی می‌باشد. انرژی مصرفی گرمایش ساختمان ویلایی و آپارتمان‌های دو و پنج طبقه نیز به ترتیب ۱۱۴۳، ۲۶۱۷ و ۱۰۰۴۸ کیلووات ساعت بوده درحالی‌که میزان گاز مصرفی برای آب گرم مورد نیاز در مقایسه مقدار بزرگی برآورد شده است. با توجه به شکل ۶ سرانه مصرف انرژی در ساختمان-های آپاراتمانی به صورت چشمگیر کمتر از مقدار آن در ساختمان ویلایی برآورده شده است که این موضوع به روشنی بیانگر آن است که زندگی در ساختمان‌های ویلایی اثرات محیط زیستی مخرب‌تری نسبت به زندگی در ساختمان‌های آپارتمانی از منظر سرانه مصرف انرژی و ردپای کربن مجازی تولیدی به جای خواهد گذاشت.

جدول ۲- انرژی مصرفی در در طول سال در بخش‌های مختلف سه ساختمان مورد بررسی

نوع ساختمان	برق مصرفی اتاق ها kWh	گاز مصرفی اتاق ها kWh	برق مصرفی روشنایی kWh	انرژی گرمایش (Gas) kWh	انرژی سرمایش (Electricity) kWh	آب گرم خانگی (Gas) kWh	روشنایی فضاهای خارجی kWh
ساختمان ویلایی	۳۵۳/۵۴	۲۸۵/۲۲	۱۷۰۵۰/۳۸	۱۱۴۳/۷۲	۹۳۲۳/۳۴	۱۶۲۵/۲۲	۴۳۵/۹۵
آپارتمانی دو طبقه	۵۷۲/۲۳	۳۴۷/۵۱	۲۶۵۷۱/۳۲	۲۶۱۷/۲۲	۵۳۲۱/۱۵	۳۳۰۷/۷۳	۲۷۱/۴۲
آپارتمانی ۵ طبقه	۲۲۳۴/۱۴	۱۱۶۴/۰۲	۹۶۹۰۷/۲۷	۱۰۰۴۸/۰۶	۱۸۶۸۷/۸۲	۱۱۰۲۴/۸۴	۹۹۱/۵۵



شکل ۵- انرژی مصرفی در در طول سال در بخش‌های مختلف سه ساختمان مورد بررسی



شکل ۶- سرانه مصرف انرژی در طول سال در بخش‌های مختلف سه سازه به ازای هر فرد در سال

نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر با استفاده از فاکتور انتشار برای انواع سوخت‌ها که به صورت پیش‌فرض در نرم‌افزار وجود دارد، میزان دی-اکسیدکربن ناشی از مصرف انرژی در بخش‌های مختلف ساختمان را برآورد می‌نماید. مطابق جدول ۳ میزان کربن‌دی‌اکسید تولیدی به ازای

مصرف انرژی در بخش‌های مختلف در طول بهره‌برداری یک ساله از ساختمان ویلایی برابر ۱۶۹۸۰/۲۳ (۷۳/۸۳ کیلوگرم به ازای هر مترمربع) و برای ساختمان دو و پنج طبقه به ترتیب ۱۹۵۱۳ kg (۴۰/۴۶ کیلوگرم به ازای مترمربع) و ۹۷۶۳۷/۷۱ kg (حدود ۱۰۷ کیلوگرم به ازای مترمربع) برآورد شده است. با توجه به تعداد افراد ساکن در هر ساختمان، میزان سرانه کربن تولید به ازای هر فرد برای ساختمان ویلایی و آپارتمانهای دو و پنج طبقه به ترتیب ۸۴۹۰، ۴۸۷۸ و ۴۸۸۱ کیلوگرم در سال برآورد گردیده است. روشن است سرانه ردپای کربن تولیدی برای هر فرد ساکن در ساختمان‌های ویلایی به نحوه محسوسی بیشتر از ساختمان‌های آپارتمانی است. اگرچه تفاوت محسوسی میان ساختمان‌های آپارتمانی ۲ و ۵ طبقه مشاهده نشده است. به منظور مقایسه لازم به ذکر است طبق گزارشات سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا (EPA[۱۷])، میزان دی‌اکسیدکربن حاصل از سوخت یک خودروی شخصی در طول یک سال حدود ۴۷۰۰ kg، ردپای کربن غذای هر امریکایی در سال ۶۱۰۰ kg و مجموع ردپای کربن سالانه هر امریکایی ۲۸۲۰۰ kg می‌باشد. این در حالیست که کوهی و عابسی (۱۳۹۷) مقدار ردپای کربن ناشی از فرایندهای ساخت یک سازه دو طبقه را ۴۶۳/۵۵ کیلوگرم کربن به ازای مترمربع و ردپای کربن ناشی از بهره برداری از این ساختمان در هر سال را ۴۰ کیلوگرم کربن به ازای مترمربع از ساختمان یا ۴۸۷۵ کیلوگرم به ازای هر فرد برآورد نموده‌اند [۱۸ و ۱۹]. مقایسه این اعداد نشان دهنده نقش بسزای صنعت ساخت و ساز و بهره برداری غیرسبز و پایدار از آن در تولید کربن و گرمایش جهانی زمین است که آن خود مجموعه ای گسترده از پیامدهای محیط زیستی و اکولوژی را در پی خواهد داشت.

جدول ۳- میزان کربن دی اکسید تولیدی در طول یک سال بهره برداری از ساختمان‌های ویلایی و آپارتمانی در اقلیم بابلسر

کربن دی اکسید تولید شده (کیلوگرم)	ساختمان
۱۶۹۸۰/۲۳	ویلایی
۱۹۵۱۳/۸۹	آپارتمانی ۲ طبقه
۹۷۶۳۷/۷۱	آپارتمانی ۵ طبقه

۵- نتیجه‌گیری

امروزه شهرها را در سطح دنیا چاله‌های انرژی و مواد می‌دانند که در ابعاد بسیار کلان منابع طبیعی را در خود بلعیده و انواع پسماندها و آلودگی‌ها را تولید می‌کنند. صنعت ساختمان یکی از مهمترین بخش‌ها در مصرف بالای انرژی و منابع در سطح شهرهای دنیا محسوب شده که تولید گازهای گلخانه‌ای و تخریب محیط زیست در ابعاد جهانی را به همراه داشته است. این روند باعث شده است تا طی سال‌های اخیر سازمان‌های جهانی و دولت‌ها توجه بیشتری به روند ساخت ساختمان‌های مسکونی، خدماتی و تجاری داشته باشند و آثار محیط زیستی این تاسیسات حین ساخت و بهره‌برداری بیشتر مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق، با هدف ارزیابی کمی نقش بهره برداری از ساختمان ها در تولید گازهای گلخانه ای در سطح منطقه ای، ابتدا با مدلسازی کامپیوتری یک ساختمان ویلایی و مقایسه میزان انرژی مصرفی آن با داده‌های میدانی مصرف گاز و برق، دقت مدلسازی طی دوره یک ساله مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس سه ساختمان مسکونی ویلایی و آپارتمانی دو و پنج طبقه در محدوده شهرستان بابلسر به عنوان نمونه‌ای از ساختمان‌های رایج در منطقه مورد شبیه-سازی قرار گرفته است و میزان انرژی مصرفی در بخش‌های مختلف ساختمان و دی‌اکسیدکربن تولیدی ناشی از آن در طول سال بهره-برداری با استفاده از قابلیت نرم‌افزار دیزان‌بیلدر مورد محاسبه قرار گرفته است. نتایج کلی تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

۱- در نتیجه شبیه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان ویلایی، میزان مصرف معادل گاز برابر با ۶۱۷۵/۱۳ kWh و مصرف برق را ۷۳۷۲/۰۵ kWh برآورد شده است. در شرایط واقعی و با اندازه‌گیری برق مصرفی از روی فیش‌های دریافتی، میزان مصرفی برق ساختمان

[1] United States Environmental Protection Agency

۷۸۰۹ kWh و مصرف گاز آن ۶۵۲۰ kWh برآورد گردیده است که بیانگر دقت حدودا ۹۰ درصدی مدل در برآورد مصارف انرژی این ساختمان است.

۲- سرانه مصرف انرژی به ازای هر فرد ساکن در ساختمان‌های آپارتمانی به صورت چشمگیری کمتر از میزان آن در ساختمان ویلایی برآورد شده است.

۳- میزان تولید کربن یا ردپای کربن مجازی ناشی از بهره‌برداری از ساختمان‌های ویلایی و آپارتمانی مورد مطالعه در طول یک سال نیز به ترتیب ۱۶۹۸۰، ۱۹۵۱۳ و ۹۷۶۳۷ کیلوگرم برآورد گردیده است. مقادیر فوق به خوبی اهمیت و نقش این صنعت در ورود سطح بالایی از گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر زمین را نشان می‌دهد.

در انتها لازم است یادآور شد که در شهرهای شمالی و بالاخص بابلسر، احداث ساختمان‌های ویلایی علیرغم اشغال و تغییر کاربری اراضی با ارزش کشاورزی و باغی که پیامدهای مستقیم محیط زیستی دراز مدت برای منطقه و کشور به همراه خواهد داشت، به دلیل عدم وجود مشاعات و سیستم های منفرد حرارتی این ساختمانها دارای سرانه مصرف انرژی و انتشار کربن مجازی بالاتری نسبت به ساختمان‌های آپارتمانی می‌باشند. این موضوع به نوبه خود ضرورت بازنگری در برنامه ریزی‌های توسعه شهری در کشور و بالاخص مناطق تفریحی و توریستی سواحل شمالی ایران را آشکار می‌سازد. در سالهای اخیر با توجه ارزش زمینهای مسکونی با چشم انداز‌ه های همیشگی، روند روبه رشدی در توسعه برجهای بلند مرتبه در مناطق ساحلی این شهر آغاز گردیده است. روندی مشابه در عمده شهرهای ساحلی و توریستی مهم دنیا از میامی امریکا تا ریودوژانیرو برزیل مشاهده می گردد. تحت این شرایط علاوه بر تامین بهتر امنیت و اشغال کمتر زمینهای با ارزش ساحلی، تامین مسکن در مناطق توریستی مصرف کمتر آب و انرژی و در پی آن پیامدهای محدودتر محیط زیستی را به دنبال خواهد داشت. برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود نقش فعالیت‌های اصلاحی از جمله ارتقای سیستم‌های کم مصرف روشنایی، استفاده از سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی با راندمان بالا، عایق‌بندی پوسته ساختمان و استفاده از پنجره‌های دو یا سه جداره و .... در کاهش مصرف انرژی و بهبود ردپای کربن مجازی در ساختمان که به صورت عمومی در سرفصل توسعه ساختمان‌های سبز به آن اشاره می-شود، مورد مطالعه قرار گیرد. پیش‌بینی هر یک از این سناریوها تحت شرایط تغییر اقلیم و افزایش ۲-۵ درجه‌ای در میانگین حرارت کره زمین نیز می‌تواند تصویر بهتری از میزان انرژی مصرفی ساختمان برای ساختمان‌های سنتی و ساختمان‌های سبز و میزان اثربخشی و اهمیت اقتصادی آن فراهم سازد.

۶- منابع

[1] Zimmer, A. and Ha, H., (2014). Buildings and Infrastructure from a Sustainability Perspective. *Sustainable and Healthy Communities Program-Theme 4.1*, *1*, pp.2016-09.

[2] Deru, M.P. and Torcellini, P.A., (2007). *Source energy and emission factors for energy use in buildings*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

[3] Wackernagel, M. and Rees, W. (1996). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Canada: New Society Publishers, 113-127.

[4] Onat, Nuri Cihat, and Murat Kucukvar (2020). Carbon footprint of construction industry: A global review and supply chain analysis." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 124: 109783.

[5] Green Building, (2012). *History of Green Building*. [online] Available at: http://www marble- institute. com/ pdfs /. [Accessed 5 June. 2012].

[6] History of Green Building, (2012). *Sunrise builders*. [online] Available at: http://www.sunrisebuildersmqt. net/green- building/history-of-green-building.

[7] Yan, H. Shen, Q. Fan, LCH. Wang, Y. and Zhang, L. (2010). *Greenhouse gas emissions in building construction: Acase study of One Peking in Hong Kong*. Building and Environment, 45, 949-955.

[8] Teng, J. and Wu, X. (2014). *Eco-footprint-based life-cycle eco-efficiency assessment of building projects*. Ecological Indicators, 39, 160-168.
[9] Solís-Guzmán, J. Martínez-Rocamora, A. and Marrero, M. (2014). *Methodology for determining the carbon footprint of the construction of residential buildings*, *Assessment of carbon footprint in different industrial sectors*. Edited by Subramanian Senthilkannan Muthu, Springer, 1, 49-83.
[10] Moussavi, Z. and Akbarnezhad, A. (2015). *Effects of structrul system on the life cycle carbon footprint of building*. Energy and Building, 102, 337-346.
[11] Jin, H. and Ling, W. (2015). *External wall structure of green rural hoses in Daqin, China, based on life cycle and ecological footprint theories*. Frontiers of Architectural Research, 4, 212-219.
[12] Yu, M. Thomas, W. Crawford, R. and Tait, C. (2017). *The carbon footprint of Aoustralias construction sector*. Procedia Engineering, 180, 211-220.
[13] Kumar Pal, S. Takano, A. Alanne, K. and Siren, K. (2017). *A life cycle approach to optimizing carbon footprint and costs of a residential building*. Biulding and Environment, *123, 146-162.*
[14] Fantilli, A. P., O. Mancinelli, and B. Chiaia (2019). The carbon footprint of normal and high-strength concrete used in low-rise and high-rise buildings." *Case Studies in Construction Materials* 11: e00296.
[15] DesignBuilder, D., (2021). 2.1 User's Manual. https://designbuilder.co.uk/
[16] EnergyPlus Essentials, (2021), EnergyPlus™ Version 9.5.0 Documentation, U.S. Department of Energy
[17] Energyplus Engineering Reference. (2018). U.S. Department of Energy, 10 October,
[18] Koohi, M. Abessi, O. (2019). *Calculating the carbon footprint in Construction Industry, comparing a building with concrete and steel structure*. International Conference on Civil, Architecture and Urban Development Management in Iran.
[19] Koohi, M. Abessi, O. (2019). *Calculating the water footprint in Construction Industry, comparing a building with concrete and steel structure*. International Conference on Sustainable Development and Urban Development.
[20] Aram, M. and Abessi, O. (2020). *Optimal design of green buildings using computational fluid dynamics and climate simulation tools*. International Journal of Environmental Science and Technology, *17*, 917-932.