

BIM-Based LCA and the role of Regional Variables

Ali Akbar Shirzadi Javid^{1*}, Sahar Falegari²

1- Associate Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- M.Sc. Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

With the architecture, Engineering and Construction (AEC) industry representing a significant share of global energy consumption and greenhouse gas (GHG) emissions, developing sustainable design and reducing buildings environmental impacts has become a priority over the past decades. Adopting building information modelling (BIM) tools and implementing them into life cycle analysis (LCA) techniques at early stages of design has proven to be one of the most effective methods for a buildings sustainability evaluation. It's quite often that some of these attributes are overlooked due to their insignificance or in order to facilitate the analysis. With our environment constantly going through changes it is reasonable that the construction industry should also aim to adapt to these changes and make use of them. However, the role of local climate features and its effects on a buildings energy output is often so neglected. This research aims to consider the role of climatic attributes and local weather characteristics of a building by using BIM-LCA integration techniques, and see how it affects that buildings energy performance. It is witnessed that by using the proper equipment and construction materials, that matches the respective climate, up to 28% of the buildings energy consumption during the operational phase, can be saved. Admitting changes to the model however, can cause up to 3% increase in the models GHG emissions. Moreover, this work develops a prototype to validate the results.

ARTICLE INFO

Receive Date: 21 April 2022

Revise Date: 07 July 2022

Accept Date: 10 August 2022

Keywords:

Life Cycle Assessment(LCA)

BIM-based LCA

Regional variables

Climate Change

Building Information Modeling
(BIM)

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.337986.2782>

*Corresponding author: Ali Akbar Shirzadi Javid

Email address: Shirzad@iust.ac.ir

ارزیابی چرخه عمر با تلفیق مدل سازی اطلاعات ساختمان و متغیرهای اقلیمی-منطقه‌ای

علی اکبر شیرزادی جاوید^{۱*}، سحر فعله‌گری^۲

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

با گسترش نقش قابل ملاحظه صنعت معماری، مهندسی و ساخت در مصرف جهانی انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه‌ی مبانی طراحی پایدار و کاهش اثرات زیست محیطی از اهمیت روز افزون برخوردار شده است. در این راستا استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان و به کارگیری آن در ارزیابی چرخه عمر در مراحل اولیه طراحی روش قابل اطمینانی برای ارزیابی مبانی توسعه پایدار در ساختمان‌ها است. در نتیجه تعدد عواملی که در ارزیابی پایداری یک ساختمان اثرگذارند، هنگام بهینه‌سازی اثرات ناشی از ساخت و بهره‌برداری از یک ساختمان نقش متغیرهای اقلیمی و منطقه‌ای گاهاً مورد توجه قرار نمی‌گیرند. این پژوهش، متغیرهای اقلیمی-منطقه‌ای و تاثیر آن‌ها را در ارزیابی چرخه عمر ساختمان و مصرف سالانه انرژی آن مورد بررسی قرار می‌دهد. بدین ترتیب سه مدل یکسان در سه موقعیت با اقلیم متفاوت در آمریکای شمالی (بوستون، آریزونا و کبک) توسعه داده شده و ارزیابی چرخه عمر برای این سه مدل در دو سناریوی مختلف بررسی شده است. نتایج نشان داد با استفاده از مصالح مناسب که با ویژگی‌های آب و هوایی منطقه سازگاری دارد، بیش از ۲۸٪ در مصرف انرژی سالانه ساختمان در مرحله بهره‌برداری صرفه‌جویی شود. گرچه لایه عایق حرارتی به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کند، اما موجب افزایش ۳٪ در مقدار گازهای گلخانه‌ای انتشار یافته در طول چرخه عمر مدل می‌شود. این مقدار با توجه به این که حجم عایق حرارتی به کار گرفته شده در مجموع کمتر از ۲٪ از حجم کل مدل است، مقدار قابل تاملی است.

کلمات کلیدی: ارزیابی چرخه عمر، مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، متغیرهای اقلیمی-منطقه‌ای، تغییر اقلیم، توسعه‌ی پایدار

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.337986.2782	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.337986.2782	۱۴۰۲/۰۳/۳۱	۱۴۰۱/۰۵/۱۹	۱۴۰۱/۰۵/۱۹	۱۴۰۱/۰۴/۱۶	۱۴۰۱/۰۲/۰۱
علی اکبر شیرزادی جاوید shirzad@iust.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

کاهش نرخ مصرف انرژی و تاثیرات مخرب محیط زیستی در صنعت ساخت، به یکی از اولویتهای طراحی و اجرا در صنعت معماری، مهندسی و ساخت تبدیل شده است. با توجه به فرهنگ لغت آکسفورد^۲، استفاده از واژه "پایداری"^۳ در منابع آکادمیک، از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۹ بیش از ۴۰ برابر شده است. این موضوع بیانگر اهمیت و توجه روز افزون به مسئله توسعه پایدار است. جلوگیری از مصرف بی‌رویه منابع طبیعی و انرژی، جنبه حائز اهمیتی از توسعه پایدار است. توسعه پایدار در صنعت ساخت، با هدف افزایش کیفیت زندگی برای ساکنان ساختمان به کمک ایجاد تعادل بین مولفه‌های مطلوب ساکنان و احتمالات مقرون به صرفه است [۱]. صنعت ساخت به عنوان بزرگ‌ترین مصرف کننده منابع انرژی، مسئول انتشار بیش از ۲۵٪ گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود [۲]. از روش‌های شناخته شده برای تخمین اثرات محیط زیستی عملیات‌های مرتبط با ساخت بر توسعه پایدار ساختمان‌ها، استفاده از ارزیابی چرخه عمر است. ارزیابی چرخه عمر به روش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سه مرحله انجام می‌شود: مرحله اول شامل مقدار گازهای منتشر شده ناشی از تولید و فرآوری مصالح، انتقال آن‌ها و عملیات‌های ساخت؛ مرحله دوم شامل میزان انتشار حاصل از بهره‌برداری و نگهداری ساختمان که عموماً ناشی از وسایل گرمایشی سرمایشی، نورپردازی و سایر تجهیزات داخلی (پمپ‌های آب، آسانسورها و ...) به کار گرفته شده در ساختمان است؛ مرحله سوم شامل میزان گازهای منتشر شده ناشی از تخریب ساختمان، مدیریت پسماند و دفع کردن است [۳].

کمی‌سازی تاثیرات محیط زیستی یک ساختمان توسط ارزیابی چرخه عمر عموماً در سه دسته مورد پیگیری قرار می‌گیرد: مرحله پیش از ساخت^۴، مرحله ساخت^۵ و مرحله پس از ساخت^۶. در فرآیند ارزیابی تمام عیار چرخه عمر، تمام دوره‌های چرخه عمر از استخراج منابع خام، تولید و انتقال آن‌ها به سایت، تا مرحله ساخت، بهره‌برداری و نگهداری، و نهایتاً تخریب و انهدام ساختمان را شامل می‌شود. گرچه، با توجه به حجم عظیمی از اطلاعات که در این میان باید به ثبت رسیده و مورد اشتراک واقع شود، اعمال ارزیابی تمام عیار از چرخه عمر می‌تواند بسیار وقت گیر و گاه طاقت فرسا باشد. هم‌چنین، با توجه به گرایش روز افزون توسعه پایدار، مناسب‌ترین گزینه، ارائه نتایج ارزیابی در مراحل اولیه طراحی ساختمان است، تا بتوان این نتایج را در فرآیند تصمیم‌گیری برای ساختمان مورد اثر قرار داد. در غیر این صورت فرآیند پیشرفت پروژه ممکن است به صورتی باشد که اگر نتایج ارزیابی در مراحل اولیه ارائه نشود، نقش آن‌ها در تصمیم‌گیری از بین رفته و برای ایجاد تغییرات بر اساس نتایج پیشنهادی دیر شده باشد. ارزیابی پایداری در مراحل اولیه پروژه، مثلاً در مراحل طراحی شماتیک، که اعمال تغییرات احتمالی هزینه کمتری به همراه دارد، به مراتب تاثیر بسیار بیشتری در فرآیند توسعه پایدار ساختمان برجا می‌گذارند [۴].

نوع ساختمان و مصالحی که در آن به کار رفته است، غالباً مولفه اصلی در تعیین موثرترین مرحله ارزیابی چرخه عمر است. برای ساختمانی که عمده مصرف آن از طریق الکتریسیته و سوخت است، مرحله بهره‌برداری و استفاده از ساختمان بیشترین مقدار آسیب‌های محیطی را در ارزیابی چرخه عمر به همراه دارد. مرحله تولید و فرآوری مصالح با اختلاف به عنوان دومین عامل تاثیرگذار شناخته می‌شود. در عین حال برای ساختمانی که عمده مصرف آن از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر تامین می‌شود، مرحله تولید و فرآوری بیشترین تاثیر را بر نتایج حاصل از ارزیابی چرخه عمر دارد [۵]. در پژوهشی که توسط اجایی و همکاران^۷ [۶] به عمل آمد، نتایج حاصل از ارزیابی مصالح نشان داد که بدون توجه به مصالح به کار گرفته شده در ساختمان، ساختمان‌هایی که بر مبنای انرژی‌های تجدیدپذیر عمل می‌کنند، در طولانی مدت عملکرد بهتری نسبت به ساختمان‌های با مبنای مصارف سوخت‌های فسیلی را دارا هستند. در این پژوهش هم‌چنین، انواع مصالح به کار گرفته شده و نتایج ارزیابی چرخه عمر بر مبنای هر نوع ثبت رسیده است. جدول ۱ برخی از این نتایج را به صورت خلاصه به نمایش

^۱Architecture, Engineering and Construction

^۲Oxford Dictionary

^۳Sustainability

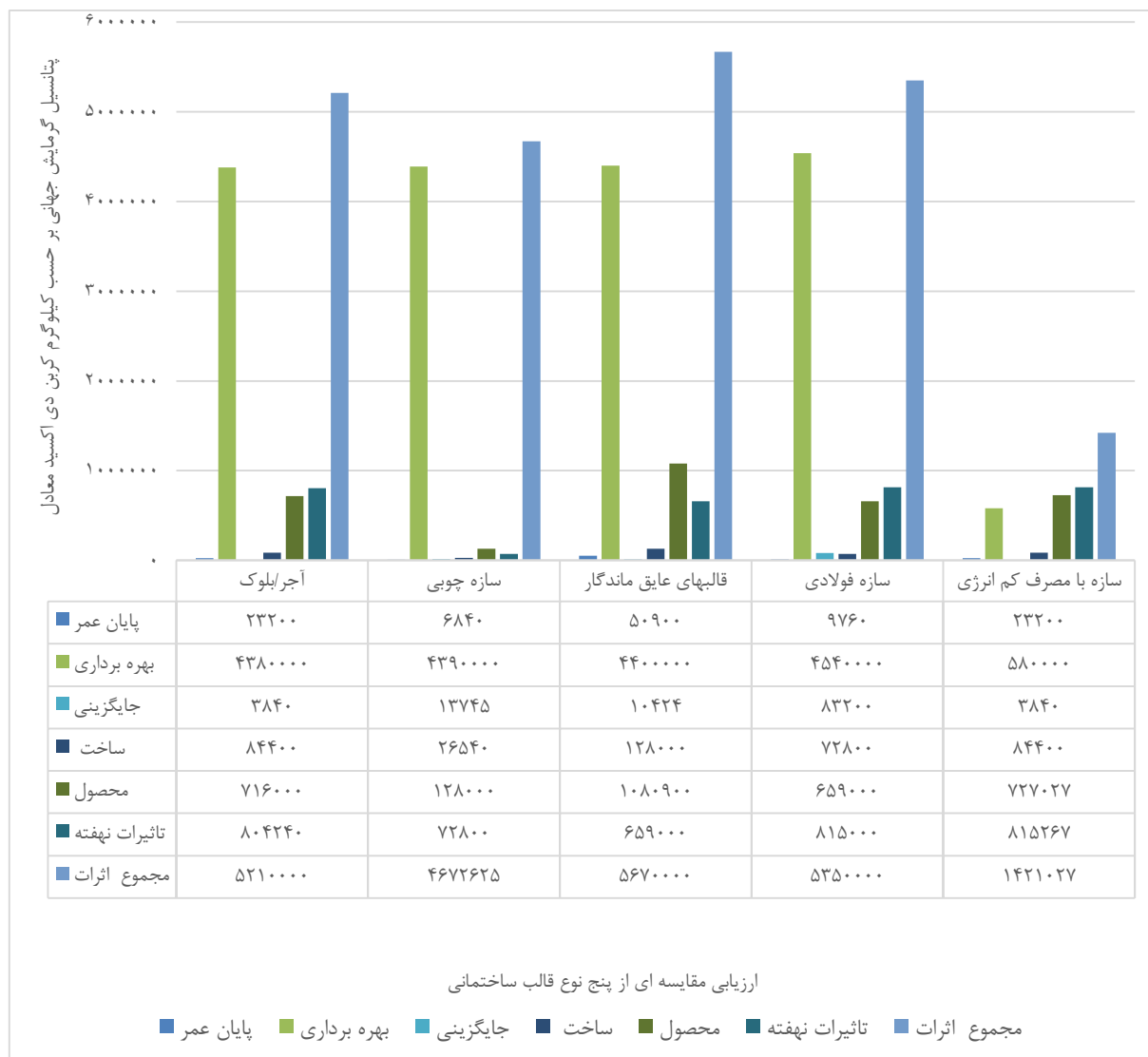
^۴Pre-Construction

^۵Construction

^۶Post-Construction

^۷Ajaji et al.

می‌گذارد. این پژوهش هم‌چنین اذعان می‌دارد که هر چقدر مصرف انرژی ساختمان در مرحله بهره‌برداری به سمت بهبود می‌نماید، باید توجه بیشتری به اثرات نهفته ناشی از چرخه عمر آن معطوف نمود.



شکل ۱. نقش مصالح در ارزیابی چرخه عمر [۶]

۲- مروری بر ادبیات پیشین

در راستای تلفیق بیم و ارزیابی چرخه عمر، چارچوب‌های بسیاری پیشنهاد داده شده است. در پژوهشی که توسط نجار و همکاران^۸ [۷] به عمل آمد، متدلوژی ارزیابی چرخه عمر از دیدگاه ساختمانی بررسی شده و نقش تلفیق مدل‌سازی و چرخه عمر در ارزیابی تاثیرات محیط زیستی مصالح ساختمانی برای کمک به تصمیم‌گیری و دستیابی به استانداردهای طراحی بهتر، با بهره‌وری بیشتر و مقرون به صرفه‌تر مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها هم‌چنین به این نتیجه رسیدند که بیشترین اثرات محیط زیستی در مرحله تولید مصالح و بهره‌برداری از ساختمان در طول عمر آن اتفاق می‌افتد. بوئنو و فابریچو^۹ [۸] به تبعات ساده‌سازی داده‌ها در ارزیابی چرخه عمر و ارائه

^۸ Najjar et al.

^۹ Bueno and Fabricio

روشی برای تلفیق مدلسازی اطلاعات ساختمان و ارزیابی چرخه عمر پرداختند. آن‌ها نتایج ۵ نوع دیوار شبیه سازی شده در افزونه تالی^{۱۰} را مقایسه کرده و نیز خروجی‌های ارزیابی را در دو نرم افزار چرخه عمر با عنوان تالی و گبی ۶ مقایسه کردند. نتایج مربوط به تاثیرگذارترین گزینه باهم ناسازگار بوده که نشانگر تاثیر ساده سازی داده‌های ورودی در دقت نتایج خروجی است. سوست و همکارانش^{۱۱} [۹] روشی برای ارزیابی چرخه عمر بر مبنای مدلسازی اطلاعات ساختمان در مراحل اولیه طراحی گسترش داده و اعتبار چارچوب پیشنهادی را با ارزیابی تاثیرات محیط زیستی برای یک ساختمان مسکونی تک واحدی در اروگوئه بررسی کردند. روش ارائه شده به منظور مساعدت در فرآیند تصمیم گیری (در انتخاب مصالح مناسب، تکنیک‌های ساخت و فاصله‌ی انتقال) در طول چرخه عمر ساختمان ارائه شد و نیز کاهش حجم داده‌های ورودی مورد نیاز و بهینه سازی فرآیند طراحی برای ارزیابی اثرات محیط زیستی را مورد هدف قرار داد. رماجی و همکارانش^{۱۲} [۱۰] به توضیح ارزیابی توسعه پایدار و مواردی که در آن می‌توان از مدلسازی اطلاعات ساختمان به عنوان اهرم برای دستیابی به این هدف استفاده کرد پرداختند. شادرام^{۱۳} [۱۱] چارچوب دیگری را پیشنهاد داده و مدلی برای سنجش اعتبار آن توسعه داد. چارچوب پیشنهادی شامل تمایزهای مفهومی، فرآیندهای لازم و جریان اطلاعات برای ارزیابی انرژی نهفته وابسته به زنجیره تامین مصالح ساختمانی بوده و مدل پیشنهادی برای سنجش عملکرد و اعتبار این چارچوب به کار گرفته شد. اساره و رویکار^{۱۴} [۱۲] در پژوهشی، نقش ارزیابی چرخه عمر بر مبنای مدلسازی اطلاعات ساختمان را در تسهیل توسعه پایدار ساختمان در غنا مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش با تاکید بر فرآیند ارزیابی و الزامات مربوط به اطلاعات، چارچوبی ارائه شد که شامل یک ماتریس هدایت و یک جریان کارپیشنهادی است. توشر و همکاران^{۱۵} [۱۳] از روشی سیستماتیک برای ایجاد ارتباط بین مراحل مختلف ارزیابی چرخه عمر استفاده کردند و نگرشی برای رفع موانع رسیدن به ساخت بهینه ارائه دادند. آن‌ها برای تعیین حساس‌ترین المان‌های ساخت از تحلیل حساسیت استفاده کرده و دیوار و سقف را اجزای اصلی با بالاترین حساسیت در تعیین مصرف انرژی ساختمان معرفی کردند. نتایج پژوهش شاخص تغییرات ایزولاسیون سقف نقش ضرورت مدلسازی اطلاعات ساختمان در پیشرفت ابزارهای شبیه سازی انرژی برای رسیدن به طراحی بهینه از دیدگاه توسعه پایدار مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به پژوهش‌های پیشین، بیشتر اثرات منفی زیست محیطی در دو مرحله تولید و بهره برداری از ساختمان اتفاق می‌افتد [۱۴]، به طوری که، این دو مرحله مجموعاً بیش از ۹۰٪ از انرژی مورد نیاز در تمام طول چرخه عمر یک محصول را دربرمی‌گیرد، به همین دلیل در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده معمولاً فرآیند ارزیابی با ساده کردن چرخه عمر در این دو مرحله اصلی از چرخه عمر ساختمان‌ها خلاصه می‌شود [۱۵].

در ارزیابی چرخه عمر آثار مربوط به مصرف انرژی بر روی محیط زیست، کمی‌سازی می‌شود. فرآیند کمی‌سازی، در قالب چند دسته ارائه می‌شود: پتانسیل گرمایش جهانی^{۱۶}، تخلیه‌ی لایه ازن استراتوسفریک^{۱۷}، اسیدی شدن^{۱۸}، اوتروفیکاسیون^{۱۹}، تشکیل ازن تروپوسفریک^{۲۰} و تخلیه منابع انرژی تجدید ناپذیر^{۲۱}. پتانسیل گرمایش جهانی، مولفه‌ی اصلی ارزیابی چرخه عمر است که بر حسب کیلوگرم کربن دی اکسید (CO₂) محاسبه شده و مقدار انرژی که انتشار یک تن گاز در بازه‌ی زمانی مشخصی جذب می‌کند نسبت به انتشار یک تن کربن دی اکسید (CO₂) [۱۶].

جدول ۱ برخی دیگر از پژوهش‌های اخیر در حوزه تلفیق مدلسازی اطلاعات ساختمان و ارزیابی چرخه عمر و نیز تخمین مصارف انرژی به صورت خلاصه ارائه می‌دهد.

جدول ۱. پژوهش‌های اخیر در حوزه تلفیق مدلسازی اطلاعات ساختمان و ارزیابی چرخه عمر

¹⁰ Tally

¹¹ Bernardette Soust et al.

¹² Issa J. Ramaji et al.

¹³ Shadram et al.

¹⁴ Asare et al.

¹⁵ Tushar et al.

¹⁶ Global Warming Potential

¹⁷ Ozone Depletion Potential

¹⁸ Acidification

¹⁹ Eutrophication

²⁰ Formation of Ozone of Lower Atmosphere

²¹ Depletion of Non Renewable Energies

محقق	تمرکز تحقیق	ابزارهای مورد استفاده
هولبرگ ^{۲۳} (۲۰۱۹) [۱۷]	اعمال پی در پی ارزیابی چرخه عمر بر مبنای مدلسازی اطلاعات ساختمان ^{۲۲} در مراحل مختلف طراحی و ارزیابی نتایج حاصل از این روش	Microsoft Excel, AutoDesk Revit, Dynamo
کاروالو ^{۲۴} (۲۰۲۰) [۱۸]	به بررسی رابطه بین توسعه ی چرخه عمر بر مبنای مدلسازی اطلاعات ساختمان و ارزیابی پایداری در ساختمان ها (با توجه به ضوابط ساختمان در پرتغال) می پردازد. هدف آن بهبود عملکرد ارزیابی در طول چرخه عمر و ارائه ی چارچوبی برای رسیدن به این هدف است	Autodesk Revit, Cypetherm REH, Tally,
شو سو ^{۲۵} (۲۰۲۰) [۱۹]	برای توسعه ی مدل جدیدی از ارزیابی در ساختمان ها، مدلسازی اطلاعات ساختمان را با ارزیابی دینامیک چرخه عمر ^{۲۵} تلفیق می کند.	Microsoft Excel, Green Building Studio, Revit, Glodon
راک ^{۲۶} (۲۰۱۸) [۲۰]	برای تسهیل فرآیند تصمیم گیری در مراحل اولیه طراحی، نگرشی برای استفاده از مدلسازی اطلاعات ساختمان در دسترسی به بازه عظیمی از مصالح ساختمانی و تاثیرات محیط زیستی آن ها پیشنهاد می دهد.	Microsoft Excel, Autodesk Revit, Dynamo
اوا مارتین ^{۲۷} (۲۰۱۹) [۲۱]	برای ساده کردن محاسبات در روش استفاده از یادگیری ماشین نگرش های مختلف در تخمین مصرف انرژی بررسی می کند.	SyNERGY, NeuralPower, DeLight
فورث ^{۲۸} (۲۰۱۹) [۲۲]	به بررسی بی دقتی های رایج در فرآیند یکپارچه سازی مدلسازی اطلاعات ساختمان با ارزیابی چرخه ی عمر می پردازد و چارچوبی برای شناسایی و رفع این بی دقتی ها ارائه می دهد.	Autodesk Revit, ArchiCAD, Simplebim, One Click LCA, Tally, eLCA

سیاست های به کار گرفته شده در کاهش مصرف انرژی در صنعت ساخت، عموماً اهمیت و تاثیر متغیرهای منطقه ای و اقلیمی را دست کم می گیرند [۲۳]. مصرف انرژی در پاسخ به تغییرات اقلیمی و نیازهای گرمایشی سرمایه ای منطقه که غالباً باهم در تقابل هستند تغییر می کند و افزایش یا کاهش خالص در مصرف انرژی تا حد زیادی به این نیازها منطقه بستگی دارد که نیازهای گرمایشی سرمایه ای هم متقابلاً از وضعیت جوی و اقلیمی منطقه تاثیر می پذیرد [۲۴]. ودیکار و همکاران^{۲۵} [۲۵] در پژوهشی تغییرات اقلیم و استهلاک ساختمان را با عملکرد مصرف انرژی ساختمان بررسی کردند و تاثیرات قابل توجه هر دو پارامتر را شناسایی نمودند. شین و همکاران [۲۶] در پژوهشی نقش موقعیت و زاویه چرخش و نوع سیستم تهویه را با دسترسی به پایگاه داده های هوایی منطقه برای یک ساختمان اداری مورد بررسی دادند. پژوهش برای یک منطقه با ویژگی های آب و هوایی مشخص انجام شده و تعدد ویژگی های اقلیمی با تغییر منطقه مورد بررسی قرار نگرفت. راک و همکاران [۲۷] با تاکید بر نقش قابل توجه گازهای گلخانه ای بر تغییرات اقلیمی نتایج حاصل از ۶۰۰ مورد مطالعاتی در حوزه ارزیابی چرخه عمر را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس مقایسه نتایج، با بهبود عملکرد چرخه عمر مصرف انرژی کاهش می یابد، این در حالی است که تولید گازهای گلخانه ای نهفته می تواند مورد افزایش واقع شود و یافتن منطقه بهینه برای مصرف انرژی تولید گازهای گلخانه ای نهفته^{۳۱} باید مورد توجه بیشتری قرار بگیرد. منظور از گازهای گلخانه ای نهفته، مقدار کربن دی اکسید انتشار یافته در طول فرآیند تولید و فرآوری محصولات ساختمانی است. چنگ و همکاران [۲۸] به بررسی تلفیق مدلسازی اطلاعات ساختمان با ارزیابی چرخه عمر و میزان انتشار گازهای گلخانه ای با در نظر گرفتن موردی مطالعاتی در شرایط زمستانی سرد و تابستانی گرم پرداختند. مطابق نتایج این تحقیق، میزان انتشار گازهای گلخانه ای در فصل تابستان بیشترین سهم را در میزان انتشار سالانه به خود اختصاص می دهد. علاوه بر این مرحله بهره برداری و نگهداری از ساختمان در بیش از ۸۰ درصد کل انتشار گازهای گلخانه ای توسط ساختمان سهیم است.

با توجه به اهمیت روز افزون ارزیابی چرخه عمر در صنعت ساختمان، تکنیک های بسیاری برای به کارگیری این روش توسعه داده شده است. هنگام بررسی چرخه عمر، عملکرد محیطی ساختمان به مولفه های مختلفی وابسته است که به برخی از آن ها اشاره شد.

²² BIM based LCA

²³ Hollberg et al.

²⁴ Carvalho et al.

²⁵ Dynamic Life Cycle Assessment (DLCA)

²⁶ Shu su et al.

²⁷ Martin Rock et al

²⁸ Eva García-Martín et al.

²⁹ Forth K et al.

³⁰ Waddicor et al.

³¹ Embodied GHG emissions

هم‌چنین، نحوه عملکرد ساختمان، نیازمندی‌ها برای ایجاد دمای رفاه، الگوی مصرف در ساختمان و الگوهای رفتاری ساکنین ساختمان از جمله موارد دیگری است که در مصرف انرژی و متعاقباً میزان تولید گازهای گلخانه‌ای تاثیر می‌گذارد. در این میان نقش اقلیمی و متغیرهای اقلیمی - منطقه‌ای نیز از مواردی است که می‌تواند تاثیر به‌سزایی در عملکرد ساختمان حین ارزیابی چرخه عمر باشد. مناطق مختلف بسته به آب و هوای غالب منطقه (تمرکز گرما^{۳۲} یا سرما^{۳۳} و ...) نیازهای گرمایشی، سرمایشی متفاوتی را دنبال می‌کنند. این مسئله که سازگار کردن طراحی ساختمان و به تبع آن نتایج ارزیابی چرخه عمر حاصل از آن با نیازهای آب و هوایی منطقه، چقدر می‌تواند به نفع یا ضرر ساختمان باشد و نیز لزوم انطباق ابزار و تکنیک‌های طراحی ساخت با شرایط آب و هوایی به خصوص در یک منطقه در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- روش تحقیق

۳-۱- ساخت و توسعه مدل در نرم افزار روبیت

هدف این پژوهش بررسی نقش متغیرهای اقلیمی در ارزیابی چرخه عمر بر مبنای مدلسازی اطلاعات ساختمان است. صنعت معماری، مهندسی و ساخت بخش عظیمی از مصرف جهانی انرژی را به خود اختصاص می‌دهد و از جمله تدابیر برای کمی سازی مصارف انرژی و تاثیرات محیط زیستی این صنعت استفاده از مفهوم ارزیابی چرخه عمر است. ارزیابی و مقایسه نتایج حاصل از چرخه عمر یک ساختمان مسکونی دو طبقه در سه منطقه با ویژگی‌های آب و هوایی مختلف در آمریکای شمالی در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مناطق به ترتیب عبارتند از بوستون^{۳۴}، آریزونا^{۳۵} و کبک^{۳۶} که دارای ویژگی‌های اقلیمی-آب و هوایی مختلفی هستند. در این جا لازم به ذکر است، تعیین موقعیت مدل‌ها با توجه به عدم دسترسی نرم‌افزار GBS به پایگاه داده‌های هوایی در کشور ایران، به ناچار در آمریکای شمالی صورت گرفت. هم‌چنین استانداردهای کافی برای مقایسه نتایج مربوط به ارزیابی چرخه عمر در کشور ایران موجود نیست اما با توجه به شباهت کلی ضوابط ساختمانی این کشور با آمریکای شمالی، استفاده از موقعیت‌های ذکر شده تصمیم مناسبی به نظر می‌رسد.

در راستای تسهیل فرآیند ارزیابی چرخه عمر، ابزار مدلسازی اطلاعات ساختمان در بسیاری از پژوهش‌ها به کار گرفته شده است [۲۹-۳۱]. به کمک ابزارهای موجود در مدلسازی اطلاعات ساختمان، نه تنها یکپارچه سازی اطلاعات مورد نیاز تسهیل می‌شود بلکه تعداد فرآیندهای لازم برای به عمل آوردن ارزیابی نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این پژوهش نیز از مدلسازی اطلاعات ساختمان برای ارزیابی چرخه عمر استفاده شده است. ابزارهای مربوط به مدلسازی، هم‌چنین امکان تحلیل مصرف انرژی ساختمان و گازهای گلخانه‌ای انتشار یافته در بازه ۳۰ ساله از چرخه عمر ساختمان را در اختیار قرار می‌دهند.

مدل مورد استفاده در نرم‌افزار روبیت توسعه داده شده است و شمای کلی آن به همراه پلان طبقه همکف در شکل ۱ آمده است. هم‌چنین ویژگی‌های کلی مدل شامل مساحت سطح ناخالص، مجموع مساحت فضاهای کنترل شده^{۳۷} و کنترل نشده نیز در جدول ۳ برآورد شده است.

جدول ۲. معرفی پارامترهای طراحی

پارامتر طراحی	مقدار	واحد
مساحت ناخالص	۳۳۰٫۹۶	مترمربع
فضای کنترل شده	۲۲۷٫۰۱	مترمربع
فضای کنترل نشده	۵۳٫۰۱	مترمربع

³² Heat Intensive

³³ Cold Intensive

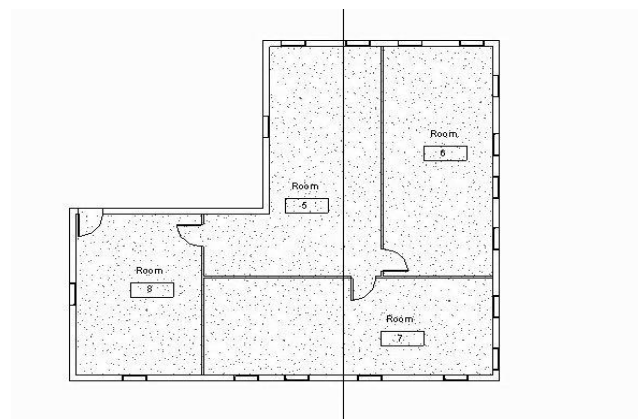
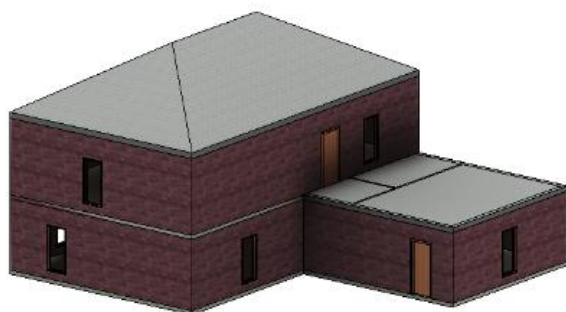
³⁴ Boston

³⁵ Arizona

³⁶ Quebec

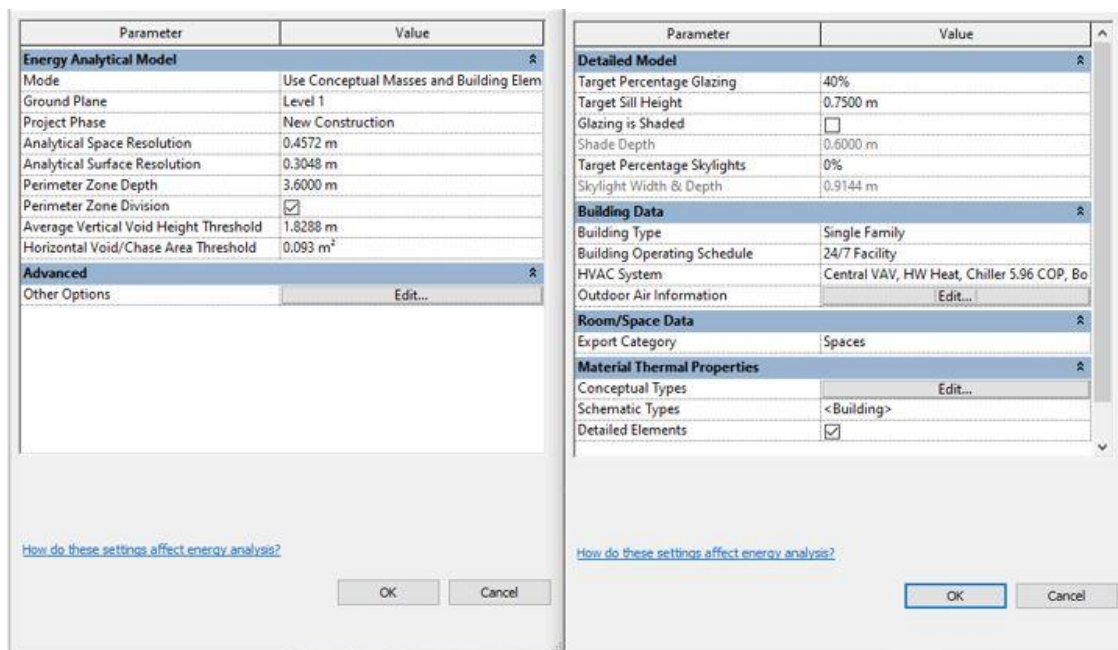
³⁷ Conditioned Zones

مترمربع	۱۰۵,۸	مساحت سطح به ازای هر فرد
-	Central VAV, HW Heat, Chiller 5.96 cop	تجهیزات تهویه
درجه سلسیوس	۲۱,۱۱	نقطه سرمایش
درجه سلسیوس	۲۳,۳۳	نقطه گرمایش



شکل ۲. نمای ۳ بعدی مدل و پلان طبقه همکف

جهت شمال در راستای ضلع غربی و عمود ضلع شمالی است. هم‌چنین، درجه توسعه مدل برابر ۲۰۰ در نظر گرفته شده است. به طوری که شکل گرافیکی مدل به همراه ابعاد، شکل، موقعیت، جهت چرخش و احجام موجود در آن مشخص شده است اما جانمایی پلان مشخص نیست. با توجه به این که پلان مورد نظر اتاق بندی شده و مناطق حرارتی مختلف از هم جدا شده‌اند، مشخص نبودن جانمایی پلان اخلاقی در تحلیل انرژی ساختمان ایجاد نمی‌کند. شکل ۳ و جدول ۳ در راستای تبیین فراتر پارامترهای تعریف شده در مدل و مفروضات آن ارائه شده است.



شکل ۳. پارامترهای طراحی و مفروضات کلی نواحی حرارتی

جزئیات مصالح و اجزای به کار گرفته شده در مدل برای دو سناریو که در این پژوهش مطرح می‌شود به شرح جدول زیر است:

جدول ۳. المان‌های تعریف شده و جزئیات

مصالح	سناریو ۱	سناریو ۲
دیوارهای خارجی	دیوار ۲۰ سانتی متری آجری	دیوار ۲۰ سانتی متری آجری با لایه ۵ سانتی متری عایق از جنس EPS
دیوارهای داخلی	دیوار ۱۰ سانتی متری آجری	دیوار ۱۰ سانتی متری آجری
پنجره	پنجره‌های دو جداره با قاب آلومینیومی و ضریب مصرف انرژی پایین (e=0.1)	پنجره‌های دو جداره با قاب چوبی و ضریب مصرف انرژی پایین (e=0.1)
سقف	سقف عرشه ۲ میلی متری و ایزوگام	سقف عرشه ۲ میلی متری، ۵ سانتی متر لایه غشایی EPDM و عایق بندی ایزوگام
درهای خارجی	درهای نפרرو میلی متر 0.915 × 2.135 با قالب آلومینیومی	درهای نפרرو میلی متر 0.915 × 2.135 با قالب چوبی
دال کف	دال بتنی با روکش موزاییکی ضخامت ۱۵ سانتی متری	دال بتنی با روکش موزاییکی ضخامت ۱۵ سانتی متری

پس از تکمیل مدلسازی و انتخاب موقعیت قرارگیری ساختمان، به کمک پایگاه داده‌های هوایی موجود در لیست موقعیت‌یاب رویت، نزدیک‌ترین پایگاه داده‌ها برای رصد ویژگی‌های اقلیمی حاکم بر منطقه با توجه به فاصله آن از ساختمان انتخاب شده است.

۳-۲- انتقال اطلاعات مدل به جی. بی. اس

دو تحلیل متفاوت برای بررسی مصرف انرژی مورد توجه قرار گرفته است. در تحلیل اول مقدار انرژی مصرف شده در ساختمان به تفکیک حوزه مصرف انرژی (گرمایش، نورپردازی و سایر تجهیزات داخلی) در نرم‌افزار رویت و توسط افزونه دیزاین بیلدر^{۳۸} ارائه شده است.

³⁸ Design Builder

مفروضات مورد نیاز برای آغاز فرآیند تحلیل انرژی از جمله کاربری ساختمان، ویژگی‌های گرمایشی، برنامه فعالیت ساختمان، سیستم تهویه، گرمایش و سرمایش، اطلاعات هوای خارجی در نرم‌افزار، مطابق شکل ۳ تعریف شده است. در تحلیل دوم اطلاعات مدل پردازش شده در رویت به پلتفرم آنلاین این شرکت با عنوان جی. بی. اس منتقل شده و تحلیل میزان مصرف سالانه انرژی، سوخت و منابع آبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار هم‌چنین یکی از شاخص‌های مهم در سنجش مصرف انرژی با عنوان شدت مصرف انرژی^{۳۹} بر حسب مگاژول بر مترمربع در سال ($MJ/m^2/year$) را برای مصرف سالانه ساختمان تخمین می‌زند. برای هر یک از مدل‌های انتقال داده شده، این نرم‌افزار ۲۴۸ گزینه جایگزین را با رعایت محدودیت‌های معرفی شده در بخش قبل بررسی کرده و به صرفه‌ترین گزینه را از لحاظ مقدار EUI و با توجه به استاندارد Ashrae به کاربر معرفی می‌کند.

مقدار EUI با تقسیم انرژی مصرف شده در طول سال بر مساحت ناخالص ساختمان محاسبه می‌شود. گزارش تحلیل که از این نرم‌افزار دریافت می‌شود گزینه‌های طراحی گوناگونی از جمله نسبت پنجره به دیوار^{۴۰}، درجه چرخش ساختمان^{۴۱}، نوع پنجره، مدت زمان فعالیت ساختمان در طول شبانه روز، نفوذ هوا، عملکرد نورپردازی، استفاده از صفحه‌های خورشیدی با مساحت مشخص و نوع سیستم تهویه را دربردارد.

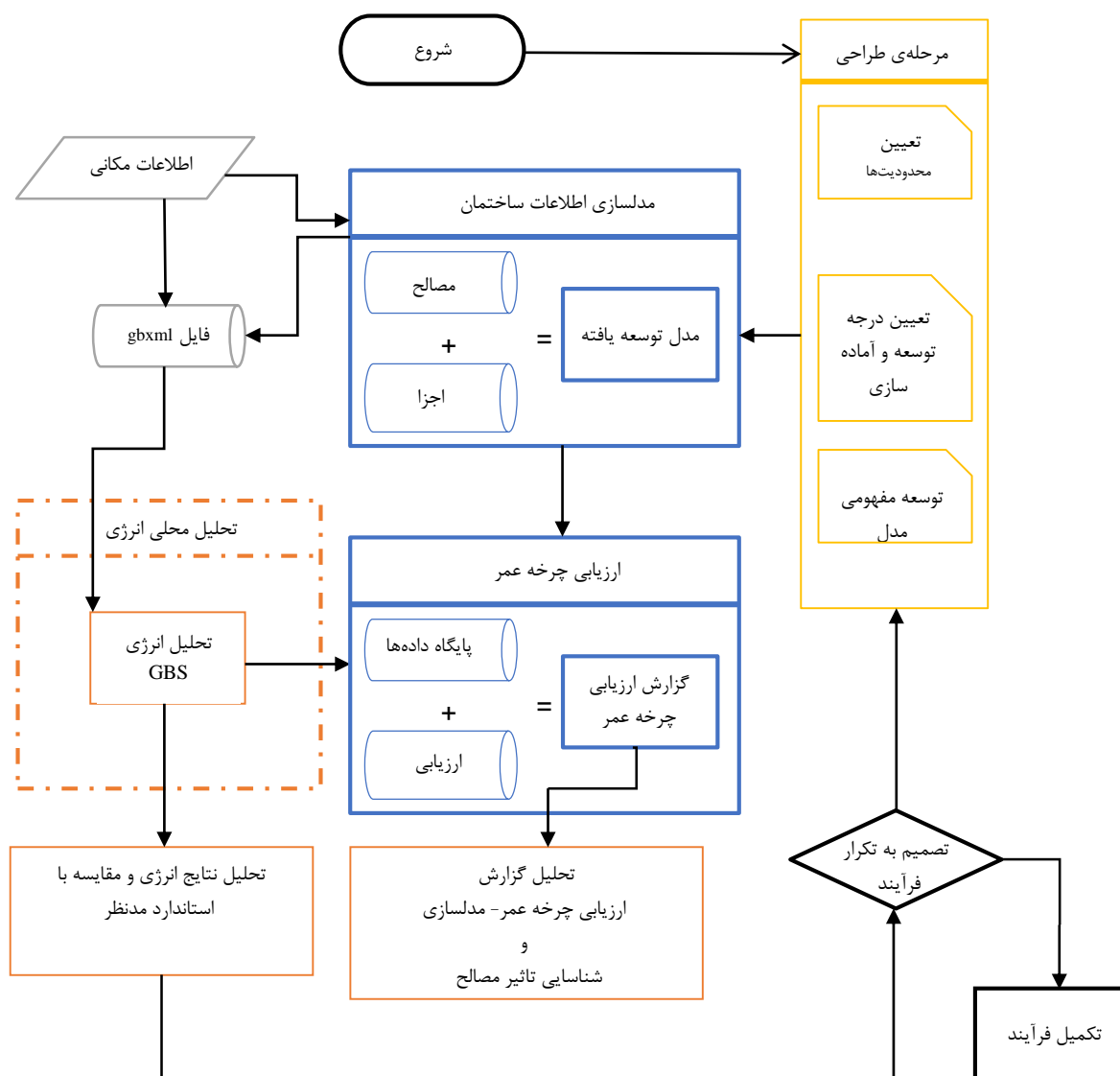
۳-۳- تغییر موقعیت مدل در رویت و تحلیل مجدد

پس از تکمیل تحلیل انرژی در رویت و جی بی اس، موقعیت مدل در رویت تغییر داده شده و تحلیل مراحل قبل برای موقعیت‌های جدید تکرار می‌شود. در این مرحله نقش متغیرهای اقلیمی و تاثیر منطقه‌ی جغرافیایی بر نتایج حاصل از ارزیابی چرخه عمر مورد بررسی قرار می‌گیرد. فرآیند مدل‌سازی- ارزیابی و چرخه تکرار آن در شکل زیر به صورت خلاصه آورده شده است.

³⁹ Energy Use Intensity (EUI)

⁴⁰ Windows to Wall Ratio (WWR)

⁴¹ Building Orientation



شکل ۴. فرآیند مدلسازی-ارزیابی

پس از اینکه تحلیل انرژی برای سه ایالت بوستون، کبک و آریزونا تکمیل شد، مدل اصلی اصلاح شده و لایه ایزوله به جزئیات دیوار و سقفها افزوده شده و تحلیل انرژی مجدد برای هر سه موقعیت تکرار می‌شود. بدین ترتیب نقش مصالح با توجه به شرایط اقلیمی منطقه در مصرف انرژی ساختمان مشخص می‌شود. این فرآیند هم‌چنین مشخص می‌کند کدام یک از موقعیتها بیشترین بهره را از اصلاح مصالح مورد استفاده در ساختمان می‌برد و کدام موقعیت نسبت به تغییر ایجاد شده بی‌تفاوت است.

۳-۴- ارزیابی چرخه عمر

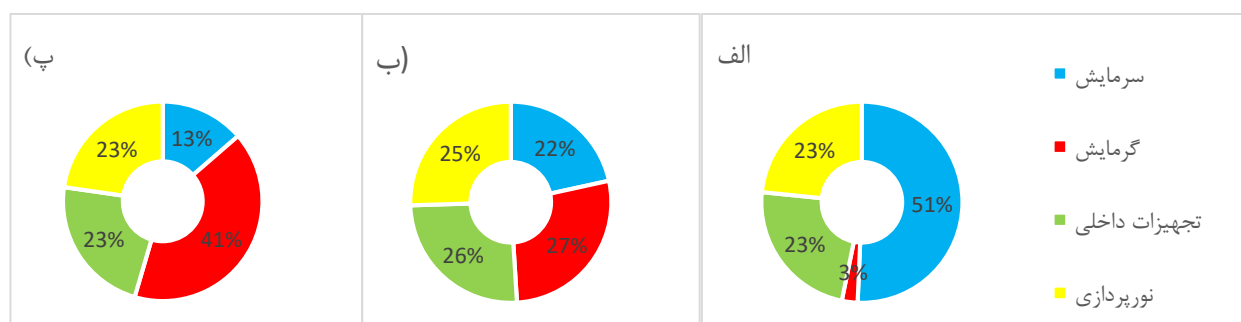
ضمن افزودن لایه عایق برای حفظ انرژی در ساختمان و کاهش مصرف نباید از عواقب زیست محیطی افزودن این مصالح به ساختار دیوارها غافل شد. در آخرین مرحله از این پژوهش ارزیابی چرخه عمر ساختمان در بازه ۳۰ ساله از عمر آن، برای هر دو سناریو پیشنهاد شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این کار، اطلاعات مدل رویت به نرم‌افزار One Click LCA منتقل شده و شاخص‌های ارزیابی چرخه عمر از جمله پتانسیل گرمایش جهانی، تخلیه لایه ازون استراتوسفریک، اسیدی شدن، اوتروفیکاسیون، تشکیل ازون تروپوسفریک و تخلیه منابع انرژی محاسبه می‌شوند. هدف از انتخاب بازه ۳۰ ساله برای ارزیابی، اجتناب از لزوم تعویض تجهیزات و باقی ماندن در بازه سرویس‌دهی اجزای مختلف در ساختمان است.

۴- نتایج و تفسیر آن‌ها

۴-۱- نتایج تحلیل انرژی

برای تحلیل انرژی، مدل‌های توسعه یافته در نرم افزار رویت به فضای ابری نرم‌افزار GBS منتقل شده است. نتایج حاصل از این تحلیل بر مبنای مصرف انرژی سالانه از نوع الکتریسیته است. این نرم‌افزار یکی از شاخص‌های مهم در سنجش مصرف انرژی با عنوان شدت مصرف انرژی^{۴۲} بر حسب مگاژول بر مترمربع در سال ($MJ/m^2/year$) را برای مصرف سالانه‌ی ساختمان تخمین می‌زند. برای هر یک از مدل‌های انتقال داده شده، این نرم‌افزار ۲۴۸ گزینه‌ی جایگزین را با رعایت محدودیت‌های معرفی شده در بخش قبل بررسی کرده و به صرفه‌ترین گزینه را از لحاظ مقدار EUI و با توجه به استاندارد Ashrae به کاربر معرفی می‌کند. مقدار EUI با تقسیم انرژی مصرف شده در طول سال بر مساحت ناخالص ساختمان محاسبه می‌شود. گزارش تحلیل که از این نرم‌افزار دریافت می‌شود گزینه‌های طراحی گوناگونی از جمله نسبت پنجره به دیوار، درجه چرخش ساختمان، نوع پنجره، مدت زمان فعالیت ساختمان در طول شبانه روز، نفوذ هوا، عملکرد نورپردازی، استفاده از صفحه‌های خورشیدی با مساحت مشخص و نوع سیستم تهویه را دربردارد.

روش به کار گرفته شده برای اعمال تحلیل در هر سه مدل واقع در آمریکای شمالی یکسان است. این نتایج در سه زمینه ارائه شده است: گرمایش، سرمایش، نورپردازی و تجهیزات داخلی. این مقادیر در شکل ۵ با درصدی که هریک از این زمینه‌ها به خود اختصاص داده‌اند ارائه شده است.



شکل ۵. توزیع مصرف انرژی در ساختمان در مناطق جغرافیایی مختلف: الف) بوستون ب) آریزونا پ) کبک

بیش از ۵۰٪ از مصرف انرژی در ساختمان، بدون توجه به موقعیتی که ساختمان در آن قرار گرفته است صرف گرمایش یا سرمایش آن در طول سال می‌شود. بدین ترتیب با افزایش بهره‌وری سیستم سرمایشی-گرمایشی در ساختمان، پتانسیل برای کاهش شدت مصرف انرژی افزایش می‌یابد. پایش مصرف انرژی سالانه در شهر کبک، نشان می‌دهد بیش از ۴۰٪ مصرف انرژی سالانه صرف گرمایش ساختمان می‌شود و انرژی مورد نیاز برای سرمایش ساختمان در طول سال کمتر از ۱۵٪ است.

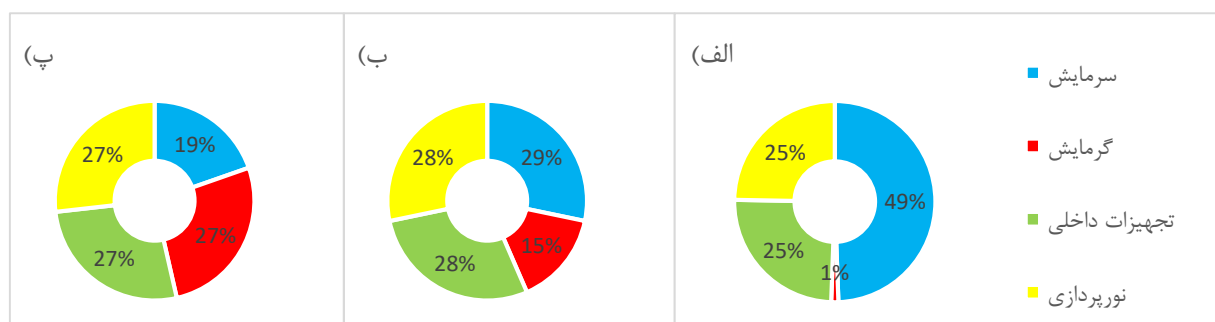
۴-۲- اصلاح مدل و تحلیل مجدد انرژی

سقف و دیوارها در ساختمان عامل اصلی ارتباط ناحیه داخلی ساختمان و فضای خارجی هستند. به کارگیری لایه ایزولاسیون مناسب در دیوارها و سقف که سهم قابل توجهی از مساحت ساختمان را نیز به خود اختصاص می‌دهند می‌تواند در کاهش حجم سیستم مکانیکی گرمایش-سرمایش، صرفه جویی در مصرف انرژی و افزایش رفاه ساکنین مشارکت کند [۳۲].

⁴² Energy Use Intensity (EUI)

بدین ترتیب جزییات سقف و دیوارها اصلاح شده تا نقش استفاده از لایه ۵ سانتی متری عایق حرارتی در تغییر الگوی مصرف انرژی تعیین شود. عایق حرارتی به کار گرفته شده از جنس پلی استایرن (EPS) است. از جمله مزایای استفاده از پلی استایرن، کم وزن بودن و انعطاف این محصول در شکل پذیری است. البته به توجه به این که این محصول دارای ضریب عایق حرارتی پایین تری از محصولات با کاربری مشابه همانند فایبرگلاس است، باید در ضخامت بیشتری مورد استفاده قرار گیرد. همچنین با توجه به این که هدف اصلی پژوهش بهینه سازی مصرف انرژی سالانه در ساختمان است، استفاده از لایه EPS که از خاصیت حفظ گرما در طول زمستان و بازتاب حرارت در طول تابستان برخوردار است، گزینه مطلوب تشخیص داده شد. عایق های پلی استایرن، با توجه به ساختار تخته ای (Boarding) که از آن برخوردارند، در طول سالیان به شکل قابل ملاحظه ای بازدهی خود را حفظ می کنند و با توجه به این که ارزیابی چرخه عمر که در بخش بعد به آن پرداخته می شود، در بازه ۳۰ ساله از عمر ساختمان صورت گرفته است، عدم کاهش بازدهی محصول به نتایج قابل اعتمادتری در بخش های بعدی می انجامد. افزودن عایق حرارتی، ضریب عایق حرارتی دیوار را تغییر می دهد - این ضریب تا ۴,۸۸ مترمربع کلوبین بر وات توسط لایه پلی استایرن تغییر می کند. عایق بسته به استفاده یا عدم استفاده از لایه پوششی (مثلاً اندود گچی)، ضخامت فوم و مصالح دیگر که به کار گرفته شده به عنوان عایق صوتی نیز کاربرد دارد. عملکرد لایه پلی استایرن به عنوان عایق حرارتی به عوامل گفته شده بسته نیست و تنها وجود یا عدم وجود آن در عایق سازی حرارتی نقش دارد [۳۳].

نتایج توزیع انرژی در ۴ حوزه سرمایه، گرمایش، تجهیزات داخلی و نورپردازی به تفکیک موقعیت مدل در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. توزیع مصرف انرژی در ساختمان در سناریو دوم: الف) آریزونا ب) بوستون پ) کبک

نتایج تحلیل نشان می دهد مدل واقع در کبک با ۱۵٪ کاهش مصرف انرژی گرمایی در طول سال بیشترین منفعت را از افزودن عایق حرارتی می برد. مدل واقع در بوستون نیز حدود ۱۳٪ کاهش مصرف انرژی در گرمایش را شاهد بوده است. این در حالی است که مدل آریزونا عملاً شاهد تغییر قابل توجهی (کمتر از ۲٪) در مصرف انرژی سالانه نبوده است. بنابراین افزودن لایه ی EPS به ساختار مدل، بیشترین کمک را به توزیع یکنواخت انرژی برای مدل واقع در کبک کرده است.

جدول ۴ نتایج حاصل از تخمین مصرف انرژی در هر سه مدل را به صورت مصرف سوخت و الکتریسیته و شدت مصرف انرژی در طول سال پس از ایجاد تغییرات در مدل ارائه می دهد. این جدول همچنین نتایج پیشین را برای مقایسه ی تغییرات ارائه می نماید.

جدول ۴. عملکرد مدل‌ها در مصرف انرژی قبل و بعد از تغییرات

موقعیت مدل	سناریو اول		سناریو دوم		
	EUI (MJ/m ² /year)	مقدار مصرف انرژی	EUI (MJ/m ² /year)	مقدار مصرف انرژی	
		الکتریسیته (kWh)	سوخت (MJ)	الکتریسیته (kWh)	سوخت (MJ)
بوستون	۲۶۰۹٫۷	۴۲۱۴۸	۵۲۸۱۸۵	۱۹۴۸٫۵	۳۷۶۷۸۶
کبک	۳۳۵۴٫۷	۶۰۱۹۸	۸۹۳۵۴۳	۲۵۳۴٫۴	۶۵۵۷۳۴
آریزونا	۱۱۷۲٫۱	۴۴۵۱۱	۲۲۷۶۷۰	۹۹۳٫۲	۴۳۱۹۳

مدل واقع در کبک بعد از افزودن عایق‌های حرارتی شاهد ۲۶٪ کاهش در مقدار EUI سالانه است. این مدل با توجه به اقلیم سرد و زمستان‌های طولانی، بهره‌ی زیادی از افزودن لایه عایق حرارتی می‌برد. مدل واقع در بوستون نیز با کاهش ۲۵٪ در مقدار EUI پاسخ نسبتاً مشابهی در مقایسه با کبک ارائه می‌کند. مدل آریزونا با توجه به اقلیم گرم و خشک آن بهره کمتری از اصلاح حرارتی مدل برده و شاهد کمتر از ۱۵٪ تغییر در مقدار EUI سالانه است. علاوه بر این، مدل آریزونا حتی پیش از اصلاح مدل، معیارهای استاندارد اشرفه را برآورد کرده و کاهش بیشتر مصرف انرژی نسبت به هزینه‌ای که به ساختمان تحمیل می‌شود قابل تامل است.

علاوه بر این نتایج باید توجه داشت که ارزیابی چرخه عمر به صورت کامل شامل برآورد معیارهای ارزیابی از جمله پتانسیل گرمایش جهانی است. این مسئله که افزودن عایق‌های حرارتی چه سهمی در افزایش تاثیرات محیط زیستی مورد بررسی در ارزیابی چرخه عمر دارد در بخش بعد مورد توجه قرار گرفته است.

۳-۴- ارزیابی چرخه عمر

پس از بررسی تقاضای مصرف انرژی در مدل‌ها، ارزیابی چرخه عمر در پلاگین او. سی. ال به عمل آمد. دوره محاسبات، معادل ۳۰ سال در نظر گرفته شده است و ارزیابی از نوع گهواره تا گور بوده و مراحل مختلف چرخه عمر را مدنظر قرار می‌دهد. انتشار ناشی از انرژی نهفته می‌تواند تا ۸۵٪ از کل مقدار گازهای گلخانه‌ای انتشار یافته را شامل شود [۳۴] و استفاده از مصالحی که عملکرد بهتری از لحاظ توسعه‌ی پایدار دارند، می‌تواند تا ۱۲٪ در کاهش مقدار گازهای انتشار یافته موثر باشد [۳۵].

در تغییر مقدار گازهای گلخانه‌ای منتشر شده سه عامل کلی موثر وجود دارد: (۱) تغییر حجم اجزای فعلی، (۲) تغییر تعداد اجزا و (۳) تغییر جنس مصالح [۳۶]. در این پژوهش از آنجایی که مصالح مورد استفاده در مدل‌ها تغییر داده شد، تحلیل ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای پس از تغییر مصالح، مجدداً بررسی شد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد نتایج حاصل از ارزیابی در قالب تاثیرات زیر بیان می‌شود: پتانسیل گرمایش جهانی، تخلیه‌ی لایه‌ی اوزون استراتوسفریک، اسیدی شدن، اوتروفیکاسیون، تشکیل اوزون تروپوسفریک و تخلیه‌ی منابع انرژی. این نتایج برای سناریو اول مطابق جدول ۵ است.

جدول ۵. برآورد مولفه‌های ارزیابی چرخه عمر بر اساس مرحله تحلیل

مرحله تحلیل	پتانسیل گرمایش جهانی (kg CO _{2e})	اسیدی شدن (kg SO _{2e})	اوتروفیکاسیون (kg PO _{4e})	تشکیل ازون تروپوسفریک (kg CFC11e)	تخلیه منابع انرژی (kg O ₃)
ساخت	A1-A3 ۴,۴۴×۱۰ ^۴	۱,۷۰×۱۰ ^۲	۷,۳۳×۱۰ ^۰	۱,۶۷× ^۲ ۱۰	۹,۸۹×۱۰ ^۰
انتقال	A4 ۳,۳۷×۱۰ ^۳	۷,۳۲×۱۰ ^۰	۱,۵۴×۱۰ ^۰	۵,۸۹× ^۴ ۱۰	۴,۳۴× ^۱ ۱۰
مصرف انرژی	B6 ۷,۰۱×۱۰ ^۵	۱,۲۸×۱۰ ^۳	۲,۶۷×۱۰ ^۲	۶,۲۴× ^۲ ۱۰	۶,۱۰×۱۰ ^۱
پایان عمر	C1-C4 ۱,۴۲×۱۰ ^۳	۵,۷۵×۱۰ ^۰	۱,۳۱×۱۰ ^۰	۲,۰۷× ^۴ ۱۰	۳,۱۳× ^۱ ۱۰

مطابق جدول ۶، مرحله مصرف انرژی (B6) تاثیرگذارترین مرحله در ایجاد اثرات محیط زیستی است. مرحله تولید و فرآوری مصالح (A1-A3) دومین مرحله تاثیرگذار است. مراحل انتقال و پایان عمر کمترین آثار مخرب را به جا می‌گذارند. نتایج تحلیل هم‌چنین نشان می‌دهد بیش از ۶۸٪ از کربن منتشر شده در مرحله فرآوری و تولید توسط آجر تولید شده است و بدین ترتیب آجرها بالاترین مشارکت را در انتشار کربن در مرحله ساخت دارند. در ادامه مصالح سازه‌ای مدل، بتن، سبمی معادل ۳۱٪ در تولید کربن نهفته را به خود اختصاص داده است. بدین ترتیب سایر مصالح مورد استفاده در بازشوها، از جمله در و پنجره، کمترین نقش را در تولید کربن نهفته به خود اختصاص داده‌اند.

با تکمیل تحلیل چرخه عمر و اصلاح مدل، تحلیل مجدد انجام گرفته و نتایج متناظر آن در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۶. برآورد مولفه‌های ارزیابی چرخه عمر بر اساس مرحله‌ی تحلیل

مرحله تحلیل	پتانسیل گرمایش جهانی (kg CO _{2e})	اسیدی شدن (kg SO _{2e})	اوتروفیکاسیون (kg PO _{4e})	تشکیل ازون تروپوسفریک (kg CFC11e)	تخلیه منابع انرژی (kg O ₃)
ساخت	A1-A3 ۴,۵۷×۱۰ ^۴	۱,۷۰×۱۰ ^۲	۷,۶۰×۱۰ ^۰	۱,۶۷× ^۲ ۱۰	۱,۳۹×۱۰ ^۰
انتقال	A4 ۳,۳۰×۱۰ ^۳	۷,۲۸×۱۰ ^۰	۱,۵۴×۱۰ ^۰	۵,۸۶× ^۴ ۱۰	۴,۳۱× ^۱ ۱۰
مصرف انرژی	B6 ۵,۸×۱۰ ^۵	۱,۰۶×۱۰ ^۳	۲,۲۲×۱۰ ^۲	۵,۱۸× ^۲ ۱۰	۵,۰۶×۱۰ ^۱
پایان عمر	C1-C4 ۱,۹۵×۱۰ ^۳	۵,۸۴×۱۰ ^۰	۱,۳۱×۱۰ ^۰	۲,۰۵× ^۴ ۱۰	۳,۱۷× ^۱ ۱۰

نتایج تحلیل حاکی از آن است که با وجود کاهش مصرف انرژی در مدل‌ها، پس از تغییر مصالح مورد استفاده، تاثیرات زیست محیطی ناشی از مصالح افزوده شده، افزایش می‌یابد. در مورد اثر کربن، گاهی این اتفاق می‌افتد و برخی جزییات ساختمانی که اصولاً قابل اغماض هستند نقش قابل توجهی در کربن منتشر شده برجا می‌گذارند [۳۷]. نتایج حاصل از پژوهش، حاکی از افزایش ۳٪ در پتانسیل گرمایش جهانی در طول بازه ۳۰ ساله از چرخه عمر مدل‌هاست. گرچه این مقدار به ظاهر قابل اغماض است، با توجه به این که مجموع لایه عایق حرارتی به کار گرفته شده کمتر از ۲٪ از کل حجم ساختمان را در برمی‌گیرد، مقدار نسبتاً قابل توجهی است و چشم‌پوشی از آن به سادگی امکان‌پذیر نیست.

۴-۴- ارزیابی اقتصادی عایق‌های حرارتی

با توجه به پایین بودن درجه توسعه‌ی مدل، جزییات اجرایی مصالح مشخص نیست و بنابراین برآورد قیمت مترمربع دیوارها به صورت تقریبی و بدون در نظر گرفتن جزییات انجام شده است. هم‌چنین با توجه به اینکه نرم‌افزار GBS هزینه‌های مربوط به مصرف انرژی سالانه را بر حسب دلار به دست می‌دهد، و نیز با در نظر گرفتن این‌که موقعیت مدل‌ها در آمریکای شمالی فرض شده است، تخمین هزینه دیوارها بر اساس دلار کانادا و با لحاظ لیست قیمت مصالح در این کشور محاسبه شده است. جدول ۷ نتایج حاصل از برآورد اقتصادی را نشان می‌دهد.

جدول ۷. ارزیابی اقتصادی انواع دیوارها با توجه به نوع عایق حرارتی

ارزش خالص فعلی (NPV)	هزینه مصرف انرژی در طول ۳۰ سال	هزینه مصرف انرژی سالانه	شدت مصرف انرژی سالانه (MJ/m ² /y)	مقدار مصرف انرژی الکتریکی سالانه (kWh)	هزینه مصرف انرژی (kWh)	هزینه کلی ساخت دیوارها (هزینه مترمربع دیوار* مساحت سطح دیوار)	هزینه تخمینی بر مترمربع دیوار (دلار)	مشخصات کلی دیوارها
۱۲۹۷	۱۳۷۸۰۰	دلار ۳۸۰۰	۱۹۵۲	۲۵۱۴۷	دلار ۰٫۱۵	دلار ۶۶۰۰-۴۸۰۰	۱۶-۲۲	دیوار با بلوک بتنی
-۳۰۱۵	۱۳۵۷۶۸	دلار ۳۷۱۳	۱۷۱۳	۲۴۱۵۹	دلار ۰٫۱۵	دلار ۶۶۰۰-۱۰۸۰۰	۲۲-۳۶	دیوار با بلوک بتنی و عایق حرارتی EPS
۴۷۷۱٫۸	۱۴۶۰۸۸	دلار ۴۰۵۸	۲۰۳۶	۲۶۴۰۴	دلار ۰٫۱۵	دلار ۲۴۰۰-۳۶۰۰	۸-۱۲	دیوار آجری
۱۳۶۶	۱۲۸۵۳۶	دلار ۳۳۷۶	۱۶۳۸	۲۱۹۶۴	دلار ۰٫۱۵	دلار ۵۴۰۰-۶۰۰۰	۱۸-۲۰	دیوار آجری با عایق حرارتی EPS
-۴۳۴۱	۱۳۳۶۳۶	دلار ۳۶۰۱	۱۷۹۸	۲۳۴۲۷	دلار ۰٫۱۵	دلار ۱۰۵۰۰-۱۲۰۰۰	۳۵-۴۰	دیوار بتنی با عایق حرارتی پشم شیشه

نکته جالب توجه، مشاهده تفاوت قیمت‌های قابل توجه در ایالت‌های مختلف آمریکای شمالی است. به طور مثال، ایالت آریزونا از جمله گران‌ترین ایالات آمریکا در ارائه خدمات کارگری، بنایی و سایر تسهیلات مربوط به نیروی انسانی است. اگر برآورد اقتصادی دقیق از فعالیت ساخت دیوارها مد نظر باشد، می‌بایست هر سه ایالت به صورت جداگانه و با نظر گرفتن جزییات اجرایی ساختمان و نیز هزینه‌های مربوط به تجهیزات و منابع انسانی مورد بررسی قرار بگیرند. هزینه تخمینی مترمربع دیوارها بر اساس لیست قیمت‌های موجود در بوستون برآورد شده و سپس مشخصات مدل با توجه به نوع مشخصات دیوار تغییر پیدا می‌کند. این مشخصات سپس به نرم‌افزار تخمین انرژی منتقل شده و مصرف انرژی سالانه بر حسب کیلووات ساعت در جدول درج می‌گردد. لازم به ذکر است، برای سادگی بیشتر و تسهیل محاسبات مربوط به هزینه‌های مصرف انرژی، انواع انرژی‌های الکتریکی و سوخت که در طول سال به مصرف کاربران ساختمان می‌رسد، توسط نرم‌افزار به واحد انرژی الکتریکی یعنی کیلووات ساعت تبدیل شده است و هزینه‌های متناظر ناشی از آن نیز معادل سازی شده است. از آنجایی که مصارف انرژی در دوره ۳۰ ساله از عمر ساختمان مد نظر بوده، نتایج حاصل باید با در نظر گرفتن استهلاک و کاهش بهره‌وری مصالح به خصوص عایق‌های حرارتی در نظر گرفته شود. برای این کار نتایج انرژی سالانه استخراج شده در مرحله قبل به نرم‌افزار OneClickLCA منتقل می‌شود. این نرم‌افزار با توجه به جنس مصالح برداشت شده از پایگاه

اطلاعاتی رویت به ضریب حرارتی اولیه مصالح، ضریب کاهش جداگانه‌ای اختصاص می‌دهد و مصرف انرژی کلی را در طول بازه ۳۰ ساله از چرخه عمر ساختمان به دست می‌دهد. این نتایج در ستون هشتم جدول فوق درج شده است. در نهایت، ارزش خالص فعلی با فرض نرخ بهره ۱۰ درصد به صورت ثابت محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد تنها در موارد استفاده از پشم شیشه و یا بلوک بتنی به همراه عایق پلی‌استایرن، ارزش خالص فعلی منفی شده و سرمایه‌گذاری به صرفه به نظر نمی‌رسد. در سایر موارد مقدار ارزش خالص فعلی مثبت است که نشان‌دهنده مثبت بودن ارزش سرمایه‌گذاری می‌باشد. لازم به ذکر است بررسی کاهش بهره‌وری تجهیزات داخلی ساختمان در طول سالیان از حوزه‌ی تحقیقاتی این پژوهش خارج است.

۵- جمع‌بندی

از بررسی ارزیابی چرخه عمر مدل‌ها با توجه به اقلیمی که مدل در آن توسعه یافته است، نتایج زیر به دست آمده است:

۱- مصرف انرژی در طول چرخه عمر مدل با توجه به موقعیتی که مدل در آن واقع است متغیر است. نتایج نشان می‌دهد، هرچقدر شدت ویژگی‌های آب و هوایی در یک اقلیم خاص بیشتر باشد، موقعیت برای کاهش مصرف انرژی در آن بیشتر خواهد بود. مدل واقع در کبک، پس از بهینه‌سازی شاهد کاهش ۳۳٪ در مقدار مصرف انرژی بوده، مدل واقع در آریزونا نیز با نصب پانل‌های خورشیدی شاهد کاهش ۷۸ واحدی (معادل ۴۲٪) در مقدار EUI بوده است. مدل واقع در بوستون گرچه به این‌چنین تغییراتی واکنش مثبت نشان داد اما مقدار کاهش EUI در آن، چه در صورت نصب پنل‌ها و چه در صورت تغییر سیستم گرمایشی-سرمایشی کمتر از دو مدل قبلی بوده است.

۲- افزودن عایق حرارتی به مدل‌ها، سبب کاهش ۲۸ درصدی مقدار EUI در کبک و ۲۰ درصدی در بوستون شده اما کاهش مصرف انرژی در آریزونا کمتر از دو درصد بوده و قابل اغماض است. نتایج نشان می‌دهد افزودن عایق حرارتی در اقلیم گرم و خشک نه تنها از منظر ارزیابی چرخه عمر به صرفه نیست بلکه با توجه به افزایش مقدار انتشار کربن، توصیه نمی‌شود.

۳- با وجود این‌که افزودن لایه عایق حرارتی موجب کاهش مصرف انرژی می‌شود، نتایج تحلیل چرخه‌ی عمر حاکی از افزایش ۳ درصدی مقدار گازهای گلخانه‌ای انتشار یافته دارد. این موضوع با در نظر گرفتن این‌که فوم‌های پلی‌استایرن کمتر از ۲٪ حجم کل ساختمان را برمی‌گیرند، مقدار قابل توجهی است.

۶- پیشنهادات

موارد زیر در راستای ادامه فرآیند این تحقیق پیشنهاد می‌شود:

- ۱) استفاده از انواع مختلف مصالح و عایق‌های حرارتی و روشی برای یافتن مصالح بهینه با توجه به اقلیم مدل
- ۲) مصرف انرژی ساختمان برای سال جاری و بدون در نظر گرفتن کاهش بهره‌وری اجزای مدل در طول چرخه عمر آن محاسبه شده است. در نظر گرفتن استهلاك مدل و تجهیزات داخلی و نیز تغییراتی که در اقلیم منطقه در طول سالیان ایجاد می‌شود، خارج از دایره این پژوهش بوده است.

مراجع

- [1] Chrisna du Plessis, (2002), Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries, *CIB and UNEP-IETC*.
- [2] WEF, World Economic Forum, (2016), *Can the circular economy transform the world's number one consumer of raw materials?*
- <https://www.weforum.org/agenda/2016/05/can-the-circular-economy-transform-the-world-s-number-one-consumer-of-raw-materials/> [May 4th, 2016]

- [3] Lucchi, E., (2016), Simplified assessment method for environmental and energy quality in museum buildings. *Energy Build*, 117, 216–229
- [4] Ramaji, I.J., et al., (2017), Investigation of Leveraging BIM Standards to Facilitate Sustainability Evaluations from Early Stages of Design, *ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering 2017*. p. 175-183.
- [5] Ajayi, S.O., et al., (2015), Life cycle environmental performance of material specification: a BIM-enhanced comparative assessment. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. 6(1): p. 14-24.
- [6] Ajayi, S.O., et al., (2015), Life cycle environmental performance of material specification: a BIM-enhanced comparative assessment. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*. 6(1): p. 14-24.
- [7] Najjar, M., K. Figueiredo, M. Palumbo and A. Haddad, (2017). "Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building." *Journal of Building Engineering* 14: 115-126.
- [8] Bueno, C. and M.M. Fabricio, (2018), Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM-LCA plug-in. *Automation in Construction*. 90: p. 188-200.
- [9] Soust-Verdager, B., et al., (2018), BIM-Based LCA Method to Analyse Envelope Alternatives of Single-Family Houses: Case Study in Uruguay. *Journal of Architectural Engineering*, 24(3): p. 05018002.
- [10] Ramaji, I.J., et al., (2017), Investigation of Leveraging BIM Standards to Facilitate Sustainability Evaluations from Early Stages of Design, *ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering 2017*. p. 175-183.
- [11] Shadram, F., et al., (2016), An integrated BIM-based framework for minimizing embodied energy during building design. *Energy and Buildings*, 128: p. 592-604.
- [12] Asare, K.A.B., et al., (2020), BIM-based LCA and energy analysis for optimized sustainable building design in Ghana. *SN Applied Sciences*. 2(11): p. 1855.
- [13] Tushar, Q., et al. (2021). "An integrated approach of BIM-enabled LCA and energy simulation: The optimized solution towards sustainable development." *Journal of Cleaner Production*. 289: 125622.
- [14] Najjar, M., et al., (2017), Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building. *Journal of Building Engineering*. 14: p. 115-126.
- [15] Sartori, I., and Hestnes, A. G. (2007). "Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article." *Energy and buildings, Elsevier*, 39(3), 249–257.
- [16] EPA, Environmental Protection Agency, Understanding Global Warming Potentials, (2021) <<https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>> [Oct 18th, 2021]
- [17] Hollberg, A., G. Genova, and G. Habert, (2020), Evaluation of BIM-based LCA results for building design. *Automation in Construction*. 109: p. 102972.
- [18] Carvalho, J.P., et al., (2020), Integrating BIM-Based LCA and Building Sustainability Assessment. *Sustainability*. 12(18): p. 7468.
- [19] Su, S., et al., (2020), BIM-DLCA: An integrated dynamic environmental impact assessment model for buildings. *Building and Environment*. 183: p. 107218.
- [20] Röck, M., et al., (2018), LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. *Building and Environment*. 140: p. 153-161
- [21] García-Martín, E., et al., (2019), Estimation of energy consumption in machine learning. *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 134: p. 75-88.
- [22] Forth, K., A. Braun, and A. Borrmann, (2019), BIM-integrated LCA - model analysis and implementation for practice. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 323: p. 012100.

- [23] Santamouris, M. (2016). "Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change." *Solar Energy*, **128**: 61-94.
- [24] Dirks, J. A., et al. (2015). "Impacts of climate change on energy consumption and peak demand in buildings: A detailed regional approach." *Energy*, **79**: 20-32.
- [25] Waddicor DA, Fuentes E, Sisó L, Salom J, Favre B, Jiménez C, et al. (2016), Climate change and building ageing impact on building energy performance and mitigation measures application: a case study in Turin, northern Italy. *Build Env*, 102:13–25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.003>.
- [26] Shin, Y.-s. and K. Cho, (2015), BIM Application to Select Appropriate Design Alternative with Consideration of LCA and LCCA. *Mathematical Problems in Engineering*. **2015**: p. 281640.
- [27] Röck, M., et al., (2020), Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*. **258**: p. 114107
- [28] Cheng, B., et al., (2020), A BIM-LCA Approach for Estimating the Greenhouse Gas Emissions of Large-Scale Public Buildings: A Case Study. *Sustainability*. **12**(2).
- [29] Asare, K.A.B., et al., (2020), BIM-based LCA and energy analysis for optimised sustainable building design in Ghana. *SN Applied Sciences*, 2020. **2**(11): p. 1855.
- [30] Veselka, J., et al., (2020), Recommendations for Developing a BIM for the Purpose of LCA in Green Building Certifications. *Sustainability*. **12**(15).
- [31] Hollberg, A., G. Genova, and G. Habert, (2020), Evaluation of BIM-based LCA results for building design. *Automation in Construction*. **109**: p. 102972.
- [32] Al-Homoud, M.S., 2005. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Build. Environ.* 40, 353e366.
- [33] Miskinis, K., et al. (2018). "Influence of EPS, mineral wool and plaster layers on sound and thermal insulation of a wall: a case study." *Applied Acoustics*, **137**: 62-68.
- [34] Mao, C., Shen, Q., Shen, L. and Tang, L. (2013), "Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: two case studies of residential projects", *Energy and Buildings*, Vol. 66, pp. 165-176, available at: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813004210
- [35] Sandanayake, M., Zhang, G., Setunge, S., Luo, W. and Li, C.-Q. (2017), "Estimation and comparison of environmental emissions and impacts at foundation and structure construction stages of a building – a case study", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 151, pp. 319-329.
- [36] Crippa, J., 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.
- [37] Reeves, T., et al. (2012). Validation of building energy modeling tools: Ecotect™, Green Building Studio™ and IES<VE>™. *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*.