



بهینه‌سازی ضخامت عایق ساختمان در شرایط آب و هوایی مختلف با رویکرد زیست‌محیطی

مریم کریمی^{۱*}، احسان عنبرزاده^۲

۱. استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

۲. کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

* تهران، صندوق پستی: ۱۴۹۱۱-۱۵۷۱۹، karami@khu.ac.ir

چکیده

با توجه به بالا بودن سهم قابل‌توجه مصرف انرژی در بخش ساختمان، محاسبه دقیق بارهای گرمایی و سرمایی یک ساختمان و تجزیه و تحلیل این بارها و تلاش در جهت کاهش اتلاف انرژی به ویژه عایق‌کاری ساختمان، از جمله راه‌های کاهش مصرف انرژی گرمایی و سرمایی می‌باشد. در این مطالعه هدف، بررسی تأثیر بهینه‌سازی ضخامت عایق بر میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن در شرایط آب و هوایی مختلف است. در این پژوهش، ابتدا به مدل‌سازی یک ساختمان نمونه در اقلیم‌های متفاوت آب و هوایی ایران، با کمک نرم‌افزار دیزاین بیلدر پرداخته شده است و سپس، برای بهینه‌سازی از روش الگوریتم ژنتیک که با نرم‌افزار متلب قابل انجام است نیز کمک گرفته شده است. در نهایت با استفاده از نتایج به دست آمده به تحلیل زیست‌محیطی (CO_2) و مقایسه‌ی ضخامت بهینه عایق ساختمان برای بازه ده سال در آب و هوای شهرهای مختلف ایران پرداخته شده است. نتایج نشان داد که میزان انتشار کلی گاز دی‌اکسید کربن در بازه ده سال در مناطق آب و هوایی سرد و خشک (تبریز) و گرم و مرطوب (بندرعباس) به ترتیب کمترین (برابر با 350 kg/m^2) و بیشترین (برابر با 770 kg/m^2) است.

کلیدواژگان

ضخامت بهینه عایق، تحلیل زیست‌محیطی، میزان انتشار دی‌اکسید کربن، شرایط آب و هوایی

Optimizing the Insulation Thickness of the Building in Different Climatic Conditions with an Environmental Approach

Maryam Karami^{1*}, Ehsan Anbarzadeh¹

1. Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

* P.O. Box 15719-14911, Tehran, Iran, karami@khu.ac.ir

Abstract

Due to the high share of energy consumption in the building sector as well as accurate calculation of heating and cooling loads of a building, one of the most studied methods to reduce heat energy consumption is building insulation. In this study, the aim is to investigate the effect of optimizing the insulation thickness on the emission of carbon dioxide gas in different climatic conditions. First, a model building in different climatic conditions is modeled using Design Builder software and then to optimize the genetic algorithm optimization with MATLAB software. Finally, using the obtained results, environmental analysis (CO_2) and comparison of the optimal thickness of building insulation for a period of ten years have been discussed. The results showed that the total emission of carbon dioxide gas over a period of ten years in climatic regions of cold and dry (Tabriz) and hot and humid (Bandar Abbas) is the lowest (equal to 350 kg/m^2) and the highest (equal to 770 kg/m^2) respectively.

Keywords

Optimum Insulation Thickness, Environmental Analysis, CO_2 Emission, Climatic Conditions

۱- مقدمه

کاهش مصرف انرژی در بخش‌های مختلف از جمله ساختمان، فعالیت‌هایی صورت گرفته است [۲].

از عوامل مهم در زمینه کاهش مصرف انرژی در ساختمان، بررسی شرایط آب و هوایی برای تعیین ضخامت بهینه عایق است. علی بولاتورک [۳]، به تعیین ضخامت بهینه عایق پلی‌استایرن انبساطی برای ۶ شهر مختلف کشور ترکیه به روش $P_1 - P_2$ پرداخت. وی ضخامت بهینه عایق برای شهرهای با آب و هوای گرم را بین $2/2$ تا $3/8$ سانتی‌متر و برای شهرهای با آب و هوای سرد را بین $1/6$ تا $2/7$ برآورد کرد. همچنین، در نتایج وی، به‌طور کلی میزان صرفه‌جویی انرژی برای شهرهای مختلف کشور ترکیه از $8/47$ تا $12/19$ دلار بر متر مربع و مدت زمان بازگشت سرمایه از $3/39$ تا $3/81$ سال نتیجه شد.

بیش از یک سوم از انرژی تولیدی در سطح جهان صرف استفاده از وسایل گرمایشی و سرمایشی می‌شود؛ لذا صرفه‌جویی در مصرف انرژی توسط این وسایل، سهم زیادی در کاهش کل انرژی مصرفی خواهد داشت [۱]. بحث صرفه‌جویی در انرژی و عایق‌کاری حرارتی از زمان بحران انرژی در سطح بین‌المللی به طور جدی مطرح شد و اقدامات زیادی به منظور پایین آوردن میزان مصرف انرژی صورت گرفته است. بالا رفتن هزینه‌ی سوخت در چند دهه‌ی اخیر باعث تحولات زیادی در صنایع و ساختمان‌سازی به منظور کاهش مصرف انرژی شده است؛ به همین دلیل در سال‌های اخیر به منظور

ساختمان برای شهر الازیگ در کشور ترکیه پرداخت، به طوری که سه حالت مختلف شامل: قرارگیری عایق در لایه خارجی، میانی و داخلی دیوار را مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیق او نشان داد که بارهای سالیانه و ضخامت بهینه عایق با تغییر قرارگیری در موقعیت عایق حرارتی، تغییری چندانی نمی‌یابند و فقط بیشترین نوسان حرارت در تابستان و زمستان برای حالتی که عایق در لایه میانی دیوار باشد رخ می‌دهد؛ اما اگر عایق در لایه بیرونی دیوار باشد، کمترین نوسان در دما اتفاق می‌افتد. در این تحقیق، هدف بررسی تأثیر بهینه‌سازی ضخامت عایق ساختمان از منظر زیست‌محیطی است. بنابراین، در این پژوهش سعی شده است تا مناسب‌ترین ضخامت عایق با در نظر گرفتن تأثیرات زیست محیطی برای ساختمان نمونه مورد نظر به دست آید.

۲- روش تحقیق

۲-۱- ساختمان مورد بررسی

در این پژوهش، به مدل‌سازی یک ساختمان نمونه از نقشه‌های اجرایی مسکن مهر در اقلیم‌های متفاوت آب و هوایی ایران، با کمک نرم‌افزار دیزاین بیلدر پرداخته می‌شود و میزان مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی ساختمان در شرایط مختلف آب و هوایی، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در ابتدا به کمک دستورات ترسیم، ساختمان مورد نظر در محیط نرم‌افزار ترسیم می‌شود. سپس با اعمال کردن مصالح دیوارها، بازشوها، تعیین سیستم گرمایشی و سرمایشی و تعیین کاربری ساختمان، به محاسبه بار حرارتی مجموعه پرداخته می‌شود و مصارف مختلف انرژی مدل‌سازی خواهد شد.

طبقات ساختمان با توجه به نقشه‌های اصلی، در نرم‌افزار دیزاین بیلدر مدل‌سازی شده و تمامی بخش‌های مختلف خانه، شامل: آشپزخانه، اتاق خواب‌ها، حمام، سرویس بهداشتی، هال و پذیرایی و همچنین، پاگرد و راه پله به طور دقیق مدل‌سازی شده است.

نقشه ساختمان مورد نظر از ساختمان‌های ساخته شده در مسکن مهر پزند انتخاب شده است که یک ساختمان تیپ چهار طبقه‌ی چهار واحدی می‌باشد. مساحت هر واحد ۹۰ متر مربع و مساحت زیر بنا ۱۴۴۲ متر مربع است.

در طبقه همکف، پارکینگ و انباری‌ها و اتاق سرایدار و در هر واحد از طبقات تیپ ساختمان نیز ۴ نفر با متابولیسیم یک انسان بالغ در نظر گرفته شده است.

نقشه پلان طبقه تیپ و نمای ساختمان مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. جنس دیوارهای خارجی از بیرون به داخل به ترتیب شامل: ۱/۵ سانتی‌متر سنگ نمای گرانیت، ۱/۵ سانتی‌متر ملات، ۱۰ سانتی‌متر آجر، لایه عایق متغیر و ۳ سانتی‌متر گچ می‌باشد. شماتیک ساختار دیوار خارجی ساختمان نیز در شکل ۲ نشان داده شده است.

دمبایسی و همکاران [۴]، با استفاده از روش ترمواقتصادی به بررسی ضخامت بهینه عایق پلی‌استایرن انبساطی برای شهرهای آنکارا، ازمیر، ترازن و کارس در کشور ترکیه پرداختند که نتایج تحقیق آنها نشان داد که برای شهرهای مذکور به ترتیب ۴/۶، ۷/۷، ۶ و ۱۰/۷ سانتی‌متر به عنوان ضخامت بهینه عایق پلی‌استایرن انبساطی نیاز است. همچنین، بیشترین مقدار صرفه‌جویی انرژی در شهر کارس با ۵۶/۶ درصد و کمترین میزان صرفه‌جویی انرژی در شهر ازمیر محاسبه شد.

از عوامل مهم دیگر در زمینه کاهش مصرف انرژی در ساختمان، استفاده از انواع مختلف عایق‌های به‌کار رفته در جداره ساختمان است که در این خصوص تحقیقات متعددی انجام گرفته است. حسن [۵] با استفاده از روش روز-درجه، بار حرارتی ساختمان را محاسبه و به تعیین ضخامت بهینه یک عایق پلیمری (پلی‌استایرن اکسترود شده) و یک عایق معدنی (پشم شیشه) در ساختمان پرداخت. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که استفاده از عایق‌های حرارتی پلی‌استایرن اکسترود شده و پشم شیشه در ساختمان باعث می‌شود هزینه‌ای بالغ بر ۲۲ دلار در هر متر مربع از دیوار ساختمان در طول عمر ده سال صرفه‌جویی شود. بنی اسدی و همکاران [۶]، با کمک نرم‌افزار Energy Plus به عنوان یک شبیه‌ساز انرژی و روش الگوریتم ژنتیک برای یافتن ضخامت بهینه عایق، به تأثیر ماده‌ی عایق تغییر فاز دهنده^۱ (PCM) در کنار عایق‌های رایج دیگری مثل پشم سنگ و پلی‌استایرن انبساطی در کشور ایران پرداختند. به طوری که در ایران ضخامت بهینه PCM بدون در نظر گرفتن شرایط اقتصادی برای شهرهایی چون: تهران، اصفهان، شیراز، یزد، بندرعباس و تبریز محاسبه گردید و تحقیقات ایشان نشان داد که برای مناطق جنوبی کشور ایران ضخامت بهینه عایق PCM تقریباً برابر با صفر بوده، ولی در مناطق سرد ضخامت بهینه بیشتر از ۶ سانتی‌متر است. از دیگر نتایج پژوهش آنان این بود که با توجه به وضعیت اقتصادی در حال حاضر کشور ایران، استفاده از عایق‌های دیگر مورد بررسی، بسیار با صرفه‌تر از عایق PCM خواهد بود.

از پارامترهای مهم دیگر در تعیین ضخامت عایق بهینه نیز می‌توان به بررسی عایق‌کاری جهت‌های مختلف دیوارهای ساختمان اشاره نمود. داواس [۷]، با استفاده از روش هزینه چرخ عمر به بررسی ضخامت بهینه عایق پلی‌استایرن انبساطی و میزان صرفه‌جویی انرژی در کشور تونس برای بازه زمانی ۳۰ سال پرداخت. طبق نتایج وی، دیوارهای جنوبی با ضخامت بهینه‌ی ۱۰/۱ سانتی‌متر و صرفه‌جویی انرژی ۷۱/۳۳ درصد و همچنین مدت بازگشت سرمایه ۳/۲۹ سال از نظر اقتصادی بهترین دیوار برای عایق‌بندی است. او همچنین دریافت که جهت دیوار تأثیر کمی بر تغییر تعیین ضخامت بهینه عایق دارد اما تأثیر بیشتری بر صرفه‌جویی انرژی خواهد داشت و بیشترین مقدار صرفه‌جویی انرژی، ۲۳/۷۸ دلار بر متر مربع برای دیوار شرقی است.

اوزل [۸]، یک تحلیل انرژی-اقتصادی و زیست‌محیطی در شرایط آب و هوایی سرد با در نظر گرفتن جهت‌گیری ساختمان در بازه زمانی ۲۰ سال انجام داد. طبق نتایج وی، مناسب‌ترین جهت برای عایق‌کاری ساختمان نیز، دیوارهای جنوبی با ضخامت ۹/۲ سانتی‌متر از عایق پلی‌استایرن اکسترود شده می‌باشد. شکل (۲-۱۱)، نتیجه به دست آمده برای سقف ساختمان از تحقیقات اوزل برای مناطق سرد آب و هوایی را نشان می‌دهد. او همچنین در تحقیق دیگری [۹] به تأثیر قرارگیری موقعیت عایق حرارتی در دیوار

^۱ Phase Change Materials

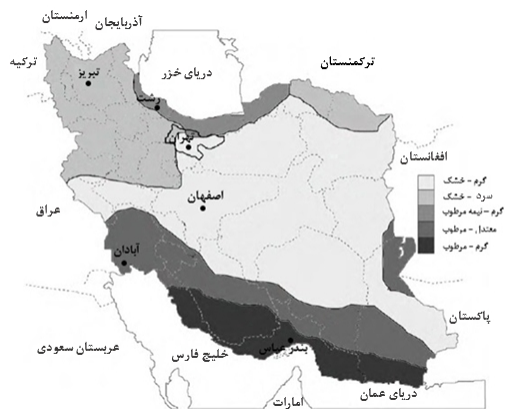


Fig. 3 Iran climatic conditions map

شکل ۳ نقشه شرایط آب و هوایی شهرهای ایران

۲-۳- تحلیل زیست محیطی

امروزه برای بررسی اثرهای زیست محیطی (CO_2)، تنها میزان انتشار این گاز در داخل ساختمان بر اثر مصرف انرژی گرمایشی یا سرمایشی را مد نظر قرار نمی‌دهند، بلکه میزان تولید این گاز در تمامی مراحل استخراج تا تولید و حمل‌ونقل مصالح ساختمانی نیز تحت بررسی قرار داده می‌شود. در این مقاله، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی انرژی توسط موتور شبیه‌سازی انرژی پلاس در نرم‌افزار دیزاین بیلدر، به منظور تحقیق تأثیرات زیست‌محیطی عایق، میزان نشر گاز (CO_2) در هنگام مصرف گاز و برق در داخل ساختمان و همچنین میزان تولید این گاز از هنگام استخراج ماده عایق تا کارگذاری آن در دیوار ساختمان، محاسبه و بررسی شده است.

$$CO_{2t} = N \times (CO_{2el} + CO_{2g}) + (CO_{20} \times M_{ins}) \quad (1)$$

که در آن، M_{ins} مقدار ماده عایق استفاده شده به عنوان مصالح ساختمانی که ضخامت آن در این پژوهش متغیر است و N بازه زمانی در نظر گرفته شده برای محاسبه میزان تأثیر زیست محیطی مصرف برق (CO_{2el}) و گاز (CO_{2g}) می‌باشد. در انتهای این پژوهش مقدار (CO_{2t})، برای ضخامت بهینه عایق‌های مختلف و برای هر شهر که از نظر انرژی-اقتصادی به دست آمده است، به صورت کیلوگرم بر متر مربع برآورد و در جدول نشان داده شده است.

۲-۳- بحث و نتایج

نتایج میزان انتشار کلی گاز (CO_2) در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کمترین میزان ضخامت عایق در منطقه آب و هوایی معتدل و مرطوب (رشت) برابر با ۶/۳ سانتی‌متر و بیشترین ضخامت عایق در منطقه سرد و خشک (تبریز) برابر با ۸/۶ سانتی‌متر به دست آمده است. میزان انتشار کلی گاز دی‌اکسید کربن در بازه ده سال در مناطق آب و هوایی گرم-خشک شهرهای تهران و اصفهان به ترتیب حدود ۴۲۵ و ۴۳۵ کیلوگرم بر مترمربع، در منطقه گرم سرد-خشک (تبریز) حدود ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمربع، در منطقه معتدل-مرطوب (رشت) حدود ۷۶۰ کیلوگرم بر مترمربع، در منطقه گرم-نیمه مرطوب (آبادان) حدود ۷۶۰ کیلوگرم بر مترمربع و در نهایت، در منطقه گرم-مرطوب (بندرعباس) حدود ۷۷۰ کیلوگرم بر مترمربع است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان انتشار کلی گاز

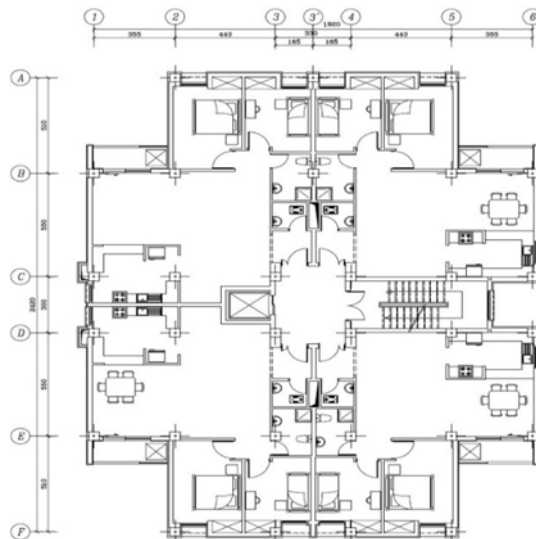


Fig. 1 Sample plan of the case study building

شکل ۱ پلان طبقات تیپ ساختمان نمونه

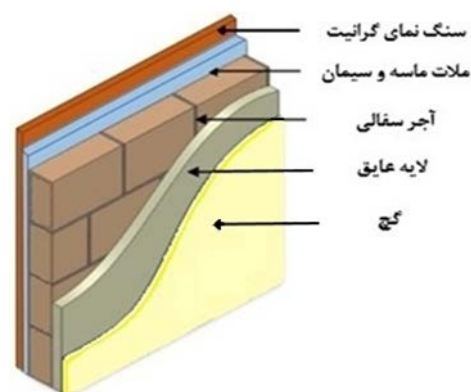


Fig. 2 Schematic of the building external wall

شکل ۲ طرحواره دیوار خارجی ساختمان

۲-۲- شرایط آب و هوایی

در این تحقیق، تأثیر شرایط آب و هوایی بر ضخامت بهینه عایق با در نظر گرفتن ۶ شهر با آب و هوای متنوع در کشور ایران شامل تهران (گرم و خشک)، اصفهان (گرم و خشک)، تبریز (سرد و خشک)، رشت (معتدل و مرطوب)، آبادان (گرم و نیمه مرطوب)، بندرعباس (گرم و مرطوب) مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۳، مناطق مختلف آب و هوایی کشور ایران را نشان می‌دهد.

مسکونی در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان می‌باشد که این امر نشان دهنده‌ی مقرون به صرفه بودن دیوار مورد نظر در کشور ایران است.

دی اکسید کربن در بازه ده سال در منطقه آب و هوایی سرد- خشک و گرم- مرطوب به ترتیب کمترین و بیشترین است.

جدول ۲ مقایسه ضخامت عایق بهینه کلی با مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان

Table 2 Calculation of optimum insulation thickness by Mabhas 19

| ضریب ضریب هدایت مقاومت | ضریب هدایت - حرارتی - حرارتی - روش تجویزی مبحث ۱۹ | مقاومت - حرارتی - ضخامت بهینه | ضریب هدایت - حرارتی - ضخامت بهینه | ضریب هدایت بهینه (mm) | میزان کل انتشار CO ₂ در بازه ده سال (kg/m ²) |
|------------------------|---|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|---|
| ۲/۸ | ۰/۶۷ | ۲/۲۳ | ۰/۴۴ | ۶/۷ | ۴۲۵ |
| ۲/۸ | ۰/۶۷ | ۲/۷۳ | ۰/۳۶ | ۸/۶ | ۴۳۵ |
| ۲/۸ | ۰/۶۷ | ۲/۳۰ | ۰/۴۳ | ۶/۹ | ۳۵۰ |
| ۱/۵ | ۰/۹۸ | ۲/۱۶ | ۰/۴۶ | ۶/۳ | ۴۳۵ |
| ۲/۸ | ۰/۶۷ | ۲/۳۰ | ۰/۴۳ | ۶/۹ | ۳۵۰ |
| ۲/۸ | ۰/۶۷ | ۲/۳۶ | ۰/۴۲ | ۷/۱ | ۴۳۵ |

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ضخامت بهینه عایق برای ساختمان‌های مناطق مختلف آب و هوایی با استفاده از شبیه‌سازی یک ساختمان نمونه در نرم‌افزار دیزاین بیلدر به دست آمده است. افزایش ضخامت عایق در ساختمان باعث کاهش مصرف گاز (CO₂) و اثرهای مخرب زیست محیطی آن در ساختمان به دلیل کاهش مصرف انرژی توسط سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی می‌شود. اما از طرفی افزایش ضخامت عایق در ساختمان نیز باعث افزایش گاز (CO₂) از هنگام استخراج ماده اولیه عایق تا انتقال این مواد به کارخانه و ساخت آن به عنوان مصالح و در نهایت حمل و نقل آن به محل ساخت ساختمان می‌شود. در نتیجه تأثیر زیست محیطی افزایش ضخامت عایق متأثر از این دو عامل خواهد بود. بر اساس نتایج به دست آمده، میزان انتشار کلی گاز دی اکسید کربن در بازه ده سال در منطقه آب و هوایی سرد- خشک و گرم- مرطوب به ترتیب کمترین و بیشترین است.

جدول ۱ ضخامت بهینه مناطق آب و هوایی مختلف و اثرهای زیست‌محیطی آن
Table 1 Optimum insulation thickness in different climate zones and the environmental effects

| شرایط آب و هوایی | ضخامت بهینه (cm) | انتشار CO ₂ در هنگام مصرف انرژی برق و گاز (kg) | تولید CO ₂ از استخراج ماده عایق و تولید آن تا نصب در دیوار (kg) | میزان کل انتشار CO ₂ در بازه ده سال (kg/m ²) |
|-----------------------------|------------------|---|--|---|
| گرم - خشک (تهران) | ۶/۷ | ۵۸۰۰۰ | ۳۸۵۰ | ۴۲۵ |
| گرم - خشک (اصفهان) | ۶/۹ | ۶۱۰۰۰ | ۴۰۵۰ | ۴۳۵ |
| سرد - خشک (تبریز) | ۸/۶ | ۴۸۰۰۰ | ۴۳۵۰ | ۳۵۰ |
| معتدل - مرطوب (رشت) | ۶/۳ | ۱۰۶۵۰۰ | ۳۸۰۰ | ۷۶۰ |
| گرم - نیمه - مرطوب (آبادان) | ۶/۹ | ۱۰۷۵۰۰ | ۴۰۵۰ | ۷۶۵ |
| گرم - مرطوب (بندرعباس) | ۷/۱ | ۱۰۸۰۰۰ | ۴۲۰۰ | ۷۷۰ |

۳-۱- مقایسه ضخامت بهینه عایق با مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان

در مبحث نوزدهم از مقررات ملی ساختمان که برای کشور ایران تنظیم شده است، ضوابط طرح، محاسبه و اجرای عایق‌کاری حرارتی و سیستم‌های تأسیساتی گرمایشی، سرمایشی، تهویه، تهویه مطبوع، تأمین آب گرم مصرفی و روشنایی الکتریکی در ساختمان‌ها تعیین می‌شود و شامل دو روش کارکردی و تجویزی است. در روش کارکردی حداکثر ضریب انتقال حرارت مجاز برای ساختمان‌ها با شرایط مختلف در شهرهای ایران ارائه شده و اصول کلی ضروری در مورد سیستم‌های طراحی شده، جهت به حداقل رسانیدن مصرف انرژی بیان می‌گردد [۱۰]. در این روش می‌توان ضریب انتقال حرارت دیوار به دست آمده را با حداکثر ضریب تعریف شده از این روش برای مناطق مختلف آب و هوایی مقایسه نمود. همچنین، در روش تجویزی راه حل‌های فنی مختلف برای تعیین طراحی قسمت‌های مختلف تشکیل‌دهنده پوسته‌ی خارجی ساختمان ارائه می‌گردد و حداکثر ضریب مقاومت حرارتی جداره‌های ساختمان تعریف شده است که می‌توان ضریب مقاومت حرارتی جداره‌های ساختمان مورد نظر را با این ضریب مقایسه نمود [۱۰]. مقدار ضریب هدایت حرارتی و ضریب مقاومت حرارتی ضخامت بهینه کلی دیوار ساختمان مورد نظر با مقدار حداکثر مجاز ضریب هدایت حرارتی از روش کارکردی و ضریب مقاومت حرارتی از روش تجویزی مقررات ملی ساختمان در مبحث ۱۹ برای هر شهر در جدول ۲ مقایسه شده است. همان‌طور که از نتایج پیداست، مقدار ضریب هدایت حرارتی و مقاومت حرارتی به دست آمده برای ضخامت‌های بهینه کلی عایق پلی استایرن انبساطی برای تمامی زوج سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی در شهرهای مذکور، کوچک‌تر از مقدار حداکثر مجاز ضریب هدایت حرارتی (با استفاده از روش کارکردی) و مقاومت حرارتی (با استفاده از روش تجویزی) تعیین شده برای دیوار خارجی ساختمان‌های

۵- مراجع

- [1] B. Comakli, B. Yüksel, "Optimum insulation thickness of external walls for energy savings", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 473–479, 2003.
- [2] S. Jaber, S. Ajib, "Optimum, technical and energy efficiency design of residential building in Mediterranean region", *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 1829–1834, 2011.
- [3] A. Bolattürk, "Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, pp. 1301–1309, 2006.
- [4] Ö. A. Dombayci, Ö. Atalay, Ş. G. Acar, E. Y. Ulu, H. K. Ozturk, Thermoeconomic method for determination of optimum insulation thickness of external walls for the houses: Case study for Turkey, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 1-8, 2017.
- [5] A. Hasan, Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost, *Applied Energy*, 63(2), 115-124, 1999.
- [6] A. Baniassadi, B. Sajadi, M. Amidpour, N. Noori, Economic optimization of PCM and insulation layer thickness in residential buildings, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 14, 92-99, 2016.
- [7] Daouas, Naouel, "A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads", *Applied Energy*, 88.1, 156-164, 2011.
- [8] M. Ozel, Thermal, economical and environmental analysis of insulated building walls in a cold climate, *Energy Conversion and Management*, 76, 674-684, 2013.
- [9] M. Ozel, "Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 3854 - 3863, 2011.
- [10] Ministry of Housing and Urban Development - Deputy of Housing and Construction, "National Building Regulations of Iran - Topic 19 - Energy Conservation in Buildings", Iran Development Publishing, 25- 49, 2010. (In Persian فارسی)