



Optimum Insulation Thickness Based on Energy Carriers Different Tariffs in Climatic Condition of Tehran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Akbari Paydar M.¹ MSc,
Mohammad Kari B.^{*2} PhD,
Maerefat M.³ PhD,
Abravesh M.² PhD

How to cite this article

Akbari Paydar M, Mohammad Kari B, Maerefat M, Abravesh M. Optimum Insulation Thickness Based on Energy Carriers Different Tariffs in Climatic Condition of Tehran. Modares Mechanical Engineering. 2019; 19(6):1447-1456.

ABSTRACT

The optimal insulation thickness is a function of the insulation initial cost and the cost of energy carriers for the internal space heating and cooling due to heat transfer from the wall. In Iran, by allocating subsidies to the energy sector, tariffs for energy carriers are sensibly lower than global prices. In order to determine the insulation optimal thickness, energy carrier tariffs were considered variable according to consumption. Electricity and gas costs were divided into 4 ascending tariffs for low, moderate, high, and very high consumption cases. In addition, the case of energy carriers without subsidies was also examined as the 5th scenario. The outer wall consists of a typical hollow brick layer with 20cm thickness, insulated with an expanded polystyrene layer, placed at the outside. Heat load due to heat transfer from the external wall was calculated by using EnergyPlus simulation software in different geographical directions and different thermal insulation thicknesses in Tehran climate. The optimum insulation thickness was determined based on the total cost over the lifetime of 30 years. According to the results, in the first tariff, which refers to low-cost subscribers, the use of thermal insulation in some geographic directions does not allow the payback period over a lifetime. In other directions, economic savings are low and neglectable. For higher tariffs, the optimum insulation thickness increases. In the 2nd to 5th tariffs, the optimal thermal insulation thickness varies from 6 to 18cm. Also, the calculated payback periods of these configurations are between 6 and 28 years.

Keywords Thermal Insulation; Optimum Thickness; Life Cycle; Payback Period

¹Fine Arts College, University of Tehran, Tehran, Iran

²Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran

³Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran

Phone: -

Fax: -

kari@bhrc.ac.ir

Article History

Received: August 6, 2018

Accepted: November 21, 2018

ePublished: June 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Determination and selecting the optimum ... [2] Effect of electricity tariff on the ... [3] Analytical periodic solution for ... [4] Determination of optimum insulation ... [5] Determination of the energy savings and the optimum ... [6] Simulation of energy saving in Iranian ... [7] Optimization of thermal insulation of residential buildings ... [8] Determination of optimum insulation thickness ... [9] Code No. 19: Energy Efficiency. Bureau for compiling ... [10] Comparison of energy conservation building ... [11] A study on optimum insulation thicknesses of external ... [12] Optimizing insulation thickness for buildings ... [13] Optimum insulation thickness of external walls ... [14] Determination of optimum insulation thickness for ... [15] Optimization of insulation thickness for external ... [16] Effect of fuel type on the optimum thickness of ... [17] A study on the optimum insulation thicknesses ... [18] A study on residential heating energy requirement ... [19] Optimum insulation thicknesses for building walls ... [20] Optimum insulation thickness of residential ... [21] Effect of wall orientation on the optimum insulation ... [22] The effects of external wall insulation ... [23] Cost analysis for optimum thicknesses and ... [24] Determination of optimum insulation thickness ... [25] EnergyPlus Engineering Reference, The Reference for ... [26] Applicability of calculation methods for conduction transfer ... [27] Modeling of heat transfer in ... [28] Long-time solutions to heat-conduction ... [29] A procedure for calculating thermal ... [30] Thermal analysis research program reference ... [31] DOE2.1E-053 source ... [32] MatLab, MATrixLABoratory-7.10.0. ... [33] Assessment of fixed shading devices with ... [34] Movable shade control algorithm (&) optimizing ...

ضخامت بهینه عایق حرارتی بر مبنای تعرفه‌های متفاوت حامل‌های انرژی در شرایط اقلیمی تهران

میثم اکبری پایدار MSc

دانشکده مهندسی معماری و انرژی، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

بهروز محمدکاری PhD*

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

مهدی معرفت PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مهدیه آب‌روش PhD

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

چکیده

ضخامت بهینه عایق حرارتی تابعی از هزینه اولیه عایق‌کاری و میزان هزینه حامل‌های انرژی برای گرمایش و سرمایش فضای داخلی ناشی از انتقال حرارت از مقطع جدار در دوره بهره‌برداری است. در ایران، با اختصاص یارانه به بخش انرژی، تعرفه مربوط به حامل‌های انرژی به‌طور قابل توجهی کمتر از تعرفه‌های میانگین جهانی است. با هدف تعیین ضخامت بهینه عایق حرارتی، تعرفه‌های حامل‌های انرژی، متناسب با میزان مصرف، متغیر در نظر گرفته شد. تعرفه برق و گاز مشترکین براساس میزان مصرف، به چهار تعرفه کم‌مصرف، مصرف متوسط، پرمصرف و بسیار پرمصرف تقسیم شد. در کنار این چهار تعرفه یارانه‌ای تعرفه حامل‌های انرژی بدون یارانه نیز به‌عنوان تعرفه پنجم مورد بررسی قرار گرفت. جدار خارجی شامل بلوک سفالی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و عایق حرارتی پلی‌استایرن از خارج است. میزان بار حرارتی ناشی از انتقال حرارت از جدار خارجی در جهت‌های مختلف جغرافیایی برای ضخامت‌های متفاوت عایق حرارتی در تهران توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی انرژی پلاس محاسبه شد و ضخامت بهینه عایق حرارتی براساس هزینه دوره حیات ۳۰ ساله تعیین شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، در تعرفه اول که مربوط به مشترکین کم‌مصرف است، استفاده از عایق حرارتی در برخی از جهت‌های جغرافیایی امکان بازگشت سرمایه در مدت‌زمان دوره حیات وجود ندارد. در دیگر جهت‌ها نیز میزان صرفه‌جویی اقتصادی کم و نزدیک به صفر است. با افزایش تعرفه، ضخامت بهینه عایق حرارتی افزایش پیدا می‌کند. در تعرفه‌های دوم تا پنجم ضخامت بهینه عایق حرارتی بین ۶ تا ۱۸ سانتی‌متر متغیر است. همچنین مدت‌زمان بازگشت سرمایه برای این تعرفه‌ها، بین ۶ تا ۲۸ سال به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: عایق حرارتی، ضخامت بهینه، دوره حیات، بازگشت سرمایه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۳۰

*نویسنده مسئول: kari@bhr.ac.ir

۱- مقدمه

انتقال حرارت از پوسته ساختمان‌ها، یکی از منابع اصلی مصرف انرژی در ساختمان‌ها است. استفاده از عایق حرارتی در دیوارها، نقش مهمی در کاهش مصرف دارد. انتخاب صحیح مصالح و چیدمان مناسب آنها با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و جهت‌گیری دیوارها، در کاهش بار سرمایی و گرمایی بسیار بااهمیت است. در حال حاضر، اکثر ساختمان‌های نوساز، ضخامت و اینرسی حرارتی اندکی دارند و در نتیجه، تبادل حرارت با محیط خارج به‌صورت بی‌رویه‌ای زیاد است. بهترین روش برای رفع این نقص، عایق‌کاری حرارتی است که صرفه‌جویی در مصرف انرژی، سالم‌سازی محیط زیست و کاهش سرمایه‌گذاری اولیه در تاسیسات مکانیکی را به‌همراه دارد. واضح است که هر چه ضخامت عایق بیشتر باشد، انتقال حرارت کمتر خواهد شد. البته افزایش ضخامت عایق باعث افزایش هزینه اولیه ساخت می‌شود (معمولاً رابطه هزینه عایق با ضخامت به‌صورت خطی است). از این رو، ضروری است که ضخامت عایق با در نظر گرفتن هم‌زمان هزینه و کاهش انرژی مصرفی در دوره بهره‌برداری بهینه‌یابی شود.

مطالعات متعددی به‌منظور تعیین ضخامت بهینه عایق حرارتی جدار خارجی ساختمان در شرایط اقلیمی و اقتصادی مختلف انجام شده است. در مطالعه‌ای^[1] که برای دوحه قطر انجام شده، ضخامت بهینه سه عایق پلی‌استایرن منبسط، پشم‌شیشه و پلی‌یورتان مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج این تحقیق، ضخامت بهینه عایق تعیین‌شده برای پلی‌استایرن منبسط و دو عایق دیگر، به‌ترتیب ۳ و ۴ سانتی‌متر است. در مقاله دیگری^[2]، تاثیر قیمت برق بر میزان ضخامت بهینه عایق حرارتی برای شهر ریاض عربستان بررسی شده است. با توجه به متغیربودن تعرفه برق، براساس میزان مصرف در عربستان، پنج تعرفه متفاوت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد ضخامت عایق حرارتی پلی‌استایرن منبسط براساس تعرفه برق، بین ۴ تا ۱۶ سانتی‌متر متغیر است. در یک مطالعه^[3]، ضخامت بهینه دو نوع عایق حرارتی پلی‌استایرن منبسط و پشم‌سنگ برای تونس مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه از دو نوع ساختار مختلف آجر و سنگ برای جدار دیوار خارجی استفاده شده است. ضخامت بهینه عایق حرارتی در دو ساختار مختلف دیوار برابر با ۶ سانتی‌متر برای پلی‌استایرن منبسط و ۴ سانتی‌متر برای پشم‌سنگ به دست آمده است. در مطالعه‌ای^[4] برای چهار شهر چین و پنج نوع عایق حرارتی مختلف، میزان ضخامت بهینه عایق حرارتی جدار خارجی براساس نوع عایق حرارتی، جهت جدار، رنگ سطح جدار و شرایط آب و هوایی، بین ۵ تا ۲۴ سانتی‌متر به دست آمده است. در پژوهشی^[5] ضخامت بهینه چهار نوع عایق مختلف برای چهار شهر ترکیه بررسی شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه، ضخامت بهینه عایق حرارتی برای شهرهای مختلف بررسی‌شده بین ۴ تا ۱۰ سانتی‌متر متفاوت است.

مطالعات معدودی با هدف بهینه‌سازی ضخامت عایق حرارتی در ایران انجام شده است. *فرهانی و ستاری*^[6] تاثیر ضخامت عایق حرارتی مناسب بر میزان مصرف انرژی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعه میزان انتقال حرارت از جدار خارجی به روش عددی محاسبه شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق، استفاده از عایق حرارتی به ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر، کاهش مصرف انرژی به میزان ۴۵٪ را به‌همراه خواهد داشت. *بر/هیم‌پور و همکاران*^[7] به بررسی ضخامت بهینه و محل قرارگیری عایق حرارتی در سه شهر ایران پرداخته‌اند. ضخامت بهینه عایق حرارتی براساس درصد بهبود حرارت انتقالی از مقاطع مختلف جدار خارجی تعیین شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه برای تهران، ضخامت بهینه عایق حرارتی بین ۵ تا ۷/۵ سانتی‌متر به‌صورت دولاپه (نیمی از داخل و نیمی از خارج) است. مبنای بهینه‌سازی ضخامت عایق حرارتی در دو مطالعه ذکرشده براساس کاهش مصرف انرژی است. *رامین و همکاران*^[8] در مطالعه‌ای ضخامت بهینه عایق حرارتی را براساس بهره‌وری اقتصادی به دست آورده‌اند. دیوار آجری و بتنی با دو نوع عایق حرارتی پلی‌استایرن منبسط، در دوره حیات ۲۵ ساله مورد بررسی قرار گرفته است. ضخامت بهینه عایق حرارتی در تهران براساس نوع دیوار، جنس عایق حرارتی، جهت جدار و محل عایق در مقطع دیوار بین ۲ تا ۷ سانتی‌متر به دست آمده است. همچنین مدت‌زمان بازگشت سرمایه برای حالت‌های مختلف بین ۴ تا ۱۸ سال متغیر است.

مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران^[9] دو روش کارکردی و تجویزی را برای طراحی پوسته خارجی ساختمان‌ها، با هدف صرفه‌جویی در مصرف انرژی ارائه داده است. در روش کارکردی میزان عایق حرارتی ساختمان، با محاسبه ضریب انتقال حرارت

می‌شود. با توجه به این که در این مطالعه نیازی به بررسی دمای مقطع داخلی جدار نیست و همچنین سرعت محاسبات در روش CTF به خصوص در شرایطی که لایه‌های جدار زیاد بوده، بیشتر از روش CondFD است، برای محاسبات انتقال حرارت از روش نرم‌افزار Energy Plus استفاده شده است. روش اساسی مورد استفاده برای محاسبات CTF در این نرم‌افزار به عنوان روش SS شناخته می‌شود [27]. مطالعات متعددی در رابطه با دقت این روش انجام شده است که نشان می‌دهند تفاوت چندانی بین نتایج این روش با دیگر روش‌ها وجود ندارد [28, 29].

در محاسبات انتقال حرارت سطح خارجی جدار، مقدار تابش خورشیدی دریافتی مستقیم و پراکنده، انتقال حرارت تابشی با محیط اطراف و انتقال حرارت همرفتی در نظر گرفته شده است. همچنین در محاسبات انتقال حرارت سطح داخلی، انتقال حرارت تابشی با سطوح داخلی و انتقال حرارت همرفتی در نظر گرفته شده است. برای محاسبات انتقال حرارت همرفتی سطح داخلی از روش TARP نرم‌افزار استفاده شده که براساس الگوریتم تهیه‌شده توسط و/تون است [30]. همچنین از روش DOE-2 برای محاسبات مربوط به انتقال حرارت همرفتی سطح خارجی استفاده شده است [31]. معادلات تعادل حرارتی شرایط مرزی به تفصیل در مرجع مهندسی نرم‌افزار Energy Plus نشان داده شده است [25].

تعیین ضخامت مناسب عایق حرارتی نیازمند انجام آنالیزهای متعدد با متغیرهای ورودی متفاوت است. بدین منظور، از ترکیب نرم‌افزار Energy Plus با MATLAB [32] استفاده شد. الگوریتم تهیه‌شده در نرم‌افزار MATLAB این امکان را فراهم می‌سازد تا به صورت خودکار پارامترهای ورودی فایل نرم‌افزار Energy Plus تغییر کند و آنالیز انرژی با اطلاعات ورودی جدید تکرار شود. پس از دریافت نتایج مربوط به آنالیزهای متعدد با ضخامت‌های متفاوت عایق حرارتی، محاسبات اقتصادی برای تمامی شرایط، انجام و با مقایسه نتایج، ضخامت مناسب عایق حرارتی انتخاب شده است.

۳- اطلاعات ورودی

اطلاعات آب‌وهوایی استفاده‌شده برای تهران مربوط به ایستگاه مهرآباد بوده که شامل اطلاعات ساعتی دمای هوا، تابش خورشیدی و سرعت و جهت باد است. زون انتخاب‌شده برای انجام آنالیز حرارتی، فضای ۳ در ۴ متر با ارتفاع ۳ متر است. دیوار ۳ در ۳ متر به عنوان جدار خارجی مورد بررسی انتخاب شده است. تمام جدارها به جز جدار مورد نظر، به صورت بی‌دررو و با اینرسی حرارتی معادل در نظر گرفته شده است. با توجه به این که تمام جدارها به جز جدار خارجی، به صورت بی‌دررو است، بار حرارتی فضای داخلی بیابگر میزان بار حرارتی ناشی از حرارت انتقالی از جدار خارجی خواهد بود. در شکل ۱ هندسه زون نشان داده شده است. انتخاب یک زون واحد با شرایط ذکرشده روشی است که برای بررسی عملکرد حرارتی عناصر مختلف ساختمان استفاده می‌شود [33, 34]. در این حالت، با توجه به بی‌دررو بودن جدارها، زون انتخاب‌شده مانند بخشی از یک ساختمان خواهد بود. با توجه به ابعاد متداول اتاق در ایران، این زون با مساحت ۱۲ متر مربع و ارتفاع ۳ متر در نظر گرفته شده است. دیوار خارجی برای هشت جهت جغرافیایی مورد بررسی قرار گرفته است. دمای آسایش فضای داخلی بین ۲۰ تا ۲۶°C و جدار خارجی بلوک سفالی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است که از روش‌های ساخت متداول در ایران به شمار می‌رود. برای جلوگیری از ایجاد پل حرارتی، عایق حرارتی در بخش خارجی قرار داده شده و

طرح و مقایسه آن با ضریب انتقال حرارت مرجع تعیین می‌شود. طراحی با روش تجویزی، در مقایسه با روش کارکردی به مراتب ساده‌تر است. در این روش، حداقل مشخصات حرارتی قابل قبول جدارهای پوسته خارجی، براساس راه‌حل‌های فنی ارایه‌شده تعیین می‌شود. براساس مطالعه فیاض و کاری [10]، رعایت ضوابط ارایه‌شده در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان باعث کاهش ۳۴ درصدی در مصرف انرژی ساختمان‌ها می‌شود.

وجود یارانه‌های انرژی در ایران، اهمیت عایق‌کاری حرارتی ساختمان را تا حدودی کم‌رنگ نموده، در نتیجه تعداد ساختمان‌های ساخته‌شده با جدار خارجی عایق‌کاری‌شده اندک است. با توجه به این نکته که مطالعاتی برای تعیین میزان تاثیر یارانه انرژی، در حالت‌های مختلف، بر میزان توجیه‌پذیری اقتصادی عایق‌کاری حرارتی انجام نشده، هدف این مطالعه انجام بررسی‌ها و محاسبات لازم در این خصوص است. لازم به توضیح است که تعیین ضخامت بهینه عایق حرارتی، براساس هزینه دوره حیات آن به دست آمده و مدت‌زمان بازگشت سرمایه کاربرد عایق حرارتی در جدار خارجی ساختمان، برای ضخامت‌های متفاوت تعیین شده است.

۲- روش‌شناسی

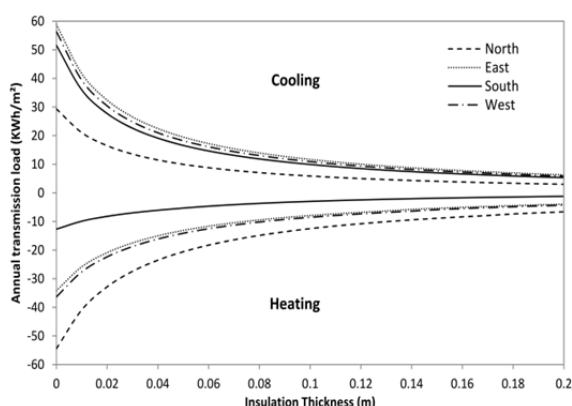
برای محاسبه میزان بار حرارتی انتقالی سالانه از جدار خارجی ساختمان، از روش‌های مختلفی استفاده شده است. یکی از ساده‌ترین روش‌ها که در مطالعات متعددی مورد استفاده قرار گرفته، استفاده از کمیت زمان-درجه گرمایش و سرمایش است. در برخی مطالعات، از روز درجه [11-17] و در برخی دیگر از ساعت درجه [18, 19] برای محاسبه ضخامت بهینه عایق حرارتی استفاده شده است. این روش براساس فرضی بوده که در آن انرژی مورد نیاز ساختمان متناسب با اختلاف بین دمای خارج و دمای معیار است. در این روش، محاسبه بار حرارتی انتقالی در شرایط پایا صورت می‌گیرد و تاثیر جرم حرارتی، تاخیر فاز ناشی از آن و همچنین تابش خورشیدی روی عناصر مختلف ساختمان در جهت‌های متفاوت در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین در تعدادی از مطالعات، تاثیرات تابش خورشیدی بر میزان بار حرارتی سالانه مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعات از دمای هوای خورشیدی به جای دمای هوای محیط [1, 20] و در تعداد اندکی از مطالعات انجام‌شده از روش عددی برای محاسبه انتقال حرارت از جدار خارجی استفاده شده است [21-24].

در این مطالعه، با هدف بررسی دقیق‌تر میزان حرارت انتقالی از جدار خارجی، در جهت‌های مختلف جغرافیایی از نرم‌افزار مدل‌سازی Energy Plus استفاده شده است [25]. این نرم‌افزار امکان محاسبه هم‌زمان اثرات تابش خورشیدی و انتقال حرارت گذرا از مقطع جدار و انتقال حرارت تابشی و همرفت در سطوح داخلی و خارجی را در خلال هر بازه زمانی داراست.

روش‌های مختلفی در رابطه با محاسبات انتقال حرارت مطرح است که دو روش CTF و CondFD بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. ایده اصلی روش CTF تعیین میزان شار حرارتی سطح داخلی و خارجی جدار در بازه زمانی مورد نظر براساس دمای سطح داخل، خارج و میزان شار حرارتی سطوح در بازه‌های زمانی گذشته است [26]. با توجه به این که این روش براساس محاسبه شار حرارتی سطوح است، نیاز به دانستن دما و میزان جریان حرارتی مقطع داخلی جدار را از بین می‌برد. در روش CondFD، انتقال حرارت براساس گره‌های در نظر گرفته‌شده در داخل مقطع جدار محاسبه

انتقال حرارت از مقطع دیوار برای جهت شمال بیشترین مقدار و جنوب کمترین مقدار است. بارهای گرمایی جهت‌های شرق و غرب نزدیک به هم و بین مقادیر حداقل جنوب و حداکثر شمال هستند. برای بار سرمایی، جهت شمال کمترین میزان است و سه جهت دیگر مقادیر نزدیک به هم دارند.

استفاده از عایق حرارتی با ضخامت بیشتر، هم‌زمان با کاهش هزینه‌های مربوط به گرمایش و سرمایش، افزایش هزینه اولیه ساخت را به دنبال دارد. انتخاب ضخامت بهینه عایق حرارتی براساس موازنه بین هزینه اولیه و هزینه حامل‌های انرژی در طول دوره حیات صورت گرفته است. با انتخاب ضخامت بهینه عایق حرارتی، امکان صرفه‌جویی اقتصادی حداکثری برای جدار خارجی ساختمان فراهم می‌شود.



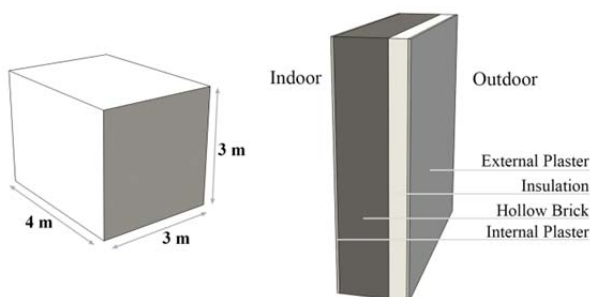
نمودار ۱) میزان انتقال حرارت در اوقات گرم و سرد سال از هر متر مربع از جدار خارجی در چهار جهت جغرافیایی

۵- آنالیز اقتصادی

در ایران، برق و گاز حامل‌های عمده تامین انرژی در ساختمان هستند. به‌طور عمده از برق به‌منظور سرمایش و از گاز، برای گرمایش فضاهای داخلی استفاده می‌شود. قیمت حامل‌های انرژی در ایران به دلیل وجود یارانه‌های غیرهدف‌مند تعیین‌شده توسط دولت، به‌طور قابل توجهی کمتر از قیمت جهانی است. تعرفه‌های اختصاص‌یافته به حامل‌های انرژی برای هر یک از واحدهای ساختمانی به‌صورت متغیر تعریف شده است و با بالا رفتن میزان مصرف به‌صورت پله‌ای افزایش می‌یابد. میزان تعرفه برق و گاز براساس میزان مصرف در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است. با توجه به تعرفه‌های متغیر حامل‌های انرژی، میزان هزینه مربوط به گرمایش و سرمایش برای هر واحد متفاوت خواهد بود. بیشتر بودن سطح جدار خارجی واحد ساختمانی، تبادل حرارتی بیشتر با محیط بیرون را به دنبال دارد. در نتیجه، با افزایش میزان مصرف انرژی، تعرفه مربوط به حامل‌های انرژی نیز بیشتر خواهد بود. بنابراین هزینه مربوط به گرمایش و سرمایش ناشی از انتقال حرارت هر متر مربع از سطح دیوار برای هر واحد ساختمانی متفاوت خواهد بود. در این مطالعه، به‌منظور بررسی تاثیر این اختلاف، واحدها به چهار گروه مختلف با مصرف انرژی متفاوت تقسیم شده‌اند که قیمت حامل‌های انرژی برای هر یک از گروه‌ها براساس میزان مصرف در جدول ۴ نشان داده شده است.

در کنار این چهار گروه، میزان بهینه ضخامت عایق حرارتی برای حامل‌های انرژی با قیمت واقعی و بدون در نظر گرفتن یارانه‌های دولتی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به قیمت گاز صادراتی ایران، قیمت آزاد هر متر مکعب گاز برابر با ۸۴۰۰ ریال است

در داخل اندود گچ و خارج اندود سیمان فرض شده است. ساختار جدار خارجی در شکل ۱ قابل مشاهده است. جدارهای داخلی در نظر گرفته شده برای زون مورد بررسی، ۱۰ سانتی‌متر دیوار گچی و سقف و کف آن، تیرچه و بلوک پلی‌استایرن با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر است. اطلاعات استفاده‌شده برای شبیه‌سازی انرژی و آنالیز اقتصادی در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱) هندسه زون و لایه‌بندی جدار خارجی انتخاب‌شده برای انجام شبیه‌سازی انرژی در نرم‌افزار Energy Plus

جدول ۱) مقادیر تعیین‌شده برای پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی انرژی و آنالیز اقتصادی

بلوک سفالی (۲۰ سانتی‌متر)	
ضریب هدایت حرارت معادل (W/m.K)	۰/۵
عایق حرارتی پلی‌استایرن	
ضریب هدایت حرارت (W/m.K)	۰/۰۴
هزینه عایق حرارتی (R/m^3 ; C_{ins})	۱۸۰۰۰۰
هزینه اجرا و مصالح نصب عایق (R/m^2 ; C_{con})	۲۵۰۰۰۰
اندود گچ	
ضریب هدایت حرارت (W/mK)	۰/۳
اندود سیمان	
ضریب هدایت حرارت (W/mK)	۱
ضریب جذب خورشیدی سطح خارجی	۰/۷
ضریب انتشار سطح خارجی و داخلی	۰/۹
پنل گچی (۱۰ سانتی‌متر)	
ضریب هدایت حرارت (W/mK)	۰/۳
سقف تیرچه و بلوک	
ضریب هدایت حرارت معادل (W/mK)	۰/۳۵
ضریب عملکرد (COP)	۲/۵
تعرفه (C_{el})	جدول ۳
بازدهی (μ_s)	۰/۷
ارزش حرارتی گاز (j/m^3 ; H_u)	$۳/۶ \times 10^7$
تعرفه (C_g)	جدول ۳
نرخ تورم (i)	۱۳٪
نرخ سود (d)	۱۵٪
دوره حیات (N)؛ (years)	۳۰

۴- نتایج شبیه‌سازی انرژی

آنالیزهای متعددی به‌منظور بررسی میزان انتقال حرارت از جدار خارجی در جهت‌های مختلف جغرافیایی برای ضخامت‌های متفاوت عایق حرارتی انجام شد. در نمودار ۱، میزان انتقال حرارت سالانه از هر متر مربع از جدار خارجی برای چهار جهت جغرافیایی نشان داده شده است. واضح است که با افزایش ضخامت عایق حرارتی، میزان حرارت انتقالی از مقطع جدار کاهش خواهد یافت. این کاهش، در ضخامت‌های کم عایق حرارتی با سرعت بیشتری همراه است. با افزایش ضخامت عایق حرارتی، این میزان با سرعت کمتری کاهش می‌یابد. برای تهران، میزان بار گرمایی ناشی از

در نتیجه، مقدار هزینه گاز و برق مصرفی برای گرمایش و سرمایش در طول دوره حیات برای هر متر مربع از سطح دیوار براساس معادله ۲ به دست می‌آید.

$$C_{enr} = PWF \left(\frac{Q_c}{COP} C_{el} + \frac{Q_h (3.6 \times 10^6)}{H_u \mu_s} C_g \right) \quad (2)$$

مجموع هزینه دوره حیات هر متر مربع از جدار شامل هزینه سوخت در طول دوره حیات، هزینه عایق حرارتی و هزینه مربوط به نصب آن می‌شود.

$$C_t = C_{enr} + (C_{ins} \times L_{ins}) + C_{con} \quad (3)$$

مقدار صرفه‌جویی اقتصادی سالانه (A_s)، برابر اختلاف بین هزینه سوخت جدار بدون عایق با جدار عایق‌کاری‌شده در یک سال است. مدت‌زمان بازگشت سرمایه برابر با زمانی است که در این مدت هزینه صرفه‌جویی‌شده برابر هزینه اولیه عایق‌کاری باشد و براساس معادله ۴ به دست می‌آید.

(۴)

$$PWF(b) \times A_s = (C_{ins} \times L_{ins}) + C_{con}$$

$$\rightarrow \begin{cases} b = \frac{\ln \left[1 - \left(\frac{d-i}{1+i} \right) \frac{(C_{ins} \times L_{ins}) + C_{con}}{A_s} \right]}{\ln \left(\frac{1+i}{1+d} \right)} & \text{if } i \neq d \\ b = (1+i) \frac{(C_{ins} \times L_{ins}) + C_{con}}{A_s} & \text{if } i = d \end{cases}$$

۶- نتایج آنالیز اقتصادی

در نمودار ۲- الف، میزان هزینه انرژی، هزینه اولیه عایق حرارتی و مجموع هزینه برای تعرفه سوم در جهت جنوبی نشان داده شده است. ضخامت بهینه، شرایطی خواهد بود که مجموع هزینه در دوره حیات کمترین مقدار باشد. براساس این نمودار، برای تعرفه سوم، ضخامت بهینه برابر با ۹ سانتی‌متر به دست آمده است. در نمودار ۲- ب، مجموع هزینه برای تمام تعرفه‌های مورد بررسی نشان داده شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش میزان تعرفه حامل‌های انرژی، ضخامت بهینه عایق حرارتی نیز افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه مربوط به نتایج تعرفه اول این بوده که میزان هزینه دوره حیات جدار بدون عایق کمتر از جدار با ضخامت‌های مختلف عایق حرارتی است. به عبارت دیگر، امکان بازگشت سرمایه صرف‌شده برای عایق‌کاری حرارتی در مدت‌زمان دوره حیات ۳۰ ساله وجود نخواهد داشت و استفاده از عایق حرارتی، توجیه اقتصادی ندارد. در حالی که در صورت استفاده از عایق حرارتی با ضخامت ۵ سانتی‌متر، امکان صرفه‌جویی ۶۶ درصدی انرژی فراهم خواهد شد.

تغییرات مجموع هزینه دوره حیات در ضخامت‌های کم با شدت بیشتری همراه است. با افزایش ضخامت در بازه بالای ۶ سانتی‌متر، این تغییرات با شدت کمتری صورت می‌گیرد. به‌عنوان مثال، در صورت استفاده از عایق به ضخامت ۶ سانتی‌متر به‌جای ضخامت‌های بهینه به‌دست‌آمده در تعرفه‌های دوم تا پنجم، میزان هزینه دوره حیات به‌ترتیب ۳، ۵، ۹ و بیشتر از ضخامت بهینه خواهد شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شرایط بهینه اقتصادی در یک بازه از ضخامت عایق حرارتی می‌تواند به دست آید

(معادل ۲۰ سنت با احتساب قیمت دلار ۴۲۰۰۰ ریال). میزان برق تولیدی از هر متر مکعب گاز با در نظر گرفتن بازده متوسط نیروگاه‌های ایران و اتلاف در شبکه‌های توزیع و انتقال، برابر با ۳ کیلووات ساعت است. در نتیجه، هزینه هر کیلووات ساعت برق مصرفی برابر با ۲۸۰۰ ریال است. همچنین با احتساب ۱۰۰ ریال برای هزینه تولید و انتقال هر کیلووات ساعت، هزینه تمام‌شده هر کیلووات ساعت برق برابر با ۳۹۰۰ ریال خواهد بود.

جدول ۲) تعرفه پله‌ای برق (ریال/کیلووات‌ساعت) مشترکین

دامنه مصرف ماهانه	تعرفه (ریال/متر مکعب)
۰-۱۰۰	۴۵۰
۱۰۰-۲۰۰	۵۲۵
۲۰۰-۳۰۰	۱۱۲۵
۳۰۰-۴۰۰	۲۰۲۵
۴۰۰-۵۰۰	۲۳۲۵
۵۰۰-۶۰۰	۲۹۲۶
مازاد بر ۶۰۰	۳۲۲۶

جدول ۳) تعرفه پله‌ای گاز (ریال/متر مکعب) مشترکین

دامنه مصرف ماهانه	تعرفه (ریال/متر مکعب)
۰-۲۰۰	۴۱۰
۲۰۰-۳۰۰	۶۹۰
۳۰۰-۴۰۰	۹۶۰
۴۰۰-۵۰۰	۱۲۴۰
۵۰۰-۶۰۰	۱۵۱۰
۶۰۰-۷۰۰	۲۲۰۰
۷۰۰-۸۰۰	۲۶۲۰
۸۰۰-۹۰۰	۳۰۳۰
۹۰۰-۱۰۰۰	۳۴۵۰
۱۰۰۰-۱۱۰۰	۳۸۶۰
۱۱۰۰-۱۲۰۰	۴۴۱۰
مازاد بر ۱۲۰۰	۴۸۳۰

جدول ۴) گروه‌های در نظر گرفته‌شده برای تعرفه حامل‌های انرژی

گروه	تعرفه ۱	تعرفه ۲	تعرفه ۳	تعرفه ۴	تعرفه ۵
میزان مصرف کم مصرف	مصرف متوسط	پرمصرف	بسیار پرمصرف	تعرفه بدون یارانه	
تعرفه برق (ریال)	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰	۲۵۰۰	۳۹۰۰
تعرفه گاز (ریال)	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۸۴۰۰

ارزیابی اقتصادی براساس هزینه دوره حیات کامل‌ترین تحلیل اقتصادی محسوب می‌شود و روشی است که برای بررسی کاربردهای سودده و تجاری به کار می‌رود. برای انجام آنالیز اقتصادی، ارزش کنونی سوخت مصرفی برای گرمایش و سرمایش در طول دوره حیات براساس میزان نرخ تورم و سود محاسبه شده است. بدین منظور، هزینه سوخت مربوط به یک سال در ضریب ارزش کنونی (PWF) ضرب می‌شود که توسط معادله ۱ به دست می‌آید.

$$PWF = \sum_{j=1}^N \frac{(1+i)^{j-1}}{(1+d)^j}$$

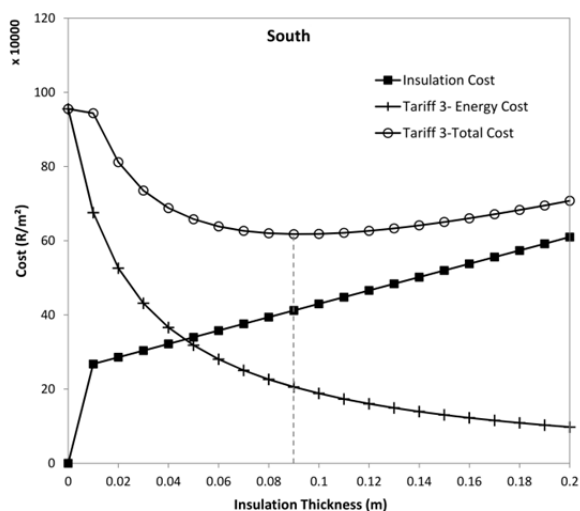
$$= \begin{cases} \frac{1}{d-i} \left[1 - \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^N \right] & \text{if } i \neq d \\ \frac{N}{1+i} & \text{if } i = d \end{cases} \quad (1)$$

متفاوت جغرافیایی نشان داده شده است. میزان انرژی صرفه‌جویی‌شده در تعرفه‌های یک تا پنج با توجه به تغییر ضخامت بهینه عایق حرارتی، بین ۷۰ تا ۸۷٪ متغیر بوده، در حالی که اختلاف زیادی بین هزینه صرفه‌جویی‌شده در این پنج تعرفه وجود دارد و بین صفر تا یک‌ریال است. با مقایسه دو وضعیت می‌توان نتیجه گرفت که برای تعرفه اول، جهت‌هایی که استفاده از عایق حرارتی بهینه به دست آمده نیز دارای هزینه صرفه‌جویی‌شده بسیار کم بوده و نزدیک به صفر است. بنابراین از دیدگاه اقتصادی، استفاده از عایق حرارتی توجیه‌پذیر نیست، در حالی که در صورت استفاده از عایق با ضخامت ۶ سانتی‌متر، صرفه‌جویی انرژی نزدیک به ۷۰٪ خواهیم داشت. برای تعرفه دوم نیز نتایج به همین صورت بوده و هزینه صرفه‌جویی‌شده کم بوده و دوره بازگشت سرمایه به‌طور میانگین برای جهت‌های مختلف بیش از ۱۷ سال بوده که زمان زیادی است. باید به این نکته نیز توجه داشت که استفاده از عایق حرارتی با ضخامت ۶ سانتی‌متر باعث کاهش مصرف انرژی حدود ۷۰٪ خواهد شد و افزایش آن از ۶ تا ۱۸ سانتی‌متر تنها باعث کاهش ۲۰ درصدی مصرف انرژی می‌شود. بنابراین عدم عایق‌کاری حرارتی، میزان مصرف منابع انرژی را به‌شدت افزایش می‌دهد، در حالی که بهینه‌سازی ضخامت عایق می‌تواند به مقدار کمتری، انرژی مصرفی را کاهش دهد.

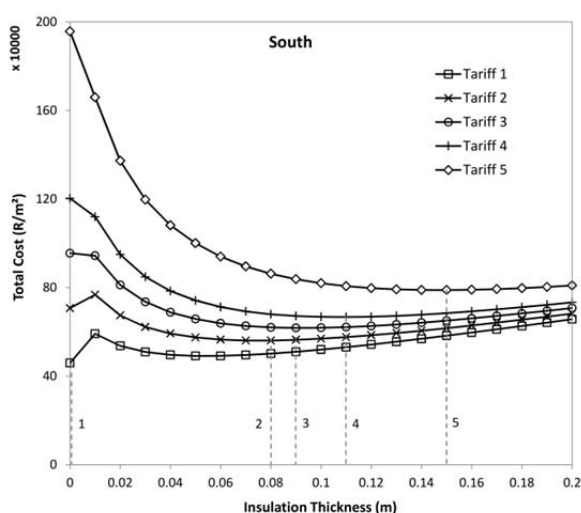
و در این بازه، اختلاف کمی بین نتایج وجود دارد. در جدول ۵، ضخامت بهینه عایق حرارتی و مدت‌زمان بازگشت سرمایه برای تعرفه‌های مختلف تعیین‌شده در هشت جهت جغرافیایی نشان داده شده است. حداکثر اختلاف بین ضخامت بهینه به‌دست‌آمده برای جهت‌های مختلف جغرافیایی برای هر یک از تعرفه‌ها برابر با ۳ سانتی‌متر است.

با توجه به این که تعرفه حامل‌های انرژی، یک پارامتر اقتصادی مهم در هزینه دوره حیات بوده، تغییر آن تاثیر قابل توجهی بر ضخامت بهینه و مدت‌زمان بازگشت سرمایه داشته، در حدی که ضخامت بهینه با تغییر تعرفه در بازه‌ای بین ۶ تا ۱۸ سانتی‌متر تغییر کرده است. همچنین مدت‌زمان بازگشت سرمایه بین ۶ تا ۲۸ سال قرار داشته است. لازم به ذکر است که برای تعرفه اول، در جهت‌های شمال، شمال شرقی، شمال غربی و جنوب، جدار بدون عایق حرارتی از نظر اقتصادی بهینه بوده و در صورت استفاده از عایق حرارتی، بازگشت سرمایه‌ای بیشتر از ۳۰ سال داشته است. عدم استفاده از عایق حرارتی، با وجود صرفه اقتصادی، مصرف بالاتر انرژی را به‌همراه دارد. به‌منظور مقایسه بین صرفه اقتصادی و میزان تغییرات انرژی مصرفی، در شکل ۲، مقدار هزینه صرفه‌جویی‌شده در طول دوره حیات و درصد کاهش انرژی مصرفی نسبت به جدار بدون عایق برای تعرفه‌های مختلف در جهت‌های

الف



ب

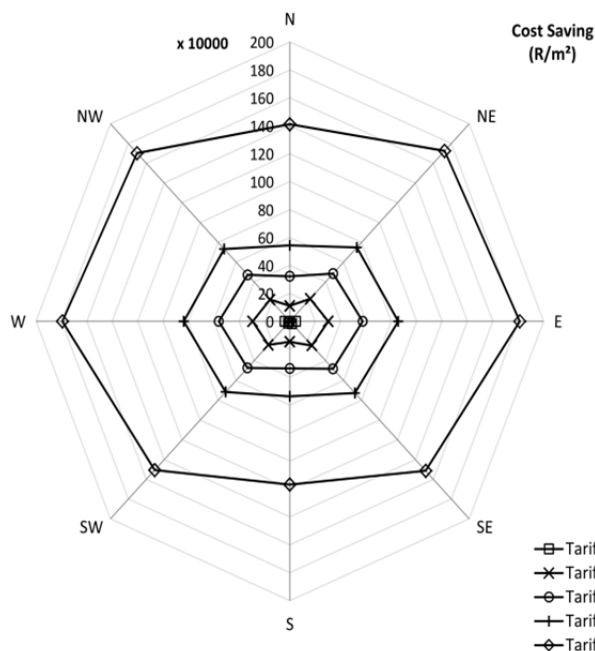


نمودار ۲) نتایج آنالیز اقتصادی ضخامت‌های مختلف عایق حرارتی در جهت جنوبی؛ الف) هزینه انرژی و مجموع هزینه دوره حیات در ضخامت‌های مختلف عایق برای تعرفه سوم، ب) مجموع هزینه دوره حیات در ضخامت‌های مختلف برای پنج تعرفه

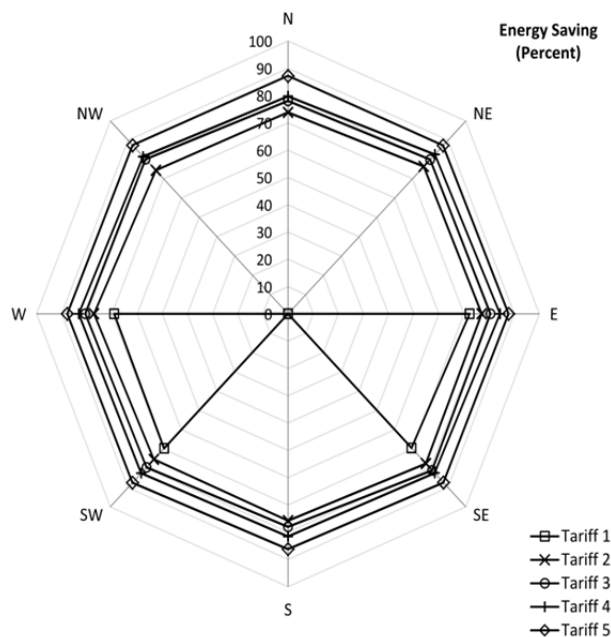
جدول ۵) ضخامت بهینه عایق حرارتی (متر) و مدت‌زمان بازگشت سرمایه (سال) برای تعرفه‌های مختلف در هشت جهت جغرافیایی

جهت جغرافیایی	شمال	شمال شرقی	شرق	جنوب شرقی	جنوب	جنوب غربی	غرب	شمال غربی
تعرفه ۱	ضخامت بهینه	۰	۰/۰۷	۰/۰۶	۰	۰/۰۶	۰/۰۶	۰
دوره بازگشت سرمایه	-	-	۲۵/۶	۲۷/۵	-	۲۸	۲۶	-
تعرفه ۲	ضخامت بهینه	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۸
دوره بازگشت سرمایه	۲۲	۱۷/۴	۱۵/۳	۱۶/۹	۲۰/۲	۱۶/۷	۱۵/۶	۱۷/۴
تعرفه ۳	ضخامت بهینه	۰/۱	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۱	۰/۱۱	۰/۱۱
دوره بازگشت سرمایه	۱۵/۲	۱۲/۵	۱۱/۲	۱۲/۵	۱۴/۵	۱۲/۳	۱۱/۴	۱۲/۷
تعرفه ۴	ضخامت بهینه	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۱۲
دوره بازگشت سرمایه	۱۱/۶	۱۰	۹/۳	۹/۹	۱۱/۷	۱۰	۹/۲	۹/۹
تعرفه ۵	ضخامت بهینه	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۱۸
دوره بازگشت سرمایه	۷/۲	۶/۱	۵/۹	۶/۶	۷/۶	۶/۶	۵/۹	۶/۲

(a)



(b)



شکل ۲) هزینه صرفه‌جویی‌شده در طول دوره حیات و انرژی صرفه‌جویی‌شده نسبت به جدار بدون عایق برای ضخامت‌های بهینه تعرفه‌های مختلف در هشت جهت جغرافیایی؛ الف) مقدار هزینه صرفه‌جویی‌شده در طول دوره حیات، ب) انرژی صرفه‌جویی‌شده نسبت به جدار بدون عایق برای ضخامت‌های بهینه تعرفه‌های مختلف در هشت جهت جغرافیایی

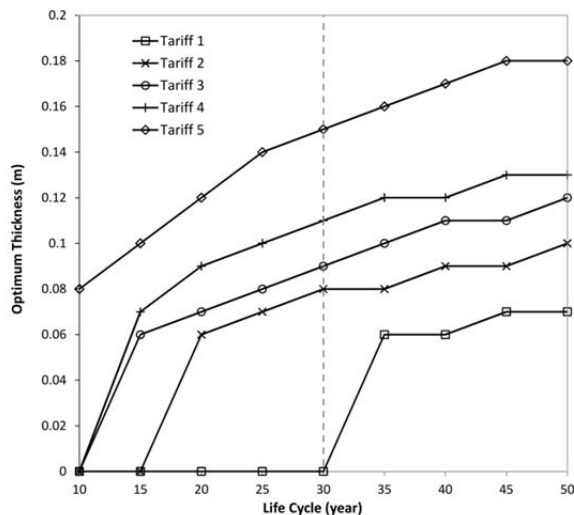
۳- الف، مدت‌زمان دوره حیات در بازه بین ۱۰ تا ۵۰ سال نشان داده شده است. براساس این نمودار با افزایش دوره حیات، ضخامت بهینه عایق حرارتی افزایش پیدا می‌کند. این تغییر در دوره حیات کم با شدت بیشتری بوده است و با افزایش مدت‌زمان دوره، با شیب کمتری افزایش می‌یابد. برای دوره‌های کوتاه، استفاده از عایق حرارتی برای تعرفه‌های پایین حامل‌های انرژی، توجیه اقتصادی نخواهد داشت. به‌عنوان مثال، برای دوره حیات ۱۰ ساله، به‌جز تعرفه پنجم، استفاده از عایق در دیگر تعرفه‌ها اقتصادی نخواهد بود. در نمودار ۳- ب، تاثیر تغییر هزینه عایق‌کاری بر ضخامت بهینه نشان داده شده و تغییرات هزینه اولیه (مجموع هزینه مصالح مربوط به نصب عایق حرارتی و اجرا) به‌صورت درصدی از هزینه در نظر گرفته شده است. با افزایش هزینه اولیه، ضخامت بهینه کاهش پیدا می‌کند. براساس نتایج، افزایش هزینه اولیه باعث می‌شود تا عایق‌کاری حرارتی در تعرفه‌های پایین اقتصادی نباشد. با توجه به این که بخشی از هزینه عایق‌کاری مربوط به هزینه نصب و مصالح اضافی به‌کاررفته برای نصب است، طراحی جزئیات اجرایی مناسب، این امکان را فراهم می‌کند تا هزینه اولیه عایق‌کاری کاهش یابد و می‌تواند راهکاری برای توجیه‌پذیری اقتصادی عایق‌کاری حرارتی، حتی در تعرفه‌های پایین باشد. نرخ تورم و سود از متغیرهای اقتصادی هستند که در ایران دچار نوسانات شدیدی می‌شوند. در نمودارهای ۳- ج و د تاثیر این متغیرها بر ضخامت بهینه عایق حرارتی در بازه بین ۱۰ تا ۲۰٪ نشان داده شده است. با افزایش نرخ تورم و سود، ضخامت بهینه به‌ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. افزایش ضخامت بهینه در نرخ تورم‌های پایین، تغییرات کمی دارد و برای مقادیر بالای نرخ تورم، ضخامت بهینه با شدت بیشتری افزایش می‌یابد. افزایش نرخ سود، عدم توجیه‌پذیری اقتصادی عایق‌کاری حرارتی را در تعرفه‌های پایین به‌دنبال دارد.

با توجه به این که بخش بزرگی از مشترکین حامل‌های انرژی، جزء گروه کم‌مصرف و مصرف متوسط هستند (تعرفه اول و دوم)، استفاده از عایق حرارتی در جدارها با توجه به تعرفه کم حامل‌های انرژی، توجیه اقتصادی ندارد. نتیجه عدم توجیه‌پذیری اقتصادی در نحوه ساخت بناها نیز مشهود است و شاهد آن هستیم که بیشتر ساختمان‌های ساخته‌شده در تهران فاقد عایق‌کاری حرارتی مناسب هستند. در حالی که عدم عایق‌کاری حرارتی، مصرف انرژی را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد و باعث از بین رفتن منابع و آلودگی زیست‌محیطی می‌شود.

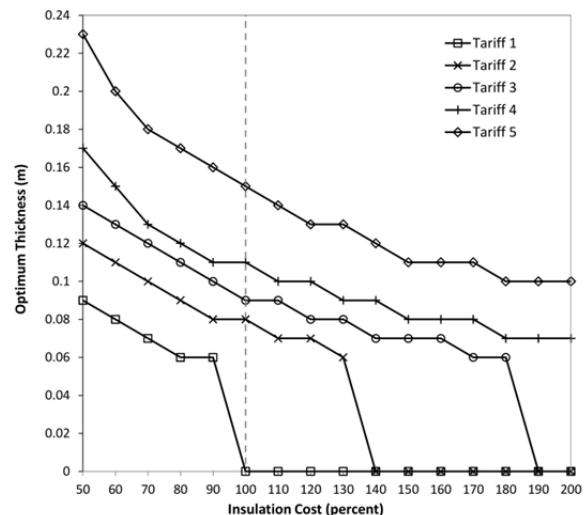
۷- بررسی تاثیر متغیرهای اقتصادی بر ضخامت بهینه عایق حرارتی

تغییر هر یک از پارامترهای اقتصادی می‌تواند باعث تغییر هزینه دوره حیات و در نتیجه ضخامت بهینه عایق حرارتی شود. به‌منظور حساسیت‌سنجی، ضخامت بهینه عایق حرارتی برای مقادیر مختلف پارامترهای اقتصادی، مورد بررسی قرار گرفت. چهار متغیر اقتصادی اصلی شامل دوره حیات، هزینه اولیه عایق‌کاری، نرخ تورم و نرخ سود بر میزان ضخامت بهینه عایق حرارتی مورد بررسی قرار گرفته و حالت مبنای این متغیرها، مقادیر لحاظ‌شده در بخش قبلی است. مقادیر در نظر گرفته عبارت از ۳۰ سال برای دوره حیات و به‌ترتیب ۱۳ و ۱۵٪ برای نرخ تورم و نرخ سود هستند. مقدار هزینه اولیه عایق‌کاری حرارتی با توجه به ضخامت عایق، براساس مقادیر جدول ۱ تعیین شده و تغییرات هزینه اولیه براساس درصدی از این مقادیر است. با هدف بررسی تاثیر هر یک از پارامترهای اقتصادی در ضخامت بهینه عایق حرارتی، سه پارامتر دیگر ثابت و برابر با حالت مبنا در نظر گرفته شده است.

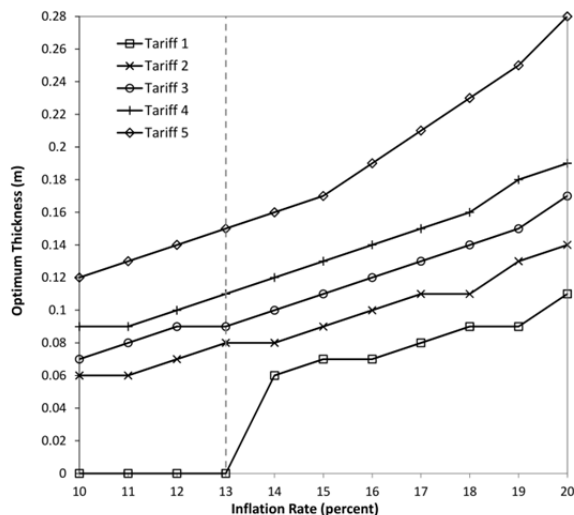
در نمودار ۳، تاثیر این چهار متغیر اقتصادی بر میزان ضخامت بهینه عایق حرارتی در جهت جنوبی نشان داده شده است. در نمودار



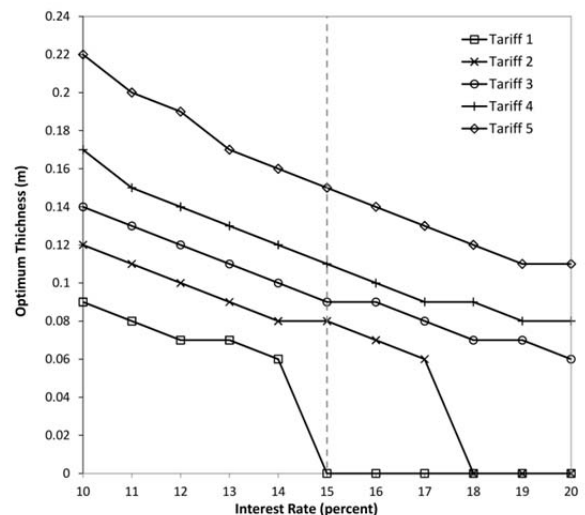
Inflation Rate=13% Interest Rate=15%



Life Cycle=30 (years) Inflation Rate=13% Interest Rate=15%



Life Cycle=30 (years) Interest Rate=15%



Life Cycle=30 (years) Inflation Rate=13%

نمودار ۳) تاثیر متغیرهای اقتصادی بر ضخامت بهینه عایق حرارتی؛ الف) مدت زمان دوره حیات، ب) هزینه اولیه عایق کاری، ج) نرخ تورم، د) نرخ سود

همچنین در دیگر جهت‌های جغرافیایی نیز بازگشت سرمایه به‌طور متوسط ۲۷ سال و میزان هزینه صرفه‌جویی‌شده نزدیک به صفر است.

۲- برای تعرفه‌های دوم تا پنجم، ضخامت بهینه بین ۶ تا ۱۸ سانتی‌متر تغییر می‌کند و بازگشت سرمایه نیز در بازه بین ۶ تا ۲۸ سال است. با بالاتر رفتن تعرفه حامل‌های انرژی، ضخامت بهینه عایق حرارتی افزایش می‌یابد و مدت زمان بازگشت سرمایه کوتاه‌تر می‌شود.

۳- افزایش دوره حیات عایق حرارتی در ساختمان، استفاده از آن را از دیدگاه اقتصادی توجیه‌پذیرتر خواهد کرد و ضخامت بهینه عایق حرارتی افزایش می‌یابد. البته در اکثر موارد، دوره حیات ساختمان به دوام مصالح و سیستم‌های مورد استفاده بستگی ندارد، بلکه منافع اقتصادی ناشی از تخریب و نوسازی است که باعث کاهش عمر مفید متوسط ساختمان‌ها می‌شود.

۴- کاهش هزینه اولیه عایق حرارتی و هزینه نصب آن باعث افزایش ضخامت بهینه و کاهش مدت زمان بازگشت سرمایه

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، میزان تاثیر پارانه‌های غیرهدف‌مند حامل‌های انرژی بر ضخامت بهینه عایق حرارتی برای تهران مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این که تعرفه برق و گاز براساس میزان مصرف مشترکین به‌صورت پله‌ای محاسبه می‌شود، تعرفه مصرف مشترکین در چهار رده کم‌مصرف، مصرف متوسط، پرمصرف و بسیار پرمصرف دسته‌بندی شد. همچنین بررسی اقتصادی برای تعرفه بدون پارانه به‌عنوان تعرفه پنجم، مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی انرژی توسط نرم‌افزار مدل‌سازی Energy Plus برای دیوار بلوک سفالی با عایق حرارتی پلی‌استایرن از خارج در ضخامت‌های مختلف عایق حرارتی انجام گرفت و ضخامت بهینه عایق حرارتی براساس محاسبه هزینه دوره حیات ۳۰ ساله تعیین شد. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، موارد زیر قابل طرح هستند:

- ۱- برای تعرفه اول که مربوط به مشترکین کم‌مصرف است، در چهار جهت از هشت جهت جغرافیایی، استفاده از عایق حرارتی، اقتصادی نیست و بازگشت سرمایه آن بیش از ۳۰ سال است.

۹- پی‌نوشت

A_s	صرفه‌جویی اقتصادی سالانه (R/m^2)
b	مدت زمان بازگشت سرمایه (سال)
C_{con}	هزینه اجرای عایق حرارتی (R/m^2)
C_{el}	تعرفه برق (R/KWh)
C_{enr}	هزینه انرژی مصرفی (R/m^2)
C_g	تعرفه گاز (R/m^3)
C_{ins}	هزینه عایق حرارتی (R/m^3)
C_t	مجموع هزینه (R/m^2)
COP	ضریب عملکرد سیستم سرمایشی
d	نرخ سود (%)
H_u	ارزش حرارتی گاز (j/m^3)
i	نرخ تورم (%)
L_{ins}	ضخامت عایق حرارتی (m)
N	مدت زمان دوره حیات (سال)
PWF	ضریب ارزش کنونی
Q_c	بار سرمایی سالانه انتقال یافته (KWh)
Q_h	بار گرمایی سالانه انتقال یافته (KWh)
R	ریال
μ_s	بازدهی سیستم گرمایشی

منابع

- 1- Al-Khawaja MJ. Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation. *Applied Thermal Engineering*. 2004;24(17-18):2601-2610.
- 2- Al-Sanea SA, Zedan MF, Al-Ajlan SA. Effect of electricity tariff on the optimum insulation-thickness in building walls as determined by a dynamic heat-transfer model. *Applied Energy*. 2005;82(4):313-330.
- 3- Daouas N, Hassen Z, Aissia HB. Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia. *Applied Thermal Engineering*. 2010;30(4):319-326.
- 4- Liu X, Chen Y, Ge H, Fazio P, Chen G. Determination of optimum insulation thickness of exterior wall with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China. *Procedia Engineering*. 2015;121:1008-1015.
- 5- Ucar A, Balo F. Determination of the energy savings and the optimum insulation thickness in the four different insulated exterior walls. *Renewable Energy*. 2010;35(1):88-94.
- 6- Farhanieh B, Sattari S. Simulation of energy saving in Iranian buildings using integrative modelling for insulation. *Renewable Energy*. 2006;31(4):417-425.
- 7- Ebrahimpour A, Maerefat M, Kari BM. Optimization of thermal insulation of residential buildings in climatic conditions of Iran for annual thermal loads. *Modares Technical and Engineering*. 2004; 17:33-52. [Persian]
- 8- Ramin H, Hanafizadeh P, Akhavan-Behabadi MA. Determination of optimum insulation thickness in different wall orientations and locations in Iran. *Advances in Building Energy Research*. 2016;10(2):149-171.
- 9- Unknown Author. Code No. 19: Energy Efficiency. Bureau for compiling and promoting national regulations for buildings: Ministry of Housing and Urbanism IRI; 2002. [Persian]
- 10- Fayaz R, Kari BM. Comparison of energy conservation building codes of Iran, Turkey, Germany, China, ISO 9164 and EN 832. *Applied Energy*. 2009;86(10):1949-1955.

می‌شود. بنابراین ارایه راهکارهای کم‌هزینه عایق‌کاری حرارتی می‌تواند به‌عنوان یک اقدام مهم و اولویت‌دار برای افزایش توجیه‌پذیری اقتصادی آن باشد.

۵- نرخ تورم و سود تاثیر قابل توجهی در ضخامت بهینه عایق حرارتی و مدت‌زمان بازگشت سرمایه آن دارد. افزایش نرخ تورم و سود به‌ترتیب باعث افزایش و کاهش ضخامت بهینه عایق حرارتی می‌شوند.

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که پایین‌بودن تعرفه حامل‌های انرژی برای مشترکین کم‌مصرف و با مصرف متوسط که بیشتر مشترکین را شامل می‌شوند، باعث می‌شود تا عایق‌کاری حرارتی از دیدگاه اقتصادی توجیه‌پذیر نباشد. همچنین در تعرفه‌های بالا نیز بازگشت سرمایه طولانی و هزینه صرفه‌جویی‌شده کم است. با توجه به این که تعرفه حامل‌های انرژی در پله‌های بالا نیز پایین‌تر از قیمت آزاد آن است، مشترکین پرمصرف در کنار استفاده از یارانه مربوط به پله‌های پایین، در پله‌های بالا نیز یارانه دریافت می‌کنند. در نتیجه، یارانه انرژی پرداختی از طرف دولت به مشترکین پرمصرف بیشتر از دیگر مشترکین است. به عبارت دیگر، حتی تعرفه پله‌ای نیز انگیزه لازم برای صرفه‌جویی را به‌همراه ندارد. برای ایجاد تعادل در میزان یارانه دریافتی توسط مشترکین مختلف، بهتر است تعرفه‌های انرژی در پله‌های بالاتر از الگوی مصرف، با قیمت آزاد و بدون اختصاص یارانه‌ای تعیین شود. در این صورت برای مشترکین پرمصرف، استفاده از عایق با ضخامت بالا توجیه اقتصادی خواهد داشت و مدت‌زمان بازگشت سرمایه به حدود ۷ سال کاهش پیدا خواهد کرد. لازم به توضیح است که در اکثر کشورها، در نظر گرفتن ضخامت‌های اندک عایق حرارتی به هیچ وجه توصیه نمی‌شود و به‌عنوان "سوختن یک فرصت مهم" تلقی می‌شود، زیرا توجیه اقتصادی افزایش ضخامت آن در آینده وجود نخواهد داشت. همچنین امکان کاهش مصرف انرژی به مقدار ۸۷٪ فراهم خواهد شد که با توجه به پرمصرف‌بودن این مشترکین، تاثیر زیادی بر کل مصرف انرژی خواهد داشت.

نامناسب‌بودن تعرفه‌های موجود و عدم توجیه‌پذیری اقتصادی آن باعث شده است تا توجه لازم از طرف سازندگان و مصرف‌کنندگان به عایق‌کاری حرارتی ساختمان معطوف نشود و بیشتر بناهای تهران بدون عایق‌کاری حرارتی اجرا شوند. در حالی که با اضافه‌کردن عایق حرارتی، تنها به ضخامت ۶ سانتی‌متر، امکان صرفه‌جویی ۷۰ درصدی در میزان مصرف انرژی ناشی از انتقال حرارت از جدار خارجی فراهم می‌شود که می‌تواند تاثیر بسزایی در کاهش مصرف منابع انرژی و کاهش آلودگی محیط زیست داشته باشد. بنابراین، در شرایط کنونی، دیدگاه اقتصادی به‌تنهایی نمی‌تواند ترغیب‌کننده سرمایه‌گذاران، سازندگان و بهره‌برداران برای انجام عایق‌کاری حرارتی باشد و انجام مناسب عایق‌کاری حرارتی ساختمان نیازمند وضع قوانین جدی و استفاده از ابزارهای تشویقی از طرف دولت است.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تأییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

سهم نویسندگان: میثم اکبری‌پایدار (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۲۵٪); بهروز محمدکاری (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۲۵٪); مهدی معرفت (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۲۵٪); مهدیه آبروش (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۵٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

wall insulation thickness on annual cooling and heating energy uses under different climates. *Applied Energy*. 2012;97:313-318.

23- Ozel M. Cost analysis for optimum thicknesses and environmental impacts of different insulation materials. *Energy and Buildings*. 2012;49:552-559.

24- Ozel M. Determination of optimum insulation thickness based on cooling transmission load for building walls in a hot climate. *Energy Conversion and Management*. 2013;66:106-114.

25- Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), EnergyPlus Engineering Reference, The Reference for EnergyPlus Calculations, LBNL. 2016.

26- Li XQ, Chen Y, Spitler JD, Fisher D. Applicability of calculation methods for conduction transfer function of building constructions. *International Journal of Thermal Sciences*. 2009;48(7):1441-1451.

27- Seem JE. Modeling of heat transfer in buildings [Dissertation]. Madison: University of Wisconsin-Madison; 1987.

28- Ceylan HT, Myers GE. Long-time solutions to heat-conduction transients with time-dependent inputs. *Journal of Heat Transfer*. 1980;102(1):115-120.

29- Ouyang K, Haghighat F. A procedure for calculating thermal response factors of multi-layer walls-state space method. *Building and Environment*. 1991;26(2):173-177.

30- Walton GN. Thermal analysis research program reference manual. Washington DC: National Bureau of Standards; 1983.

31- Lawrence Berkeley Laboratory (LBL), DOE2.1E-053 source code. 1994.

32- Unknown Author. MatLab, MATrixLABoratory-7.10.0. User's Guide, MathWorks. 2017.

33- Mandalaki M, Zervas K, Tsoutsos T, Vazakas A. Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use. *Solar Energy*. 2012;86(9):2561-2575.

34- Akbari Paydar M, Kari BM. Movable shade control algorithm (&) optimizing control conditions for cold seasons in Tehran city. *Iranian Association of Architecture and Urbanism*. 2016;7(11):5-17. [Persian]

11- Yu J, Yang Ch, Tian L, Liao D. A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China. *Applied Energy*. 2009;86(11):2520-2529.

12- Hasan A. Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost. *Applied Energy*. 1999;63(2):115-124.

13- Çomaklı K, Yüksel B. Optimum insulation thickness of external walls for energy saving. *Applied Thermal Engineering*. 2003;23(4):473-479.

14- Bolattürk A. Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey. *Applied Thermal Engineering*. 2006;26(11-12):1301-1309.

15- Altan Dombaycı Ö, Gölçü M, Pancar Y. Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources. *Applied Energy*. 2006;83(9):921-928.

16- Ucar A, Balo F. Effect of fuel type on the optimum thickness of selected insulation materials for the four different climatic regions of Turkey. *Applied Energy*. 2009;86(5):730-736.

17- Ekici BB, Gulten AA, Teoman Aksoy U. A study on the optimum insulation thicknesses of various types of external walls with respect to different materials, fuels and climate zones in Turkey. *Applied Energy*. 2012;92:211-217.

18- Kaynaklı O. A study on residential heating energy requirement and optimum insulation thickness. *Renewable Energy*. 2008;33(6):1164-1172.

19- Bolattürk A. Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey. *Building and Environment*. 2008;43(6):1055-1064.

20- Yu J, Tian L, Yang Ch, Xu X, Wang J. Optimum insulation thickness of residential roof with respect to solar-air degree-hours in hot summer and cold winter zone of china. *Energy and Buildings*. 2011;43(9):2304-2313.

21- Ozel M. Effect of wall orientation on the optimum insulation thickness by using a dynamic method. *Applied Energy*. 2011;88(7):2429-2435.

22- Pan D, Chan M, Deng S, Lin Z. The effects of external