

ارزیابی کاهش تلفات حرارتی با بکارگیری عایق های حرارتی یا ایجاد فاصله هوایی در جداره های خارجی ساختمان

قنبر علی شیخ زاده ^{۱*} , مظفر مهرابیان ^۲ و علی ضامن مقصودی ^۳
گروه مهندسی مکانیک – دانشکده مهندسی – دانشگاه کاشان
E-mail: gsheikhzadeh@yahoo.com

در این پژوهش ابتدا به بررسی راههای مختلف انتقال حرارت در ساختمان پرداخته و سپس مکانیزم انتقال حرارت هدایتی که نقش اساسی در تلفات حرارتی از ساختمان دارد مورد توجه قرار گرفته است. یکی از بهترین راهها برای جلوگیری از تلفات حرارتی استفاده از عایق های حرارتی با تعبیه فاصله هوایی در جداره های ساختمان است. مقدار تلفات حرارتی برای یک ساختمان مسکونی نمونه واقع در یک منطقه نسبتاً سردسیر در سه حالت عادی، عایقکاری شده و استفاده از فاصله هوایی در جداره ها محاسبه شده تا تاثیر عایقکاری و یا ایجاد فاصله هوایی در ساختمان مشخص شود. این محاسبات نشان می دهد که تعبیه فاصله هوایی در دیواره های خارجی تا ۲۹ درصد تعبیه فاصله هوایی در سقف (بام) تا ۳۶ درصد، استفاده از عایق پشم شیشه با کاغذ گرافیت در دیواره های خارجی تا ۷۸ درصد، و استفاده از عایق پشم شیشه با ورق آلومینیوم در سقف تا ۸۵ درصد از تلفات حرارتی این جداره ها می کاهد. همچنین تعبیه فاصله هوایی حدود ۲۸ درصد و استفاده از عایق حرارتی حدود ۵۸ درصد از تلفات حرارتی کل ساختمان مورد نظر می کاهد.

واژه های کلیدی: تلفات حرارتی ساختمان، عایق های حرارتی، فاصله هوایی، صرفه جوئی

تحولات شگرفی که در علوم مهندسی معماری و صنعت ساختمان بوجود آمده است ناشی از وسعت دید و استفاده از آخرین دستاوردهای علمی در جهان می باشد. همزمان با پیشرفت تکنولوژی در تمام ابعاد و زمینه های علمی و همچنین به سبب پیشرفت گسترده صنعتی و اقتصادی کشور، نیاز به شناخت و اشاعه تکنولوژی پیشرفته در استفاده از منابع انرژی را افزایش یافته و از سوی دیگر موجب صرفه جوئی در انواع منابع انرژی می شود. استفاده از منابع طبیعی شامل گاز، نفت و یا زغال سنگ برای گرم کردن منازل و ساختمانهای اداری و تجاری بخش مهمی از ذخائر انرژی مفید را مصرف می کند. روشن نگاه داشتن سیستم های تهویه مطبوع در تابستان برای خنک کردن ساختمانها مستلزم استفادع از نیروی برق است که تولید آن باعث آلودگی هوای شهرها، سواحل دریاها، آب رودخانه و تهدید زندگی آبزیان می گردد. یک سوم از انرژی تولیدی در سطح جهان صرف استفاده از وسایل گرمایشی و سرمایشی می شود، لذا صرفه جوئی در مصرف انرژی توسط این وسایل سهم زیادی در کاهش کل انرژی مصرفی خواهد داشت [۲۱].

مناسب ترین روش برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان، عایق کردن جداره های خارجی ساختمانها می باشد که حاصل آن صرفه جوئی در انرژی و سوخت مصرفی در فصل زمستان، کاهش نیروی برق مصرفی در تابستان، سالم سازی محیط زیست و تقلیل سرمایه گذاری در تاسیسات گرمایشی و سرمایشی می باشد. این کار با استفاده از عایق های ساختمانی و یا با استفاده از بلوک های مجوف که منجر به ایجاد فاصله هوایی در جداره های خارجی ساختمان می شود امکانپذیر است. استفاده از پنجره های دو لایه نیز به میزان قابل ملاحظه ای از اتلافات حرارتی و برودتی ساختمان ها می کاهد. اگر چه استفاده از عایق هایی ساختمانی منجر به افزایش هزینه سرمایه گذاری اولیه می شود، ولی همانطور که محاسبات انجام شده در این پژوهش نشان می دهد، افزایش سرمایه پس از حدود ۵ سال مستهلک می شود. با توجه به اینکه در کشور ما ارزش استفاده از عایق ها بطور کامل برای مردم روشن نمی باشد، در این تحقیق سعی شده است که عملکرد عایق ها و تاثیر استفاده از آنها در کاهش تلفات حرارتی مورد مطالعه قرار می گیرد.

حرارت در ساختمان توسط مکانیزم های هدایت، جابجایی و تشعشع انتقال می یابد که در محاسبات مربوط به بار حرارتی در فصل زمستان اثرات تشعشع ناچیز فرض می شود. بنابراین راه های اتلاف حرارت در ساختمان عبارتند از تلفات حرارت از جداره های ساختمان شامل دیواره ها، بام، پنجره ها و کف و نفوذ هوا به داخل ساختمان [۳]. برای ارزیابی تلفات حرارتی از جداره های ساختمان، از مفهوم ضریب انتقال حرارتی کلی بصورت زیر استفاده می شود:

$$Q = UA(T_i - T_o) \quad (1)$$

که در آن U ضریب انتقال حرارت کلی، A سطح جداره، T_o دمای طرح خارج و T_i دمای طرح داخل می باشد. U بیانگر اثرات توأم انتقال حرارت از لایه های تشکیل دهنده جداره، هوای محبوس در فاصله هوایی (در صورت وجود) و لایه های هوای دو طرف جداره مورد نظر می باشد. جداره های ساختمان اغلب از لایه هایی با ضخامت متفاوت متشکل از مواد مختلف می باشند. مقاومت حرارتی هدایتی این جداره های مرکب به صورت جمع مقاومت های لایه های مختلف می باشد:

$$R_{e,cond} = R_1 + R_2 + \dots = \frac{X_1}{K_1 A} + \frac{X_2}{K_2 A} + \dots \quad (2)$$

که در آن $R_{e,cond}$ مقاومت حرارتی هدایتی جداره مرکب، X_i و K_i ضخامت و ضریب هدایت حرارتی لایه i ام و A سطح جداره می باشد.

مقاومت حرارتی لایه های هوای مجاور دیواره (داخل و خارج) با استفاده از ضرایب فیلم داخل و خارج بیان می شود. اگر دیواره شامل یک فاصله هوایی نیز باشد مقاومت حرارتی مربوط به این هوای ساکن را نیز باید در نظر گرفت. بنابراین مقاومت مربوط به لایه های هوا بصورت زیر بیان می شود:

$$R_{e,air} = R_{si} + R_a + R_{so} = \frac{1}{f_i A} + \frac{1}{f_a A} + \frac{1}{f_o A} \quad (3)$$

که در آن $R_{e,air}$ مقاومت حرارتی معادل مربوط به هوا، f_i ضریب فیلم داخل، f_a ضریب فیلم فاصله هوایی و f_o ضریب فیلم خارج می باشد. ضریب فیلم هوای داخل معمولاً مقدار ثابتی در نظر گرفته می شود و ضریب فیلم های هوای خارج به شرایط هوای بیرون از جمله سرعت باد در محل بستگی دارد. توجه شود که تلفات حرارتی به دو دلیل به سرعت و جهت باد بستگی دارد: اول اینکه حرارت را از سطح خارجی ساختمان به بیرون انتقال می دهد و مقدار مقاومت حرارتی کل را پائین می آورد و دوم اینکه باعث نفوذ هوای سرد از درزهای اطراف درب ها و پنجره ها و از داخل هواکش ها و ... به داخل ساختمان می شود. بهر حال ضرایب فیلم داخل و خارج در مورد یک ساختمان موجود در یک منطقه خاص تقریباً مقادیر ثابتی می باشند. مقاومت حرارتی کل به صورت جمع مقاومت ها بیان می شوند:

$$R_t = R_{e,air} + R_{e,air} \quad (4)$$

و طبق تعریف U از رابطه زیر بدست می آید:

$$UA = 1/R_t \quad (5)$$

با توجه به مطالب فوق الذکر، آنچه در تعیین ضریب انتقال حرارت کلی قابل کنترل است، ضخامت و ضریب هدایت حرارتی لایه ام و ضخامت فاصله هوایی می باشد. اگر در مورد هزینه مصرف شده و فضای اشغال شده توسط جداره ها محدودیتی وجود نداشته باشد، می توان مقاومت حرارتی جداره را بقدری افزایش داد که ضریب انتقال حرارت جداره به سمت صفر میل کند و تلفات حرارتی از جداره ناچیز شود ولی عملاً این امکانپذیر نیست.

تلفات ناشی از نفوذ هوا، با استفاده از حجم هوای نفوذی و اختلاف دمای طرح داخل و خارج محاسبه می شود. حجم هوای نفوذی با روش های مختلفی قابل محاسبه است. در اینجا از روش حجمی مقدار هوای نفوذی محاسبه می شود:

$$\dot{V} = n \times V \quad (6)$$

که در آن $\dot{V}$ حجم هوای نفوذی (CFH)، V حجم محل مورد نظر (CF) و n دفعات تعویض هوای محل در ساعت می باشد. پس از اینکه حجم هوای نفوذی مشخص شد، تلفات حرارتی ناشی از نفوذ هوا بصورت زیر محاسبه می شود:

$$Q = \rho \times \dot{V} \times C_p \times (T_i - T_o) \quad (7)$$

که در آن ρ دانسیته هوا و C_p گرمای ویژه هوا می باشد. بار حرارتی هر محل با جمع تلفات حرارتی از جداره ها و تلفات حرارتی ناشی از نفوذ هوا با احتساب ۱۰٪ ضریب اطمینان بدست می آید.

یکی از راههای کاهش تلفات حرارتی استفاده از عایق ها می باشد. عایق ها اصولاً دو دسته می باشند: عایق های حجمی و عایق های انعکاسی، عایق های حجمی بصورت یک هادی حرارتی ضعیف عمل می کنند. پشم شیشه، پشم های معدنی، الیاف سلولوزی و فومها (مثل پلی یورتان) از این دسته عایق ها می باشند، که در صنعت ساختمان کاربرد دارند. عایق های انعکاسی نیاز به یک فاصله هوایی دارند، بطوریکه با انعکاس قسمت عمده تشعشع و یا عدم انتشار حرارت از طریق تشعشع در دیوارهای این فاصله هوایی عمل می کنند و بدین ترتیب عبور حرارت از جداره را کاهش می دهند. این نوع عایق ها در محدود کردن حرارت دریافتی در تابستان (حرارت اکتسابی از خورشید) نقش موثرتری دارند و در محدود کردن تلفات حرارتی در زمستان (که عمده تلفات مربوط به هدایت و جابجایی می باشد) موثر واقع نمی شوند.

هوای ساکن عایق بسیار خوبی است . لذا عایق ها یا شامل حباب های کوچک هوا می باشند , مثل فوم ها , و یا هوا را در سطح خود جذب می کنند , مانند عایق های الیافی . به همین دلیل عایق ها دارای ضریب هدایت حرارت پائینی می باشند . عایق های پشم شیشه و پشم های معدنی سطوح زیادی را در تماس با هوا ایجاد می کنند و در نتیجه مولکولهای هوا جذب این سطوح شده و لایه های ساکن هوا را تشکیل می دهند . بهر حال این عایق ها از انتقال حرارت جابجائی در درون خود جلوگیری می کنند [۴] .

در ایران پشم شیشه رایج ترین عایق در صنعت ساختمان می باشد و شرکت پشم شیشه ایران با قدمتی ۴۰ ساله انواع این عایق را تولید می کند . قیمت تقریبی این عایق ها (سال گذشته) در جدول زیر آورده شده است .

نوع عایق	ضخامت (mm)	قیمت هر متر مربع (ریال)
پشم شیشه با روکش با کاغذ گرافیت	60	17500
	80	20500
	100	24000
	150	31000
پشم شیشه با روکش آلومینیوم	50	19000
	75	23000
	100	25500
	150	33000

جدول ۱ - قیمت تقریبی عایق پشم شیشه

میزان عایق کاری با توجه به اقلیمهای مختلف زمستانی و تابستانی متغیر بوده و به درجه حرارت محیط خارج ساختمان بستگی دارد . بدیهی است کاهش مقدار U مستلزم صرف هزینه های بیشتر می باشد . بهر حال در برخی موارد می توان در قبال تحمل هزینه های بسیار کم به عایق کاری نسبتاً خوبی یعنی مقدار U کمتری دست یافت و در نتیجه به صرفه جوئی زیادی در مصرف انرژی رسید .

مقدار عایقی که کل هزینه های گرمایش فضاها را محصور بین جداره ها را در طول عمر مفید خود به حداقل برساند بعنوان ضخامت بهینه عایق تعریف می شود . مادامی که کاهش هزینه گرمایش ناشی از افزودن عایق بیشتر از افزایش هزینه بکارگیری عایق باشد , کل هزینه کاهش خواهد یافت . طبق مقررات ملی ساختمان مقدار ضریب انتقال حرارت جداره های ساختمان نباید از $0.45 \text{ W/m}^2\text{K}$ تجاوز کند .

برای محاسبه ضخامت بهینه عایق می توان از روشی نسبتاً ساده استفاده نمود . در این روش از نرخ بهره پول ، مالیات و تورم بهای سوخت و غیره صرفنظر می شود . اطلاعات اساسی لازم در این روش عبارتند از : هزینه سوخت ، بازده سیستم گرمایشی ، ساعات کارکرد سیستم در سال ، دوره ارزیابی یعنی مدت زمانی که هزینه عایق با صرفه جوئی در انرژی جبران می شود . دمای طرح خارج ، دمای طرح داخل ، ضریب هدایت عایق و هزینه خرید و نصب عایق در ضخامت های مختلف [۵] . در این روش مقادیر هزینه حرارت مفید ، ضریب هزینه ، هزینه حرارت تلف شده ، محاسبه می شود . سپس با مقایسه هزینه عایق و هزینه حرارت تلف شده ، ضخامت بهینه عایق تعیین می گردد هزینه حرارت مفید به هزینه سوخت و بازده سیستم گرمایشی بستگی دارد . هزینه حرارت تلف شده را می توان طی چهار مرحله که توسط روابط زیر مشخص شده ، محاسبه نمود :

$$GJC = \frac{FC}{HV} \quad (8-الف)$$

$$UGJC = \frac{GJC}{E} \quad (8-ب)$$

$$CC = \frac{UGJC \times T}{10^9} \quad (8-ج)$$

$$QC = CC \times \frac{Q}{A} \quad (8-د)$$

که در آن ، FC هزینه سوخت ، HV ارزش حرارتی سوخت ، GJC هزینه یک گیگاژول انرژی ناخالص ، E بازده حرارتی سیستم گرمایشی ، UGJC هزینه یک گیگاژول انرژی مفید ، T دوره ارزیابی (ثانیه) ، CC ضریب هزینه (ریال بر وات) ، Q/A شار تلفات حرارتی و QC هزینه حرارت تلف شده (ریال بر متر مربع) می باشد .

با مقایسه هزینه ضخامت های مختلف عایق و هزینه حرارت تلف شده بر اساس این ضخامت ها و کمترین هزینه کل می توان در مورد ضخامت بهینه عایق تصمیم گیری نمود . قابلیت تاثیر عایق های تراکم پذیر مانند پشم شیشه به چگالی آنها بستگی دارد . تجزیه نشان داده است که اگر پشم شیشه بطور آزاد (با چگالی کم) قرار بگیرد قابلیت تاثیر آن بیشتر از زمانی است که بطور فشرده (با چگالی زیاد) بکار رود [۶].

با توجه به اینکه موضوع این تحقیق کاهش بار حرارتی می باشد، جهت محاسبات نمونه محلی انتخاب شده است که زمستانی بسیار سرد و تابستانی معتدل دارد. لذا گرمایش چنین محلی به انرژی زیادی نیاز دارد، اما نیازی به سرمایش تابستانی ندارد. ساختمانی مسکونی واقع در شهرستان داران در غرب استان اصفهان در نظر گرفته شده است. این شهر در عرض جغرافیایی 33° و ارتفاع 6300 ft از سطح دریا واقع شده است. دمای طرح خارج زمستانی در این منطقه سردسیر 13°F - می باشد. ساختمان مورد نظر مطابق شکل (۱)، دارای یک طبقه شامل هال، پذیرائی، دو اتاق خواب، آشپزخانه، حمام و توالت بوده و مساحت زیر بنای آن حدود 150 m^2 می باشد.

دیوارهای خارجی از آجر معمولی با ضخامت 240 mm با روکار بیرونی از آجر نما به ضخامت 100 mm و نازک کاری داخلی از اندود گچ به ضخامت 10 mm تشکیل شده است و دارای ضریب انتقال حرارت $0.31\text{ But/hr}^{\circ}\text{Fft}^2$ می باشد. سقف از آسفالت به ضخامت 50 mm ، شن و ماسه به ضخامت 60 mm ، بتن به ضخامت 100 mm ، و اندود گچ به ضخامت 20 mm تشکیل شده و دارای ضریب انتقال حرارت $0.33\text{ But/hr}^{\circ}\text{Fft}^2$ می باشد. پنجره ها تک شیشه معمولی با ضریب انتقال حرارت $1.13\text{ But/hr}^{\circ}\text{Fft}^2$ می باشد. کف ساختمان از بتن ماسه و موزائیک تشکیل شده و دارای ضریب انتقال حرارت $0.26\text{ But/hr}^{\circ}\text{Fft}^2$ می باشد.

با توجه به رابطه (۱) تلفات حرارتی از جداره های ساختمان محاسبه شده و با احتساب 10% ضریب اطمینان معادل 1300.82 But/hr بدست می آید. همچنین تلفات حرارتی ناشی از نفوذ هوا با توجه به رابطه (۷) و با احتساب 10% ضریب اطمینان معادل 33814 But/hr بدست می آید. بنابراین کل بار حرارتی ساختمان در حالت معمولی برابر 163822.2 But/hr بدست می آید [۷].

برای کاهش تلفات حرارتی دیوارهای خارجی، عایق پشم شیشه با روکش گرافیت با ضریب هدایت حرارتی 0.04 W/mk و برای کاهش تلفات حرارتی سقف، عایق پشم شیشه با روکش آلومینیوم با ضریب هدایت حرارتی 0.033 W/mk در نظر گرفته شده است. از آنجا که کف ساختمان بتن ریزی شده و روی سطح زمین قرار گرفته است، نیازی به عایق کاری ندارد. اگر کف ساختمان روی یک فضای گرم نشده واقع شده باشد (کف های معلق)، عایق کاری کف نیز الزامی خواهد بود.

سوخت مورد استفاده برای گرمایش ساختمان نمونه، گاز طبیعی با ارزش حرارتی 9407 kcal/m^3 یا 0.039 GJ/m^3 در 1500 m^3 نظر گرفته شده است. سیستم گرمایشی نیز بخاری گاز سوز با راندمان حرارتی حدود ۷۵٪ می باشد. از آنجا که مقدار سوخت مصرفی در ماه بیش از می باشد، هزینه هر متر مکعب سوخت تقریباً ۱۵۰ ریال می باشد. همچنین دروه ارزیابی برابر عمر مفید عایق و معادل ۱۲ سال و کارکرد سیستم گرمایشی ۱۳۰ شبانه روز در سال در نظر گرفته می شود.

با توجه به مقادیر فوق الذکر و روابط (۸-الف) تا (۸-ج) ضریب هزینه بصورت زیر محاسبه می شود:

$$GJC = \frac{FC}{HV} = \frac{150(R/m^3)}{0.039(GJ/m^3)} = 3846.2(R/GJ)$$

$$UGJC = \frac{GJC}{E} = \frac{3846.2}{0.75} = 5128.2(R/GJ)$$

$$CC = \frac{UGJC}{10^9} = \frac{5128.2 \times (12 \times 130 \times 24 \times 3600)}{10^9} = 691.2(R/w)$$

این ضریب هزینه برای کلیه اجزاء ساختمان ائم از دیوارها و سقف صادق است. هزینه شار تلفات حرارتی برای دیوارهای خارجی و سقف با توجه به مقادیر ضریب انتقال حرارت و اختلاف دمای طرح داخل و خارج، از رابطه (۸-د) محاسبه می گردد.

تاثیر بکارگیری ضخامت مختلف عایق در دیوارهای خارجی و سقف بر مقادیر ضریب انتقال حرارت کلی، هزینه تلفات حرارتی، هزینه عایق و هزینه کل در جداول (۲) و (۳) خلاصه شده است. با توجه به مقادیر هزینه کل در این جداول، مشاهده می شود که ضخامت عایق بهینه برای دیواره های خارجی ۸۰mm و برای سقف ۱۰۰mm می باشد. برای کاهش تلفات حرارتی از پنجره های خارجی، این پنجره ها با شیشه دبل با فاصله هوایی ۱۰mm در نظر گرفته شده اند. لذا ضریب انتقال حرارت پنجره ها نسبت به پنجره تک شیشه ای بیش از نصف کاهش می یابد و برابر بدست می یابد.

با توجه به مقادیر جدی ضریب انتقال حرارت کلی، تلفات حرارتی از جداره های ساختمان می گردد. مقدار تلفات حرارتی کل با احتساب ۱۰٪ ضریب اطمینان معادل بدست می آید. با مقایسه تلفات حرارتی ساختمان در حالت معمولی، که در قسمت قبل محاسبه شد، و مقدار تلفات حرارتی پس از بکارگیری عایق، درصد کاهش تلفات حرارتی بصورت زیر محاسبه می شود:

$$\frac{163822.2 - 68242}{163822.2} \times 100 = 58.2\%$$

ضخامت عایق (mm)	U (Wm ² k)	هزینه تلفات حرارتی (R/m ²)	هزینه عایق (R/m ²)	هزینه کل (R/m ²)
0	1.77	59947.2	0	59947.7
60	0.48	16257.0	17500	33757.0
80	0.39	13208.8	20500	33708.8
100	0.32	10838.0	24000	34838.0
150	0.23	7789.8	31000	38789.0

جدول ۲ - تاثیر بکارگیری عایق در دیوارهای خارجی

ضخامت عایق (mm)	U (Wm ² k)	هزینه تلفات حرارتی (R/m ²)	هزینه عایق (R/m ²)	هزینه کل (R/m ²)
0	1.91	64689.4	0	64689.4
50	0.49	16595.7	19000	35595.7
75	0.36	12192.7	23000	35192.7
100	0.28	9483.2	25500	34983.2
150	0.19	6435.0	33000	39435.0

جدول ۳ - تاثیر بکارگیری عایق در سقف

بنابراین در نتیجه بکارگیری عایق ، تلفات حرارتی کل ساختمان به اندازه 58.2% کاهش می یابد . به همین میزان مقدار سوخت مصرفی و به تبع آن هزینه پرداختی برای سوخت کاهش می یابد . بنابر این با استفاده از عایق های بهینه در جداره های خارجی ساختمان می توان حدود 60% در مصرف سوخ صرفه جویی نمود .

لازم به ذکر است که تلفات حرارتی کل شامل دو قسمت ، تلفات از جداره ها و ناشی از نفوذ هوا ، می باشد ، استفاده از عایق بر تلفات ناشی از نفوذ هوا تاثیری ندارد . بنابراین درصد کاهش تلفات حرارتی از هر متر مربع دیوارهای خارجی و سقف بیشتر از درصد کاهش تلفات حرارتی کل ساختمان می باشد . درصد کاهش تلفات حرارتی جداره ها با توجه به مقادیر ضریب انتقال حرارت قبل از عایق کاری U_o و بعد از عایق کاری U_N ، بصورت زیر محاسبه می شود :

$$\text{درصد کاهش تلفات حرارتی جداره} = \frac{U_o - U_N}{U_o} \times 100$$

بنابراین :

$$= \frac{1.77 - 0.39}{1.77} \times 100 = 78\%$$

$$\text{درصد کاهش تلفات حرارتی سقف} = \frac{1.91 - 0.28}{1.91} \times 100 = 85\%$$

از آنجا که عایق کاری به سرمایه اولیه اضافی نیاز دارد ، از لحاظ اقتصادی دوره بازگشت این سرمایه نیز مهم می باشد .

دوره بازگشت سرمایه با توجه به هزینه عایق و صرفه جوئی سالانه بصورت زیر محاسبه می گردد :

دوره ارزیابی / (هزینه تلفات حرارتی بعد از عایق کاری - هزینه تلفات حرارتی قبل از عایق کاری) = صرفه جوئی سالانه

صرفه جوئی سالانه / هزینه عایق = دوره بازگشت سرمایه

با توجه به مقادیر موجود در جداول (۱) و (۲) ، برای دیوارهای خارجی دوره بازگشت سرمایه چنین محاسبه می شود :

$$\text{صرفه جوئی سالانه} = \frac{59947.2 - 13208.8}{12} = 3894.8 (R/m^2)$$

$$\text{دوره بازگشت سرمایه} = \frac{20500}{3894.8} = 5.26 (year)$$

با توجه به مقادیر موجود در جداول (۱) و (۳) ، برای سقف دوره بازگشت سرمایه چنین محاسبه می شود :

$$= \frac{64689.4 - 9483.2}{12} = 4600.5 (R/m^2)$$

$$\text{دوره بازگشت سرمایه} = \frac{25500}{4600.5} = 5.5 (year)$$

مشاهده می شود که دوره بازگشت سرمایه کمتر از نصف عمد مفید عایق می باشد . بنابراین بر صرفه جوئی انرژی از لحاظ اقتصادی نیز استفاده از عایق مقرون به صرفه است .

همانطور که قبلاً اشاره شد هوای ساکن عایق بسیار خوبی می باشد . بنابراین می توان با تعبیه فاصله هوایی در جداره های خارجی ساختمان , بدون سرمایه اولیه لازم برای عایق کاری که در قسمت قبل گفته شده , تلفات حرارتی را کاهش داد . البته ساخت جداره هایی با فاصله هوایی نیز محدودیت هایی را شامل می شود و این فاصله نباید از 11cm تجاوز کند . در دیوارهای دو جداره , جدار داخلی برابر بوده و جدار خارجی فقط به عنوان محافظ عمل می کند [۸] .

برای مقایسه نتایج با قسمت قبل , ضخامت فاصله هوایی به اندازه ضخامت عایق بکار رفته در جداره ها و پنجره ها نیز دوبرابر در نظر گرفته می شود . تاثیر تعبیه فاصله هوایی 80mm برای دیوارهای خارجی و 100mm برای سقف در جدول (۴) آورده شده است .

جداره	U_o $\left(\frac{w}{m^2k}\right)$	U_N $\left(\frac{w}{m^2k}\right)$	$\frac{U_o - U_N}{U_o} \times 100$ (%)
دیواره خارجی	1.77	1.26	29
	1.91	1.23	36

جدول ۴ - تاثیر تعبیه فاصله هوایی در دیوارهای خارجی و سقف

با توجه به مقادیر جدید ضریب انتقال حرارت کلی , تلفات حرارتی از جداره های ساختمان محاسبه می گردد . مقدار تلفات حرارتی کل با احتساب ۱۰٪ ضریب اطمینان معادل ۱۸۸۰۶,۹ Btu/hr می شود . با مقایسه تلفات حرارتی ساختمان در حالت معمولی , و مقدار تلفات حرارتی پس از تعبیه فاصله هوایی , درصد کاهش تلفات حرارتی بصورت زیر محاسبه می شود :

$$\frac{163822.2 - 118806.9}{163822.2} \times 100 = 27.5\%$$

بنابراین در نتیجه تعبیه فاصله هوایی، تلفات حرارتی کل ساختمان به اندازه 27.5% کاهش می یابد و به همین میزان مقدار سوخت مصرفی و به تبع آن هزینه پرداختی برای سوخت کاهش می یابد. با توجه به اینکه هزینه ساخت دیواره های دو جداره با همان ضخامت دیواره های معمولی تقریباً برابر می باشد، مشاهده می شود که تعبیه فاصله هوایی عایق نسبتاً خوبی می باشد.

درصد کاهش تلفات حرارتی از جداره ها، سقف و کل ساختمان با استفاده از عایق پشم شیشه با ضخامت بهینه و با استفاده از فاصله هوایی در جدول زیر خلاصه شده است.

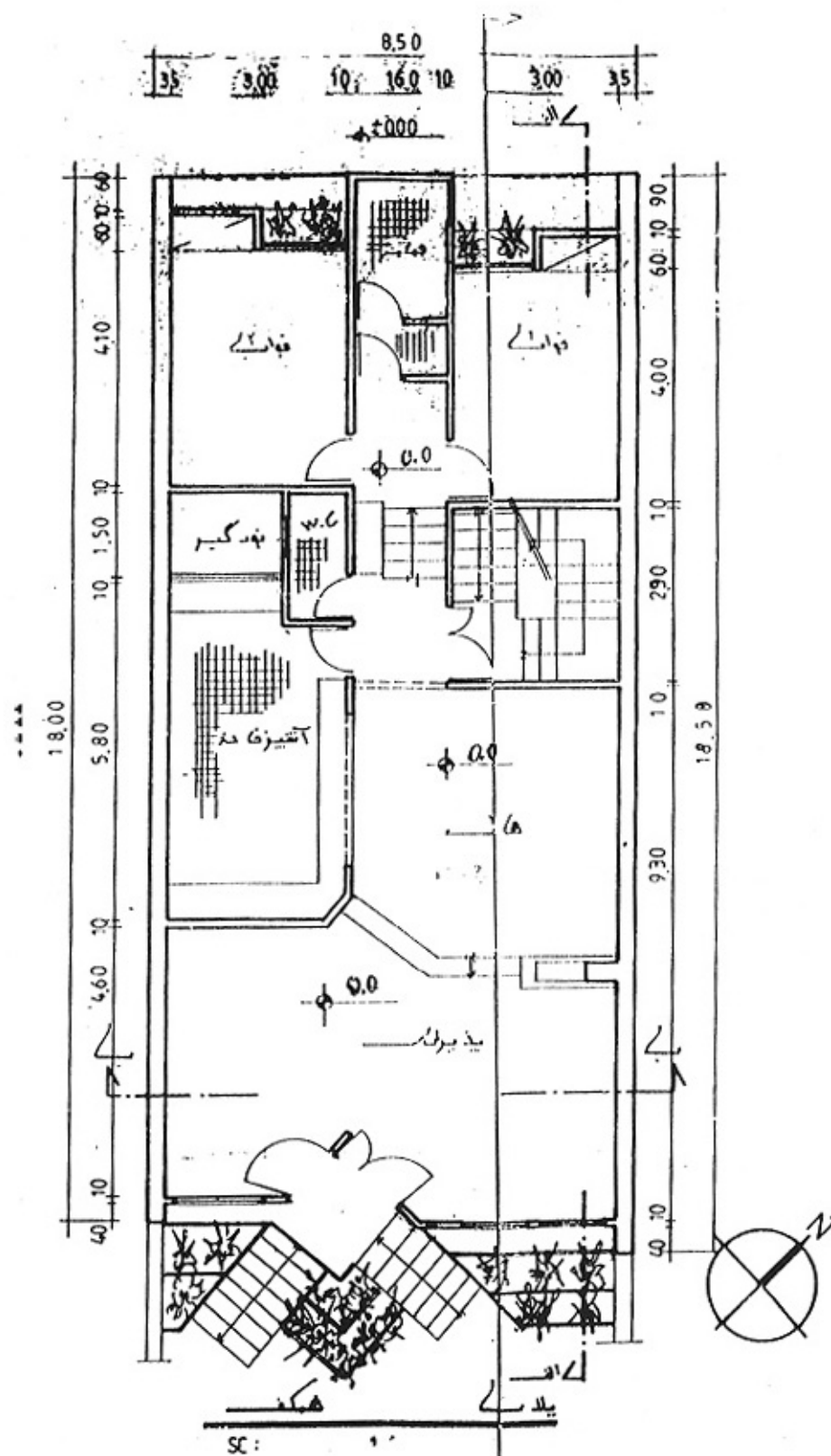
	دیواره های خارجی	سقف	کل
پشم شیشه	78%	85%	58%
فاصله هوایی	29%	36%	28%

جدول ۵ - درصد کاهش تلفات حرارتی

همانطور که مشاهده می شود استفاده از عایق ها نقش بسیار موثری در درصد کاهش تلفات حرارتی و در نتیجه کاهش مصرف انرژی خواهد داشت. همچنین استفاده از فاصله هوایی بجای عایق، می تواند تا حدود ۳۰٪ از تلفات حرارتی ساختمان بکاهد و گرچه کارایی عایق پشم شیشه را نخواهد داشت، ولی بدلیل عدم صرف هزینه اضافی، از لحاظ اقتصادی مقرون بصره خواهد بود.

۱. سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور، "مقدمه مجموعه مقالات اولیه اولین همایش بهینه سازی مصرف سوخت در بخش ساختمان"، تهران، ۱۳۸۰.
۲. دکتر م. صالحی، "انرژی در ساختمان"، ویرایش اول، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۲.
۳. مهندس م. طباطبائی، "محاسبات تاسیسات ساختمان"، ویرایش هفتم، چاپخانه کارون تهران، ۱۳۸۰.
۴. براند. ر. "جزئیات معماری برای ساختمان های عایق بندی شده"، ویرایش دوم، ترجمه دکتر حسین مظفری، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۲.

۵. مهندسین مشاور شهر اصفهان , “ ضخامت اقتصادی عایق ها برای ساختمان های موجود ” , ویرایش اول , دانشگاه صنعتی اصفهان , ۱۳۷۴ .
۶. م . مهرابیان , “ طراحی سیستم های تهویه مطبوع و حرارت مرکزی ” , انتشارات نوین , ۱۳۶۳ .
۷. ع . مقصودی , “ بکارگیری عایق حرارتی در ساختمان ” , پایان نامه کارشناسی , دانشکده مهندسی دانشگاه کاشان , ۱۳۸۰ .
۸. دکتر ح . اسلامی , “ راهنمای عایقکاری ساختمان ” , ویرایش اول , مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن تهران , ۱۳۷۱ .



شکل ۱- پلان ساختمان نمونه