

## روشی نوین در بهینه‌سازی پنجره‌های تک‌جداره

سید مهدی میر هاشمی\*<sup>۱</sup>، سیده محمد هادی شاپوریان<sup>۲</sup>، دکتر زهره اقبابکلو<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد رشته انرژی و معماری، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد رشته انرژی و معماری، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۲/۲۵، تاریخ پذیرش نهایی: ۸۹/۶/۳)

### چکیده:

از کل انرژی مصرفی کشور، حدود ۴۰٪ آن صرف سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها می‌شود که یک سوم اتلاف حرارتی از طریق پنجره‌ها صورت می‌پذیرد. از آنجایی که بسیاری از ساختمان‌های موجود مطابق با استانداردهای مصرف انرژی ساخته نشده و به ناچار برای ایجاد شرایط آسایش حرارتی مجبور به مصرف انرژی بیش از حد هستند، بنابراین موجب به هدر دادن ذخایر انرژی شده و با واقعی شدن تعرفه حامل‌های انرژی، بالا رفتن هزینه‌ها را نیز سبب می‌شوند. پنجره‌ها عناصری از بنا هستند که نور، حرارت و زیبایی مناظر را به درون دعوت می‌کنند. پنجره‌ها همچنین بزرگترین عناصر اتلاف حرارت نیز به‌شمار می‌روند. در ساختمان‌های موجود، راه‌های پیش‌گیری، تعویض و یا بهبود کارایی پنجره‌ها است. عدم وجود راهکار مناسب جهت بهینه‌سازی بازشوها و جدارهای نورگذر ساختمان‌های موجود یکی از نقاط ضعف فرایند بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان به‌شمار می‌رود. مقاله حاضر تلاشی برای ارائه راهکاری ساده و اجرایی برای بهینه‌سازی درها و پنجره‌های موجود در ساختمان با حداقل هزینه است. این روش شامل افزودن شیشه دوم به همراه پروفیل‌های پوشاننده می‌باشد. فرایند اجرای آن نیازمند تجهیزات پیچیده و آموزش متخصصان نبوده، همچنین موجب اتلاف مصالح اولیه پنجره نمی‌شود. این روش در نهایت باعث کاهش اتلاف انرژی و افزایش کیفیت آسایش فضای داخلی می‌شود. نتایج مدل‌سازی رایانه‌ای میزان کاهش ضریب انتقال حرارت (سطحی) حاصل از این روش را ۳۷٪ نشان می‌دهد.

### واژه‌های کلیدی:

بهینه‌سازی مصرف انرژی، بهینه‌سازی پنجره، کاهش اتلاف انرژی، اصلاح پنجره‌های تک‌جداره.

## مقدمه

حرارتی، پوسته خارجی و یا بام را از نظر انتقال حرارت اصلاح نمود، اما در مورد درها و پنجره‌های شیشه‌ای نمی‌توان از این روش استفاده نمود. برای اصلاح این عناصر باید اقدام به نصب جدار دیگری با فاصله مناسب از جدار قبلی نمود و یا تمامی ساختار را به نحوی جایگزین کرد تا نه فقط انتقال حرارت از آن کاهش بیابد بلکه جلوی نشت و نفوذ هوا نیز گرفته شود.

در حالی که بیشترین میزان انتقال حرارت از پنجره‌ها صورت می‌گیرد، مشکلات بهینه سازی آن (از قبیل نصب دو پنجره و یا تعویض پنجره‌ها با پنجره‌های دارای شیشه‌های دو جداره) متعدد هستند. با توجه به بالا بودن هزینه اجرای این روش‌ها، صرفاً دو پنجره‌ای کردن جدارهای شفاف شمالی در طبقه همکف و اول و جدارهای جنوبی در طبقه اول مورد بررسی قرار می‌گیرد. طبق نتایج بدست آمده در روش‌های متداول، میزان لازم برای این اقدام بیش از ۸۰۰۰ ریال بر متر مربع مفید، و زمان بازگشت سرمایه ۷ سال و میزان صرفه جویی در انتقال حرارت از جدارهای پوسته خارجی ۹ درصد می‌باشد.

مطابق برآوردهای انجام شده، کل انرژی مصرفی کشور در سال ۱۳۷۱ بیش از ۱۲ میلیارد دلار بوده است. در سال ۱۳۸۱ این مقدار بالغ بر ۲۰ میلیارد دلار شده و پیش‌بینی می‌شود چنانچه روند مصرف انرژی به همین گونه ادامه یابد، در سال ۱۳۹۶ میزان مصرف انرژی در کشور با میزان تولید آن برابر شده و دیگر توانی برای صادرات انرژی وجود نخواهد داشت (URL 1). این شرایط در تمام بخش‌ها از جمله بخش ساختمان صادق است. اکثر قریب به اتفاق ساختمان‌های کشور فاقد ضوابط فنی شناخته شده برای جلوگیری از هدر رفتن انرژی سرمایه‌ی گرمایی هستند. و با وجود اینکه شدت مصرف انرژی به ازای هر مترمربع در کشور ۲ تا ۳ برابر استانداردهای جهانی است، شرایط آسایش حرارتی در داخل ساختمان‌ها محقق نشده است (URL 1).

در حال حاضر بهینه سازی ساختمان‌های موجود به عنوان راهکاری ضروری مورد توجه قرار گرفته است. بهینه سازی شامل روش‌هایی متفاوت برای هر بخش از جدار خارجی ساختمان است به این معنی که می‌توان با استفاده از عایق‌کاری

## عملکرد حرارتی پنجره و نقش اجزای اصلی

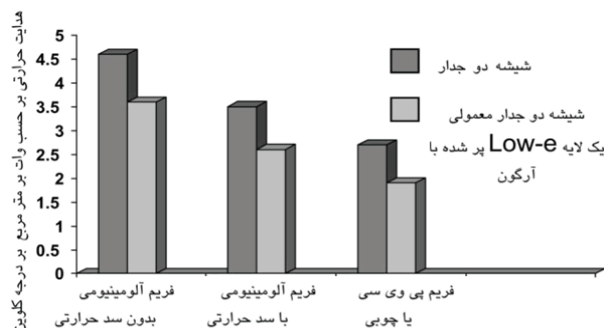
یکی دیگر از راه‌های اتلاف حرارت، خروج هوای گرم و نفوذ هوای سرد به داخل است این اتفاق زمانی روی می‌دهد که هوای گرم به بالا صعود کرده و در نتیجه هوای سرد از راه درزها وارد ساختمان می‌شود. وجود نورگیرها، سقف‌های بلند و باز بودن دودکش شومینه‌ها (افزایش فشار) و سرعت باد در کنار درزبندی ضعیف پنجره‌ها باعث خروج هوای داخل ساختمان و جایگزینی هوای بیرون می‌شود.

ضریب انتقال حرارت شیشه‌های دو جداره نصف شیشه‌های یک جداره می‌باشد و افزودن لایه‌های بعدی به پنجره تاثیر کمتری (در حدود ۱۲ درصد) نسبت به لایه دوم خواهد داشت. نور قابل رویت از طول موج‌هایی تشکیل شده است که توسط چشم انسان قابل ردیابی است. این نور تقریباً شامل ۴۷ درصد انرژی نور خورشید است. میزان عبور قابل رویت با افزایش تعداد لایه‌های شیشه کاهش قابل توجهی نداشته و از این بابت عملکرد پنجره کاملاً قابل قبول است (دقیق، ۱۳۸۲، ۹۵۵).

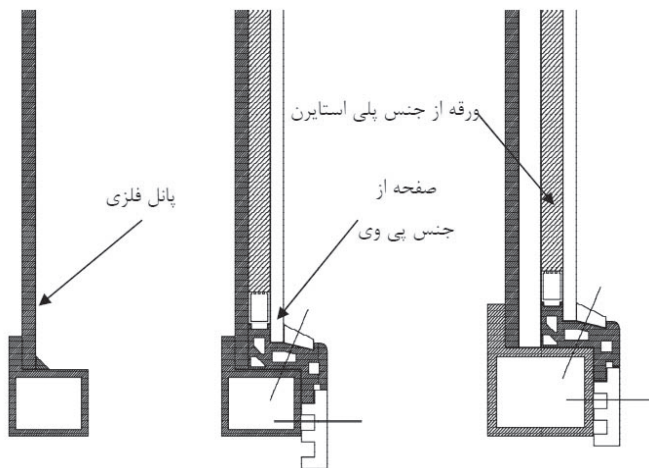
طبق بررسی‌های به عمل آمده از در و پنجره‌های متداول که بیشترین فراوانی را در ساختمان‌سازی ایران دارند (نمودار ۲)، کوچکترین ابعاد پروفیل‌ها برای نصب شیشه و نگاهداری آن ۲/۵ سانتی متر است که می‌توان برای طراحی عناصر لازم برای بهینه‌سازی پنجره استفاده نمود.

در خانه‌های قدیمی حدود ۳۰ درصد و در خانه‌های جدید ۱۵ تا ۲۰ درصد کل اتلاف حرارت از راه پنجره‌ها صورت می‌گیرد. مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر انتقال حرارت از طریق پنجره‌ها عبارتند از: ساختمان چارچوب و قاب پنجره، ابعاد پنجره، درزبندی پنجره و شیشه مناسب (از قندی، ۱۳۸۲، ۴۷۵).

مطابق با نمودار ۱، جنس و ساختمان چارچوب مورد استفاده در ساخت پنجره بر روی هدایت حرارتی کل پنجره اثرات زیادی دارد.



نمودار ۱- تأثیر جنس قاب پنجره بر میزان اتلاف حرارت. ماخذ: (صنایع شیشه آذربایجان، ۱۳۸۲، ۸۹۲)

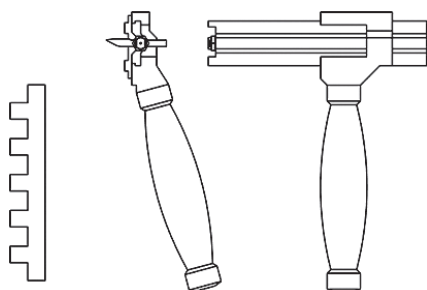


نمودار ۵- صفحات پوشیده شده با ورق فلزی (با اندازه متفاوت).

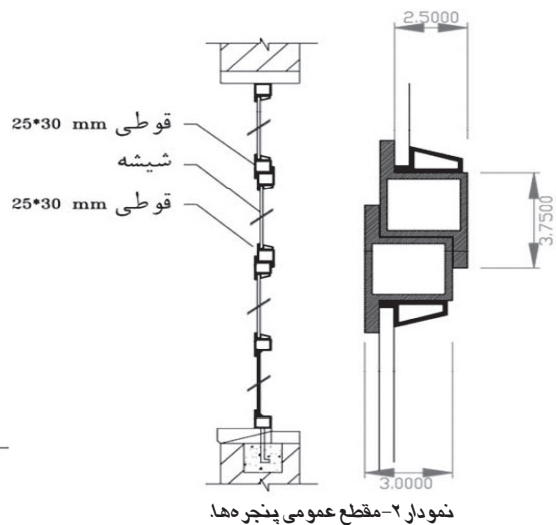
حفظ شیشه اولیه، یک لایه جدید به آن افزوده خواهد شد. این لایه با فاصله یک سانتیمتر (یا بیشتر) از شیشه قبلی قرار گرفته و فضای آن مطابق با نمودار ۴ با هوا پر می‌شود. گرچه پر شدن این لایه توسط گازهای بی اثر با وزن ملکولی بالاتر انتقال حرارت را کاهش می‌دهد، اما این میزان بسیار اندک و قابل چشم پوشی است (جدول ۱). مشکل میعان فضای میانی شیشه‌ها نیز با قرار دادن نواری مجوف که با مواد رطوبت گیر پر شده است، از میان می‌رود. همان‌گونه که در نمودار ۵ ملاحظه می‌شود، در مورد تنک‌های غیر شیشه‌ای از یک ورق پلاستیکی به همراه پرکننده پلی استایرن استفاده شده است. جزئیات این قسمت کاملاً شبیه به بخش‌های شیشه خور است. ابعاد اصلی طرح به نحوی است که کوچکترین پروفیل استفاده شده در پنجره‌ها را پوشش خواهد داد و برای پنجره‌هایی با پروفیل‌های بزرگتر، از مقطعی دندان‌دار برای پوشش سطح باقیمانده استفاده می‌شود. پروفیل‌های دندان‌دار امکان استفاده از این طرح در پنجره‌هایی با ابعاد مختلف را به وجود می‌آورد (نمودارهای ۴ و ۵).

از مزایای این طرح قابلیت پوشاندن چارچوب پنجره برای کاهش انتقال حرارت و نیز امکان نصب شیشه دوم، به طور همزمان است.

برای سهولت استفاده از پروفیل‌های پلاستیکی در پنجره‌های مختلف و با ابعاد متفاوت، همان‌گونه که در نمودار ۶ ملاحظه می‌شود، ابزاری برای برش طولی نوارهای پوشاننده طراحی شده است که این ابزار این امکان را فراهم می‌کند تا پروفیل‌های پلاستیکی با دقت کافی و اندازه دقیق بریده شوند.



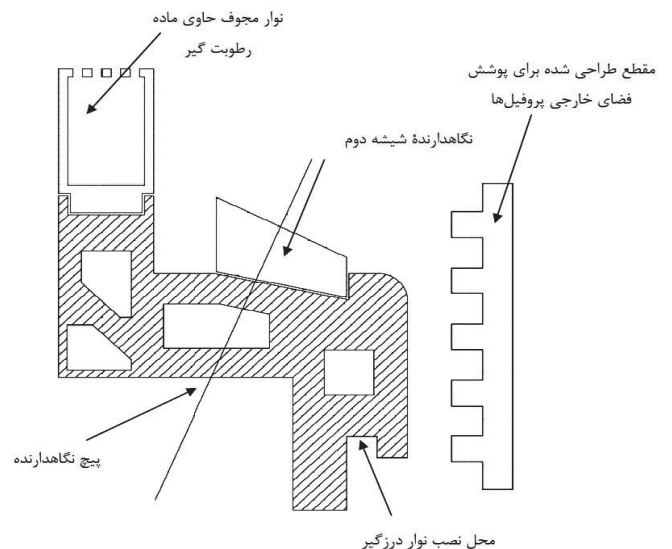
نمودار ۶- ابزار طراحی شده برای برش طولی نوارهای پوشاننده.



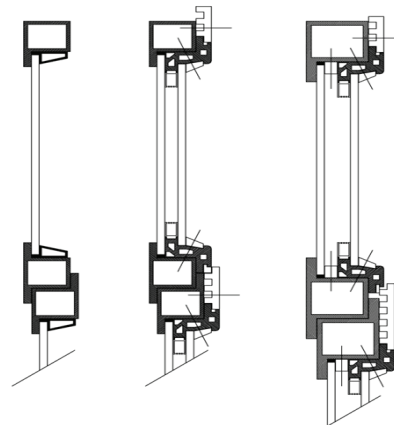
نمودار ۲- مقطع عمومی پنجره‌ها.

### جزئیات اجرایی پیشنهادی برای بهینه‌سازی پنجره‌ها

پروفیل پیشنهادی مطابق با نمودار ۳، به نحوی طراحی شده تا بتواند تمام سطح چارچوب پنجره را بپوشاند و مانع از تماس هوای گرم داخل با سطح پروفیل‌های پنجره شود. این طرح دارای جزئیاتی برای قرار گرفتن نوار درز بند است تا مانع از نشت هوا شود. حذف شیشه اولیه و نصب شیشه دو جداره جدید، هزینه‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد لذا در طرح پیشنهادی ضمن

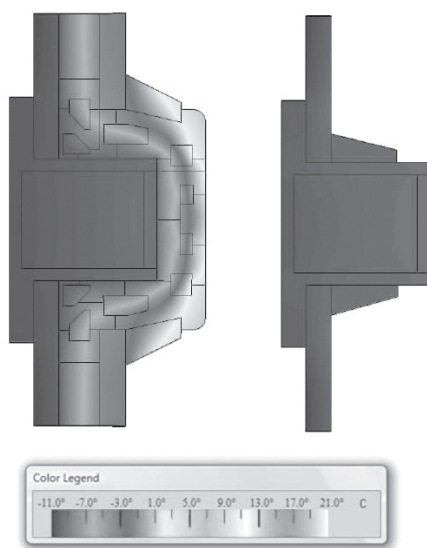


نمودار ۳- جزئیات اجرایی اتصالات.



نمودار ۴- شیشه خور ثابت و شیشه خور متحرک (با اندازه متفاوت).

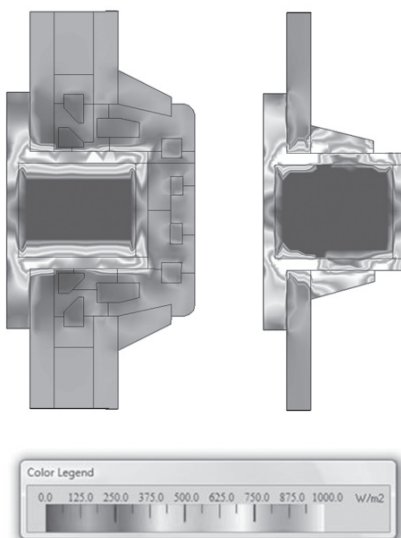
## مدل سازی رایانه ای



نمودار ۸- طیف نگاری مادون قرمز.

### نمودار شدت جریان

در این نمودار توان حرارتی منتقل شده از هر نقطه از مقطع پروفیل نمایش داده شده است. بر اساس داده‌های گرفته شده از این محاسبات، حداکثر توان در پروفیل‌ها قبل از بهینه سازی بالغ بر  $3451 \text{ W/m}^2$  است. این درحالی است که حداکثر توان منتقل شده در پروفیل بعد از بهینه سازی به  $1730 \text{ W/m}^2$  رسیده است که در حدود نیمی از توان اولیه است. پانل‌های فلزی نیز به همین ترتیب قبل از بهینه سازی توانی بالغ بر  $3530 \text{ W/m}^2$  داشته‌اند که به  $1520 \text{ W/m}^2$  کاهش یافته است (نمودار ۹).



نمودار ۹- شدت جریان.

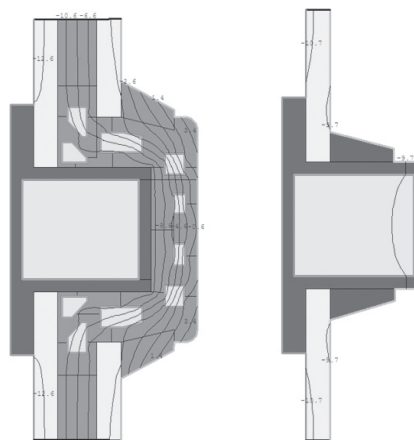
### شیشه دو جداره

برای محاسبه نتایج بهینه سازی شیشه‌ها از جدول ۱ استفاده شده است. ضریب انتقال حرارت شیشه‌ها به عنوان عامل نهایی در محاسبات از این جدول استخراج شده است. به ازای هر متر مربع از سطح شیشه خور، ضریب انتقال حرارت از  $5/9 \text{ W/m}^2\text{K}$  به  $3 \text{ W/m}^2\text{K}$

اجزای مختلف طرح پیشنهادی با استفاده از نرم افزار THERM 5.2 (LBNL, 2003) شبیه سازی شده است تا عملکرد حرارتی این اجزا و میزان کاهش انتقال حرارت در آنها مشخص شود. در این بخش شیشه‌ها به‌طور جداگانه و بر اساس جداول موجود ارزیابی شده‌اند و نیازی به مدل سازی برای آنها نبوده است. سپس قسمت‌های اصلی پروفیل تا آخرین نقطه‌ای که شیشه‌ها توسط نوار جاذب رطوبت از هم جدا می‌شوند مدل سازی شده است. در نهایت پانل‌های پوشیده شده با صفحات فلزی مدل سازی شده که نتایج آن ذکر گردیده است. در این محاسبات شرایط خارجی با دمای  $-18$  درجه و دمای داخلی  $21$  درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده که نتیجه آن اختلاف دمایی معادل  $39$  درجه است.

### نمودار هم دمایی<sup>۱</sup>

در این نمودار می‌توان دمای نقاط مختلف پروفیل‌ها را مشاهده نمود. دمای سطوح داخلی و خارجی پروفیل قبل از بهینه سازی تقریباً برابر  $10$  - درجه سانتیگراد می‌باشد که بیانگر این مطلب است که قسمت عمده افت دما در خارج پروفیل و در هوای مجاور آن اتفاق می‌افتد که نتیجه آن اتلاف حرارت است. ضمناً تا فاصله معنای داری از این پنجره، دمای محیط از محدوده آسایش خارج خواهد بود. همان‌گونه که در نمودار ۷ ملاحظه می‌شود، بعد از نصب قطعات بهینه سازی شده، دمای سطح داخلی پروفیل‌ها با  $13$  درجه افزایش به  $3$  درجه سانتیگراد می‌رسد. این تغییر به معنای تعدیل دمای خارج به مقدار  $20$  درجه می‌باشد. در پانل فلزی، دمای سطح خارجی و داخلی با هم برابر و معادل  $10$  - درجه سانتیگراد است و پس از بهینه سازی با  $10$  درجه افزایش به صفر درجه سانتیگراد افزایش پیدا می‌کند که به معنای تعدیل دمای خارج به میزان  $18$  درجه می‌باشد. پایین بودن دمای این پانل‌ها به دلیل اختلاف دمای زیاد اعمال شده در دو سطح پروفیل‌ها است (افزایش اختلاف دما دقت محاسبات را افزایش می‌دهد). این تغییرات در نموداری که دمای پروفیل را با طیف نگاری مادون قرمز در نمودار ۸ نشان می‌دهد قابل رؤیت است.



نمودار ۷- نمودار هم دمایی.

جدول ۱- مقادیر ضرایب انتقال حرارت در ترکیب‌های مختلف سیستم‌های شیشه‌ای.

نوع شیشه یا مصالح	ضخامت لایه‌های شیشه‌ای (میلیمتر)	ضخامت لایه‌های هوا (میلیمتر)	نوع لایه هوا	ضریب انتقال حرارت $U$ [ $W/m^2k$ ]
تک جداره	۴	-	-	۵/۹
تک جداره	۶	-	-	۵/۸
تک جداره	۵۰	-	-	۴/۷
دو جداره	۶ و ۴	۱۲	هوای خشک	۳/۰
دو جداره	۶ و ۴	۱۲	گاز بی‌اثر	۲/۹
دو جداره کم تاب	۶ و ۴	۱۲	گاز بی‌اثر	۱/۳
دو جداره کم تاب	۶ و ۴	۱۶	گاز بی‌اثر	۱/۱
دو جداره کم تاب	۶ و ۴	۱۲	گاز کریپتون	۱/۰۰

ماخذ: (دانش، ۱۳۸۲، ۹۳)

کاهش یافته است که نمایانگر کاهش ۵۰ درصدی در ضریب انتقال حرارت است. همانگونه که در جدول شماره ۱ دیده می‌شود، پر کردن لایه میانی شیشه‌ها با گازهای بی‌اثر و با وزن ملکولی بالا صرفاً یک دهم درصد ضریب انتقال حرارت را کاهش داده است. تعیین ضریب انتقال حرارت پروفیل‌های بهینه سازی شده استفاده می‌شود. اطلاعات استخراج شده از مدل سازی بیانگر این مطلب است که ضریب انتقال حرارتی پروفیل‌های اصلی قبل از بهینه سازی  $6/2 W/m^2k$  بوده است که به  $4/3 W/m^2k$  کاهش یافته است. این تغییر به معنای کاهش بیش از ۳۰ درصد اتلاف حرارت می‌باشد. در پانل‌های فلزی نیز ضریب انتقال حرارت از  $4/5 W/m^2k$  به  $3/9 W/m^2k$  کاهش یافته است که نشان دهنده کاهش ۱۵ درصدی در اتلاف حرارت است.

کاهش یافته است که نمایانگر کاهش ۵۰ درصدی در ضریب انتقال حرارت است. همانگونه که در جدول شماره ۱ دیده می‌شود، پر کردن لایه میانی شیشه‌ها با گازهای بی‌اثر و با وزن ملکولی بالا صرفاً یک دهم درصد ضریب انتقال حرارت را کاهش داده است.

### نتایج محاسبات ضریب انتقال حرارت

در بخش قبلی ضریب انتقال حرارت بهبود یافته در شیشه‌ها معین گردید. در این قسمت از خروجی نرم افزار THERM برای

## نتیجه

در صورتی که ضریب انتقال حرارتی هر یک از این بخش‌ها بر اساس میزان تصاحب سطح پنجره در نظر گرفته شود، ضریب انتقال حرارتی کل پنجره قبل از بهینه سازی  $5/71 W/m^2k$  خواهد بود که به  $3/57 W/m^2k$  کاهش خواهد یافت. این تغییر به معنای کاهش ۳۷ درصدی ضریب انتقال حرارتی پنجره خواهد بود.

در طرح پیشنهادی، پنجره‌ها و درها در سه بخش بهینه‌سازی می‌شوند که عبارتند از: شیشه‌ها و قسمت‌های نورگذر، پروفیل‌های اصلی و قاب پنجره‌ها و در نهایت پانل‌های فلزی که در واقع دهانه‌هایی از پنجره یا در هستند که با ورق فلزی مسدود شده‌اند. محاسبات برای هر یک از قسمت‌های مذکور تغییراتی را به شرح زیر که در جدول ۲ ارائه شده است، نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقادیر ضرایب انتقال حرارتی قبل و بعد از بهینه سازی - [ $W/m^2k$ ].

عنوان اجزاء	ضریب انتقال حرارتی قبل از بهینه سازی	ضریب انتقال حرارتی بعد از بهینه سازی	درصد کاهش انتقال حرارت	در صد تصاحب سطح پنجره	تاثیر نهایی در صرفه جویی
شیشه‌ها	۵.۹	۳	۴۹٪	۵۰٪	۲۴٪
پروفیل‌های اصلی و قاب	۶.۲	۴.۳	۳۱٪	۳۰٪	۱۰٪
پانل‌های فلزی	۴.۵	۲.۹	۱۵٪	۲۰٪	۳٪
(مجموع) در صد نهایی صرفه جویی					۳۷٪

**پی نوشت:**

## 1. Isotherm

**فهرست منابع:**

- ازقندی روشنوند، علی (۱۳۸۲)، ساختمان-انرژی-بهینه سازی، مجموعه مقالات همایش بهینه سازی سوخت در ساختمان، سومین همایش، صص ۴۸۹-۴۷۵.
- دانش، ماندانا (۱۳۸۲)، پنجره های حرارتی برای استفاده بهینه از انرژی خورشیدی، سازمان انرژی اتمی، مجموعه مقالات همایش بهینه سازی سوخت در ساختمان، سومین همایش، صص ۱۰۳-۹۳.
- دقیق، روناک، مشتاق (۱۳۸۲)، انتخاب بهینه سیستم های شیشه و پنجره به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی، مجموعه مقالات همایش بهینه سازی سوخت در ساختمان، سومین همایش، صص ۹۵۵-۹۴۳.
- شرکت صنایع شیشه آذربایجان (۱۳۸۲)، شیشه دو جداره و نقش آن در عایق کاری و صرفه جویی انرژی در ساختمان، مدیریت تقاضا در بخش مسکونی، مجموعه مقالات همایش بهینه سازی سوخت در ساختمان، سومین همایش، صص ۹۱۱-۸۹۲.

LBNL, THERM Finite Element simulator, Lawrence Berkeley National Laboratory, A US Department of Energy  
Office of Science national lab, (1994-2003)  
URL 1, [http://mabnaco.net/Building\\_01.aspx](http://mabnaco.net/Building_01.aspx)