مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1394، دوره 15، شماره 8، ص‌ص 402-410

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# اندازه‌گیری خواص تشعشعی شیشه‌های پوشش‌دار و بررسی تأثیر آن‌ها بر تلفات انرژی

مهدیه آب‌روش[1]، بهروز محمدکاری[2*]، شاهین حیدری[3]

1- دانشجوی دکترا، مهندسی معماری، دانشگاه تهران، تهران
2- استادیار، فیزیک ساختمان، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران
3- استاد، مهندسی معماری، دانشگاه تهران، تهران
*تهران، صندوق پستی 13145-1696، kari@bhrc.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 04 خرداد 1394
پذیرش: 03 تیر 1394
ارائه در سایت: 22 تیر 1394

*کلید واژگان:*
شیشه پوشش‌دار
منعکس‌کننده
عملکرد حرارتی
مصرف انرژی

**چکیده**

با توجه به سهم بسزای شیشه‌ها در اتلاف انرژی، بررسی عملکرد حرارتی انواع شیشه‌های چندجدارهٔ پوشش‌دار، با در نظر گرفتن شرایط حاکم در مناطق حادّ اقلیمی و تولیدات موجود در کشور و محصولات خارجی در دسترس، ضروری است. در این مقاله، خواص تشعشعی شیشه‌های ساده و پوشش‌دار تولیدشده در داخل کشور که مشخصات حرارتی و نوری آن‌ها در دسترس نبود، با استفاده از دستگاه‌های اسپکروفتومتر و گسیل‌سنج اندازه‌گیری شد. در مرحله دوم، به کمک روش محاسباتی دقیق موجود در نرم‌افزار انرژی‌پلاس، میزان اتلاف انرژی از شیشه‌ها با توجه به خواص تشعشعی اندازه‌گیری‌شده، در دو شرایط اقلیمی حاد (بسیار گرم‌ومرطوب و بسیار سرد) محاسبه گردید. در مرحله دوم، با انتخاب روش محاسباتی به جای اندازه‌گیری‌های واقعی، این امکان فراهم گردید تا تأثیر پارامترهای مختلف (دو نوع اقلیم متفاوت، جهت‌های مختلف جغرافیایی و انواع شیشه‌ها) بر میزان اتلاف سالانه انرژی از شیشه‌ها، با حذف عوامل احتمالی نظیر انتقال حرارت از جدارهای کدر و تهویه محاسبه گردد، که انجام این محاسبات به صورت واقعی امکان‌پذیر نبود. نتایج نشان می‌دهند در منطقه سردسیر، بهره‌گیری از شیشه‌های دوجداره با پوشش کم‌گسیل، در تمام جهت‌های جغرافیایی کمترین اتلاف انرژی را در مقایسه با سایر شیشه‌های مورد مطالعه دارد و کاهش اتلاف انرژی از آن، در مقایسه با شیشهٔ دوجدارهٔ ساده، تا 97 درصد است. در منطقهٔ گرمسیر، کاربرد شیشه‌های دوجدارهٔ پوشش‌دارِ منعکس‌کننده با زمینهٔ رنگی آبی تیره در تمامی جهت‌ها، بهترین گزینه از بین موارد بررسی‌شده است و در این حالت، کاهش اتلاف انرژی از شیشه، نسبت به شیشهٔ دوجدارهٔ شفاف، بیش از 70 درصد است.

Archive of SID

# Measurement of Radiative Properties of Coated Glazing Systems and Evaluation of their Influence on Energy Consumption

Mahdieh Abravesh[1], Behrouz Mohammad Kari[2*], Shahin Heidari[1]

1- Faculty of Architecture, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Department of Energy, Building and Housing Research Center, Tehran, Iran
*P.O.B. 13145-1696, Tehran, Iran, kari@bhrc.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 25 May 2015
Accepted 24 June 2015
Available Online 13 July 2015

*Keywords:*
Coated Glazing
Reflective
Thermal Performance
Energy Consumption

ABSTRACT

Considering the determinant role of glazing systems in energy consumption, it is imperative to survey the thermal performance of double coated glazing systems in accordance with the harsh climatic conditions and available local and foreign products' situation. In this paper, the radiative properties of local coated and non-coated glazing units are measured by the spectrophotometer and emissometer apparatus. These thermal and solar properties were not available in any datasheet. In the second step, through the accurate calculation method of EnergyPlus software, the amount of energy loss due to the radiative properties of glazing units was simulated in two extreme climates (very hot and humid climate and cold climate). By choosing the simulation method instead of real measurements in this step, it became possible to evaluate the effect of different parameters (such as climate, orientation and glazing specification) on the annual energy loss through the glazing units by eliminating other factors like energy transfer through opaque surfaces and ventilation. The simulation results indicate that using double glazing unit with low-E coating on the third surface (from the exterior) of the double glazing, significantly reduces energy consumption of the glass unit (up to 97 percent) for all orientations in the cold climate. In hot climates like Bandar Abbas, using reflective coatings (with dark blue color) in double glazing units is the best possible alternative since it lessens the energy transfer through the glass unit (up to 70 percent) compared to the clear double glazed ones.

## 1- مقدمه

امروزه، به منظور کاهش اتلاف انرژی از شیشهٔ پنجره‌ها در ساختمان‌ها، اقدامات همه‌جانبه‌ای برای بهبود خصوصیات حرارتی جدارهای نورگذر و انطباق هرچه بیشتر آن‌ها با انتظارات متعدد موجود، خصوصاً به لحاظ عملکرد حرارتی، صورت گرفته است. در حال حاضر، در کشور شیشه‌های پوشش‌داری تولید می‌شود که دارای تفاوت‌هایی نسبت به محصولات سایر کشورهاست و

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Abravesh, B. Mohammad Kari, Sh. Heidari, Measurement of Radiative Properties of Coated Glazing Systems and Evaluation of their Influence on Energy Consumption, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 8, pp. 402-410, 2015 (In Persian)

www.SID.ir

با در نظر گرفتن تنوع اقلیمی موجود در ایران، انجام پژوهش‌های موردی و ارائه مناسب‌ترین راه‌حل‌های قابل‌استفاده در کشور ضروری است.

با توجه به نقش کلیدی پوشش‌های نوین بر روی عملکرد حرارتی، تحقیقات گسترده‌ای در سطح جهانی به منظور تعیین میزان اثربخشی مجموعهٔ شیشه‌های پوشش‌دار از نقطه‌نظر حرارتی صورت گرفته است. در گزارش‌ها و مدارک فنی به‌دست‌آمده از مطالعات انجام‌شده، راهکارهای مناسب برای بهبود عملکرد حرارتی در شرایط آب و هوایی مختلف ارائه شده است؛ ولی در اینجا باید به این نکتهٔ کلیدی اشاره کرد که راهکارهای ارائه‌شده تنها برای شرایط اقلیمی بررسی‌شده و در صورت کاربرد شیشه‌های مطالعه‌شده معتبر است.

پژوهش‌های متعددی در زمینهٔ تعیین عملکرد حرارتی انواع شیشه‌های پوشش‌دار صورت گرفته است. بخشی از این پژوهش‌ها در زمینهٔ ارزیابی روش‌های تولید این نوع شیشه‌ها انجام شده است، و بخشی دیگر با هدف تعیین اثربخشی کاربرد انواع شیشه‌های پوشش‌دار در شرایط مختلف، با انجام اندازه‌گیری‌های میدانی و شبیه‌سازی‌ها و یا تلفیقی از این دو، صورت گرفته است.

ناگائی و همکاران [1]، برای تعیین وابستگی بین ساختار مولکولی و توده‌ای با ویژگی‌های نوری و شیمیایی آن در فیلم‌های به‌کاررفته در پنجره‌های هوشمند بررسی‌هایی انجام داده‌اند. در پژوهشی دیگر، که سِلِ و همکاران [2] به آن پرداخته‌اند، با توجه به تفاوت‌هایی که در عملکرد حرارتی صفحات پوشش‌دار ساخته‌شده به روش‌های مختلف (دارای پوشش نرم و سخت) وجود دارد، مشخصات فنی تجهیزات الکتروکرومیک و ترموکرومیک ساخته‌شده به روش اسپاترینگ تعیین شده است. گِئورگ و کراگزووِک [3] نیز در پژوهش خود، عملکرد پنجره‌های مجهز به شیشه‌های فتوالکتروکرومیک با کاتالیست پلاتین را ارزیابی کرده‌اند. همچنین به منظور بهبود عملکرد پوشش‌های فتوکرومیک، هوچ و همکاران [4] موفق شده‌اند یک مدول فتوالکتروکرومیک با رنگ‌پذیری بسیار مطلوب بسازند. لایهٔ الکتروکرومیک و لایهٔ فتواکتیو، با استفاده از یک الکترود پایهٔ پلاتینی، بر روی یک پوشش نشانده شد. با این روش، سرعت تغییر رنگ افزایش یافت، و ضریب عبور از 23 به 64 درصد رسید. در پژوهشی دیگر، زو و همکاران [5]، راه‌های افزایش ضریب عبور نور مرئی در فیلم‌های ترموکرومیک با دی‌اکسیدِ وانادیوم امکان‌سنجی شده است. مون‌هی و همکاران [6]، به بررسی پوشش ضد انعکاس روی فیلم ترموکرومیک، با لایه‌نشانی آر اف پرداخته‌اند. لازم به یادآوری است که از هر دو پوشش ذکرشده، برای افزایش انتقال نور از فیلم در هر دو دمای گرم و سرد استفاده می‌شود. لی و همکاران [7] تلاش کرده‌اند، با قرار دادن یک پوشش ضدانعکاس بر روی یک شیشهٔ ترموکرومیک، به روش اسپاترینگ، ضریب عبور نور مرئی در دمای کم و زیاد را بهبود بخشند. جِیمز و باهاج [8]، با ارزیابی تأثیر پنجره‌های هوشمند تشکیل‌یافته از عناصر اپتیکی هولوگرافیک[1] در یک ساختمان آموزشی، تلاش کرده‌اند با مدل‌سازی، راه‌حل‌هایی برای رفع شرایط نامطلوب ناشی از خیرگی و اینرسی حرارتی اندک این نوع فضاها بیابند. گرِیل و همکاران [9]، در مقاله‌ای، به ارائهٔ توضیحاتی در مورد پنجره‌های هوشمند (پنجره‌های کریستال مایع، فتوکرومیک، پنجرهٔ اس پی دی[2] و پنجره الکتروکرومیک) و توجیه کاربرد آن در اقلیم‌های سرد و گرم پرداخته‌اند. نیتز و هارتویگ [10]، دربارهٔ کاربردهای ممکن لایه‌های ترموتروپیک برای تبدیل جدارهای شیشه‌ای شفاف به غیرشفاف (مات) نورگذر، زمانی که دما از حد تعیین‌شده‌ای فراتر رود، بررسی‌هایی انجام داده‌اند. پلاتزِر و همکاران [11] به مقایسهٔ دو نوع شیشهٔ پویا (الکتروکرومیک و گازوکرومیک) پرداخته‌اند و در درازمدت، عملکرد آنها بر روی دو ساختمان در شرایط اقلیمی متفاوت (آتن و فرایبورگ) ارزیابی و مقایسه کرده‌اند. پژوهش توپیک و اِسمول [12] به ساخت و ارزیابی یک سیستم کنترل سه‌حالتهٔ آنالوگ برای تغییر میزان تشعشع عبوری در یک شیشه فتوکرومیک اختصاص داشته است. همچنین، بررسی‌هایی دربارهٔ مسائل محیطی مربوط به استفاده از منابع انرژی و تکنولوژی‌های متداول و مزایای استفاده از فناوری ترموالکتریکی و انرژی‌های تجدیدپذیر توسط زیا و همکاران [13] صورت گرفته است. در تحقیقی دیگر، روزنفلد و پلاتزر [14] با ارائهٔ یک روش تجربی، ضریب عبور نور مرئی و ضریب عبور خورشیدی شیشهٔ دوجدارهٔ پرشده با گاز آرگون و دارای فیلم پوششی را اندازه‌گیری کرده‌اند. ارهان [15] در پژوهش خود، به بررسی عملکرد شیشهٔ دوجداره از نظر انتقال حرارت از طریق هدایت و جابه‌جایی پرداخته است. تحقیق ریورا و همکاران [16] به بررسی عملکرد حرارتی چهار نوع شیشه (ساده، تک‌جداره با فیلم پوششی، دوجداره ساده، دوجداره با فیلم پوششی) در یک ساختمان اداری در دو منطقه مکزیکو و اتاوا اختصاص داشته است. نتایج نشان می‌دهند که کاربرد فیلم پوششی برای شیشهٔ ساده در شرایطی که دمای هوا زیاد باشد، مناسب نیست، اما شیشه دوجداره با فیلم پوششی برای مناطق بررسی‌شده عملکرد حرارتی بهتری دارد. در پژوهشی دیگر، ونگ و همکاران [17] یک مدل ریاضی برای انتقال حرارت از طریق تابش با طول موج بلند بین سطوح داخلی یک فضا و سطوح خارجی از طریق شیشه ارائه کرده‌اند. در این پژوهش، سه عامل تأثیرگذار بر انتقال حرارت ارزیابی شده است: 1) ضریب عبور شیشه 2) ضریب انتقال حرارت شیشه 3) اختلاف دمای سطوح و دمای فضای داخل با دمای سطوح و دمای فضای خارج.

متأسفانه در کشور ما، در این زمینه، سابقهٔ پژوهشی وجود ندارد و چنان‌که اشاره شد، راهکارهایی که ارائه شده‌اند تنها برای شرایط اقلیمی بررسی‌شده و در صورت کاربرد شیشه‌های مورد مطالعه معتبرند.

در حال حاضر، در کشور، شیشه‌های پوشش‌داری تولید می‌شود که با محصولات تولیدشده در دیگر کشورها تفاوت‌هایی دارند و خواص تشعشعی آن‌ها در دسترس نیست. بنابراین، با در نظر گرفتن تنوع اقلیمی موجود در ایران، انجام پژوهش‌های موردی و ارائهٔ مناسب‌ترین راه‌حل‌های قابل استفاده در کشور ضروری است.

در این مقاله، با اندازه‌گیری خواص تشعشعی شیشه‌ها و بهره‌گیری از مدل‌سازی‌های متعدد، تلاش شده است نقش خواص تشعشعی شیشه‌ها بر تغییر میزان اتلاف انرژی در دو منطقه حاد اقلیمی گرم و سرد مشخص گردد. دو شهر اردبیل و بندرعباس بر اساس بیشترین میزان نیاز بار گرمایی و سرمایی انتخاب شده‌اند.

## 2- مفروضات

در این مقاله، ابتدا، خواص تشعشعی تعداد قابل توجهی از شیشه‌های ساده و پوشش‌دار منتخب تولید داخل و خارج از کشور اندازه‌گیری شده، و سپس مقدار اتلاف انرژی مربوط به انواع مختلفی از شیشه‌ها در دو اقلیم سرد و گرم در چهار جهت جغرافیایی (شمال، جنوب، شرق و غرب) مورد مطالعه، تحلیل و مقایسه قرار گرفته است. برای اقلیم سرد، شهر اردبیل و برای اقلیم گرم، شهر بندرعباس انتخاب شده است.

1- HOE
2- SPD



Archive of SID
www.SID.ir

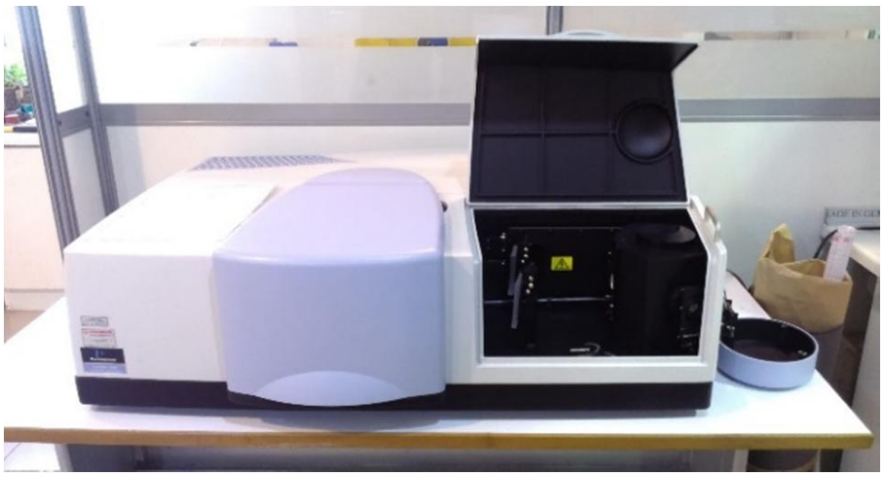
در ادامه، محاسبات مربوط به اتلاف انرژی از شیشه‌ها با توجه به خواص تشعشعی اندازه‌گیری‌شده با استفاده از یک نرم‌افزار شبیه‌ساز انرژی مطرح در سطح جهانی و داده‌های آب و هوایی ساعتی معتبر دو شهر مذکور انجام شده است.

## 2-1- اندازه‌گیری آزمایشگاهی خواص تشعشعی شیشه‌های پوشش دار

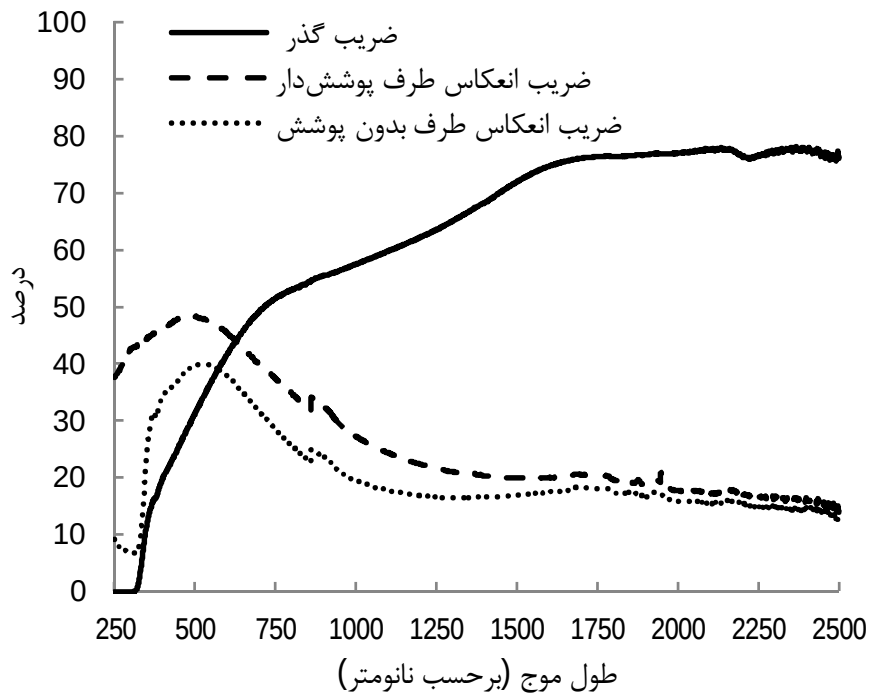
به منظور تعیین مشخصات حرارتی و نوری شیشه‌های مورد مطالعه (ضرایب عبور و انعکاس هر دو سطح - پوشش‌دار و بدون پوشش - تمامی شیشه‌ها)، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی با دستگاه اسپکتروفتومتر[1] (شکل 1) واقع در بخش انرژی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، در بازه طول موج‌های تابش خورشیدی، بین 250 تا 2500 نانومتر با گام‌های یک نانومتر، انجام شد، تا بیشترین میزان دقت حاصل شود. برای اطمینان از میزان دقت داده‌های اندازه‌گیری‌شده، دستگاه به کمک یک نمونه مرجع استاندارد کالیبره شده است. برای تعیین ضریب گذر نور مرئی[2]، ضریب گذر خورشیدی[3]، ضریب انعکاس نور مرئی[4] و ضریب انعکاس خورشیدی[5] شیشه‌های مورد مطالعه، نمونه‌هایی به ابعاد تقریبی 5x5 سانتی‌متر از تولیدات موردنظر تهیه شد. این نمونه‌ها در داخل دستگاه قرار داده شد و با اندازه‌گیری‌های لازم در بازه ذکر شده، ضرایب گذر و انعکاس دو طرف شیشه در هر طول موج به‌دست آمد. در شکل 2، نمودار مربوط به اطلاعات خام یکی از نمونه‌ها (شیشه با پوشش کم‌گسیل) که توسط دستگاه ثبت شده نشان داده شده است. سپس، محاسبات مربوط به بازه طول موج نورمرئی و طول موج خورشیدی به صورت تفکیکی برای هر یک از شیشه‌ها انجام شد. نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها و محاسبات در Error! Reference source not found. ارائه شده است. در این جدول، علاوه بر ارائهٔ خواص تشعشعی اندازه‌گیری‌شده شیشه‌های تولید داخل، خواص تشعشعی چند نمونه شیشهٔ تولید خارج گزارش‌شده توسط پایگاه داده‌های آزمایشگاه معتبر بین‌المللی ال بی ان ال[6] نیز، به منظور مقایسهٔ داده‌ها و بالا بردن اطمینان از صحت داده‌های اندازه‌گیری‌شده ارائه شده است. لازم به توضیح است که مشخصات شیشه‌های اندازه‌گیری‌شده تولید داخل با مشخصات شیشه‌های تولید خارج گزارش‌شده توسط آزمایشگاه معتبر بین‌المللی ال بی ان ال دقیقاً یکسان نیست، اما نزدیک بودن داده‌های مربوط به یک شیشهٔ خاص می‌تواند صرفاً اطمینان به درستی داده‌های اندازه‌گیری‌شده را بالا ببرد.

لازم به توضیح است گسیلندگی هر دو سطح تمام شیشه‌ها نیز، با استفاده از دستگاه گسیلندگی‌سنج، تعیین شده است. ضریب گسیلندگی دو طرف تمام شیشه‌ها، به جز شیشه با پوشش کم‌گسیل، 0/86، و ضریب گسیلندگی سطح پوشش‌دار شیشه کم‌گسیل 0/24 است.

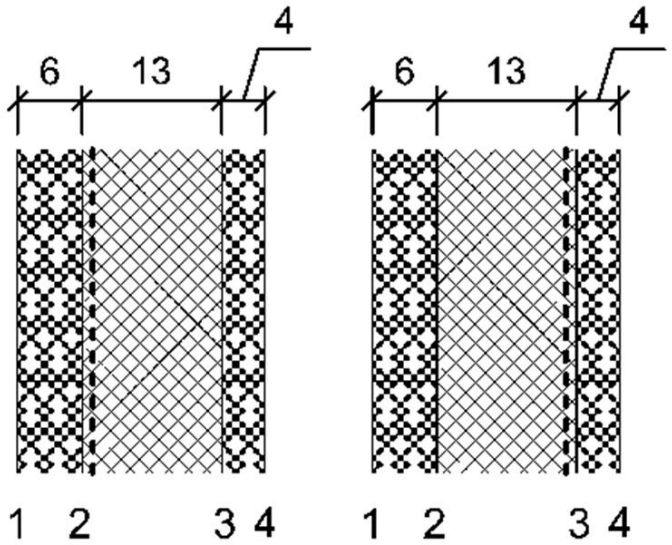
در همهٔ مدل‌ها، فاصلهٔ بین دو شیشه برابر با 13 میلی‌متر، و پرشده با هوا در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است شیشه‌های پرشده از هوا، در بازهٔ 12 تا 14 میلی‌متر، بهترین عملکرد حرارتی را دارند. ضخامت شیشهٔ رو به فضای خارج 6 میلی‌متر و ضخامت شیشهٔ رو به فضای داخلی مدل، 4 میلی‌متر است. از آنجا که شبیه‌سازی‌ها در دو اقلیم سرد (اردبیل) و گرم (بندرعباس) انجام شده است، محل قرارگیری سطح پوشش‌دار در شیشهٔ دوجدارهٔ کم‌گسیل برای هر اقلیم، متفاوت است. در اردبیل، به منظور کاهش انتقال حرارت از داخل به خارج ساختمان، شیشهٔ کم‌گسیل به گونه‌ای قرار می‌گیرد که سطح پوشش‌دار شیشه، سومین سطح جدار نورگذر (سطح رو به خارج شیشهٔ داخلی) باشد؛ اما، در بندرعباس، به منظور کنترل نور خورشید ورودی و محدود کردن انتقال حرارت به داخل ساختمان، دومین سطح جدار نورگذر (سطح رو به داخل شیشهٔ خارجی) به‌عنوان سطح پوشش‌دار شیشه، در نظر گرفته می‌شود (شکل 3).



**شکل 1** دستگاه اسپکتروفتومتر برای اندازه‌گیری خواص تشعشعی شیشه‌ها (واقع در بخش انرژی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی)




**شکل 2** اطلاعات خام (ضریب‌های گذر و انعکاس (درصد) برحسب طول موج (نانومتر)) ثبت‌شده توسط دستگاه مربوط به شیشهٔ طلایی نوع 2




**شکل 3** شیشهٔ دوجداره با پوشش کم‌گسیل روی سطح سوم (شکل سمت راست) شیشهٔ دوجداره با پوشش کم‌گسیل روی سطح دوم (شکل سمت چپ)

1- Spectrophotometer (Perkin Elmer 1050)
2- Visible Transmittance
3- Solar Transmittance
4- Visible Reflectance
5- Solar Reflectance
6- LBNL



www.SID.ir

**جدول 1** خواص تشعشعی اندازه‌گیری شده برای شیشه‌های مورد مطالعه

| | نوع شیشه | ضریب گذر نور مرئی (درصد) | ضریب گذر خورشیدی (درصد) | ضریب انعکاس نور مرئی (درصد) | | ضریب انعکاس خورشیدی (درصد) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | (طرف پوشش‌دار) | (طرف بدون پوشش) | (طرف پوشش‌دار) | (طرف بدون پوشش) |
| شیشه‌های اندازه‌گیری‌شده | آبی تیره | 7/5 | 6/5 | 29/3 | 55/4 | 24/3 | 55/3 |
| | آبی روشن | 69/9 | 53/2 | 14/2 | 30/6 | 12/3 | 29/2 |
| | مشجر با کابل | 69/9 | 53/2 | 8/5 | 7/7 | 9/7 | 9/8 |
| | طلایی نوع 1 | 16/7 | 26/6 | 18/2 | 43/8 | 15/5 | 37/4 |
| | کم‌گسیل | 78/5 | 41/4 | 7/8 | 10/4 | 35/5 | 25/1 |
| | صورتی نوع 1 | 25/7 | 33/3 | 33/0 | 25/2 | 37/7 | 24/9 |
| | طلایی نوع 2 | 35/2 | 45/9 | 45/2 | 36/0 | 33/2 | 22/7 |
| | طلایی نوع 3 | 27/4 | 35/9 | 29/6 | 38/5 | 25/0 | 37/2 |
| | خاکستری | 18/2 | 31/4 | 16/4 | 45/5 | 13/8 | 31/7 |
| | سبز نوع 1 | 66/7 | 49/3 | 8/1 | 8/1 | 9/0 | 8/9 |
| | سبز نوع 2 | 35/9 | 38/3 | 32/0 | 16/4 | 23/0 | 11/9 |
| | صورتی نوع 2 | 24/9 | 32/0 | 34/3 | 23/5 | 40/1 | 26/0 |
| | نقره‌ای نوع 1 | 41/0 | 49/1 | 33/2 | 22/0 | 25/5 | 17/4 |
| | نقره ای- سبز نوع 1 | 37/2 | 35/1 | 21/6 | 16/1 | 14/2 | 13/8 |
| | نقره‌ای- برنز | 36/4 | 43/2 | 32/4 | 16/1 | 22/1 | 13/7 |
| | نقره‌ای - سبز نوع 2 | 17/7 | 12/3 | 14/7 | 33/1 | 11/4 | 31/8 |
| | نقره‌ای نوع 2 | 63/4 | 61/9 | 36/4 | 34/5 | 30/9 | 23/4 |
| | ساده | 89/8 | 83/7 | 8/1 | 10/0 | 7/5 | 7/5 |
| شیشه‌های گزارش‌شده از پایگاه داده‌های آزمایشگاه ال‌بی‌ان‌ال | خاکستری (کد 11389) | 19/9 | 23/4 | 21/7 | 53/2 | 13/2 | 36/4 |
| | طلایی نوع 3 (کد 11344) | 31/6 | 47/9 | 45/3 | 53/5 | 29/0 | 37/0 |
| | نقره‌ای-سبز نوع 1 (کد 1754) | 36/9 | 39/3 | 9/60 | 7/30 | 10/6 | 9/10 |
| | نقره‌ای نوع 2 (کد 4286) | 62/4 | 61/4 | 35/0 | 32/2 | 25/6 | 21/5 |
| | ساده (کد 1606) | 89/7 | 82/2 | 8/1 | 8/1 | 7/4 | 7/4 |

### 2-2- نرم‌افزار مورد استفاده برای انجام محاسبات میزان اتلاف انرژی از شیشه‌ها

نرم‌افزار مورد استفاده در این مطالعه، برای شبیه‌سازی انتقال انرژی از جدارهای نورگذر ساختمان، نرم‌افزار انرژی‌پلاس است. این نرم‌افزار را متخصصان دانشگاه‌های ایلینویز و کالیفرنیا با همکاری سایر مؤسسه‌ها مانند دایرهٔ انرژی آمریکا[1]، واحد مهندسی ارتش آمریکا[2] و ... تهیه کرده‌اند. همچنین، اعتبارسنجی این نرم‌افزار برای حالت‌های مختلف پوسته برعهده گروه تهیه‌کننده این نرم‌افزار بوده است [18]. انتشار اولین نسخه انرژی پلاس، که نرم‌افزاری فاقد واسط کاربر گرافیکی[3] است، به سال 1998 میلادی باز می‌گردد و در تهیهٔ این پژوهش از نسخه 8/1 آن استفاده شده است. این نرم‌افزار بر پایهٔ مشخصات کالبدی ساختمان، ساکنان، تجهیزات، سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی آن، همچنین داده‌های آب و هوایی سالانهٔ ساعت به ساعت محل استقرار ساختمان، می‌تواند متغیرهای متعددی را در هر زمان از سال محاسبه و به تعبیر دقیق‌تر، پیش‌بینی نماید. نمونه‌هایی از این متغیرها، دمای هوای فضاها، دمای سطوح، انتقال حرارت از سطوح کدر و شفاف همچنین بارهای گرمایی و سرمایی لازم برای حفظ دما یا شرایط آسایش حرارتی موردنظر در ساختمان هستند[19].

در نرم‌افزار انرژی‌پلاس، شبیه‌سازی جدارهای یک یا چند جداره شیشه‌ای به روش‌های متعدد - از بسیار ساده (بر پایهٔ ضریب انتقال حرارت و ضریب بهرهٔ گرمایی خورشیدی) تا پیشرفته (متوسط طیفی) و خیلی دقیق (طیفی) - امکان‌پذیر است، و در این پژوهش، از روش متوسط طیفی استفاده شده است. در حل معادلات، برای تعیین ضرایب همرفت، الگوریتمِ در نظر گرفته شده برای سطح داخلی، TARP است. این الگوریتم ضریب تبادل حرارت در سطح جدار[4] داخلی را بر اساس اختلاف دما، با ترکیب دو مدل مطرح (اشری و اسپارو) و با تفکیک مؤلفه‌های همرفت اجباری و طبیعی در جهات مختلف هماهنگ می‌کند. برای سطح خارجی از الگوریتم DOE-2 (ترکیبی از مدل‌های موویت و بلست) استفاده شده است.

### 2-3- مشخصات مدل ارائه‌شده

به منظور بررسی اتلاف انرژی از شیشه‌ها، مدلی از یک ساختمان فرضی با یک منطقهٔ حرارتی[5] به ابعاد 5x5 و ارتفاع 3 متر تهیه شد و در منطقهٔ حرارتی این مدل پنجره‌ای به عرض 2/5 متر و ارتفاع 2 متر با اکابه 0/9 متر قرار داده شد (شکل4). با چرخش این مدل حول محور عمودی، تمام

1- US Department of Energy
2- US Army Corps of Engineers
3- Graphical User Interface (GUI)

4- Surface Heat Transfer Coefficient
5- Thermal Zone



Archive of SID
www.SID.ir

جهت‌های چهارگانهٔ اصلی (شمال، جنوب، شرق و غرب) برای همه انواع شیشه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. در هر یک از مدل‌ها، مساحت پنجره 30 درصد نما در نظر گرفته شده است. در مدل تهیه‌شده، همهٔ جدارهای کدر 25 سانتی‌متر ضخامت دارند که از 15 سانتی‌متر بتن و 10 سانتی‌متر عایق حرارتی تشکیل شده است. مشخصات مصالح به‌کاررفته در جدارهای کدر در جدول2 ارائه شده است. ضریب هدایت حرارتی عایق حرارتی جدارهای کدر برابر [W/m.K] 0/0001 تعریف شده است، تا انتقال حرارت از آن‌ها بسیار کم و نزدیک به حالت بی‌دررو باشد، ولی درعین‌حال اثر اینرسی حرارتی آن‌ها نیز در نظر گرفته شود.

مشخصات مدل نمونه به‌گونه‌ای انتخاب شده است که صرفاً به بررسی تأثیر شیشه‌های مورد مطالعه و میزان مصرف انرژی حاصل از آن‌ها پرداخته شود و تأثیر هر گونه عوامل احتمالی دیگر بر میزان مصرف انرژی نظیر انتقال حرارت از جدارهای کدر، تهویه و ... حذف شود.

جدار نورگذر تعبیه‌شده در هر یک از مناطق حرارتی به صورت پنجره‌ای ثابت و بدون قاب فرض شد تا تحلیل‌ها بر بخش نورگذر پنجره متمرکز گردد. مشخصات حرارتی و نوری هر یک از شیشه‌های مورد مطالعه، براساس خواص تشعشعی شیشه‌ها، که در جدول1 آمده است، به جدارهای نورگذر نسبت داده شد و شبیه‌سازی عملکرد حرارتی شیشه‌ها در چهار جهت اصلی ساختمان به صورت مستقل انجام گردید.

### 2-4- تعیین محدوده اوقات سرد و گرم سال در دو شهر اردبیل و بندرعباس

به‌منظور تعیین دوره‌های سرد و گرم سال در دو شهر اردبیل و بندرعباس، و به عبارت دیگر محدوده‌های نیاز به سیستم گرمایی یا سرمایی، میانگین دمای هوای روزانه و مرزهای آسایش حرارتی ساکنان معیار قرار گرفت. با توجه به بالا بودن اینرسی حرارتی فضاهای بررسی‌شده، فرض حداقل تغییر دما در اوقات شبانه‌روز و ملاک قرار دادن دماهای متوسط روزانه کاملاً قابل توجیه است. در این تحقیق، دمای مبنای فضای داخل، در دورهٔ گرمایش در شهر اردبیل 20 درجهٔ سلسیوس، و دمای مبنای سرمایش در شهر بندرعباس 25 درجه سلسیوس در نظر گرفته شد.

به این ترتیب، اوقات سرد در شهر اردبیل زمانی در نظر گرفته شد که متوسط روزانهٔ دمای هوای داخل، در شرایطی که سیستم گرمایی غیرفعال است، کمتر از حدّ پایین آسایش حرارتی در زمستان (20 درجه سلسیوس) باشد. این محدودهٔ زمانی از 5 مهر (27 سپتامبر) آغاز می‌شود و تا پایان اردیبهشت (19 می) ادامه می‌یابد. لازم به توضیح است که دماهای مبنای متفاوتی را می‌توان در مطالعات در نظر گرفت، ولی با توجه به اینکه بررسی‌ها به‌صورت قیاسی صورت می‌گیرد، در بررسی‌های انجام‌شده، دمای مبنا بیشترین میزان مجاز در نظر گرفته شد.

همچنین، در مورد شهر بندرعباس، روزهایی از سال به عنوان روزهای گرم سال مشخص شدند. در این اوقات، متوسط روزانه دمای هوای داخل، در شرایطی که سیستم سرمایی غیر فعال است، از حد پایین آسایش حرارتی در تابستان (25 درجه سلسیوس) بیشتر است. مطابق این محاسبات، اوقات گرم بندرعباس از 6 بهمن (26 فوریه) آغاز می‌شود و تا 14 آذرماه (5 دسامبر) ادامه می‌یابد.

## 3- تحلیل نتایج شبیه‌سازی مدل‌های ارائه شده

مقدار اتلاف انرژی مربوط به نوع شیشهٔ پنجره برابر است با حاصل جمع جبری مقادیر کسب حرارت مستقیم و پراکنده از آفتاب و کسب یا دفع حرارت از طریق هدایت، همرفت و تشعشع در بازهٔ طول موج بلند. انتقال حرارت به صورت هدایت از شیشه، بسته به دمای خارج و داخل، می‌تواند از داخل به خارج یا از خارج به داخل صورت گیرد. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته به منظور ارزیابی میزان اتلاف انرژی از شیشه‌ها ارائه شده است. به منظور تحلیل و مقایسهٔ نتایج، نمودارها و جدول‌های مربوط به انتقال انرژی شیشه‌های مورد مطالعه در اوقات سرد سال در شهر اردبیل و در اوقات گرم سال در شهر بندرعباس، در چهار جهت جغرافیایی نشان داده شده است.

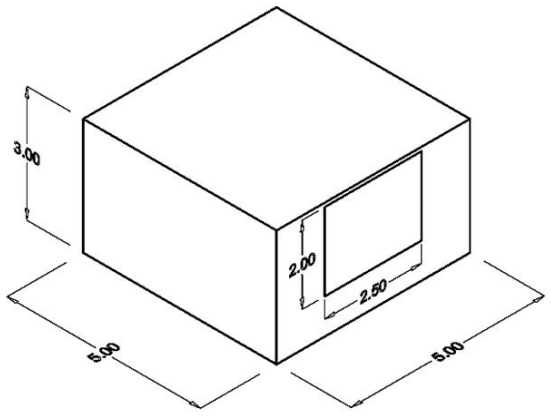
در نمودار شکل5، میزان اتلاف انرژی انواع جدارهای نورگذر در اوقات سرد سال (براساس محدوده تعیین‌شده) در شهر اردبیل؛ و در نمودار شکل6، اتلاف انرژی انواع جدارهای نورگذر در اوقات گرم سال (براساس محدودهٔ تعیین‌شده) در شهر بندرعباس نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل5 مشاهده می‌گردد، در شهر اردبیل، انواع شیشه‌ها با جهت‌گیری جنوبی کمترین اتلاف انرژی را نسبت به سایر جهت‌های جغرافیایی دارند. در این اقلیم، شیشه‌های با جهت‌گیری شرقی، از نظر اتلاف انرژی، در اولویت دوم قرار دارند.

با توجه به میزان اتلاف انرژی سالانه از شیشه‌ها در جهت‌های مختلف جغرافیایی، جهات مناسب قرارگیری پنجره‌ها در شهر اردبیل، به ترتیب اولویت عبارت‌اند از نمای جنوبی، نمای شرقی، نمای غربی، نمای شمالی.

برای انجام محاسبات در شهر اردبیل، به منظور کنترل نور خورشید برای افزایش انتقال انرژی از شیشه، سطح پوشش‌دار شیشه، سومین سطح جدار نورگذر را تشکیل می‌دهد. براساس این فرضیه، لایه‌های جدار نورگذر که به صورت دوجداره درنظر گرفته شده است و در انجام محاسبات به‌کار رفته است، از خارج به داخل به ترتیب زیر است: 1- شیشهٔ شفاف به ضخامت 6 میلی‌متر؛ 2- لایهٔ هوا به ضخامت 13 میلی‌متر؛ 3- شیشه پوشش‌دار 4 میلی‌متری (سطح پوشش‌دار شیشه سمت خارج و مجاور لایهٔ هوای بین دو شیشه قرار می‌گیرد).

نتایج نشان می‌دهد، در شهر اردبیل بهره‌گیری از شیشه‌های دوجداره با پوشش کم‌گسیل روی سطح سوم جدار نورگذر، در اوقات سرد سال در تمام جهت‌های جغرافیایی، کمترین اتلاف انرژی را در مقایسه با سایر انواع جدارهای نورگذر بررسی‌شده دارد و به میزان چشمگیری موجب بهبود عملکرد حرارتی جدارهای نورگذر شده است.




**شکل 4** هندسه مدل ارائه‌شده

**جدول 2** مشخصات مصالح به‌کاررفته در جدارهای کدر

| مصالح | ضخامت [m] | ضریب هدایت حرارتی ($\lambda$) [W/m.K] | وزن مخصوص خشک [kg/m³] | ظرفیت گرمایی [J/kg.K] |
|---|---|---|---|---|
| بتن مسلح | 0/15 | 2/30 | 2240 | 900 |
| عایق حرارتی | 0/10 | 0/0001 | 16 | 1210 |



Archive of SID
www.SID.ir

به منظور مقایسهٔ جدارهای نورگذر، میزان اتلاف انرژی انواع شیشه‌های دو جداره پوشش‌دار نسبت به شیشهٔ دوجداره شفاف در جدول3 به صورت درصد نشان داده شده است. با توجه به جدول3 و جدول4 و نمودار شکل5، شیشه‌های دوجدارهٔ شفاف در اولویت دوم بعد از شیشه‌های دوجداره با پوشش کم‌گسیل روی سطح سوم قرار دارند. در جدول 3 و جدول 5 افزایش و کاهش اتلاف انرژی هر شیشه نسبت به شیشهٔ دوجدارهٔ ساده به ترتیب با اعداد مثبت و اعداد منفی مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود،

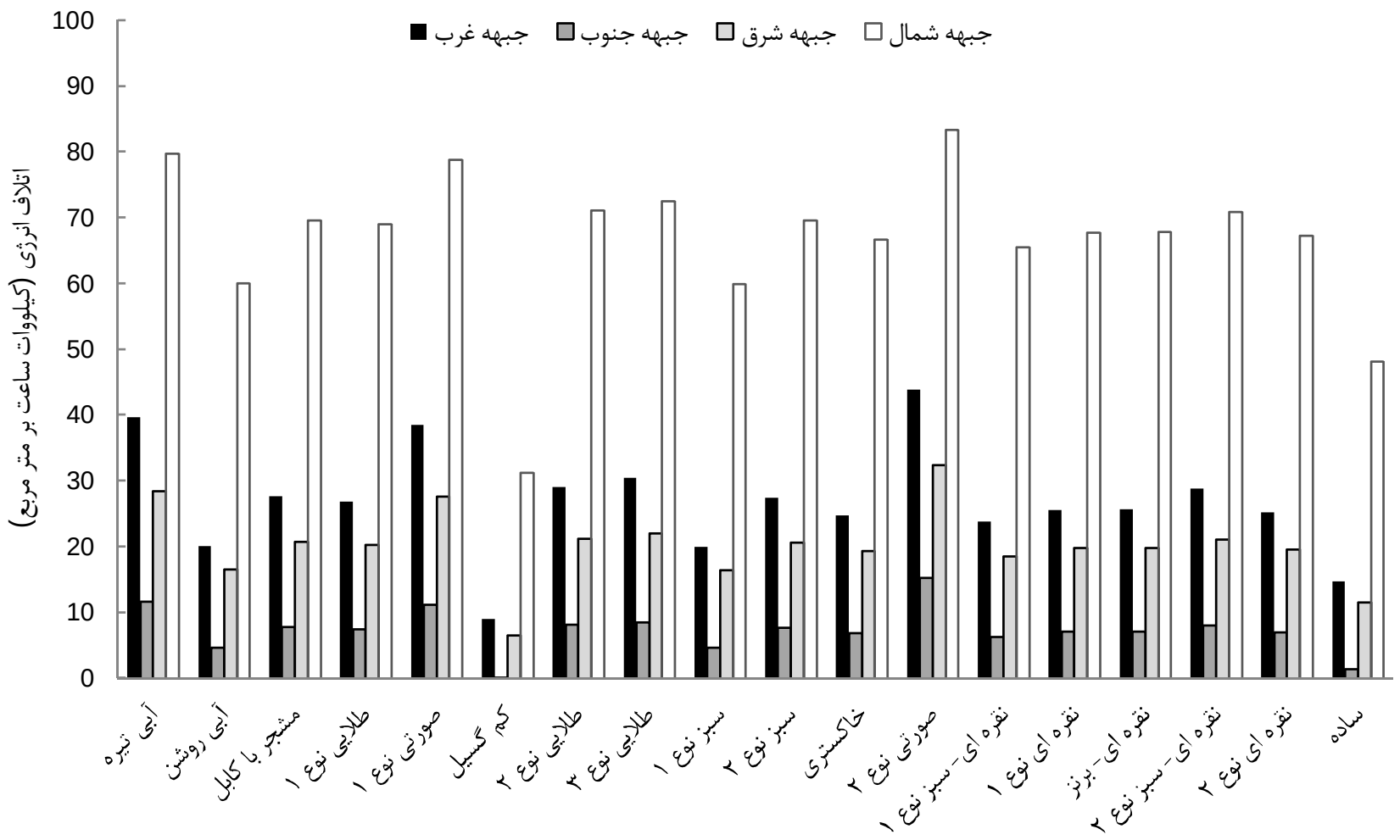
**جدول 3** کاهش (-) / افزایش (+) اتلاف انرژی ناشی از انواع شیشه‌های دوجدارهٔ پوشش‌دار نسبت به شیشهٔ دوجدارهٔ شفاف در شهر اردبیل (به درصد)

| نوع شیشه | جنوب | شرق | غرب | شمال |
|---|---|---|---|---|
| آبی تیره | 768/9 | 147/2 | 170/0 | 65/7 |
| آبی روشن | 249/6 | 43/4 | 36/2 | 24/7 |
| مشجر با کابل | 479/6 | 80/6 | 88/0 | 44/6 |
| طلایی نوع 1 | 459/0 | 75/9 | 82/1 | 43/5 |
| صورتی نوع 1 | 740/3 | 140/0 | 162/1 | 63/9 |
| کم‌گسیل | -97/6 | -43/3 | -38/9 | -35/0 |
| طلایی نوع 2 | 505/6 | 84/5 | 97/3 | 47/9 |
| طلایی نوع 3 | 537/2 | 91/1 | 107/2 | 50/7 |
| خاکستری | 248/1 | 42/9 | 35/8 | 24/5 |
| سبز نوع 1 | 472/9 | 78/7 | 86/5 | 44/8 |
| سبز نوع 2 | 409/4 | 67/6 | 68/6 | 38/7 |
| صورتی نوع 2 | 1038/0 | 181/3 | 198/6 | 73/3 |
| نقره‌ای نوع 1 | 367/5 | 60/9 | 61/8 | 36/3 |
| نقره ای- سبز نوع 1 | 430/3 | 71/7 | 74/0 | 40/7 |
| نقره‌ای- برنز | 433/1 | 72/0 | 74/9 | 41/0 |
| نقره‌ای - سبز نوع 2 | 500/4 | 82/7 | 95/6 | 47/5 |
| نقره‌ای نوع 2 | 419/2 | 70/4 | 71/0 | 39/9 |

در شهر اردبیل، تلفات انرژی ناشی از شیشه‌های دوجداره با پوشش کم‌گسیل نسبت به شیشهٔ دوجدارهٔ شفاف که از نظر عملکرد حرارتی دارای اولویت دوم است، در جهات جنوبی، شرقی، غربی و شمالی به ترتیب 98، 43، 39 و 35 درصد کاهش می‌یابد. با استفاده از شیشهٔ کم‌گسیل، بهرهٔ خورشیدی در حدی است که با میزان اتلاف حرارت تقریباً برابری می‌کند. در چنین شرایطی، اتلاف انرژی از شیشه تقریباً به صفر می‌رسد و به عبارت دیگر، کاهش اتلاف انرژی از شیشه نزدیک به 100 درصد می‌شود.

**جدول 4** میزان اتلاف انرژی سالانه از انواع شیشه‌های دوجدارهٔ مورد مطالعه در شهر اردبیل به ترتیب اولویت (کیلووات ساعت بر متر مربع)

| نوع شیشه | جنوب | شرق | غرب | شمال |
|---|---|---|---|---|
| کم‌گسیل | 0/03 | 6/53 | 9/00 | 31/29 |
| ساده | 1/34 | 11/51 | 14/71 | 48/10 |
| سبز نوع 1 | 4/65 | 16/45 | 19/99 | 59/90 |
| آبی روشن | 4/67 | 16/50 | 20/04 | 59/98 |
| نقره‌ای- سبز نوع 1 | 6/24 | 18/51 | 23/80 | 65/54 |
| خاکستری | 6/80 | 19/29 | 24/81 | 66/72 |
| نقره‌ای نوع 2 | 6/93 | 19/61 | 25/17 | 67/29 |
| نقره‌ای نوع 1 | 7/08 | 19/76 | 25/60 | 67/69 |
| نقره‌ای - برنز | 7/12 | 19/80 | 25/73 | 67/83 |
| طلایی نوع 1 | 7/47 | 20/24 | 26/80 | 69/01 |
| سبز نوع 2 | 7/65 | 20/57 | 27/45 | 69/65 |
| مشجر با کابل | 7/74 | 20/79 | 27/66 | 69/56 |
| نقره‌ای- سبز نوع 2 | 8/02 | 21/03 | 28/78 | 70/92 |
| طلایی نوع 3 | 8/09 | 21/24 | 29/04 | 71/13 |
| طلایی نوع 2 | 8/51 | 21/99 | 30/48 | 72/47 |
| صورتی نوع 1 | 11/22 | 27/62 | 38/56 | 78/83 |
| آبی تیره | 11/61 | 28/46 | 39/73 | 79/71 |
| صورتی نوع 2 | 15/20 | 32/38 | 43/94 | 83/34 |




**شکل 5** میزان اتلاف انرژی جدارهای نورگذر در شهر اردبیل در اوقات سرد سال در چهار جهت جغرافیایی



Archive of SID
www.SID.ir

در شهر بندرعباس، همان‌طور که در نمودار شکل6 مشاهده می‌شود، در اوقات گرم سال، پنجره‌های شمالی، با کمترین میزان تبادل حرارت، نسبت به سایر جهت‌های جغرافیایی، عملکرد حرارتی مطلوب‌تری دارند. پس از آن، نمای غربی نسبت به نماهای دیگر ساختمان از عملکرد مناسب‌تری برخوردار است.

با توجه به مقدار سالانه اتلاف انرژی از شیشه‌ها در شهر بندرعباس در نماهای مختلف، جهت‌های مناسب قرارگیری پنجره‌ها در این شهر، به ترتیب اولویت عبارت‌اند از: نمای شمالی، نمای غربی، نمای جنوبی، نمای شرقی.

چنان که توضیح داده شد، برای انجام دادن محاسبات در شهر بندرعباس، به منظور کنترل نور خورشید برای محدود کردن انتقال انرژی از شیشه، سطح پوشش‌دار شیشه، دومین سطح جدار نورگذر را تشکیل می‌دهد. براساس این فرضیه، لایه‌های جدار نورگذر که به صورت دوجداره درنظر گرفته شده و در انجام دادن محاسبات به‌کار رفته است، از خارج به داخل به ترتیب زیر است: شیشهٔ پوشش‌دار به ضخامت 6 میلی‌متر (سطح پوشش‌دار شیشه در سمت داخل و مجاور لایهٔ هوای بین دو شیشه قرار می‌گیرد)، لایهٔ هوا به ضخامت 13 میلی‌متر، شیشهٔ شفاف به ضخامت 4 میلی‌متر.

براساس فرضیه‌های درنظرگرفته‌شده، نتایج نشان می‌دهند که در شهر بندرعباس، کاربرد شیشه‌های پوشش‌دار به صورت دوجداره نسبت به شیشهٔ دوجدارهٔ شفاف در تمام جهت‌های جغرافیایی از عملکرد بهتری با توجه به کاهش انتقال حرارت از خارج به داخل برخوردار است. در بین شیشه‌های پوشش‌دار بررسی‌شده، شیشهٔ آبی رنگ (نوع 1) دارای کمترین اتلاف انرژی نسبت به سایر شیشه‌ها در دورهٔ گرم سال است و انتقال انرژی (از خارج به داخل) آن نسبت به شیشه دوجداره شفاف در جهت‌های شمالی، غربی، جنوبی و شرقی به ترتیب 65، 70، 70 و 71 درصد کاهش می‌یابد.

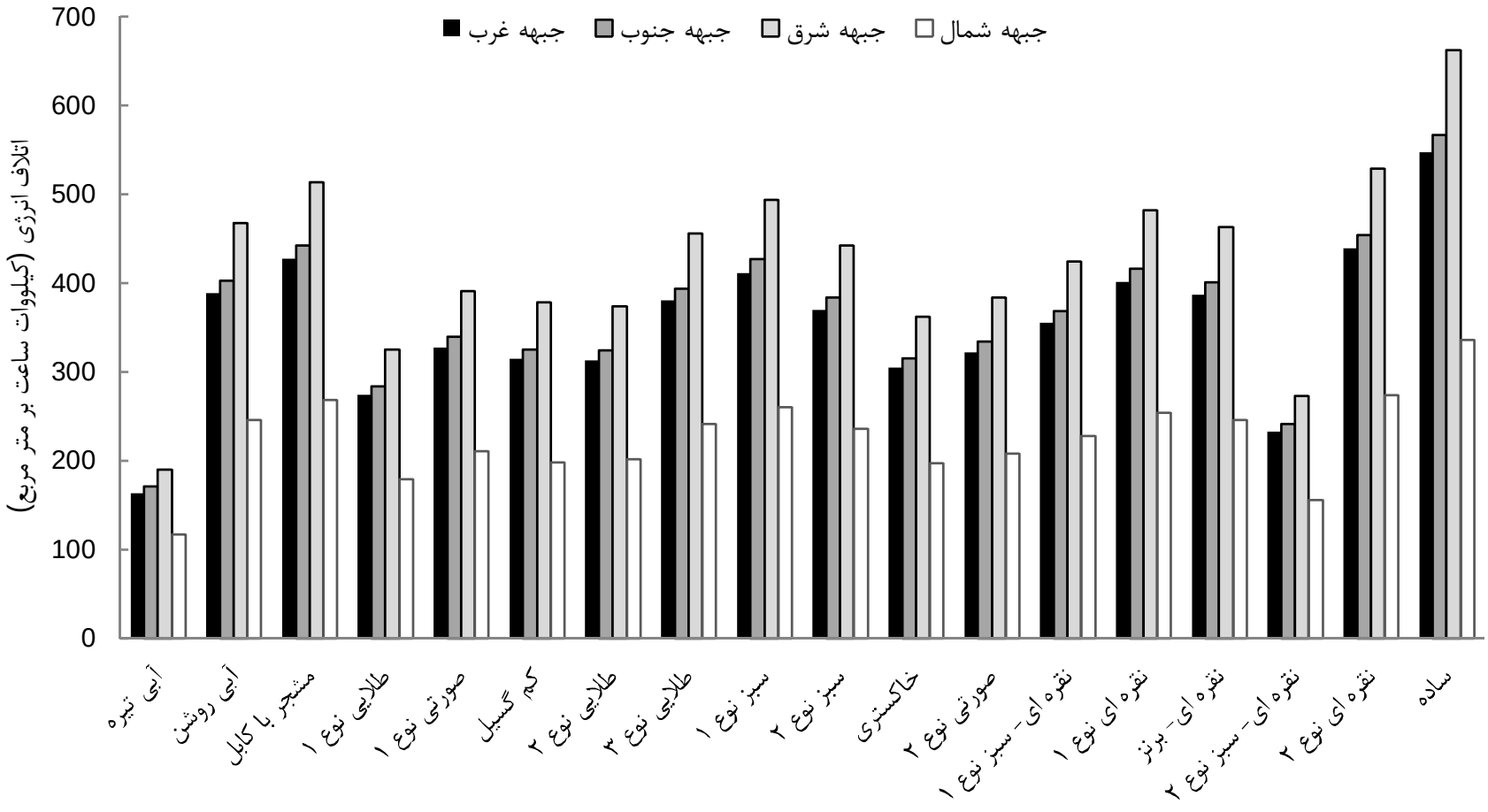
در شهر بندرعباس، بهره‌گیری از شیشه‌های دوجداره با پوشش کم‌گسیل روی سطح سوم جدار نورگذر، در اوقات سرد سال، نسبت به عملکرد حرارتی سایر جدارهای نورگذرِ بررسی‌شده، از اولویت ششم برخوردار است و اتلاف انرژی آن نسبت به شیشهٔ دوجدارهٔ شفاف در تمام جهت‌های جغرافیایی اصلی حدود 41 درصد کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که کاهش اتلاف انرژی مربوط به شیشهٔ پوشش‌دار با رنگ آبی نسبت به شیشهٔ دوجدارهٔ شفاف حدود 70 درصد است. به منظور مقایسهٔ جدارهای نورگذر، عملکرد حرارتی انواع شیشه‌های دوجدارهٔ پوشش‌دار نسبت به شیشهٔ دوجدارهٔ شفاف در جدول5 به صورت درصد نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل6، جدول5 و جدول6، مشاهده می‌گردد شیشه‌های دوجداره شفاف بدترین عملکرد را به لحاظ اتلاف انرژی در شهر بندرعباس دارند.

## 4-نتیجه‌گیری و توصیه‌های کاربردی

با توجه به محاسبات انجام‌شده برای شیشه‌های مورد مطالعه، نتایج به‌دست آمده، در دو قسمت، برای مناطق سردسیر (نظیر اردبیل) و گرم و مرطوب (نظیر بندرعباس) به شرح زیر ارائه می‌شود:

**مناطق سردسیر**

- در مناطق سردسیر (مانند شهر اردبیل)، انواع شیشه‌های قرارگرفته در جبههٔ جنوبی کمترین اتلاف انرژی از شیشه را در دورهٔ سرد سال نسبت به سایر جهت‌های جغرافیایی دارند.
- جهت‌های مناسب قرارگیری پنجره‌ها در شرایط سردسیر، به لحاظ کاهش اتلاف انرژی، به ترتیب اولویت عبارت‌اند از نمای جنوبی، نمای شرقی، نمای غربی، نمای شمالی.
- در اردبیل، شیشه‌های کم‌گسیل کمترین اتلاف انرژی را (با 97 درصد کاهش اتلاف انرژی نسبت به حالت شیشهٔ دوجدارهٔ ساده) دارند. به عبارت دیگر، کاهش انتقال حرارت از داخل به خارج در این اوقات سال، باعث پررنگ شدن سهم بهرهٔ خورشیدی و نزدیک شدن مقدار این دو به یکدیگر می‌شود.
- در اردبیل، بعد از شیشه‌های دوجداره با پوشش کم‌گسیل (قرارگیری پوشش کم‌گسیل روی سطح سوم)، شیشه‌های دوجدارهٔ شفاف از نظر کاهش اتلاف انرژی، دارای اولویت دوم هستند؛ ولی از نظر اقتصادی، با در نظر گرفتن هزینهٔ فعلی انرژی و این نوع شیشه‌ها، شیشه‌های دوجدارهٔ ساده دارای توجیه فنی و اقتصادی قوی‌تری هستند.




**شکل 6** میزان اتلاف انرژی جدارهای نورگذر در شهر بندرعباس در اوقات گرم سال در چهار جهت جغرافیایی



Archive of SID
www.SID.ir

**جدول 5** کاهش اتلاف انرژی (-) ناشی از کاربرد انواع شیشه‌های دو جداره پوشش‌دار نسبت به شیشه دوجداره شفاف در شهر بندرعباس (به درصد)

| نوع شیشه | جنوب | شرق | غرب | شمال |
|---|---|---|---|---|
| آبی تیره | -65/0 | -70/1 | -69/8 | -71/2 |
| آبی روشن | -26/8 | -28/9 | -29/0 | -29/4 |
| مشجر با کابل | -19/9 | -21/9 | -21/9 | -22/5 |
| طلایی نوع 1 | -46/6 | -49/8 | -49/9 | -50/9 |
| کم‌گسیل | -37/1 | -40/1 | -40/0 | -41/0 |
| صورتی نوع 1 | -40/9 | -42/4 | -42/5 | -42/8 |
| طلایی نوع 2 | -40/0 | -42/7 | -42/8 | -43/6 |
| طلایی نوع 3 | -28/1 | -30/5 | -30/4 | -31/2 |
| خاکستری | -22/5 | -24/7 | -24/7 | -25/4 |
| سبز نوع 1 | -29/5 | -32/3 | -32/3 | -33/2 |
| سبز نوع 2 | -41/3 | -44/3 | -44/3 | -45/3 |
| صورتی نوع 2 | -38/0 | -41/0 | -41/0 | -42/0 |
| نقره‌ای نوع 1 | -32/1 | -35/0 | -35/0 | -36/0 |
| نقره ای- سبز نوع 1 | -24/4 | -26/5 | -26/6 | -27/2 |
| نقره‌ای- برنز | -26/8 | -29/3 | -29/3 | -30/1 |
| نقره‌ای - سبز نوع 2 | -53/5 | -57/4 | -57/4 | -58/8 |
| نقره‌ای نوع 2 | -18/3 | -19/8 | -19/8 | 20/1 |

**جدول 6** میزان اتلاف انرژی سالانه از انواع شیشه‌های دوجدارهٔ مورد مطالعه در شهر بندرعباس به ترتیب اولویت (کیلووات ساعت بر مترمربع)

| نوع شیشه | جنوب | شرق | غرب | شمال |
|---|---|---|---|---|
| آبی تیره | 117/5 | 163/8 | 171/1 | 190/5 |
| نقره‌ای - سبز نوع 2 | 156/3 | 232/8 | 241/6 | 273/2 |
| طلایی نوع 1 | 179/2 | 274/4 | 284/1 | 325/3 |
| خاکستری | 197/2 | 304/8 | 315/6 | 362/6 |
| طلایی نوع 3 | 201/6 | 313/3 | 324/4 | 373/7 |
| کم‌گسیل | 198/6 | 315/0 | 325/8 | 378/7 |
| صورتی نوع 2 | 208/1 | 322/5 | 334/6 | 384/2 |
| صورتی نوع 1 | 211/4 | 327/9 | 340/1 | 390/8 |
| نقره ای- سبز نوع 1 | 228/2 | 355/3 | 368/5 | 424/3 |
| سبز نوع 2 | 236/7 | 370/1 | 384/0 | 442/5 |
| طلایی نوع 2 | 241/5 | 380/5 | 394/3 | 456/1 |
| نقره‌ای- برنز | 245/8 | 386/8 | 401/0 | 463/3 |
| آبی روشن | 245/9 | 389/1 | 402/6 | 467/8 |
| نقره‌ای نوع 1 | 254/0 | 401/9 | 416/4 | 482/4 |
| سبز نوع 1 | 260/3 | 411/9 | 426/8 | 494/3 |
| مشجر با کابل | 268/9 | 427/3 | 442/7 | 513/4 |
| نقره‌ای نوع 2 | 274/3 | 439/0 | 454/6 | 529/2 |
| ساده | 336/0 | 548/0 | 566/9 | 662/0 |

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، توصیه می‌شود در طراحی، تا حد امکان به پنجره‌های جنوبی اولویت داده شود، و تلاش شود بیشترین سطح پنجره‌ها در نمای جنوبی در نظر گرفته شود. از طرف دیگر، توصیه می‌شود شیشه‌های دوجداره کم‌گسیل و بی‌رنگ با ضریب عبور خورشیدی بالا مورد استفاده قرار گیرد، تا در دورهٔ سرد سال بیشترین بهرهٔ خورشیدی حاصل شود.

**مناطق گرمسیر**

- در شهر بندرعباس، انواع شیشه‌های قرارگرفته در جبههٔ شمالی کمترین اتلاف انرژی را در دورهٔ گرم سال، نسبت به سایر جهت‌های جغرافیایی، دارند.
- جهت‌های مناسب قرارگیری پنجره‌ها در این شهر، از نظر کاهش اتلاف انرژی از شیشه، به ترتیب اولویت عبارت‌اند از نمای شمالی، نمای غربی، نمای جنوبی، نمای شرقی.
- در این اقلیم، شیشه‌های منعکس‌کننده با زمینهٔ رنگی آبی تیره کمترین اتلاف انرژی را - با 70 درصد کاهش اتلاف انرژی نسبت به شیشهٔ دوجدارهٔ ساده - از خود نشان می‌دهند.
- در شهر بندرعباس، بهره‌گیری از شیشه‌های دوجداره با پوشش کم‌گسیل روی سطح دوم جدار نورگذر، نسبت به سایر شیشه‌های بررسی‌شده از نظر تلفات انرژی، از اولویت ششم برخوردار است و کاهش اتلاف انرژی آن نسبت به شیشهٔ دوجدارهٔ شفاف در تمام جهت‌های جغرافیایی حدود 41 درصد است.
- در شهر بندرعباس، کاربرد شیشه‌های دوجداره پوشش‌دار نسبت به شیشهٔ دوجدارهٔ شفاف به اتلاف انرژی کمتری در تمامی جهت‌های جغرافیایی می‌انجامد.
- در این مناطق، با کاربرد شیشه‌های رنگی منعکس‌کننده، هرچند اتلاف انرژی از شیشه کاهش می‌یابد، ولی با تحت‌الشعاع قرار دادن آسایش بصری و افزایش نیاز به بهره‌گیری از روشنایی مصنوعی (برای خنثی کردن اثر شیشه‌های رنگی)، اجرایی بودن این راه‌حل محل تردید است. به‌این‌ترتیب، به نظر می‌رسد شیشه‌هایی که زمینهٔ رنگی خنثی‌تر و گسیلندگی سطح دوم کمتری دارند، برای مناطق گرمسیر مناسب‌تر باشند.

در نتیجه، پیشنهاد می‌شود در زمان انتخاب شیشهٔ مناسب، علاوه بر عملکرد حرارتی و تلفات انرژی از شیشه‌ها، عملکرد شیشه‌ها در برابر عبور نور مرئی خورشید نیز در نظر گرفته شود.

به‌طور کلی، نتایج مربوط به منطقهٔ گرمسیر نشان می‌دهند که برای اجتناب از ورود بی‌رویهٔ حرارت در اوقات گرم سال، بهتر است از پنجره‌های شمالی بهره گرفته شود. از طرف دیگر، توصیه می‌شود با استفاده از شیشه‌های دوجدارهٔ پوشش‌دار منعکس‌کننده تیره، عبور تشعشع خورشیدی به کمترین میزان ممکن کاهش یابد، یا ترجیحاً، با بهره‌گیری از شیشه‌های دوجدارهٔ کم‌گسیل، انتقال حرارت از شیشهٔ خارجی به داخل ساختمان، تا حد امکان تقلیل یابد.

از طرف دیگر، نتایج نشان می‌دهند که برآورد میزان اتلاف انرژی مربوط به شیشه‌های گوناگون نیازمند در دست داشتن تمام مشخصات حرارتی مربوط به شیشه و انجام شبیه‌سازی‌ها و محاسبات پیچیده است.

## 5- مراجع

[1] J. Nagai, *Optical and chemical properties of electrochromic oxide films for smart windows,* Research Laboratory, Asahi Glass Co. Ltd, Yokohama , Japan, Electrochimica Acta 46 pp.2049–2053, 2001.

[2] C. Selle, M. Maaza, O. Nemraoui, Preparation & Characrerization of Properties of Sputtered Electrochromic & Thermochromic Devices, *Surface & Coating Technology* 98, pp.1477-1482, 1998.

[3] A. Georg, U. O. Kraxovec, Photoelectrochromic window with Pt catalyst, *Thin Solid Films* 502, pp. 246 – 251, 2006.

[4] A. Hauch, A. Georg, S. Baumgartner, U. O. Krasovec, B. Orel, New photoelectrochromic device, *Electrochimica Acta* 46, pp. 2131–2136, 2001.

[5] G. Xu, P. Jin, M. Tazawa, K. Yoshimura, Optimization of antireflection coating for VO2-based energy efficient window, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 83 pp. 29–37, 2004.

[6] M. Lee, J.Cho, *Better thermochromic glazing of windows with anti-reflection coating,* Department of Electronic Materials Engineering, University of Suwon, Suwon, South Korea, Thin Solid Films 365, 2000.

[7] M. H. Lee, Thermochromic glazing of windows with better luminous solar transmittance, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 71, pp. 537–540, 2002.



Archive of SID
www.SID.ir

[8] P.A.B. James, A.S. Bahaj, Smart glazing solutions to glare and solar gain: a 'sick building' case study, *Energy and Buildings* 37, pp. 1058–1067, 2005.

[9] M. Mc Grail, *Smart Window Technology,* Research for Duke Smart House, November 2005.

[10] P. Nitz, H. Hartwig, Solar control with thermotropic layers, *Solar Energy* 79 pp. 573–582, 2005

[11] W. J. Platzer, *Switchable Facade Technology,* Final technical report, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, July 2003

[12] J. Krc, M. Topic, F. Smole, Three-state regulator for electrochromic windows, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 71, pp. 387–395, 2002.

[13] H. Xia, L. Luob, G. Fraisseb, *Development and applications of solar-based thermoelectric technologies,* Provincial Laboratory of Green Chemical Technology, College of Chemical and Energy Engineering, University of Technology, Guangzhou, Guangdong, China, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, pp. 923–936, 2007.

[14] J.L. Rosenfeld, J. Platzer, W.J. Van Dijk, H.A. Maccari, Modelling the optical and thermal properties of complex glazing: overview of recent developments, *Solar Energy* 69 (Suppl. 6), pp.1–13, 2001.

[15] A. Orhan, Conjugate heat transfer analysis of double pane windows, *Building and Environment* 41, pp.109–116, 2006.

[16] M. Rivera, G. Álvarez, I. Morrison, J. Xamán, Appraisal of thermal erformance of a glazed office with a solar control coating: Cases in Mexico and Canada, *Building and Environment* 46, pp.1223-1233, 2011.

[17] T. Wang, L. Wang, B. Li, A model of the long-wave radiation heat transfer through a glazing, Energy and Buildings 59, pp.50–61, 2013.

[18] U.S. Department of Energy, http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/energyplus_ashrae_140_envelope.pdf , 2015/02/14

[19] The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California, The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, US Department OF Energy, 2007

Archive of SID


www.SID.ir