

ارزیابی عملکرد حرارتی و بصری پنجره در کلاس‌های درس در اقلیم شهر تهران^۱

زهرا سادات زمردیان^۲

استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

شهرام پوردیهیمی^۳

استاد دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

کلیدواژگان: آسایش حرارتی، آسایش بصری، شاخص فضا-زمانی، تابش خورشید، پنجره.

چکیده

تأمین شرایط محیطی مناسب برای فضاهای آموزشی، به دلیل تأثیر منفی عدم آسایش حرارتی و بصری بر یادگیری و عملکرد دانش‌آموزان، اهمیت زیادی دارد. شرایط نامناسب ناشی از گرم شدن بیش از حد فضا و یا خیرگی ناشی از تابش مستقیم خورشید می‌تواند با طراحی پنجره‌های مناسب کاهش یابد. از آنجایی که کاربران مجبور به نشستن در مکان‌های مشخص در کلاس‌های درس هستند، تحلیل‌های فضایی علاوه بر تحلیل‌های زمانی آسایش ضروری است. در این پژوهش، با بهره‌گیری از شاخص‌های فضا-زمانی آسایش حرارتی و بصری پیشنهادی، اثر طراحی پنجره بر آسایش، با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک در یک مدول کلاس درس در جهت‌گیری‌های مختلف در شرایط اقلیمی تهران، ارزیابی می‌شود. درصد پنجره، ضریب انتقال حرارت، ضریب عبور نور، ضریب دریافت تابش، و سایبان از جمله پارامترهای مورد ارزیابی در طراحی پنجره هستند. علاوه بر شاخص‌های آسایش حرارتی و بصری، میزان نیاز به انرژی برای تأمین سرمایش و گرمایش در حالت‌های مختلف بررسی

شده است. بر اساس نتایج، پنجره مناسب برای کلاس درس در جبهه‌های مختلف پیشنهاد می‌شود. با توجه به نتایج پنجره‌های با عملکرد بالا، که ضریب انتقال حرارت پایین و شیشه‌هایی با LSG بالا (ضریب دریافت تابش پایین و میزان عبور نور بالا) دارند، در همه جهات آسایش حرارتی فضا-زمانی را با ۳۵٪ پنجره تأمین می‌کنند. هرچند تأمین آسایش بصری در همه جهات، به‌جز شمالی، بدون بهره‌گیری از سایبان‌های مناسب، قابل دستیابی نیست. همچنین از شیشه‌های با LSG بالا زمانی به جای سایبان‌های خارجی می‌توان استفاده کرد که بهره‌گیری از آن‌ها به دلایل زیبایی، سازه‌ای، و یا دید امکان ندارد.

۱. مقدمه و پیشینه تحقیق

تأثیر کیفیت محیط داخلی بر سلامت، آسایش، و بهره‌وری افراد، بخصوص در فضاهای اداری و آموزشی، بسیار مورد توجه است. آسایش حرارتی و بصری از پارامترهای کیفیت محیط داخلی و اغلب مهم‌ترین نیازمندی‌های کاربران در ساختمان‌ها و منبع اصلی مصرف انرژی گزارش شده است^۴. بر اساس آمار از میان بخش‌های خدماتی عمومی، بخش آموزشی با در اختیار داشتن تقریباً ۱۱۰ هزار مدرسه و

۱. مقاله برگرفته از رساله دکتری معماری نگارنده اول است با عنوان آسایش حرارتی در فضاهای آموزشی در شهر تهران: کاربرد شاخص‌های فضا-زمانی برای ارزیابی آسایش که در بهمن‌ماه ۱۳۹۵ به راهنمایی نگارنده دوم در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی دفاع شده است.

۲. نویسنده مسئول؛

z_zomorodian@sbu.ac.ir

3. s-deihimi@sbu.ac.ir

۴. نک:

F. Van Dijken, et al, "Indoor Environment and Pupils' Health in Primary Schools".

پرسش‌های پژوهش

۱. آیا می‌توان معیاری برای ارزیابی کارایی پنجره‌ها، با در نظر گرفتن توزیع فضا-زمانی آسایش حرارتی و بصری، عرضه کرد؟

۲. چه پارامترهایی در طراحی پنجره بر آسایش حرارتی و بصری بیشترین تأثیر را دارند؟

۳. چه نوع پنجره‌ای برای کلاس‌های درس در شرایط اقلیمی تهران مناسب است؟

مؤسسه آموزش عالی سهم قابل توجهی در مصرف انرژی این بخش دارد. به طور میانگین ۹٪ از انرژی مصرفی صرف تأمین روشنایی، ۷۶٪ صرف تأمین گرمایش و ۱۰٪ صرف تأمین سرمایش برای فراهم کردن شرایط آسایش بصری و حرارتی می‌شود^۵. تأمین این موارد به‌شدت بر سلامتی و بهره‌وری متصرفین فضاهای آموزشی تأثیرگذار است. از سوی دیگر، فضاهای آموزشی در کشور ما عمدتاً در طول ساعات ۸:۰۰ تا ۱۵:۰۰ در فصول پاییز، زمستان، و بهار بهره‌برداری می‌شوند و در ساعات دیگر به صورت عمده فاقد بهره‌بردار هستند. از این رو در صورتی که امکان تأمین حداکثر آسایش و مصرف حداقل انرژی در طول ساعات فوق در این فضاها مقدور باشد، ظرفیت قابل توجهی برای بهبود طراحی فضا ایجاد گردیده است، بخصوص در اقلیمی متعادل و میانه، در صورت داشتن امکان بهره‌گیری از طراحی ایستا در تأمین آسایش، موضوع طراحی پوسته خارجی بنا، که به صورت جدی‌تری مدخل تبادل انرژی است، مد نظر خواهد بود. همین امر موجب شده است در سال‌های اخیر توجه به روش‌های طراحی و ساخت و ارزیابی نما از بعد کارایی انرژی و قابلیت تأمین آسایش آن بیشتر در مطالعات مورد نظر باشد. انرژی جداری خارجی نما بر عملکرد عایق حرارتی اجزا، به‌ویژه بخش غیر شفاف آن، و بر هواپندی بهتر، پنجره‌های با عملکرد بهتر (شیشه و قاب)، و نیز بهره‌گیری مناسب‌تر از منابع انرژی و عملکرد مصالح اثر می‌گذارد^۶. توجه به پنجره، این شریان اصلی نور روز و در عین حال ضعیف‌ترین نقطه ساختمان از نظر اتلاف حرارتی، و تأثیر بنیادی آن بر مقدار مصرف انرژی، و نیز شرایط آسایش داخلی، این نوع مطالعات را گسترده‌تر و لزوم آن را بیشتر کرده است. پنجره‌های بزرگ در ساختمان‌های آموزشی که به صورت معمول و در نمونه‌های رایج کشور عموماً فاقد سایبان هستند، گرچه نور روز زیادی فراهم می‌کنند، اما به همین نسبت موجب ایجاد خیرگی و گرمایش بیش از حد فضا نیز می‌گردند. مضاف اینکه کوران هوا و نیز عدم تقارن تابشی این سطوح بزرگ احساس عدم آسایش و یا تفاوت در شرایط آسایش را، بخصوص برای متصرفین مستقر در نزدیکی آن، ایجاد می‌کند. این امر در کنار این موضوع که اغلب اوقات کاربران نمی‌توانند محل استقرار خود در کلاس را به‌سادگی تغییر دهند و یا پرده‌های داخلی را متناسب نظر خود باز و بسته کنند، منجر به تشدید این احساس عدم آسایش خواهد شد. بنا بر این تابش مستقیم که بر آسایش بصری^۷ و حرارتی^۸ تأثیرگذار

۵. نک: ب. شفیع، روش‌های بهینه مصرف برق در مدارس.
۶. نک:

A.M. Atzeri, et al, "Comfort Metrics for an Integrated Evaluation of Buildings Performance".

۷. نک:

Standard IES LM-83-12, Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE).

۸. نک:

E. Arens, et al, "Modeling the Comfort Effects of Short-wave Solar Radiation Indoors".

از حد و کاهش بار سرمایش در ساختمان‌ها هستند، در مقالات متعددی مطالعه شده است. ابو هیجله و حامد^{۲۰} معتقدند که استفاده از سایبان‌های بهینه ثابت در مقایسه با سایبان‌های دینامیک منجر به مصرف انرژی کمتری می‌گردد.

تمرکز اغلب مطالعات بر مصرف انرژی (گرمایشی، سرمایشی، و روشنایی) بوده و سطوح آسایش کمتر بررسی شده است. در مطالعات معدودی آسایش حرارتی و بصری در خصوص مشخصات پنجره برای ارزیابی‌ها از شاخص‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت استفاده شده‌اند. در زمینه آسایش حرارتی تقریباً در همه مطالعات شاخص‌های کوتاه‌مدت نظیر میانگین آرای پیش‌بینی‌شده (PMV) و درصد نارضایتی پیش‌بینی‌شده (PPD)^{۲۱} را در زمان و موقعیت مشخصی در فضا به کار برده شده‌اند. در تعداد کمی از مطالعات از شاخص‌های طولانی‌مدت نظیر ساعات عدم آسایش وزن‌یافته^{۲۲} بهره گرفته‌اند. برخلاف ارزیابی‌های نور روز که به صورت فضایی صورت می‌گیرد، در مطالعات اندکی تحلیل‌های آسایش حرارتی فضایی مد نظر بوده‌اند^{۲۳}، در حالی که در اکثر مطالعات تنها شاخص‌ها را در نقطه مرکزی فضا محاسبه می‌کنند.

اغلب این مطالعات در فضاهای اداری و مسکونی با در نظر گرفتن تعداد افراد کمتر و زمان اشغال بیشتر انجام شده است؛ اما در فضای کلاس، که قابلیت حضور در آن به شدت تحت تأثیر شرایط حرارتی و بصری محیط است، کمبود مطالعات احساس می‌شود.

از این رو مقاله حاضر، مبتنی بر مطالعات رساله دکتری نویسنده اول به راهنمایی نویسنده دوم مقاله، الگویی برای توزیع فضا- زمانی آسایش حرارتی- بصری، به مثابه معیاری برای طراحی پنجره‌های کلاس‌های درس است. در این پژوهش که از طریق شبیه‌سازی انجام می‌پذیرد، با استفاده از شاخص‌های طولانی‌مدت آسایش حرارتی و بصری، اثر ساختار پنجره (نظیر مشخصات شیشه، ابعاد، و سایبان‌ها) بر یکنواختی آسایش

است و می‌تواند شرایط عدم آسایش و نتیجتاً نیاز به انرژی برای تأمین روشنایی و سرمایش را افزایش دهد، باید در مراحل اولیه طراحی مورد توجه باشد.

پیش از این تأثیر ساختار پنجره‌ها بر آسایش حرارتی^۹، مصرف انرژی^{۱۰}، و نیز آسایش بصری^{۱۱} مطالعه شده است و به این منظور پارامترهای طراحی پنجره، نظیر جهت، نسبت پنجره به دیوار، مشخصات شیشه (اعم از ضریب انتقال حرارتی، ضریب دریافت حرارت خورشیدی^{۱۲}، و ضریب عبور نور، و نیز سایبان‌های داخلی و خارجی^{۱۳}) عمدتاً از طریق شبیه‌سازی و نیز به‌ندرت از طریق روش‌های تجربی^{۱۴} بررسی شده است.

هی و همکاران^{۱۵} اثر شیشه پنجره بر نور روز و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها و نیز روش‌های مختلف بهینه‌سازی، که در مطالعات به کار گرفته شده را بررسی و روش‌های ارزیابی فی- اقتصادی را برای انتخاب شیشه‌های مناسب پیشنهاد کرده‌اند. اجیب و جابر^{۱۶} با لحاظ کردن هزینه‌های انرژی و سرمایه‌گذاری، تأثیر ضریب انتقال حرارتی پنجره، ابعاد، و جهت را بر نیاز به انرژی سرمایشی و گرمایشی سالیانه بررسی کرده‌اند. گارنیز و همکاران^{۱۷} اثر نور روز، ضریب انتقال حرارتی، و ضریب دریافت حرارت خورشیدی را برای رسیدن به طرح بهینه پنجره مطالعه کرده‌اند؛ همچنین لی و همکاران^{۱۸} اثر ابعاد پنجره، جهت، ضریب عبور نور، ضریب انتقال حرارتی، و ضریب دریافت حرارتی خورشیدی شیشه را مطالعه کردند تا ترکیب بهینه پنجره در ساختمان‌های اداری را در پنج محدوده اقلیمی در آسیا تعیین کنند.

بایور و بوبکری^{۱۹} تأثیر ابعاد پنجره بر خیرگی را بر مبنای ادراک خیرگی متصرفین و الگوریتم‌های پیش‌بینی خیرگی در یک مدل اداری بررسی کردند و نشان دادند که بر اساس محاسبات خیرگی کمتری نسبت به شرایط واقعی پیش‌بینی می‌شود.

سایبان‌ها که ابزاری پایه برای پیشگیری از گرمایش بیش

۹. نک:

C. Huizenga, et al, "Window Performance for Human Thermal Comfort".

۱۰. نک:

M.N. Inanici & F.N. Demirebilek, "Thermal Performance Optimization of Building Aspect Ratio and South Window Size in five Cities Having Different Climatic Characteristics of Turkey".

۱۱. نک:

M.A. Fasi & I.M. Budaiwi, "Energy Performance of Windows in Office Buildings Considering Daylight Integration and Visual Comfort in Hot Climates".
12. Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)

۱۳. نک:

Tsikaloudaki, et al, "The Energy Performance of Windows in Mediterranean Regions".

۱۴. نک:

L. Vanhoutteghem, et al, "Impact of Façade Window Design on Energy, Daylighting and Thermal Comfort in Nearly zero-Energy Houses".

۱۵. نک:

W.J. Hee, et al, "The Role of Window Glazing on Daylighting and Energy Saving in Buildings".

حرارتی و بصری در فضا در طول زمان بهره‌برداری ارزیابی می‌شود. به‌کارگیری شاخص‌های طولانی‌مدت در یک مدل کلاس رایج در شرایط اقلیمی شهر تهران، و در چهار جهت‌گیری شمالی، شرقی، جنوبی، و غربی بررسی شده است. شاخص‌های استفاده‌شده تغییرات زمانی (ساعتی، روزانه، و فصلی)، و اختلاف سطوح آسایش در فضا در نظر هستند. همچنین میزان مصرف انرژی برای تأمین گرمایش و سرمایش در ساختارهای مختلف بررسی شده است. در نتایج در قالب نمودارهایی، روشی برای تبیین ترکیب بهینه پنجره‌ها برای فضای کلاس درس نمایش داده شده است. این تحلیل‌های فضا- زمانی آسایش در محیط داخلی طراح را قادر به ارزیابی تفصیلی طرح خود می‌کند، طرحتی که ایجاد فضایی هم‌نواخت، به‌ویژه در کلاس‌های درس، را برای بهره‌گیری حداکثر از فضا فراهم می‌کند.

۲. روش‌شناسی

روش‌شناسی پژوهش حاضر شامل دو بخش است در بخش اول شاخص‌های ارزیابی آسایش حرارتی و آسایش بصری معرفی و محدوده قابل قبول آن‌ها مشخص و سپس فرایند شبیه‌سازی شامل مشخصات مدل‌های مورد ارزیابی و نرم‌افزار بررسی می‌شود.

۲.۱. شاخص‌های ارزیابی

۲.۱.۱. آسایش حرارتی فضا- زمانی (STCA)

کارلوسی و همکاران بیش از هفتاد شاخص را برای ارزیابی آسایش حرارتی جمع‌آوری و در دو دسته اصلی عرضه کرده‌اند: شاخص‌های کوتاه‌مدت برای ارزیابی آسایش حرارتی فرد در یک موقعیت و زمان مشخص، و بلندمدت برای ارزیابی آسایش حرارتی در زمان اشغال و در تمام زون‌های ساختمان، که دومی به صورت درصدی، تجمیعی، ریسک (ریسک بیش گرمایش)، و میانگین بیان می‌شود. این شاخص‌ها در استانداردهای آسایش حرارتی حاضر نظیر ISO 7730، EN 15251 و ASHRAE 55 استفاده می‌شوند.^{۳۴}

اگرچه فنگر در ۱۹۷۰ فاکتور سطح نمایان^{۳۵} را با عنوان پارامتر تابشی وابسته به هندسه و جهت مطرح کرد، در استانداردهای امروزی موضوعات مهمی نظیر تابش مستقیم خورشید در ارزیابی آسایش لحاظ نمی‌شوند. تابش خورشید ممکن است موجب عدم آسایش گردد، و به نیاز سرمایشی مازاد بیانجامد. دمای متوسط تابشی و در نتیجه آن شاخص‌های آسایش (میانگین آرای پیش‌بینی‌شده، درصد نارضایتی پیش‌بینی‌شده، و دمای عامل^{۳۶}) در لحظات و نقاط مختلف فضا، بسته به مقدار تابش مستقیم دریافتی و فاصله از سطوح گرم و سرد (نظیر پنجره‌ها، دیوارها، و منابع حرارتی) متفاوت است. اثر دریافت تابش مستقیم در مطالعات محدودی بررسی شده است. لا گنسا و همکاران^{۳۷} مدلی را برای محاسبه دمای متوسط تابشی افراد در محیط داخلی با وجود تابش خورشیدی عرضه کرده و از آن برای ارزیابی آسایش در نقاط مختلف اتاق، بر اساس شاخص PMV استفاده کرده‌اند. چان و ماک^{۳۸} و نیز بسودو و همکاران^{۳۹} این مدل را برای ارزیابی آسایش حرارتی فضایی یک دفتر اداری و در مجاورت یک نمای شیشه‌ای به کار بردند. کاپلتی و همکاران^{۴۰} این مدل را برای ارزیابی مصرف انرژی و آسایش حرارتی فضایی یک ساختمان اداری با ترکیبات مختلف پنجره و سایبان از طریق شبیه‌سازی به کار گرفتند. بعدها، آرنز و همکاران^{۴۱} یک مدل ساده به نام سولارکل^{۴۲} برای ارزیابی اثر تابش مستقیم خورشید بر آسایش حرارتی متصرفین ایجاد کردند که در برابر اندازه‌گیری در شرایط آزمایشگاهی تأیید شده است.

در مطالعات فوق شاخص‌های زیر را برای ارزیابی فضا- زمانی آسایش حرارتی بر اساس مدل تعادل حرارتی و تطبیقی بیان کرده‌اند:

- درصد آسایش حرارتی (TCP)^{۳۳} و اتونومی آسایش حرارتی (TA)^{۳۴} به درصد زمانی که یک نقطه مشخص از فضا در محدوده آسایش حرارتی قرار می‌گیرد.
- فراهمی آسایش حرارتی (TCA)^{۳۵}، درصد زمانی که آسایش حرارتی در محدوده قابل قبول (مقادیر PPD کمتر از ۱۰٪)

۱۶. نک:

S. Jaber & S. Ajib, "Thermal and Economic Windows Design for Different Climate Zones".

۱۷. نک:

C. Garnier, et al, "Super Insulated Aerogel Windows: Impact on Daylighting and Thermal Performance".

۱۸. نک:

J.W. Lee, et al, "Optimization of Building Window System in Asian Regions by Analyzing Solar Heat Gain and Daylighting Elements".

۱۹. نک:

M. Boubekri & L.L. Boyer, "Effect of Window Size and Sunlight Presence on Glare".

۲۰. نک:

F. Hammad & B. Abu-Hijleh, "The Energy Savings Potential of Using Dynamic External Louvers in an Office Building".

21. Predicted Mean Vote (PMV) - Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)
22. Weighted Discomfort Hours

۲۳. نک:

F. Cappelletti, et al, "Passive Performance of Glazed Components in Heating and Cooling of an Open-space Office under Controlled Indoor Thermal Comfort".

باشد، و دسترسی به آسایش حرارتی فضایی (STCA₁₀-۹۰)^{۳۶} در صدی از فضا است که در آن TCA حداقل ۹۰٪ باشد.^{۳۷} TCP و TA بر مبنای مطالعات قبلی و با پاره‌ای تغییرات انتخاب شده‌اند تا در ارزیابی آسایش حرارتی در فضای کلاس درس در این تحقیق استفاده شوند. شاخص TA برای ارزیابی آسایش حرارتی در نقطه مرکزی و شاخص TCP برای ارزیابی در نقاط مختلف شبکه تحلیل استفاده شده است. دمای عامل شاخص دمایی آسایش حرارتی است. بازه آسایش استاندارد برای کلاس‌ها و شرایط محلی ۲۱-۲۷ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود. TA درصدی از زمان تصرف (۱۷۲۸ ساعت در طول سال تحصیلی) است که دمای عامل در بازه مورد اشاره قرار می‌گیرد. برخلاف مطالعات قبلی این شاخص با فرض وجود سیستم سرمایش و گرمایش در میانه اتاق محاسبه شده است. TCP درصد زمانی در محدوده آسایش در هر نقطه از شبکه تحلیل و STCA نسبت فضایی است که TCP در حداقل ۸۰٪ زمان تصرف در بازه آسایش قرار دارد. از آنجایی که کلاس‌ها، با توجه به زمان استراحت بین کلاس‌ها در طول زمان معمول اشغال (۸:۰۰ صبح تا ۱۵:۰۰)، متصرف دائمی ندارند، آستانه قابل قبول اندازه آسایشی است که قرارگیری در بازه آسایش در ۸۰٪ زمان تصرف برای هر نقطه از شبکه تحلیل در فضا کافی دانسته شود. STCA₂₁₋₂₇، ۸۰٪ حاصل تقسیم تعداد نقاطی است که آستانه ۸۰٪ آسایش را فراهم می‌کنند به کل نقاط شبکه تحلیل در تراز سر متصرفین (۱/۱ متر). محدوده مجاور پنجره در ارزیابی فضایی آسایش حرارتی بحرانی است و فاصله عمودی ۱/۵ متری از سطح پنجره (۲۰٪ سطح کف) محدوده قابل قبول با حداکثر عدم آسایش فرض می‌شود. بنا بر این در ارزیابی‌ها ۸۰٪، آستانه قابل قبول STCA دانسته می‌شود.

$$STCA = \sum_{k=i}^N TCP_k * 1/N \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$TCP_k = 1 \text{ if } TCP_i > 80\% \quad TCP_k = 0 \text{ if } TCP_i < 80\%$$

در این رابطه N تعداد نقاط شبکه تحلیل در تراز ۱/۱ و TCPI درصد زمانی در محدوده آسایش در نقطه i است.

۲.۱.۲. یکنواختی فضایی نور روز و عدم آسایش بصری

تقریباً در همه مطالعات در خصوص نور روز، شاخص‌های استاتیک نور، نظیر فاکتور نور روز (DF)^{۳۸}، یکنواختی، و روشنایی، به کار می‌روند. در حالی که شاخص‌های دینامیک جدید، نظیر یکنواختی نور روز (DA)^{۳۹}، یکنواختی فضایی نور روز (sDA)^{۴۰}، قرارگیری در معرض تابش خورشید سالیانه (ASE)^{۴۱}، و روشنایی نور روز قابل استفاده (UDI)^{۴۲}، برای تحلیل ترکیبات طراحی پنجره در مطالعات محدودی^{۴۳} به کار رفته است. sDA و ASE شاخص‌های ارزیابی جامعی هستند که با ترکیب زمان و فضا، در بسیاری از روش‌های سنجش عملکرد ساختمان نظیر LEED^{۴۴} (۲۰۱۳) استفاده شده است. sDA، مورد استفاده برای تعیین یکنواختی فضایی نور روز، شاخصی است که نسبت ساعات بهره‌برداری سالیانه با مقدار مشخص نور روز در دسترس را با سطح روشنایی و نسبت زمانی نشان می‌دهد. یکنواختی نور روز فضایی (sDA_{300lx-50%}) نشان‌دهنده درصد مساحت فضایی است که حداقل در ۵۰٪ زمان تصرف، حداقل ۳۰۰ لوکس روشنایی طبیعی تأمین کند. طبق استاندارد لید در سیستم ارزیابی، بر مبنای شبیه‌سازی، دستیابی به حداقل ۵۵٪ از sDA_{300lx-50%} در فضا برای گرفتن امتیاز الزامی است.^{۴۵}

sDA در این مطالعه یک ضابطه برای ارزیابی فضا- زمانی نور در فضا است. از آنجا که سطح روشنایی مناسب در تراز میز کار (۰/۸۵ متر) برای خواندن و نوشتن در کلاس درس ۵۰۰ لوکس است «sDA_{500lx, 50% = 55%}» حد پایین قابل قبول نور روز دانسته می‌شود. در این ضابطه برای نور روز قابل قبول حد بالا در نظر نیست، پس نمی‌تواند آسایش بصری را تضمین کند، زیرا که روشنایی زیاد سبب ایجاد خیرگی می‌شود.

عدم آسایش ناشی از خیرگی در نتیجه کنتراست زیاد و

نک: ۲۴

S. Carlucci, et al, "Statistical Analysis of Ranking Capability of Long-term Thermal Discomfort Indices and their Adoption in Optimization Processes to Support Building Design". 25. Projected area factor

۲۶. زمانی که سرعت جریان هوا در ساختمان کمتر از ۰/۱ متر بر ثانیه باشد، ضریب انتقال حرارت همرفتی و تابشی اغلب برابر است و میتوان دمای عامل را به صورت میانگین دمای متوسط تابشی و دمای هوا تعریف کرد.

نک: ۲۷

M. La Gennusa, et al, "A Model for Managing and Evaluating Solar Radiation for Indoor Thermal Comfort".

نک: ۲۸

M. Chan & C. Mak, "Thermal Comfort Levels in a Room with Solar Radiation".

نک: ۲۹

M. Bessoudo, et al, "Indoor Thermal Environmental Conditions near Glazed Facades with Shading Devices- Part I: Experiments and Building Thermal Model".

نک: ۳۰

F. Cappelletti, et al, "Energy Performance And



تغییرات روشنایی در زمینه دید با شاخص‌ها و ضوابط متعددی شناسایی می‌شود. در ضوابط مبتنی بر روشنایی، نظیر روشنایی سطح کار، که در راهنماهای طراحی نظیر استاندارد IES LM-۷۹-۸۳-۱۲ استفاده شده است، بیش از ۱۰۰۰ لوکس را برای بیش از تعداد ساعات مشخصی (۲۵۰ ساعت) توصیه نمی‌شود. برای تشریح اینکه چه مقدار از فضا مقدار نور خورشید بیش از حد دریافت می‌کند، شاخص قرارگیری در معرض نور خورشید سالیانه (ASE)^{۴۷} به کار می‌رود. از آنجا که تحقیقات قبلی^{۴۸} نشان داده‌اند که آستانه ۱۰۰۰ لوکس بسیار کم است، و چشم انسان توانایی تطبیق با میزان بالاتری از روشنایی را، بخصوص در مناطق با مقدار تابش زیاد دارد^{۴۹}، شاخص ASE در این مطالعه استفاده نشده است.

در میان شاخص‌های مختلف خیرگی شاخص خیرگی نور روز (DGI)^{۵۰}، درجه‌بندی خیرگی یکپارچه (UGR)^{۵۱}، احتمال خیرگی نور روز (DGP)^{۵۲}، احتمال آسایش بصری (VCP)^{۵۳}، در این مطالعه DGP انتخاب شد، چرا که بیشترین عوامل دخیل در عدم آسایش بصری را لحاظ می‌کند و برای پیش‌بینی خیرگی ناشی از نور طبیعی مناسب‌تر است. DGP بیش از ۰/۴۵ برابر

است با خیرگی تحمل‌ناپذیر. از یک روش ساده‌شده (رابطه ۲) برای محاسبه DGP بر مبنای روشنایی عمودی در تراز چشم (Ev)^{۵۴} در هر نقطه از شبکه مفروض ارزیابی در ارتفاع چشم فرد نشسته استفاده شده است.

$$DGP = 6.22 * 10^{-5} * Ev + 0.184 \quad (\text{رابطه ۲})$$

با تجاوز Ev از ۲۶۷۰ لوکس، مقدار DGP به ۰/۳۵، حد پایین مقادیر قابل قبول خیرگی، می‌رسد و حد بالای خیرگی قابل قبول، یعنی ۰/۴۵، هنگامی رخ می‌دهد که Ev به ۴۲۷۶ لوکس برسد. با این شاخص اثر کلی روشنایی عمودی، شامل نور انتقالی پراکنده و مستقیم، و سهم بازتاب‌های داخلی، ارزیابی می‌شود^{۵۵}.

عدم آسایش بصری (VD)^{۵۶}، درصد زمان تصرف با $DGP > 0.45$ است که در هر نقطه از شبکه مفروض محاسبه شده و برای ارزیابی شاخص عدم آسایش بصری فضایی^{۵۷} $SVD_{0.45-20\%}$ ، طبق «رابطه ۳» به کار گرفته شده است. DGP بیش از ۰/۴۵ در بیش از ۲۰٪ زمان تصرف با عنوان عدم آسایش ارزیابی می‌شود. نظر به این واقعیت که تابش خورشیدی مستقیم موجب می‌گردد که متصرفین پرده‌ها و کرکره‌ها را ببندند و مانع ورود روشنایی طبیعی شوند، در مقایسه با ضوابط آسایش حرارتی که در آن تا ۲۰٪ عدم آسایش در فضا قابل قبول است، آستانه محدودتری (۱۰٪) برای عدم آسایش بصری در نظر گرفته شده است.

$$SVD = \sum_{k=1}^N VD_k * 1 / N \quad (\text{رابطه ۳})$$

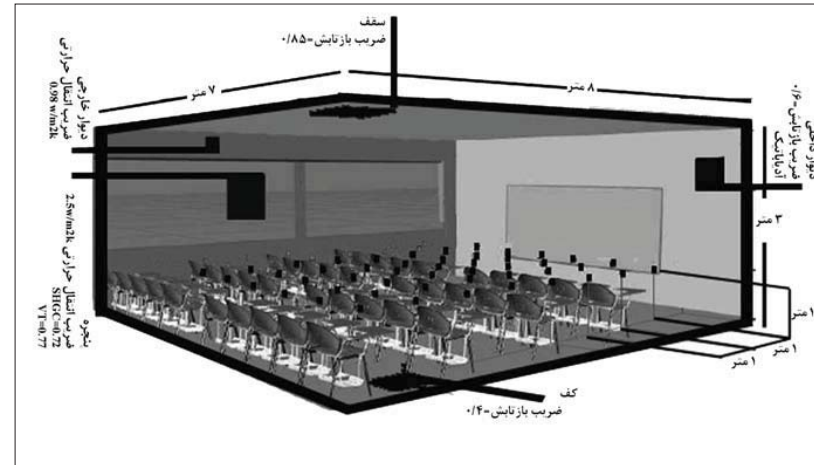
$$VD_k = 1 \text{ if } VD_i \geq 20\% \quad VD_k = 0 \text{ if } VD_i < 20\%$$

در این رابطه N تعداد نقاط شبکه تحلیل و VDi عدم آسایش بصری در نقطه i است. دو شاخص sDA و SVD برای ارزیابی ترکیبات مختلف پنجره به کار گرفته شده است.

Long-Term Evaluation Of Internal Thermal Comfort of an Office Building with Different Kinds of Glazing Systems and Window Sizes".
۳۱. نک: Arens, et al, ibid

- 32. SolarCal
- 33. Thermal Comfort Percentage (C. Mackey, "Pan Climatic Humans-Shaping Thermal Habits in an Unconditioned Society").
- 34. Thermal Autonomy (B.L. Author, et al, "Thermal Autonomy as Metric and Design Process").

ت ۱. مدل سه‌بعدی کلاس و مشخصات آن، تدوین: زهراسادات زمردیان.



۳.۱.۲. انرژی اولیه

ساختار پنجره بر میزان مصرف انرژی گرمایشی، سرمایشی، و روشنایی ساختمان به شدت اثر می‌گذارد و در تحقیقات مختلفی بررسی شده است. در مطالعات معمولاً انرژی کل شامل مجموع انرژی برای گرمایش، سرمایش، و روشنایی معیار ارزیابی‌ها هستند. به دلیل اینکه معمولاً انرژی گرمایشی از گاز طبیعی و انرژی سرمایشی و روشنایی از برق تأمین می‌گردد، میزان انرژی گرمایشی، سرمایشی، و روشنایی را نمی‌توان با یک میزان اهمیت در تحلیل‌ها مطالعه کرد، چرا که از نظر زیست‌محیطی، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن برق به ازای واحد انرژی بسیار بیشتر از میزان انتشار دی‌اکسیدکربن توسط گاز طبیعی و از نظر اقتصادی نیز قیمت برق بسیار بیشتر از قیمت گاز طبیعی است. دلیل این امر این است که بخش عمده برق کشور از انرژی‌های فسیلی و با بازدهی اندک تأمین می‌گردد. بنا بر این برای تحلیل‌ها و انتخاب پنجره بهینه، انرژی اولیه معیار ارزیابی در نظر گرفته می‌شود که میزان بازدهی نهایی (تولید و انتقال) را نیز در خود دارد و در نتیجه رابطه مستقیمی با میزان آلودگی و هزینه نهایی عامل‌های مختلف انرژی دارد. برای محاسبه انرژی اولیه از فاکتورهای انرژی اولیه برای برق (۳/۷) و گاز (۱/۰) در ایران استفاده می‌گردد^{۵۸}. مقدار انرژی اولیه در آنالیزها بر اساس «رابطه ۴» محاسبه شده است. (رابطه ۴) انرژی گرمایشی* ۱/۰ + انرژی سرمایشی* ۳/۷ = انرژی اولیه

۲.۲. فرایند شبیه‌سازی

۱.۲.۲. مدول‌های مورد بررسی و شرایط اقلیمی بستر

به منظور بررسی اثر ترکیبات طراحی پنجره بر شاخص‌های فوق، نخست یک کلاس با شرایط رایج به مساحت ۵۶ متر مربع و با ارتفاع سه متر تا زیر سقف، واقع در میانه یک ساختمان آموزشی (ت ۱) در نرم‌افزار راینو^{۵۹} با شباهت تقریبی به شرایط واقعی، از نظر مصالح، تراکم، و الگوی تصرف، مدل پایه شبیه‌سازی شد (ت ۲).

نمای پنجره هم‌جوار شرایط اقلیم خارجی است، در حالی که سایر سطوح (دیوارهای پشت و کناری، کف، و بام) هم‌دما فرض شده است. با در نظر گرفتن ارتفاع کف پنجره ۱/۱ متر و فاصله ۰/۳ متری بالای آن تا زیر سقف، نسبت پنجره به دیوار در مدل پایه ۰/۵۵٪ در نظر گرفته شد، که فاقد هر نوع سایبان داخلی و خارجی نیز هست.

برای ارزیابی اثر پنجره با خصوصیات مختلف بر شرایط حرارتی و بصری داخلی، ۹ گونه از شیشه‌های موجود در بازار با سه نوع پنجره به دیوار با درصد‌های مختلف (۰/۱۵٪، ۰/۳۵٪ و ۰/۵۵٪) در چهار جهت شمال، جنوب، شرق، و غرب شبیه‌سازی شده است. از آنجا که ایده تفکیک کنترل نور روز و دریافت حرارتی خورشیدی اهمیت زیادی دارد، نسبت دریافت نور به تابش خورشیدی (LSG)^{۶۰} پنجره‌های مورد مطالعه بررسی شد (ت ۳). برای تأمین نور روز یکنواخت، به جای یک پنجره واحد، پنجره‌های متعدد با ارتفاع کف پنجره ۱/۱ و ارتفاع ثابت ۱/۷، بر طبق مقررات، در نظر گرفته شدند. گرچه مطابق مقررات ملی ساختمانی ایران (مبحث ۱۹)^{۶۱} دو گونه اول این فهرست قابل پذیرش نیستند، برای نشان دادن تأثیر ضریب انتقال حرارتی بر شاخص‌های آسایش حرارتی فضایی بررسی شده‌اند. مشخصات ذکر شده در جدول «ت ۳» از NFRC^{۶۲} اخذ شده است. در همه پنجره‌ها از فریم‌های آلومینیومی با پل حرارتی استفاده شده است.

پارامتر	مقدار
برنامه زمانی حضور افراد	۸:۰۰ تا ۱۵:۰۰، اول مهر تا آخر خرداد
دمای مبنای دوره گرمایش و سرمایش (C)	۲۲ و ۲۶
تعداد نفرات در واحد سطح (نفر/m ²)	۰/۵۳
نفوذ هوا (ACH)	۰/۵
تهویه به‌ازای هر نفر بر اساس استانداردASHRAE	۱۵ cfm
قاب پنجره	قاب آلومینیومی با شکست حرارتی

35. Thermal Comfort Availability
 36. Spatial Thermal Comfort Availability
 ۳۷. نک: Atzeri, et al, ibid.
 38. Daylight Factor
 39. Daylight Autonomy
 40. Spatial Daylight Autonomy
 41. Annual Sunlight Exposure
 42. Useful Daylight Illuminance
 ۳۳. نک: C. Reinhart, "Opinion: Climate-based Daylighting Metrics in LEEDv4-A Fragile Progress".
 44. Leadership in Energy and Environmental Design
 45. U.S. Green Building Council, *LEED V4 for Building Design and Construction*, p. 130.
 ۴۶. نک: Hammad & Abu-Hijleh, ibid.
 47. Annual Sunlight Exposure
 ۴۸. نک: Reinhart, ibid.
 ت ۲. پارامترهای ثابت در مدل‌سازی، تدوین: نگارندگان.

S.S. Korsavi, et al, "Visual Comfort Assessment of Daylight and Sunlight Areas: A Longitudinal Field Survey in Classrooms in Kashan".
50. Daylight Glare Index
51. Unified Glare Rating
52. Daylight Glare Probability

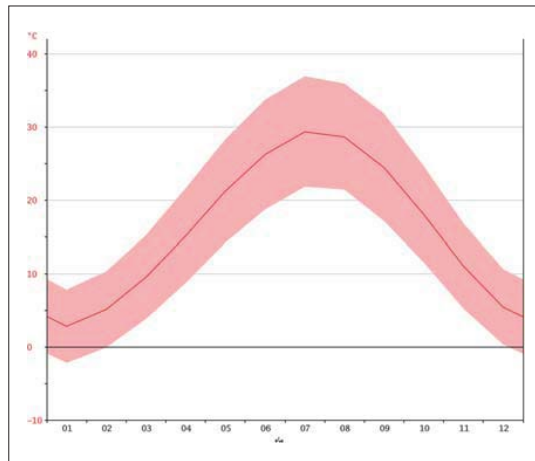
ت ۳ (راست). مشخصات پنجره‌های مورد ارزیابی، تدوین: ز.س. زمردیان. ت ۴ (چپ). اطلاعات هواشناسی تهران، مأخذ: 2015 2015.11.01]; Available from: <http://www.tehran.Climate.mps.com/>

مدل‌ها در شرایط اقلیمی شهر تهران (۳۵° و ۴۰° شمالی؛ ۵۱° و ۱۹° شرقی و با ارتفاع ۱۱۹۱ متر از سطح دریا) که منطقه نیمه‌استوایی و نیمه‌بیابانی در گروه بند Bsk در مقیاس کوپن-گایگر است، ارزیابی شده است. متوسط دمای سالیانه ۱۷ درجه سانتی‌گراد و آب‌وهوا به صورت عمومی در بهار ملایم، در تابستان گرم و خشک، در زمستان سرد، و در پاییز مطلوب است. گرم‌ترین ماه مرداد و سردترین آن دی‌ماه (با متوسط دمای حداقل و حداکثر ۲۳ و ۳۶ درجه سانتی‌گراد و نیز ۱- و ۸ درجه سانتی‌گراد) است (ت ۴). فایل آب‌وهوای عمومی سالیانه هواشناسی ایران (ITMY) برای شبیه‌سازی به کار گرفته شده است. بنا بر داده‌های هواشناسی، آسمان تهران در طول سال ۶۷٪ صاف، ۲۴٪ نیمه‌ابری، و ۹٪ ابری است. بنا بر این کلاس‌های درس بستر مطالعه پتانسیل قابل توجهی در تأمین آسایش حرارتی و بصری از طریق طراحی ایستا دارند.

۲.۲.۲. انتخاب نرم‌افزار

در سال‌های اخیر نرم‌افزارهای شبیه‌سازی متعددی با قابلیت مدل‌سازی حرارتی محیط داخلی طراحی و به کار گرفته شده‌اند.

گرچه برخلاف ابزارهای تحلیل نور روز که تجسم فضایی را فراهم می‌کنند، تقریباً همه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی ساختمان (BES)^{۶۳} آسایش حرارتی را تنها در نقطه مرکزی زون تحلیل می‌کنند. علاوه بر نرم‌افزارهای BES، با ابزارهای تحلیل CFD^{۶۴}، نظیر ماژول CFD در دیزاین بیلدر^{۶۵} و سی اف دی اتودسک^{۶۶}، نیز آسایش حرارتی فضایی محاسبه و نمایانده می‌شود. این ابزارها گرچه دقت بسیار بالایی دارد، لیکن از آنجا که محاسبات CFD اغلب بسیار زمان‌بر هستند، برای ارزیابی‌های مراحل مقدماتی طراحی مناسب نیستند. به منظور پر کردن این خلأ، مدل‌های مطالعاتی نظیر CMAP^{۶۷} و ROOM^{۶۸}، برای تحلیل‌های حرارتی فضایی عرضه شده است. همه ابزارهای یادشده تنها می‌توانند گراف آسایش را در یک زمان نشان دهند، در حالی که نه یک مقطع زمانی کوتاه نه یک میانگین می‌تواند معرف آسایش حرارتی متصرفین باشد. برای انجام این امر در ۸۷۶۰ ساعت در یک سال، بیان تصویری گرافیکی پیچیده از اطلاعات در فضا مورد نیاز است. چنین تجسم فضایی می‌تواند علاوه بر دیگر استفاده‌ها، سطوح دارای پتانسیل عدم آسایش را در طول فرایند طراحی نشان دهد. پلاگین‌های هانی بی و



ردیف	نوع	ضریب انتقال حرارت (w/m2)	SHGC	VT	گاز پرکننده	فاصله بین جداره‌ها	LSG
۱	تک جداره	۶/۳	۰/۸۱	۰/۸۸		-	۱/۰۸
۲	تک جداره کم گسیل (e2=0.4)	۵	۰/۷۸	۰/۸۵		-	۱/۰۸
۳	تک جداره کم گسیل (e2=0.2)	۴/۳۵	۰/۷۲	۰/۸۱		-	۱/۱۲
۴	دو جداره (الف)	۳/۴	۰/۶۹	۰/۷۸	هوا	۰/۰۰۶	۱/۱۳
۵	دو جداره (ب)	۲/۸	۰/۷۲	۰/۷۷	آرگون	۰/۰۱۲	۱/۰۶
۶	دو جداره کم گسیل (e2=0.04)	۲/۷	۰/۴۴	۰/۷	هوا	۰/۰۰۶	۱/۶
۷	سه جداره	۲	۰/۶۸	۰/۷۴	هوا	۰/۰۱۲	۱/۰۸
۸	سه جداره کم گسیل (e5=0.1)	۱/۳	۰/۵۸	۰/۷	آرگون	۰/۰۱۲	۱/۲
۹	سه جداره کم گسیل (e2=e5=0.1)	۱/۲	۰/۴۷	۰/۶۶	هوا	۰/۰۱۲	۱/۴

53. Visual Comfort Probability
54. Vertical Eye

نک: ۵۵

Ying-Chieh Chan, et al,
"A Systematic Method for Selecting Roller Shade Properties for Glare Protection".

56. Visual Discomfort
57. Spatial Visual Discomfort

نک: وزارت نیرو، ترازنامه انرژی ایران.

59. Rhinoceros

60. Light-to-Solar-Gain Ratio

نک: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث نوزدهم: صرفه‌جویی در مصرف انرژی.

62. National Fenestration Rating Council

63. Building Energy Simulation

64. Computational fluid Dynamics (CFD)

65. Design Builder

66. Autodesk CFD

نک: ۶۷

A.L. Webb, "Mapping Comfort: An Analysis Method For Understanding Diversity In The Thermal Environment".

ت. ۵. شاخص STCA در پنجره‌های ارزیابی شده در چهار جهت اصلی، تدوین: ز.س. زمردیان.

شبکه‌ای مورد استفاده در شبیه‌سازی حرارتی، در تراز میز (۰/۸۵) متر) و چشم (۱/۲ متر) برای تحلیل‌های بصری و نور روز نیز در نظر گرفته شده است. شاخص SVD براساس خروجی‌ها محاسبه و عرضه شده است.

دو شاخص برای ارزیابی ترکیبات مختلف پنجره یعنی جایی که هم‌زمان آستانه‌های آسایش بصری و حرارتی برآورده شوند، به کار گرفته شده است.

۳. نتایج

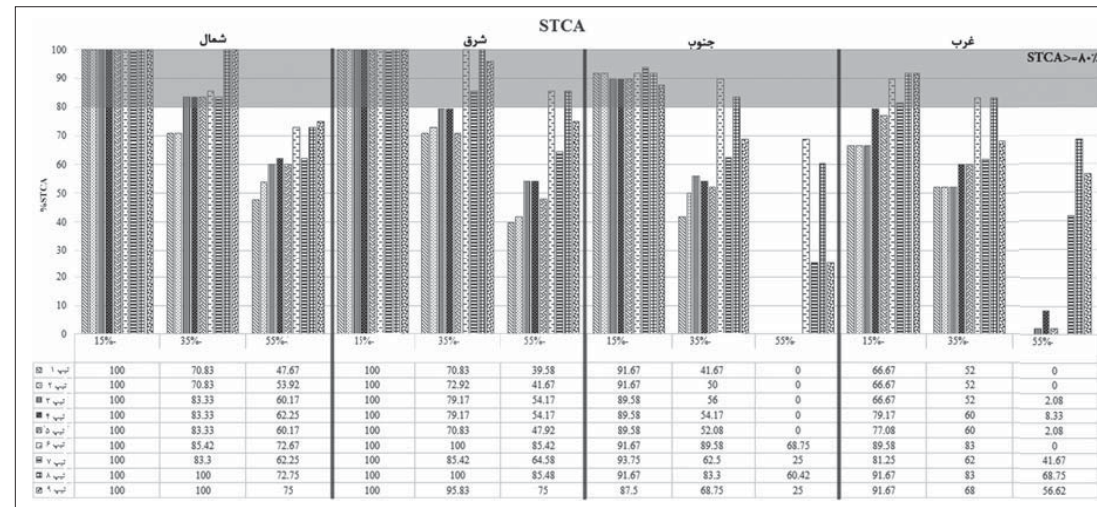
نتایج حاصل از شبیه‌سازی انواع مختلف پنجره و محاسبات شاخص‌های ارزیابی در سه بخش شامل آسایش حرارتی، آسایش بصری، و مصرف انرژی بیان می‌شود.

۳.۱. آسایش حرارتی فضا- زمانی

تأثیر ضریب انتقال حرارت، ضریب دریافت تابشی، و نسبت سطح پنجره به دیوار بر آسایش حرارتی فضا- زمانی در یک کلاس درس در چهار جهت اصلی شمال، جنوب، شرق، و غرب ارزیابی و نتایج در «ت ۵ تا ۱۲» ارائه شده است. ضریب

لیدی باگ^{۶۹} در برنامه گرسه‌پار^{۷۰} برای مطالعه آسایش بصری و حرارتی انتخاب شدند تا از موتور محاسبات حرارتی انرژی پلاس و ردیانس و دیسیم^{۷۱} برای تحلیل نور روز در محیط نرم‌افزار راینو استفاده گردد. شبکه‌ای با فواصل ۱/۰ متر در ارتفاع ۱/۱ متر (ارتفاع سر متصرفین) در مدل در نظر گرفته شد، و دمای تابشی با توجه به فاکتور دید بر اساس گنبد آسمان ترگنزا^{۷۲} و تابش خورشیدی مستقیم بر اساس روش سولارکل محاسبه شد. متوسط دمای هوای به صورت ساعتی در نقطه مرکزی فضا بر مبنای روش بار ایدتال^{۷۳} در نرم‌افزار انرژی پلاس محاسبه شده است. از دمای هوا و دمای تابشی برای محاسبه دمای عامل در هر نقطه از شبکه در زمان تصرف و نهایتاً محاسبه شاخص STCA استفاده شد. شبکه ارزیابی با فاصله ۰/۵ متری از پنجره و دیوارهای داخلی در نظر گرفته شده است.

برای ارزیابی‌های نور روز، تنها با ابزارهای محدود شاخص‌های جدید دینامیک نظیر SDA، DA، و ASE محاسبه می‌شود، نظیر دیوا^{۷۴}، سفایرا^{۷۵}، لایت ستانزا^{۷۶} و هانی بی. در این مطالعه افزونه هانی بی برای شبیه‌سازی نور روز هم‌زمان با تحلیل‌های آسایش حرارتی استفاده شده است. همان فواصل



انتقال حرارت در نمونه‌های بررسی شده بین ۶/۵ تا ۱/۲ وات بر مترمربع کلون متغیر است. به طوری که تیپ ۱ حداکثر ضریب انتقال حرارت و تیپ ۹ حداقل را دارد. همچنین ضریب دریافت تابش بین ۰/۸۱ تا ۰/۴۴ متغیر است که تیپ ۱ حداکثر و تیپ ۶ و ۹ حداقل مقدار را دارند. شاخص LSG در نمونه‌های مورد بررسی بین ۱/۰۸ تا ۱/۶ متغیر است. حداکثر و حداقل مقدار به ترتیب مربوط به تیپ ۶ (پنجره دوجداره کم‌گسیل) و تیپ ۱ تک‌جداره است.

با توجه به نتایج «ت ۵» کاهش ضریب انتقال حرارت و ضریب دریافت تابشی پنجره‌ها باعث افزایش شاخص STCA می‌شود. همچنین با افزایش درصد پنجره آسایش حرارتی فضا- زمانی در هر تیپ پنجره کاهش می‌یابد. به طوری که در همه جهات حداکثر شاخص مربوط به ۱۵٪ سطح پنجره به دیوار و حداقل مربوط به ۵۵٪ است.

بر اساس «ت ۵» از بین ۱۰۸ ساختار بررسی شده کمتر از نیمی از آن‌ها در محدوده قابل قبول شاخص STCA قرار می‌گیرند. همه ۹ تیپ پنجره، با فرض ۱۵٪ نسبت پنجره به دیوار در جبهه شمال، جنوب، و شرق، در محدوده قابل قبول شاخص قرار می‌گیرند. هر چند در جبهه غربی تنها پنجره‌های با ضریب انتقال حرارت کمتر مساوی ۲/۷ و ضریب تابشی کمتر از ۰/۷ قابل قبول هستند. با افزایش درصد پنجره به ۳۵٪ شاخص STCA و در نتیجه گزینه‌های قابل قبول کاهش می‌یابد. این کاهش در جبهه شمالی حداقل و در جبهه غربی حداکثر است. بنا بر نتایج جبهه شمالی و جنوبی شرایط آسایش مطلوب‌تری نسبت به شرقی و غربی با فرض ۳۵٪ پنجره فراهم می‌کنند. با توجه به نتایج کاهش ضریب دریافت تابشی افزایش شاخص STCA را سبب می‌شود و می‌توان، با در نظر گرفتن سایبان مناسب، گزینه‌های قابل قبول را افزایش داد. با افزایش درصد پنجره‌ها به ۵۵٪ شاخص مورد نظر به شدت کاهش می‌یابد به طوری که با در نظر گرفتن برخی از انواع پنجره‌ها در هیچ‌یک از

نقاط فضا آسایش حرارتی در ۸۰٪ زمان اشغال تأمین نمی‌شود. در حالی که در جبهه شمالی و جنوبی پنجره‌های کم‌گسیل STCA ۷۵٪ را فراهم می‌کنند. بر اساس نتایج پنجره‌های با شیشه‌های کم‌گسیل و ضریب انتقال حرارت پایین با ۳۵٪ درصد پنجره بدون داشتن سایبان در همه جبهه‌ها شرایط آسایش را می‌توانند فراهم کنند.

با ثابت گرفتن درصد پنجره (۳۵٪) میزان تغییرات شاخص STCA با فرض پنجره‌های مختلف در جبهه جنوبی حداقل (۲۶٪) و در جبهه غربی حداکثر (۳۷٪) است. در حالی که با افزایش درصد پنجره به ۵۵٪ میزان تغییرات در جبهه شمالی حداقل (۳۷٪) و در جبهه جنوبی حداکثر (۱۰۰٪) است. بنا بر نتایج انتخاب پنجره مناسب، زمانی که درصد پنجره بالا است، در جبهه جنوبی، غربی، و شرقی اهمیت زیادی دارد.

با ثابت در نظر گرفتن نوع و ابعاد پنجره تأثیر جهت‌گیری بر تغییرات شاخص STCA قابل ارزیابی است. بنا بر نتایج با در نظر گرفتن درصد پنجره‌های پایین (۱۵٪) میزان STCA بین ۸-۳۳٪ در جهت‌های مختلف متغیر است. حداکثر تغییرات مربوط به پنجره تیپ ۱/۲ و ۳ و حداقل تغییرات مربوط به پنجره‌های کم‌گسیل دو و سه‌جداره است. با افزایش ابعاد پنجره به ۳۵٪ میزان تغییرات در جبهه‌های مختلف بین ۱۷-۳۷٪ متغیر است که حداکثر آن مربوط به پنجره‌های تیپ ۳ و حداقل آن پنجره تیپ ۶ است. بنا بر نتایج جهت‌گیری عامل مهمی در تأمین آسایش فضا- زمانی است و انتخاب جهت مناسب با در نظر گرفتن نوع و ابعاد یکسان پنجره در بهبود آسایش فضا- زمانی تأثیر زیادی دارد.

بر اساس «ت ۵» می‌توان نتیجه گرفت که در جبهه‌های آفتاب‌گیر استفاده از شیشه‌های با ضریب دریافت تابش پایین مؤثرتر از استفاده از شیشه‌های با ضریب انتقال حرارت پایین است. همچنین اهمیت طراحی سایبان‌های مناسب با توجه به ساعات کاربری فضا اهمیت زیادی دارد. همچنین زمانی

۶۸ نک:

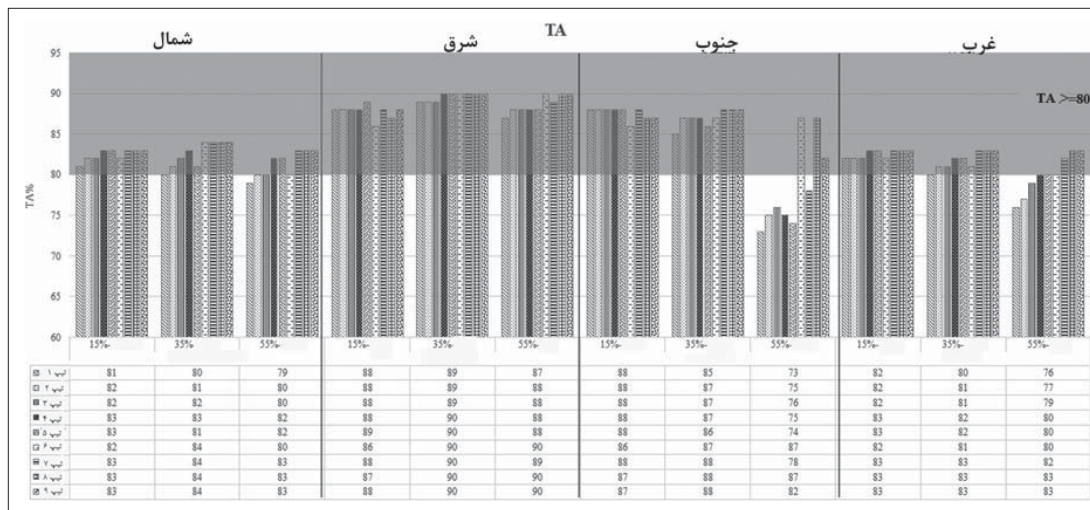
- A. White & M. Holmes, "Advanced Simulation Applications Using Room".
- 69. Honeybee and Ladybug
- 70. Grasshopper
- 71. Radiance and Daysim
- 72. Tregenza
- 73. Ideal load
- 74. DIVA
- 75. SEFAIRA
- 76. Light Stanza

تغییر می‌کند. مقایسه شاخص TA در حالت‌های مختلف گویای این مهم است که، به دلیل اینکه برای بررسی نقطه مرکزی فضا است، با این شاخص نمی‌توان پنجره‌های مختلف برای تأمین آسایش حرارتی در کل فضا را ارزیابی کرد و استفاده از شاخص‌های دقیق‌تر ضروری است. از مقایسه نمودارها می‌توان استنباط کرد که استفاده از شاخص STCA در جبهه‌های دریافت‌کننده تابش مستقیم ضروری است و دید جامع‌تری نسبت به شرایط آسایش فراهم می‌کند. در حالی که حرارت خورشیدی دریافتی از پنجره‌های جبهه شمالی به طور عمده ناشی از تابش پراکنده است و تأثیر قابل توجهی بر آسایش حرارتی ندارند. بر اساس شاخص STCA جهت شمال و جنوب عملکرد بهتری دارند، در حالی که بر اساس شاخص TA جهت شرق و جنوب مناسب‌تر هستند. هرچند تغییرات شاخص TA در همه جهات و اندازه‌ها بسیار کم است و قابل توجه نیست. پنجره‌های با شیشه‌های کم‌گسیل و ضریب انتقال حرارت پایین عملکرد بهتری دارند و انرژی تابشی را به سمت منبع تولید گرما بازمی‌گردانند، بخصوص در پنجره‌های با ابعاد بزرگ عملکرد مناسبی دارند.

که نصب سایبان‌های خارجی به دلیل مسائل اجرایی یا زیبایی‌شناسی امکان‌پذیر نیست، بهره‌گیری از شیشه‌های با ضریب دریافت تابش پایین مؤثر است.

علاوه بر شاخص STCA، شاخص TA نیز برای پنجره‌های مختلف محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است (ت ۶). برخلاف شاخص STCA که با آن دمای عامل را در هر نقطه از فضا بر اساس میزان تابش مستقیم و پراکنده دریافتی هر نقطه محاسبه می‌شود، با شاخص TA دمای عامل در نقطه مرکزی فضا و با در نظر گرفتن متوسط دمای سطوح محاسبه می‌شود. بنا بر نتایج گزینه‌های مختلف تقریباً در همه حالت‌ها در ۸۰٪ زمان اشغال آسایش را در نقطه مرکزی فضا تأمین می‌کنند. گرچه در جبهه جنوبی و غربی با ۵۵٪ پنجره تیپ ۱-۵ و ۱-۳ به ترتیب حد پایین شاخص را تأمین نمی‌کند. به طور کلی شاخص TA در جبهه شمالی و غربی، به دلیل عدم دریافت تابش کمتر از جبهه شرقی و جنوبی است.

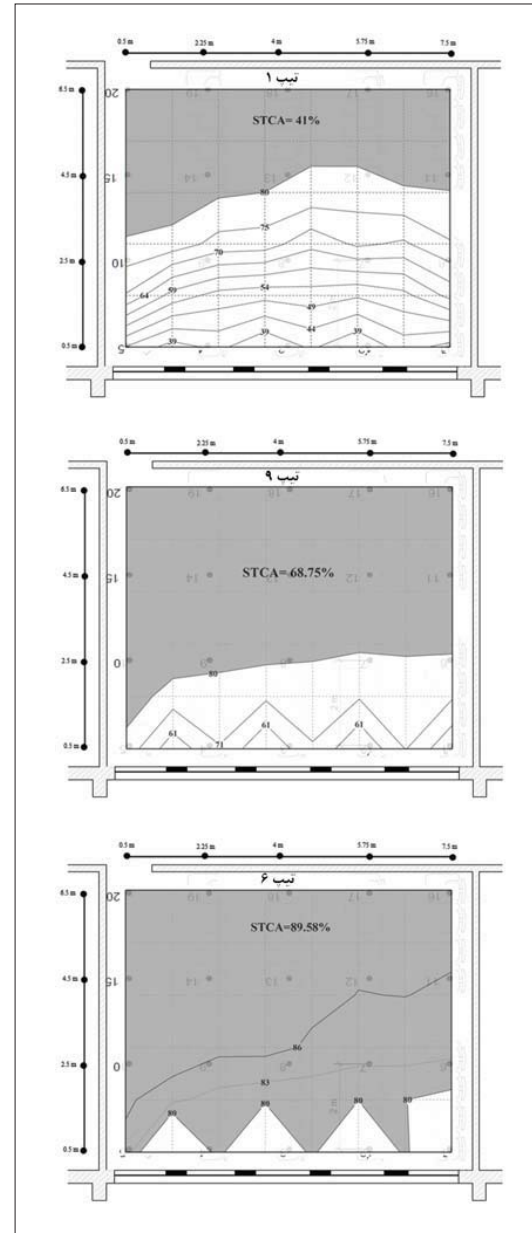
بنا بر نتایج شاخص STCA بین ۰ تا ۱۰۰٪ متغیر است در حالی که شاخص TA بین ۷۲ تا ۹۰٪ با وجود پنجره‌های مختلف



ت ۶. شاخص TA در پنجره‌های ارزیابی شده در چهار جهت اصلی، تدوین: ز.س. زمردیان.

در مدل‌های مورد بررسی در محدوده نزدیک پنجره‌ها عدم آسایش شدت بیشتری دارد. فاصله عمودی از پنجره که در محدوده آسایش قرار می‌گیرد، در گزینه‌های مختلف متفاوت است. همان‌طور که در «ت ۷» دیده می‌شود، با در نظر گرفتن ابعاد و جهت‌گیری ثابت ۳۵٪ جنوب با فرض پنجره تک‌جداره، فاصله ۳/۵ متری از پنجره در محدوده عدم آسایش قرار می‌گیرد. این فاصله با تغییر نوع پنجره به سه‌جداره کم‌گسیل به ۲/۵ متر و با تغییر به دوجداره کم‌گسیل به ۲ متر کاهش می‌یابد. شاخص STCA با توجه به کاهش ضریب انتقال حرارت و کاهش ضریب دریافت تابش افزایش یافته است. تأثیر ضریب دریافت تابش پایین بر STCA در پنجره‌های با ابعاد بزرگ‌تر ملموس‌تر است. پنجره‌های بدون سایبان در جبهه جنوبی حتی با کم‌گسیل بودن و سطوح کم سبب ناراضی‌تری حرارتی برای کاربرانی می‌شوند که در معرض تابش قرار می‌گیرند، بخصوص در فضاهای نزدیک پنجره‌ها. مزایای ضریب دریافت تابش پایین برای بهبود آسایش حرارتی با کاهش ضریب انتقال حرارت در پنجره‌های با سطوح بیشتر افزایش می‌یابد. به طور کلی ضریب انتقال حرارت پایین در همه حالت‌ها برای بهبود شاخص STCA اهمیت زیادی دارد.

در برخی از شیشه‌های کم‌گسیل که ضریب دریافت تابش بسیار پایینی فراهم می‌کنند، راهکارهای دیگر کاهش بار تابشی خورشید بیشتر مورد توجه هستند. این راهکارها شامل سایبان‌های خارجی، عمودی، و افقی متحرک و ثابت است. دو نوع سایبان، یکی سایبان افقی با ۰/۶ متر بیرون‌زدگی و ۰/۲ لوور با تیغه‌های ۲۰ سانتی‌متری با فاصله ۲۰ سانتی‌متر از پنجره بر روی پنجره‌های تیپ ۱ تا ۹ با فرض ۵۵٪ سطح پنجره به دیوار در جهت جنوب مدل‌سازی و ارزیابی شده است. شاخص STCA و TA در حالت‌های مختلف محاسبه شده و در «ت ۸» و «ت ۹» نمایش داده شده است. بر اساس نتایج با افزودن سایبان‌ها شاخص‌های مورد بررسی در همه حالت‌ها در پنجره‌هایی که



ت ۷. محدوده عدم آسایش در پنجره‌های مختلف، تدوین: ز.س. زمردیان.
ت ۸ (صفحه روبه‌رو، بالا). تأثیر سایبان‌های خارجی بر شاخص STCA در پنجره‌های مورد ارزیابی، تدوین: ز.س. زمردیان.

ت ۹ (پایین). تأثیر سایبان‌های خارجی بر شاخص TA در پنجره‌های مورد ارزیابی، تدوین: زس. زمردیان.

طبیعی پیش از حد و عدم آسایش بصری است نشان می‌دهد. بر اساس نتایج تعداد بسیار معدودی از گزینه‌های مورد بررسی در محدوده قابل قبول (+ تا ۱۰٪) قرار می‌گیرند (ت ۱۱). افزایش سطح پنجره باعث افزایش میزان ناراضایتی بصری می‌شود، هرچند در محدوده قابل قبول شاخص SDA قرار

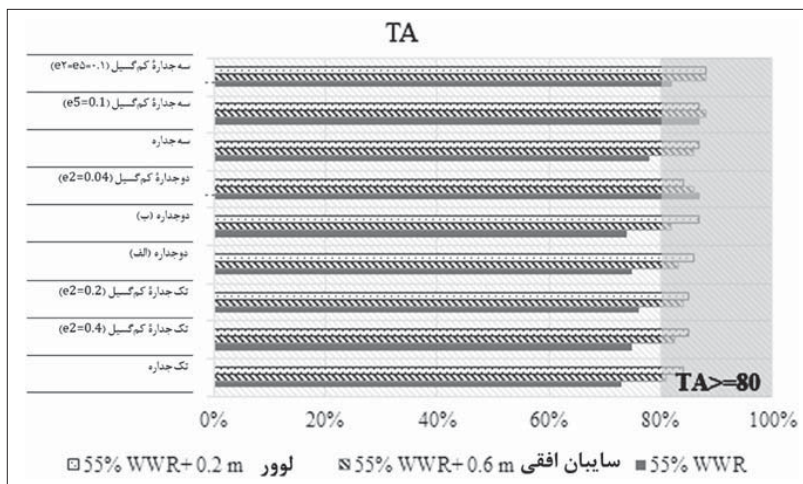
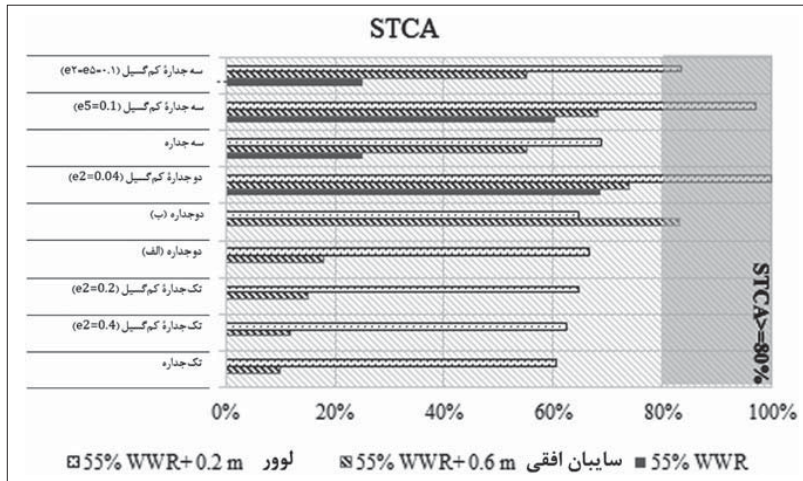
شیشه‌های کم‌گسیل دارند، افزایش یافته است، مگر زمانی که ضریب دریافت تابش کم باشد. همچنین بر اساس نتایج استفاده از لوورها، شرایط بهتری را نسبت به سایبان‌های افقی فراهم کرده‌اند.

بر اساس نتایج تأثیر شیشه‌های کم‌گسیل با ضریب تابش پایین قابل مقایسه با پنجره‌های تک‌جداره با وجود سایبان‌های خارجی است.

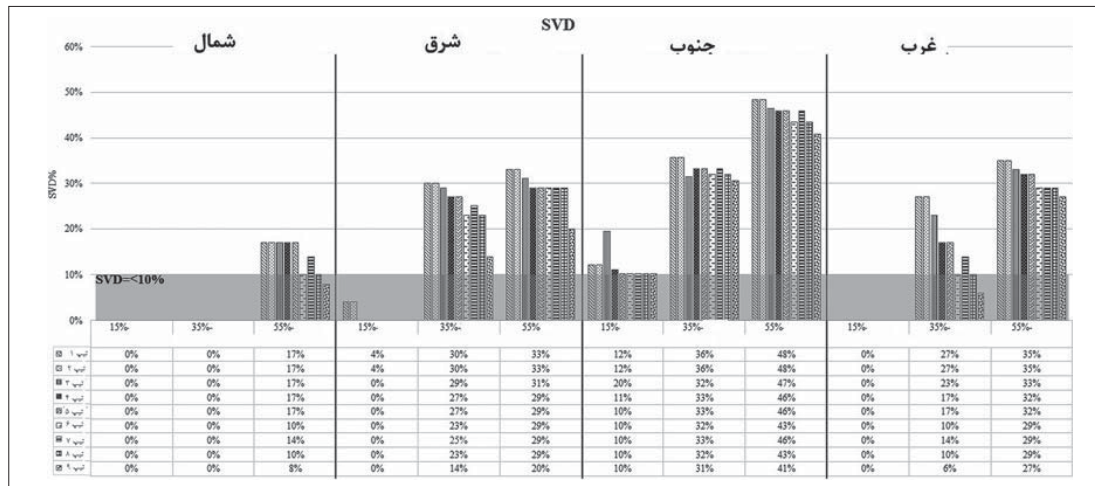
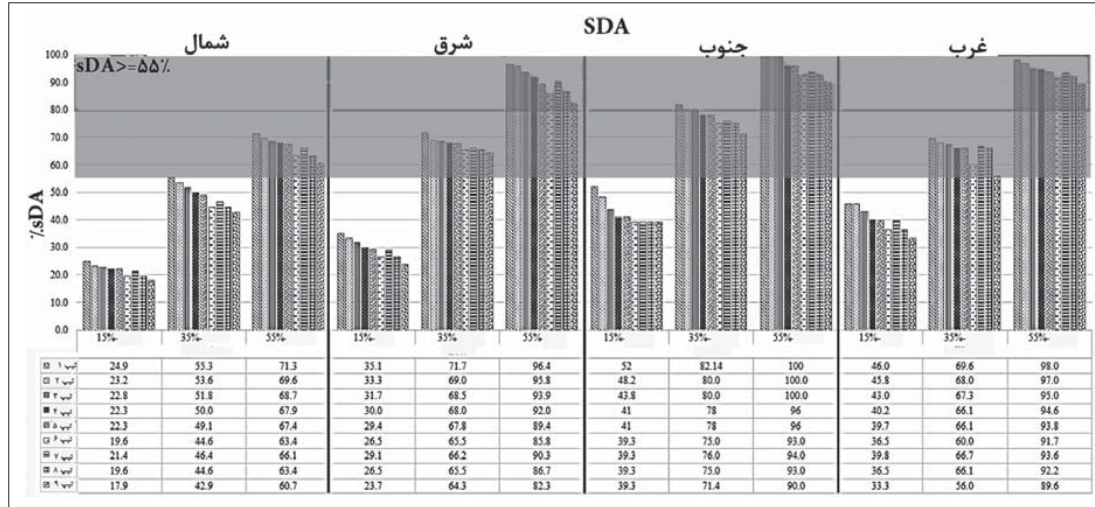
۲.۳. آسایش بصری فضا- زمانی

شاخص SDA و SVD برای ارزیابی وضعیت آسایش بصری، با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف پنجره، استفاده شده است. بر اساس نتایج (ت ۱۰) در جهت شمال پنجره‌های بزرگ‌تر از ۳۵٪ حداقل شاخص SDA را تأمین می‌کنند در صورتی که در سایر جبهه‌ها ۳۵٪ پنجره در همه حالت‌ها در بیش از ۵۵٪ فضا در ۵۰٪ از زمان اشغال بیش از ۵۰۰ لوکس روشنایی طبیعی را فراهم می‌کند. از آنجایی که این متریک حد بالا ندارد، نمی‌تواند تضمین‌کننده آسایش بصری باشد، زیرا میزان بالای روشنایی سبب خیرگی می‌شود. به طور کلی مقدار شاخص SDA، به دلیل آستانه قابل قبول پایین (۵۰٪ زمان اشغال) نسبتاً بالا است. بر اساس نتایج SDA، با توجه به جهت‌گیری پنجره، میزان ضریب عبور نور با درصد پنجره متغیر است. میزان عبور نور در پنجره‌های مورد بررسی بین ۰/۶۶ تا ۰/۸۸ متغیر است. میزان شاخص SDA با ثابت گرفتن ابعاد پنجره (۳۵٪) بین ۴۲ تا ۹۴٪ در جهات مختلف متغیر است. حداقل SDA در جبهه شمالی و حداکثر آن جبهه غربی است. میزان تغییرات این شاخص بر اساس میزان ضریب عبور نور در جهت شمالی ۲۲٪، در جبهه شرقی ۲۱٪، در جبهه جنوب ۱۹٪، و در جبهه غربی ۲۵٪ است. در حالی که تغییر ابعاد پنجره ۶۴٪ بین ۵۰٪ در پنجره‌های مختلف در جهات مختلف تأثیرگذار است.

شاخص SVD درصدی از فضا را که در معرض روشنایی



می‌گیرد. گزینه‌هایی که شیشه‌های با ضریب عبور نور پایینی دارند در جبهه غربی، ضمن تأمین روشنایی مورد نیاز، عدم آسایش بصری کمتری در طول زمان فراهم می‌کنند. حداقل میزان شاخص مورد نظر در جبهه شمالی در درصد پنجره‌های پایین صفر و حداکثر ۴۸٪ در پنجره با درصد بالا در جبهه جنوبی است. با اضافه کردن سایبان مناسب در همه جبهه‌ها می‌توان، ضمن کاهش شاخص SVD، روشنایی طبیعی مورد نیاز بر اساس شاخص SDA را نیز فراهم کرد. بر اساس نتایج با اضافه کردن سایبان لوور در جبهه جنوبی شاخص SDA از ۱۰۰٪ به ۸۷٪ و شاخص SVD از ۴۸٪ به ۲۲٪ کاهش می‌یابد.

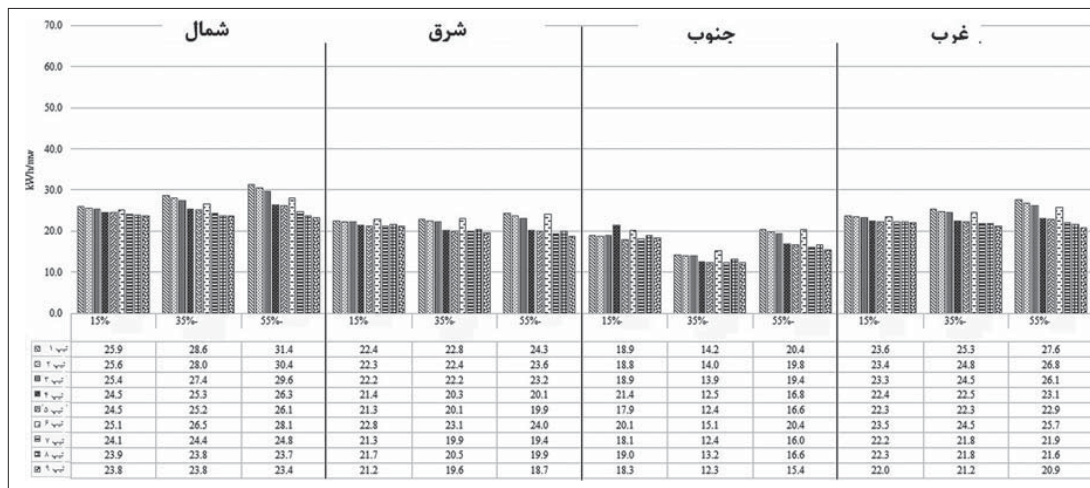
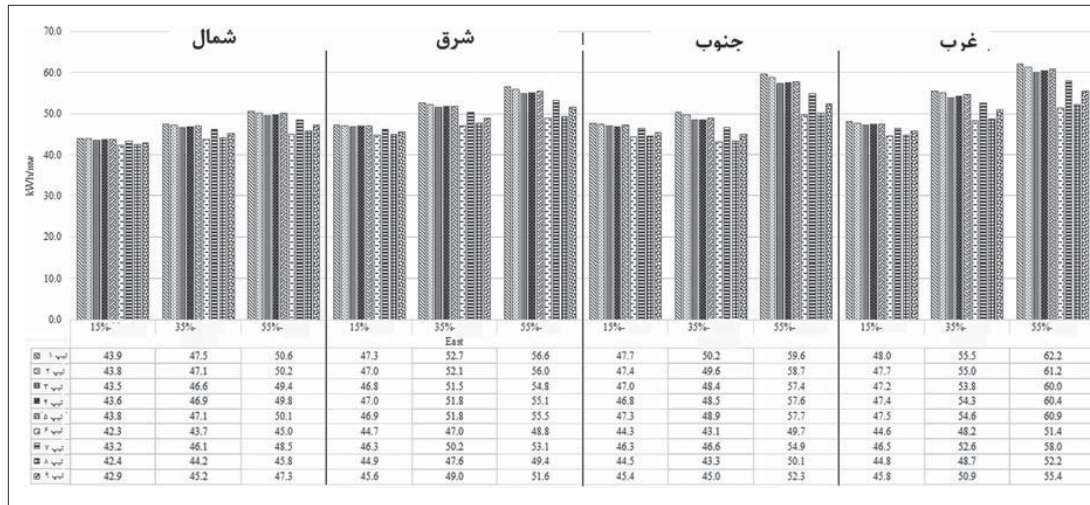


ت ۱۰ (بالا). شاخص SDA در پنجره‌های ارزیابی شده در چهار جهت اصلی،
 تدوین: ز.س. زمردیان.
 ت ۱۱ (پایین). شاخص SVD در پنجره‌های ارزیابی شده در چهار جهت اصلی،
 تدوین: ز.س. زمردیان.

۳.۳. مصرف انرژی

افزایش می‌یابد. این افزایش در جهت شمالی حداقل و در جبهه جنوبی و شرقی حداکثر است. میزان نیاز به انرژی برای گرمایش نیز در حالت‌های مختلف بررسی شده است. بر اساس نتایج حداقل انرژی برای گرمایش در جبهه جنوب و حداکثر در جبهه شمالی است.

یکی از معیارهای مهم در تصمیم‌گیری در انتخاب پنجره مناسب میزان نیاز به انرژی سرمایشی و گرمایشی است (ت ۱۲ و ۱۳). حداقل انرژی برای سرمایش در جبهه شمالی و حداکثر در جبهه غربی و جنوبی است. با افزایش درصد پنجره نیاز به سرمایش



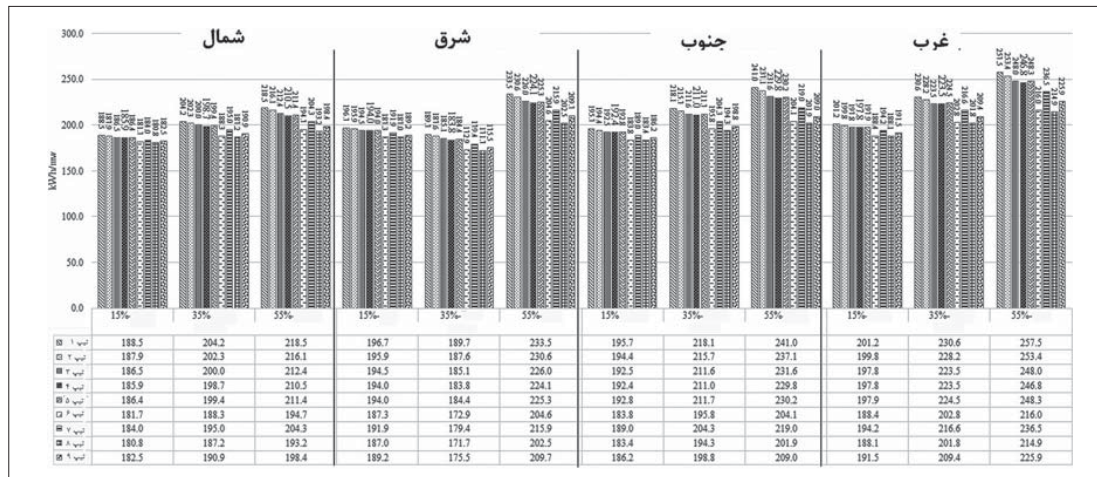
ت ۱۲ (بالا). نیاز به انرژی برای سرمایش در پنجره‌های مورد ارزیابی در جهات مختلف، تدوین: ز.س.زمردیان.

ت ۱۳ (پایین). نیاز به انرژی برای گرمایش در پنجره‌های مورد ارزیابی در جهات مختلف، تدوین: ز.س.زمردیان.

۴.۳. تحلیل روی نتایج

تابش مستقیم منجر به غیر یکنواختی دمای تابشی در فضای داخلی می‌شود. این غیر یکنواختی باید در فضاهایی که کاربران زمان زیادی ملزم به ماندن در یک مکان مشخص هستند در نظر گرفته شود تا از عدم آسایش موضعی جلوگیری شود. عدم آسایش موضعی، به واسطه تابش، به شدت بستگی به ساختار پنجره، جهت‌گیری، و جزئیات شیشه دارد و اگر در مراحل اولیه طراحی مورد توجه باشد، شرایط آسایش مطلوب‌تری فراهم می‌شود. در فرایند طراحی انتخاب پنجره مناسب بدون بهره‌گیری از ابزارهای شبیه‌سازی، که سرعت و راحتی استفاده از آن‌ها اهمیت زیادی دارد، امکان‌پذیر نیست. برنامه‌های شبیه‌سازی انرژی در ساختمان بیشتر اوقات بر اساس مبانی نظری رایج آسایش حرارتی، با ارزیابی آسایش حرارتی در نقطه مرکزی فضا، شرایط آسایش را پیش‌بینی می‌کنند. همان‌طور که در «ت ۶» نشان داده شده است، این نوع تحلیل‌ها برای یافتن بهترین و بدترین سناریو کاربرد دارد؛ ولی تصویر مناسبی را از عملکرد فضا، بخصوص زمانی که ارزیابی‌ها با در نظر گرفتن سیستم‌های سرمایش و گرمایش صورت می‌پذیرد، عرضه نمی‌کند. اکثر شبیه‌سازی‌ها بر میانگین دما و رطوبت در

برای انتخاب بهترین گزینه، با توجه به میزان مصرف انرژی، از شاخص انرژی اولیه استفاده شده، که با وزن‌دهی به گاز و برق مصرفی، معیار مناسبی نسبت به انرژی کل، که مجموع انرژی گرمایشی و سرمایشی است، فراهم می‌شود. بر اساس این شاخص مناسب‌ترین جهت‌گیری شرقی و بدترین جهت‌گیری غربی است (ت ۱۴). با ثابت فرض کردن ابعاد پنجره (۳۵٪) انرژی اولیه تیپ‌های مختلف را می‌توان تا ۶٪ در جبهه شمالی، ۷٪ در جبهه شرقی، ۹٪ در جبهه جنوب، و ۹٪ در جبهه غربی کاهش داد. همچنین با فرض ثابت بودن ابعاد و نوع پنجره، با انتخاب جهت‌گیری مناسب، میزان انرژی اولیه را می‌توان تا ۱۷٪ کاهش داد. با انتخاب ابعاد مناسب پنجره نیز می‌توان میزان انرژی اولیه را تا ۱۶٪ کاهش داد. میزان انرژی اولیه در همه جبهه‌ها با افزایش درصد پنجره افزایش می‌یابد. حداقل انرژی اولیه (۱۷۳ kW/m^2) با در نظر گرفتن ۳۵٪ پنجره نوع ۸ به سمت جنوب، و حداکثر (۲۵۷ kW/m^2) با در نظر گرفتن ۵۵٪ پنجره نوع ۱ در جهت غرب است. بر اساس نتایج، با بهره‌گیری از پنجره‌های با عملکرد بالا، می‌توان ابعاد پنجره‌ها را بدون افزایش قابل توجه مصرف انرژی اولیه افزایش داد.



ت ۱۴. نیاز به انرژی اولیه در پنجره‌های مورد ارزیابی در جهات مختلف، تدوین: ز.س. زمردیان.

حداکثر سطح و زمان اشغال فراهم کرد. بر اساس نتایج بهره‌گیری از پنجره‌های با ضریب انتقال حرارت پایین در این جبهه برای تأمین آسایش حرارتی فضا- زمانی اهمیت زیادی دارد.

در جهت جنوب، به دلیل تابش مستقیم دریافتی، تأمین آسایش بصری بدون در نظر گرفتن سایبان مناسب، حتی با بهره‌گیری از شیشه‌های با ضریب دریافت نور پایین در هیچ‌یک از ابعاد مورد بررسی امکان‌پذیر نیست. با در نظر گرفتن ابعاد پیش از ۱۵٪ سطح پنجره به دیوار، همراه با پنجره‌های با عملکرد بالا و سایبان‌های مناسب، شاخص‌های مورد بررسی در محدوده قابل قبول قرار خواهند گرفت و مصرف انرژی اولیه حداقل خواهد بود. بر اساس نتایج بهره‌گیری از پنجره‌های با شیشه‌هایی با ضریب دریافت تابش پایین در جبهه جنوب بسیار حایز اهمیت است.

در جبهه شرقی مانند جبهه جنوبی، به دلیل تابش مستقیم در ساعات‌های اولیه روز، تأمین آسایش حرارتی و بصری فضا- زمانی بدون بهره‌گیری از سایبان‌های مناسب امکان‌پذیر نیست، هرچند نسبت به جبهه جنوب آسایش بصری در ساعات‌های بیشتری تأمین می‌شود و شدت عدم آسایش بصری به مراتب کمتر است، گرچه میزان مصرف انرژی اولیه در این جبهه بیشتر از جبهه جنوب است.

در حالی که در جبهه غربی مانند شرقی روشنایی طبیعی با در نظر گرفتن ۳۵٪ سطح پنجره تأمین می‌شود، ولی عدم آسایش بصری در حالی که شدت بیشتر نسبت به شرقی دارد، به دلیل برنامه اشغال فضا، شاخص SVD کمتر از جبهه شرقی است. گرچه از نظر آسایش تفاوت قابل توجهی در دو جهت مشاهده نشده است؛ اما از نظر مصرف انرژی اولیه جبهه غربی با ثابت در نظر گرفتن ابعاد و نوع پنجره حدود ۹٪ بیشتر است. لازم به یادآوری است که همه پارامترهایی که در فرایند شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده‌اند، نظیر ضخامت جداره‌ها، ابعاد فضا، الگوی اشغال فضا، نوع و برنامه استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع و طبیعی، محدوده‌های قابل قبول برای آسایش

فضای داخلی تمركز دارند و توزیع حرارتی کمتر بررسی شده است، بنا بر این برای تصمیم‌گیری بهتر و ایجاد یک دیدگاه جامع نسبت به آسایش در فضای داخلی بر اساس تحلیل‌های فضا- زمانی در طراحی معماری کاربردی است. بر این اساس ترکیبات مختلف پنجره (ابعاد، جهت‌گیری‌ها، و خصوصیات شیشه‌ها و سایبان‌ها) و چیدمان‌های مختلف صندلی در فضای داخلی مدل‌سازی و سپس بر اساس سطوح آسایش حرارتی برای حالت‌های مختلف بهینه‌ترین طرح برای فضا می‌تواند مشخص شود. برای بهینه کردن طرح فضا، بخصوص کلاس درس، ارزیابی هم‌زمان نور روز و آسایش حرارتی الزامی است. بنا بر این توسعه شاخص‌هایی برای ارزیابی طرح در مراحل اولیه طراحی برای معماران ضروری است تا بتوانند بین آسایش حرارتی و بصری تعادل ایجاد کنند.

نتایج نشان داده است که با طراحی مناسب پنجره و انتخاب شیشه‌های مناسب می‌توان دمای عامل را در نزدیکی پنجره در محدوده آسایش نگه داشت، با این طراحی فضای قابل استفاده، بدون استفاده از پرده‌های داخلی برای جلوگیری از عبور نور روز، افزایش می‌یابد. ارزیابی هم‌زمان آسایش حرارتی و بصری فضا- زمانی و مصرف انرژی انتخاب طرح مناسب را ضمن تأمین آسایش در حداکثر فضا و در حداکثر زمان اشغال، همراه با حداقل مصرف انرژی، امکان‌پذیر می‌کند. همچنین طراح قادر می‌شود که بر اساس نوع کاربری و اهداف طراحی، با وزن‌دهی به شاخص‌های مورد ارزیابی، بهینه‌ترین طرح را انتخاب کند. در تحقیق حاضر برای انتخاب پنجره مناسب همه اهداف: آسایش حرارتی فضا- زمانی ≥ 0.8 ، تأمین روشنایی طبیعی ≥ 0.55 و عدم آسایش بصری فضا- زمانی ≤ 0.1 ، حداقل انرژی اولیه هم‌وزن در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج در جبهه شمالی انتخاب پنجره‌هایی با ابعاد بیش از ۳۵٪ و کمتر از ۵۵٪، همراه با پنجره‌های با عملکرد بالا (LSG بین ۱/۲ تا ۱/۶) نظیر تیپ‌های ۸ و ۹ می‌توان، ضمن مصرف انرژی اولیه حداقلی (کمتر از ۲۰۰ کیلووات ساعت بر متر مربع)، آسایش حرارتی و بصری را در

حرارتی و بصری، و آستانه‌های قابل قبول شاخص‌های معرفی‌شده، باید از نظر حساسیت تحلیل شوند و تأثیر آن‌ها بر انتخاب طرح بهینه بررسی گردد.

علاوه بر طراحی معماری تحلیلی فضا- زمانی آسایش حرارتی، می‌تواند انتخاب نوع و مکان قرارگیری توزیع‌کننده‌ها در سیستم‌های تهویه برای تأمین حجم و دمای مناسب هوا کاربردی باشد. همچنین با بررسی بیشینه بار سرمایشی و انرژی مصرفی، میزان کاهش دما برای جبران بار تابشی بر کاربران قابل پیش‌بینی است.

لازم به ذکر است که بر اساس شاخص‌های عرضه‌شده آستانه‌های ثابتی را در نظر می‌گیرند. به طور مثال برای آسایش حرارتی محدوده بین ۲۱ تا ۲۷ و درصد زمانی ۸۰٪ در محدوده آسایش در نظر گرفته شده است. در حالی که می‌تواند منجر به پیش‌بینی عدم آسایش بیش از حد در فضا شود. بهتر است شاخص‌های دیگری در کنار این شاخص‌ها تعریف شود که میزان اختلاف شرایط طرح را با آستانه‌های قابل قبول نشان دهد. این شاخص‌های جدید می‌تواند برای ارزیابی شدت عدم آسایش مفید باشد. همچنین از آنجایی که متریک‌های STCA و SVD زمان رویداد عدم آسایش را نشان نمی‌دهند، برای تولید استراتژی‌های تهویه و الگوی استفاده از سیستم‌های سرمایش، گرمایش، تهویه، و همچنین سایبان‌های متحرک مناسب نیستند و صرفاً برای ارزیابی وضعیت کلی طرح قابل استفاده خواهند بود. شاخص‌ها و گراف‌های متعددی باید معرفی شوند تا زمان‌های عدم آسایش کاربران طول سال بر اثر گرما، سرما، و روشنایی بیش از حد را مشخص کنند. باید توجه کرد که در ساختمان‌های با بار داخلی زیاد، مانند ساختمان‌های آموزشی، استفاده از استراتژی دریافت تابش مستقیم و انتقال جهت‌گیری مناسب باید به‌دقت در نظر گرفته شود. این امر، بخصوص در کلاس‌های درس، برای جلوگیری از گرمایش و روشنایی بیش از حد، که منجر به رفتارهای انرژی‌بر (کشیدن پرده‌ها و باز کردن پنجره‌ها) می‌شود، اهمیت دارد.

بر اساس نتایج مؤثرترین پارامترها برای تأمین آسایش حرارتی فضا- زمانی به‌ترتیب اهمیت این موارد هستند: درصد پنجره، ضریب دریافت تابش و سایبان، جهت‌گیری، و ضریب انتقال حرارت پنجره. همچنین مؤثرترین فاکتورها برای تأمین آسایش بصری فضا- زمانی شامل این موارد است: درصد پنجره، جهت‌گیری، ضریب عبور نور، و سایبان‌ها. تقریباً همه این پارامترها به یک اندازه بر آسایش بصری تأثیرگذار بوده‌اند.

قابل توجه است که با پنجره‌های مناسب به‌تنهایی نمی‌توان مشکلات ناشی از عدم آسایش را به طور کلی حل کرد، در نظر گرفتن تهویه مناسب برای برطرف کردن حرارت و رطوبت اضافی در فضای کلاس درس اهمیت زیادی دارد. همچنین مدیریت استفاده از سیستم‌های گرمایش جداره‌های خارجی با جرم حرارتی بالا می‌تواند برای جلوگیری از دماهای پایین در زمستان مفید واقع شود.

۴. نتیجه‌گیری

تحلیل‌های فضا- زمانی و تصویرسازی آن‌ها می‌تواند در تشخیص فضاهای در معرض عدم آسایش حرارتی و بصری در فرایند طراحی کمک کند. برخلاف نور روز، شاخصی برای ارزیابی فضا- زمانی آسایش حرارتی وجود ندارد. هرچند در استانداردهای جدید تعداد ساعت‌هایی را، که دما بیش از محدوده آسایش است، در نظر گرفته‌اند، اضافه کردن محدودیت‌های فضایی می‌تواند برای ارزیابی طراحی‌های معماری مفید باشد. موضوع این تحقیق یافتن روشی مناسب برای ارزیابی اثر ساختار پنجره‌ها، شامل درصد پنجره، جهت‌گیری، و خصوصیات شیشه و سایبان‌ها بر آسایش حرارتی و بصری و مصرف انرژی است. این روش در یک مدل کلاس رایج در شرایط اقلیمی تهران بررسی شده است. هدف نهایی تبیین میزان تأثیر هر یک از فاکتورها بر آسایش بصری و حرارتی نیست؛ بلکه بررسی اثرگذاری این فاکتورها بر تغییرات شاخص‌های مورد بررسی بوده است. یافته‌های اصلی و پیشنهادات برای تحقیقات آینده به طور

خلاصه در زیر بیان شده‌اند:

– آستانه‌های قابل قبول برای شاخص‌های فضا-زمانی و همچنین وزن‌دهی اهداف طراح (آسایش حرارتی، بصری، و مصرف انرژی) باید در اقلیم‌ها و کاربری‌های مختلف بررسی شود.
 – شیشه‌هایی با LSG بالا (ضریب دریافت تابش پایین و میزان عبور نور بالا) می‌تواند جانشین مناسبی برای سایبان‌های خارجی در زمانی باشند که استفاده از آن‌ها به دلایل زیبایی، سازه‌ای، و یا دید امکان‌پذیر نیست.
 – نتایج نشان داده است که سایبان‌های افقی و لوورها مکانسیم‌های تصحیح‌کننده‌ای برای پنجره‌های بزرگ هستند و امکان افزایش سطح پنجره را ضمن کنترل مصرف انرژی و تأمین آسایش فضا-زمانی فراهم می‌کنند.

– تأثیر ضریب دریافت تابش نسبت به ضریب انتقال حرارت برای افزایش شرایط آسایش در جبهه‌های تابش‌گیر بسیار قابل توجه است.
 – پنجره‌های با عملکرد بالا، که ضریب انتقال حرارتی پایینی دارند، زمان پایین بودن درصد پنجره عملکرد مناسبی ندارند، زیرا ضریب انتقال حرارتی پایین از اتلاف حرارتی جلوگیری می‌کند و باعث گرمایش بیش از حد فضا می‌شود.
 – شیشه‌های کم‌گسیل گزینه‌های خوبی برای پنجره‌ها در همهٔ جهات هستند، زیرا حرارت را در زمان گرمایش درون فضا نگه می‌دارد و در فصل سرما به فضای بیرونی بازتابش می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که استفاده از پنجره‌های دوجداره و سه‌جداره همیشه بهترین انتخاب نیست.

منابع و مآخذ

شفیعی، ب. روش‌های بهینه مصرف برق در مدارس. سازمان نوسازی مدارس، ۱۳۹۱.
 مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن. مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث نوزدهم: صرفه‌جویی در مصرف انرژی، تهران: نشر توسعه ایران، ۱۳۹۱.
 وزارت نیرو، ترازنامه انرژی ایران.

اطلاعات هواشناسی تهران:

<http://www.tehran.Climatemps.com/>

زمردیان، زهراسادات. آسایش حرارتی در فضاهای آموزشی شهر تهران: کاربرد شاخص‌های فضا-زمانی برای ارزیابی آسایش. پایان‌نامهٔ دکتری معماری، استاد راهنما: شهرام پوردیهیمی. تهران: دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده معماری و شهرسازی، بهمن ۱۳۹۵.

Arens, E., et al. "Modeling the Comfort Effects of Short-wave Solar Radiation Indoors", in *Building and Environment*, 88(0) (2015), pp. 3-9.
 Atzeri, A.M., et al. "Comfort Metrics for an Integrated Evaluation of Buildings Performance", in *Energy and Buildings*, 127 (2016), pp. 411-424.
 Author, B.L., et al. "Thermal Autonomy as Metric and Design Process", in CaGBC National Conference and Expo: Pushing the Boundary-Net Positive Buildings, Vancouver, 2013.
 Bessoudo, M., et al. "Indoor Thermal Environmental Conditions near Glazed Facades with Shading Devices-

Part I: Experiments and Building Thermal Model", in *Building and Environment*, 45(11) (2010), pp. 2506-2516.
 Boubekri, M. & L.L. Boyer. "Effect of Window Size and Sunlight Presence on Glare", in *Lighting Research and Technology*, 24(2) (1992), pp. 69-74.
 Cappelletti, F., et al. "Energy Performance And Long-Term Evaluation Of Internal Thermal Comfort of an Office Building with Different Kinds of Glazing Systems and Window Sizes", in International High Performance Buildings Conference, USA, 2012.
 Cappelletti, F., et al. "Passive Performance of Glazed

- Components in Heating and Cooling of an Open-space Office under Controlled Indoor Thermal Comfort”, in *Building and Environment*, vol. 72, p. 131-144.
- Carlucci, S. & L. Pagliano & A. Sangalli. “Statistical Analysis of Ranking Capability of Long-term Thermal Discomfort Indices and their Adoption in Optimization Processes to Support Building Design”, in *Building and Environment*, 2014.
- Chan, M. & C. Mak. “Thermal Comfort Levels in a Room with Solar Radiation”, in *Indoor and Built Environment*, 17(6) (2008), pp. 516-524.
- Chan, Ying-Chieh, et al, “A Systematic Method for Selecting Roller Shade Properties for Glare Protection”, in *Energy and Building*, February 2015.
- Fasi, M.A. & I.M. Budaiwi. “Energy Performance of Windows in Office Buildings Considering Daylight Integration and Visual Comfort in Hot Climates”, in *Energy and Buildings*, 108 (2015), pp. 307-316.
- Garnier, C. & T. Muneer & L. McCauley. “Super Insulated Aerogel Windows: Impact on Daylighting and Thermal Performance”, *Building and Environment*, 94 (2015), pp. 231-238.
- Hammad, F. & B. Abu-Hijleh. “The Energy Savings Potential of Using Dynamic External Louvers in an Office Building”, in *Energy and Buildings*,. 42(10) (2010), pp. 1888-1895.
- Hee, W.J., et al. “The Role of Window Glazing on Daylighting and Energy Saving in Buildings”, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42 (2015), pp. 323-343.
- Huizenga, C., et al. “Window Performance for Human Thermal Comfort”, in *Center for the Built Environment*, University of California, Berkeley, 2006.
- Inanici, M.N. & F.N. Demirbilek. “Thermal Performance Optimization of Building Aspect Ratio and South Window Size in five Cities Having Different Climatic Characteristics of Turkey”, in *Building and Environment*, 35 (2000), pp. 41-52.
- Jaber, S. & S. Ajib. “Thermal and Economic Windows Design for Different Climate Zones”, in *Energy and Buildings*, 43(11) (2011), pp. 3208-3215.
- Korsavi, S.S. & Z.S. Zomorodian, & M. Tahsildoost. “Visual Comfort Assessment of Daylight and Sunlight Areas: A Longitudinal Field Survey in Classrooms in Kashan”, in *Energy and Buildings*, 128 (2016), pp. 305-318.
- La Gennusa, M., et al. “A Model for Managing and Evaluating Solar Radiation for Indoor Thermal Comfort”, in *Solar Energy*, 81(5) (2007), pp. 594-606.
- Lee, J.W., et al. “Optimization of Building Window System in Asian Regions by Analyzing Solar Heat Gain and Daylighting Elements”, in *Renewable Energy*, 50 (2013), pp. 522-531.
- Mackey, C. “Pan Climatic Humans-Shaping Thermal Habits in an Unconditioned Society”, in *Architecture*, Massachusetts Institute of Technology, 2015.
- Reinhart, C. “Opinion: Climate-based Daylighting Metrics in LEEDv4–A Fragile Progress”, in *Lighting Research and Technology*, 47(4) (2015), pp. 388-388.
- Standard IES LM-83-12, *Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)*.
- Tsikaloudaki, K. et al. “The Energy Performance of Windows in Mediterranean Regions”, in *Energy and Buildings*,. 92 (2015), pp. 180-187.
- U.S. Green Building Council. *LEED V4 for Building Design and Construction*, 2013.
- Van Dijken, F. & J.E.M.H. Van Bronswijk & J. Sundell. “Indoor Environment and Pupils’ Health in primary schools”, in *Building Research & Information*, 34(5) (2006), pp. 437-446.
- Vanhoutteghem, L., et al. “Impact of Façade Window Design on Energy, Daylighting and Thermal Comfort in Nearly zero-Energy Houses”, in *Energy and Buildings*, 102 (2015), pp. 149-156.
- Webb, A.L. “Mapping Comfort: An Analysis Method For Understanding Diversity In The Thermal Environment”, in 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, 2013.
- White, A. & M. Holmes, “Advanced Simulation Applications Using Room”, in Eleventh International IBPSA Conference, 2009.
- Zomorodian, Z.S. & M. Tahsildoost & M. Hafezi. “Thermal Comfort in Educational Buildings: A Review Article”, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59 (2016), pp. 895-906.