شبیه‌سازی دقیق نماهای شیشه‌ای نوین با تأکید بر بهینه‌سازی نور روز و انرژی

(موردپژوهی: ساختمان اداری در همدان)

مریم قاسمی نسب[1]، محمدمهدی مولایی*[2] و پیمان پیله‌چی‌ها[3]

تاریخ دریافت: 1399/08/28
تاریخ پذیرش:1400/03/02

چکیده: امروزه لزوم بهینه‌سازی در مصرف انرژی و تلاش برای کاهش مصرف آن، مسأله‌ای بسیار مهم است. در این زمینه، یکی از راهکارها بهره‌گیری از نور روز و روشنایی آن در فضای داخلی ساختمان‌هاست. این درحالی است که، در ساختمان‌ها دیواره‌های شیشه‌ای بیشترین اتلاف انرژی را دارند. انتخاب سیستم شیشه‌ای مناسب برای دیواره‌های شیشه‌ای در این میان اهمیت بسیاری دارد. امروزه، با استفاده از شبیه‌سازی‌های دقیق، می‌توان عملکرد نور روز و انرژی را بسیار دقیق محاسبه نمود. شبیه‌سازی سیستم‌های شیشه‌ای نوین در یک مدل برای انطباق مؤثر از نظر عملکرد نور روز و مصرف انرژی، پیچیده و چالش برانگیز است. این مقاله در پی بهینه‌سازی همزمان عملکرد نور روز سالانه مبتنی بر ماتریس و مصرف انرژی در مبتنی بر اقلیم برای سیستم‌های شیشه‌ای نوین مختلف در ساختمان اداری شهر همدان است. این مقایسه بر روی 14 مورد شبیه‌سازی سیستم شیشه‌ای مختلف از 8 گروه سیستم‌های شیشه‌ای نوین انجام شده است: شیشه‌های پر شده از گاز، روکش‌های کم‌گسیل، شیشه‌های چنددیواره، محصولات ویژه، شیشه‌های رنگی، روکش‌های بازتابشی، شیشه‌های رنگی در یک پنجره دو دیواره با روکش‌های کم‌گسیل، شیشه‌های ترموکرمیک. نتایج بهینه‌سازی عملکرد نور روز و شدت مصرف انرژی سالانه نشان می‌دهد که سیستم Low-E3 بهینه‌ترین نمونه برای اقلیم شهر همدان است.

واژگان کلیدی: نور روز، مصرف انرژی، پوسته‌های شیشه‌ای نوین، روشنایی مفید نور روز.

[1] **کارشناسی ارشد** معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.
[2] **استادیار**، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. (نویسنده مسئول) m.moulaii@basu.ac.ir
[3] **استادیار**، گروه معماری، دانشکده معماری، مؤسسه آموزش عالی کوثر، قزوین، ایران.

1- مقدمه

نور روز در زندگی انسان اهمیت بسیاری دارد. می توان از نور روز به عنوان محرکی آگاهانه برای ورود آن به فضاهای معماری استفاده کرد. سیستم‌های شیشه‌ای مانند پنجره‌ها، نماهای شیشه‌ای، و پنجره‌های سقفی بخشی ضروری از دیواره‌های ساختمان‌ها هستند که نور روز و گرمای خورشیدی را به فضای داخلی ساختمان وارد می‌کنند (Aburas et al., 2019). در مقایسه با اجزای دیگر، عملکرد حرارتی واحدهای شیشه‌ای ضعیفتر است، تا حدی که اتلاف حرارت در سیستم‌های بزرگ شیشه‌ای ساختمان تا 60 درصد محاسبه شده است، به این دلیل تأثیر بیشتری بر تقاضای انرژی ساختمان دارد (Liu, Wu, Zhu, Li, & Ma, 2018).

استفاده از نور روز به عنوان یک ابزار مؤثر برای کاهش نیازهای روشنایی مصنوعی ساختمان‌های غیرمسکونی شناخته شده است. با این حال در عمل، نور روز یک منبع طبیعی بسیار کمیاب است (Azza Nabil & Mardaljevic, 2006). "نور روز" یک استراتژی مؤثر برای طراحی ساختمان منفعل است که طراحان را به دلیل مزایای آسایش بصری و محیطی به خود جذب می‌کند. تأمین روشنایی مورد نیاز روزانه با استفاده از روشنایی مصنوعی معمولا با بهره‌وری انرژی همراه است، به خصوص در ساختمان‌هایی که به سطوح بالایی از روشنایی نیاز دارند، مانند ساختمان‌های اداری (Asfour, 2020). در ایران، حدود 25 درصد از برق مصرفی در ساختمان‌های اداری جهت روشنایی مصنوعی به‌کار گرفته شده است. این سطح با توجه به اینکه ایران در طول شبانه‌روز از روشنایی زیادی برخوردار است (تهران به طور متوسط 8.5 ساعت آفتابی در روز دارد) میزان نسبتا بالایی است. با توجه به شناخت جهانی از عملکرد پایدارتر و کارآمدتر ساختمان، بنابراین اهمیت استفاده از روش‌هایی جهت به حداقل رساندن مصرف برق برای روشنایی مصنوعی از طریق طراحی مؤثر بهترین راهکار است (Pilechiha, Mahdavinejad, Pour Rahimian, Carnemolla, & Seyedzadeh, 2020).

در سال های اخیر بحران انرژی در جهان، و انتقال حرارت از طریق پوسته‌های ساختمانی مسأله‌ای بسیار حائز اهمیت و پررنگ شده است. می‌توان اهمیت این موضوع را در آیین نامه های ساختمانی اولیه در کشورهای اروپایی و مقررات ملی ساختمان ایران مبحث 19 مشاهده‌کرد، که به افزایش حداقل‌های عایق‌کاری پوسته و کاهش سطح پنجره مجاز در ساختمان‌ها دستور داده‌اند (Mohammadi, Heidari, 2015).

با توجه به مسأله کمبود برق و مصرف انرژی که امروزه در جهان و همچنین در ایران بسیار حیاتی و غیر قابل انکار است. اهمیت توجه طراحان و پژوهشگران در طراحی آگاهانه و توجهی ویژه به مسأله مصرف انرژی در طراحی ساختمان‌ها می‌تواند در این مسیر بسیار مؤثر باشد. امروزه نرم‌افزارهای بسیاری وجود دارند که به طراحان و پژوهشگران کمک می‌کنند تا قبل از اجرا و بهره‌برداری پژوه، بتوانند مصرف انرژی و اتلاف انرژی در پرژوه‌های ساختمانی را شبیه سازی و مصرف انرژی ساختمان را بسیار دقیق و نزدیک به واقعیت محاسبه نمایند. فرایندی بسیار مؤثر که به طراح این امکان را می‌دهد که با تغییراتی در مصالح و اندازه و جنس بازشوها اتلاف انرژی را در یک ساختمان به حداقل رساند و گامی در جهت کاهش مصرف انرژی کشور بردارد. با توجه به اقلیم سرد شهر همدان که حفظ تعادل حرارتی در ساختمان در فصول سرد سال بسیار سخت و با مصرف انرژی زیادی همراه است، با طراحی هدفمند در جهت کاهش هدر رفت انرژی بین دیواره‌های داخلی و خارجی می‌توان از اتلاف انرژی بسیار جلوگیری نمود. با توجه تأکید پژوهش های گذشته، بر این موضوع که، مقدار زیادی از اتلاف انرژی ساختمان‌ها از طریق دیواره‌های شفاف و باز شوها ست، این پژوهش بر آن است که با بررسی انواع سیستم‌های شیشه‌ای نوین و محاسبه مصرف انرژی آنها در اقلیم شهر همدان، مناسب‌ترین نوع سیستم شیشه‌ای را برای این شهر پیشنهاد دهد.

با پیشرفت تکنولوژی و تولید سیستم‌های شیشه‌ای پیچیده[1] (CFS) همچون سیستم‌های شیشه‌ای با روکش کم‌گسیل، سیستم‌های شیشه‌ای بازتابشی، سیستم‌های چنددیواره و بسیاری دیگر اتلاف حرارت از طریق پنجره‌ها و نماهای شیشه‌ای کاهش یافت و

اهمیت نور روز در زندگی انسان پررنگ‌تر شد. امروزه در طراحی ها، معماران امکان استفاده آزادانه‌تری از سیستم‌های شیشه‌ای دارند و با طراحی هدفمند از نور روز جهت روشنایی فضاهای معماری می‌توانند استفاده کنند. با انتخاب سیستم شیشه‌ای مناسب اتلاف انرژی حرارتی و برودتی در ساختمان را به حداقل رساند.

پیچدگی و چالش این پژوهش در شبیه‌سازی دقیق انواع سیستم‌های پیچیده شیشه‌ای از طریق یک نرم‌افزار و سپس اتصال پاسخ شبیه‌سازی‌ها برای محاسبه نور روز و بارهای الکتریکی جهت سرمایش و گرمایش این فضا در نرم‌افزارهایی دیگر جهت محاسبه دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت موجود است. این مطالعه چارچوبی برای ارزیابی روشنایی نور روز و مصرف انرژی ارائه می‌دهد و از یک روش بهینه‌سازی خطی برای به حداقل رساندن مصرف انرژی و به حداکثر رساندن نور روز در ساختمان‌های اداری متداول شهر همدان استفاده می‌کند.

ساختار این مقاله به شرح زیر است: اول، به معرفی شاخص‌های موجود در پژوهش که در بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی و نور روز ارائه شده است پرداخته، به دنبال آن نرم‌افزار انتخابی جهت شبیه‌سازی دقیق سیستم‌های شیشه‌ای پیچیده و دقیق معرفی و علت انتخاب آن توضیح داده شده است. سپس یافته‌های پژوهش که نتایج شبیه‌سازی مدل‌های پژوهش است ارائه شد، و در انتها بهینه‌ترین مدل پیشنهادی برای شهر همدان معرفی شده‌است.

1-1- مروری بر پیشینه پژوهشی

تحقیقات متعددی در حوزه نور روز و مصرف انرژی در پنجره‌ها و بهینه سازی آن در ساختمان انجام شده است. با بررسی پیشینه تاریخی سیستم‌های شیشه‌ای و اهمیت پنجره‌ها در کاهش بارهای حرارتی و برودتی و نیاز انسان به نور روز و اهمیت آن در زندگی انسان می‌توان به خلاهای در این موضوع دست یافت، که شبیه سازی دقیق سیستم‌های شیشه‌ای و بهینه سازی همزمان مصرف انرژی بارهای حرارتی و برودتی و روشنایی نور روز موضوع بررسی شده در این پژوهش است. در جدول 1 مروری کوتاه بر پیشینه تاریخی این موضوع که توسط دیگر پژوهشگران بررسی شده، آمده است.

جدول1- مروری بر پیشینه تحیق و محققان
Tab. 1-An overview of the research background and researchers

محقق و رفرنس پژوهش آن	موضوع بحث شده در پژوهش
Mirhashemi,) Shapourian, Ghiabaklou, (2010	به دنبال ارائه راهکاری جهت بهینه‌سازی درها و پنجره‌های ساختمان با هزینه پایین است.
Mohammadi,) (Heidari, 2015	به معرفی و امکان‌سنجی پنجره جدید در اقلیم شهر تهران که بهره‌وری انرژی بالایی در سطوح شیشه‌ای در مقایسه با پنجره چنددیواره معمولی داشته باشد پرداخته است.
(Ghiai, Pour Hajjar,2013)	به بررسی نسبت بازشو و انرژی مصرفی سالانه پرداخته و میزان تأثیرگذاری نسبت بازشو در جبهه‌های مختلف ساختمان در مصرف انرژی گوناگون است.
(Brembilla, Chi, Hopfe, & Mardaljevic, 2019)	به ارزیابی سیستم‌های شیشه‌ای پیچیده و سابه-بان‌ها در انواع مختلف شبیه‌سازی‌ها و مقایسه آن‌ها با دستورات ملی و دستورالعمل‌های ساختمان سبز پرداخته است.
(C. F. R. Reinhart & Stein, 2014)	دراین کتاب به بررسی نور روز و اهمیت نور روز در ساختمان‌های اداری پرداخته و به مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های شاخص‌های نور با نتایج تجربی پرداخته و نزدیک بودن پاسخ‌های شبیه‌سازی به آزمایش‌های تجربی نشان داده است.

2-1- معرفی شاخص‌های پژوهش در بهره‌وری انرژی و نور روز

سیستم‌های شیشه‌ای همچون پنجره‌ها، نماهای شیشه-ای و پنجره‌های سقفی شیشه‌ای در دیواره‌های ساختمان، امکان ورود نور روز و همچنین نفوذ گرما را فراهم می‌کنند. از این رو سیستم‌های شیشه‌ای از سه طریق در انرژی ساختمان تأثیرگذارند: اول، گرمایش از نور مستقیم خورشید از طریق سیستم‌های شیشه‌ای را در فصول گرم تحمیل می‌کنند. دوم، در فصول سرد به دلیل انتقال حرارت زیاد سیستم‌های شیشه‌ای در مقایسه با دیواره‌های غیر شیشه‌ای، اتلاف گرما از طریق پنجره‌ها وجود دارد (Pilechiha et al., 2020). سوم، در صورت وجود روشنایی نور روز کافی امکان استفاده از روشنایی مصنوعی کمتر می‌شود.

برای ارزیابی عملکرد انرژی در تمام مراحل زندگی در یک ساختمان اداری، تجزیه‌وتحلیل و عملکرد نور روز داخلی به طور کلی با استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزار محاسبه طیف وسیعی از معیارهای انجام می‌شود. از این رو در این پژوهش برای ارزیابی روشنایی نور روز در فضای داخلی شاخص روشنایی مفید نور روز سالانه انتخاب شده، و در ارزیابی بارهای انرژی جهت سرمایش و گرمایش شدت مصرف انرژی سالانه برای فضای اداری در ساختمان‌های متداول اداری شهر همدان که معمولا ساختمان‌هایی سه طبقه هستند، مورد پژوهش قرار گرفته است.

1-3- شاخص پویای نور روز: روشنایی مفید نور روز سالانه

استفاده از نور روز مورد توجه تمام افرادی است که دغدغه اصلی آنها صرفه‌جویی در انرژی است به ویژه در مواقعی که راه حلی برای کاهش مصرف انرژی الکتریکی است. به طور کلی در هرلحظه موقعیت زمین نسبت به خورشید در حال تغییر است، به این ترتیب در زمان‌های مختلف کیفیت و زاویه نفوذ نور خورشید به فضای داخل، متفاوت است. درحقیقت یک طراحی خوب بر مبنای نور روز، به گونه‌ای است که از این تغییر و نوسان در طول روزهای سال، در جهت تأمین نیازهای روشنایی و انرژی ساختمان استفاده کند (Pilechiha, 2018).

روشنایی مفید نورروز[2] UDI در سال 2006 معرفی شد، معیاری است که درصد ساعات اشغال شده فضا در یک سال را محاسبه می‌کند که یک نقطه در فضا در یک محدوده روشنایی خاص قرار می‌گیرد. روشنایی مفید نور روز نسبت تعداد ساعات سال به تعداد ساعات اشغال‌شده فضا در یک سال است (A. Nabil & Mardaljevic, 2005).

روشنایی مفید نور روز فاقد واحد اندازه‌گیری است. این عدد بین محدوده 0 تا 100 برای نشان دادن درصد زمان مفید بودن روشنایی‌ها ارائه شده است. هدف از تعیین سطح روشنایی مفید نور روز این است که نه خیلی تاریک است و نه خیلی روشن (C. F. Reinhart, Mardaljevic, & Rogers, 2006). این محدوده در سه رده 0-100 لوکس، 100-2000 لوکس و بیش از 2000 لوکس طبقه بندی شده است (Pilechiha, 2018). محدوده روشنایی که مفید در نظر گرفته می شود بین 100 لوکس تا 2000 لوکس است. نور زیر 100 لوکس خیلی تاریک در نظر گرفته می‌شود و در بالا 2000 لوکس بسیار روشن می‌شود (Fang & Cho, 2019).

این عامل از جمله شاخص‌های پویا بوده و بر اساس روشنایی اندازه گرفته‌شده بر سطح میز کار محاسبه می شود. از سویی نمونه پژوهش‌های مبتنی بر شرایط متنوع آب‌وهوای واقعی در یک سایت دلخواه، نشان می‌دهد که آنالیز سالیانه روشنایی در فضاهای داخلی نتایج بهتری را برای پژوهشگران به ارمغان می‌آورد، در صورتی که در بسیاری از پژوهش‌های پیشین این ارزیابی ها مبتنی بر شرایط استاتیک بوده است (Pilechiha, 2018). در این پژوهش، روشنایی مفید نور روز 2000-500 لوکس به عنوان، روشنایی مفید نور روز سالانه معرفی می شود و به عنوان معیار بهینه سازی نور روز انتخاب شده است.

1-4- شاخص بارهای مصرفی انرژی: شدت مصرف انرژی سالانه

شدت مصرف انرژی[3] EUI همچنین برای ارزیابی میزان مصرف برق استفاده می شود، که مصرف انرژی اداری را به عنوان تابعی از سطح کف مطبوع آن نشان می‌دهد (Pilechiha et al., 2020). مؤلفه عملکرد انرژی در بهینه سازی شدت مصرف انرژی سالانه است. شدت مصرف انرژی یک مؤلفه مصرف انرژی کل ساختمان محاسبه شده است. عملکرد انرژی ساختمان‌ها را می‌توان با مقایسه ارزش محاسبه شده شدت مصرف انرژی با برخی مقادیر مرجع ارزیابی کرد، که ویژگی‌های مربوط به انرژی ساختمان را نشان می‌دهد (Borgstein, Lamberts, & Hensen, 2016). واحد شدت مصرف انرژی ، کیلووات ساعت بر متر مربع در سال است (Fang & Cho, 2019). در این پژوهش برای محاسبه عملکرد انرژی در بهینه‌سازی شدت مصرف انرژی سالانه به عنوان شاخص مصرف انرژی محاسبه شده است.

5-1- نرم‌افزار ویندو و علت انتخاب آن

ویندو WINDOW یک برنامه رایانه‌ای است که در آزمایشگاه ملی لارنس برکلی LBNL طراحی شده‌است (Robin Mitchell, Christian Kohler & Ling Zhu, Simon Vidanovic, 2019) . این نرم‌افزار امکان طراحی و شبیه‌سازی انواع سیستم‌های شیشه‌ای پیچیده را فراهم می‌کند و به کاربر این امکان را می‌دهد که پس از شبیه سازی و محا سبه آنالیزهای دقیق نوری و انتقال حرارت سیستم شیشه‌ای طراحی شده از آن خروجی‌هایی گرفته که به نرم‌افزارهای شبیه‌سازی پرکاربرد و پیچیده دیگر متصل شود.

خروجی این نرم‌افزار برای بحث روشنایی نور روز و انرژی متفاوت ا ست. برای شبیه سازی نور روز، از فایل BSDF با فرمت خروجی XML استفاده می‌شود که قابلیت ورود به موتور شبیه‌سازی ردینس "Radiance," (2020) است را دارد. برای شبیه‌سازی انرژی از خروجی با فرمت idf استفاده می‌شود تا قابلیت استفاده در موتور انرژی پلاس "EnergyPlus," 2020a)) را داشته با شد. در بحث شبیه سازی نور روز و انرژی از بهترین موتورهای شبیه سازی که پا سخی نزدیک‌تر به واقعیت به‌دست می‌آورد ردینس و انرژی پلاس است. در این پژوهش از پلاگین هانی‌بی‌پلاس جهت شبیه‌سازی نور روز ا ستفاده شده که موتور آن ردینس ا ست و قابلیت ا ستفاده از فایل‌های XML تولید شده در ویندو را دارد. برای محاسبه بارهای حرارتی هم از هانی‌بی ("Ladybug & Honeybee," 2020) استفاده شده، که امکان استفاده از فایل های idf را در موتور انرژی پلاس فراهم می‌کند.

6-1- تابع توزیع پراکندگی دوسویه (BSDF)

در بحث‌های عمومی‌تر که هم پراکندگی منتقل‌شده و هم پراکندگی منعکس شده را پو شش می‌دهد، ا ستفاده از عبارت عمومی BSDF، "تابع توزیع پراکندگی دو سویه" متداول ا ست. این تابع، ویژگی‌های پراکندگی یک نمونه یا سطح را با توجه به همه جهت‌های ورودی و خروجی توصیف می‌کند، که آن را به ابزاری قدرتمند برای مطالعه و مقایسه مواد پراکندگی تبدیل می‌کند (Jonsson & Brandén, 2007) .

هدف سیستم نور روز سولاتوب (و فایل داده BSDF مربوطه) باید به درستی در مدل‌های نور روز جهت‌گیری شود تا این استاندارد جهت‌گیری سیستم نوری را منعکس کند. فایل‌های داده BSDF شامل یک ماتریس مسیر ورودی با تقسیمات کلیمز است و در نتیجه درصد نور خروجی برای هر کدام از تقسیمات کلیمز موجود است. از 145 تقسیم کلیمز و تقسیمات خروجی استاندارد برای محاسبات کارآمد استفاده می‌شود (Solatube, 2019).

2- روش تحقیق

هدف از این پژوهش مدل‌سازی دقیق سیستم‌های شیشه‌ای پیچیده و نوین و استفاده از آن‌ها در شبیه سازی رو شنایی نور روز و عملکرد م صرف انرژی در یک ساختمان اداری نمونه است تا به این شکل بتوان کارآترین آن‌ها برای ا ستفاده در طراحی معماری ا ستفاده کرد.

برای این منظور، ابتدا انواع سیستم‌های شیشه‌ای متداول و تجاری شناسایی و دسته‌بندی شدند. پس از آن متداول‌ترین نمونه‌ها در هرکدام از دسته‌ها انتخاب شد. اطلاعات دقیق هر نمونه برای مدل سازی دقیق و پیچیده آن در نرم‌افزار ویندو "WINDOW," 2020)) استخراج شد. با استفاده از اطلاعات هر سیستم‌های شیشه‌ای، فایل تابع توزیع پراکندگی دوسویه آن در نرم‌افزار ویندو تهیه شد و برای همگام‌سازی نرم‌افزار مدل‌ساز با شبیه‌سازهای انرژی و نور، فایل‌هایی با فرمت idf و xml استخراج شد. به این طریق انواع سیستم‌های شیشه‌ای به صورت دقیق در ویندو مدل سازی شده و از آن‌ها برای شبیه سازی نور روز و انرژی استفاده شد.

در ا ین مرحله مدل پژو هش که مدل متداول ساختمان‌های اداری در شهر همدان است، در نرم‌افزار راینو به صورت هندسی ترسیم شد و به گرسهاپر "Grasshopper," 2020)) که محیط کار پلاگین‌های هانیبی و هانیبی‌پلاس ا ست متصل می شود. سپس برای محا سبه بارهای حرارتی و برودتی، الگوریتم شبیه سازی مصرف انرژی سالانه مدل پژوهش نوشته شد و با استفاده از فا یل تابع توزیع پراکندگی دوسو یه هر یک از

سیستم‌های شیشه‌ای، بارهای حرارتی و برودتی و رو شنایی الکتریکی و همین‌طور شاخص شدت م صرف انرژی سالانه محاسبه شد. برای محاسبه میزان روشنایی نور روز، الگوریتم شبیه سازی رو شنایی مفید سالانه نور روز برای مدل پژوهش نوشته شد و با استفاده از فایل تابع توزیع پراکندگی دوسویه هر یک از سیستم‌های شیشه‌ای، درصد میانگین روشنایی مفید نور روز در محدوده 2000- 500 لوکس برای هریک از سیستم ها محاسبه شد. نتایج به‌دست آمده برای هر یک از آنالیزهای محاسباتی نور روز و شدت مصرف انرژی برای یافتن گزینه بهینه استفاده شد. شکل 1 چارچوب پژوهشی ارائه شده توسط این پژوهش را نشان می‌دهد.

2-1- ساختار مدل شبیه‌سازی شده برای همدان

2-1-1- مشخصات دفتر اداری مدل پژوهش

مدل پژوهش یک فضای اداری با پلان باز و پنجره‌ای در جبهه جنوبی است (شکل 2). ابعاد این اتاق 6 متر عرض در 10 متر عمق و 3.5 متر ارتفاع است، که 45 درصد نمای جنوبی آن به عنوان پوسته شیشه‌ای در نظر گرفته شده است.

برای مطالعه عملکرد سالانه نور روز، آنالیز روی صفحه کار در ارتفاع 0.8 متری از کف زمین که به صورت شبکه‌ای 0.5 متر در 0.5 متر تق سیم بندی شده ا ست مطالعه می‌شود. آستانه روشنایی نور روز 500 لوکس در نظر گرفته شده است.

2-1-2- مشخصات سیستم های پیچیده و نوین پوسته‌های شیشه‌ای شبیه‌سازی شده

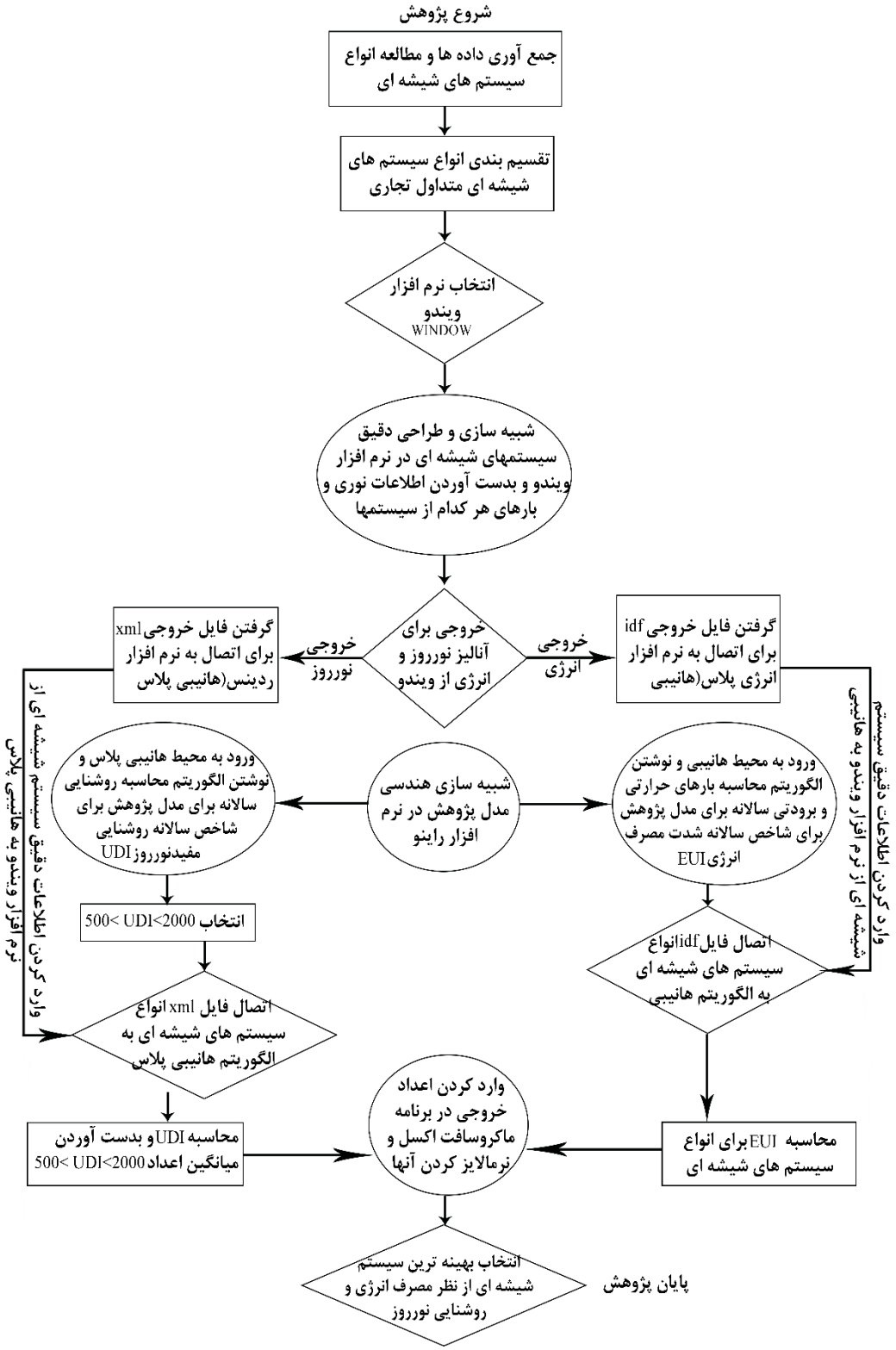
برای ارزیابی دقیق انواع سیستم‌های شیشه‌ای پیچیده تجاری موجود، دسته‌بندی اولیه‌ای تعریف شد. این د سته‌ها را می‌توان به هشت گروه شامل پر شده از گاز، روکش‌های کم‌گسیل، شیشه‌های چنددیواره، محصولات ویژه، شیشه‌های رنگی، پو ششهای بازتابشی، سیستم شیشه‌های دو دیواره با یک شیشه رنگی و روکش‌های کم‌گ سیل، و شیشه‌های ترموکرومیک گروه‌بندی کرد. در مرحه بعدی، 8 گروه معرفی شده به 14 زیرگروه بر ا ساس کارآیی تجاری آنها تق سیم(شکل 3) و در نهایت بر اساس ویژگی‌های فنی استخراج و هر کدام (جدول 2) در نرم‌افزار ویندو مدل‌سازی شد.

3– نتایج و بحث

3-1- تحلیل رو شنایی نور روز در سیستم‌های شیشه ای نوین

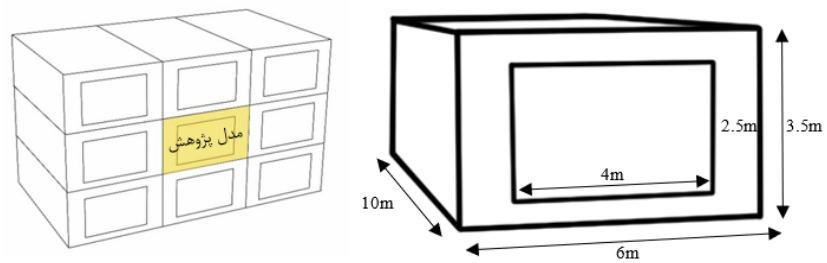
بررسی عملکرد سیستم‌های شیشه‌ای نوین برای سنجش نحوه روشنایی نور روز در مدل پژوهش برای شهر همدان، در شرایط ماتریس آ سمان که برگرفته از فایل آب و هوایی این شهر از سایت انرژی پلاس (EnergyPlus, 2020b) است. عملکرد سیستم‌های شیشه‌ای نوین در جبهه جنوبی شبیه‌سازی‌شده و میزان روشنایی مفید نور روز بر روی سطح میزکار به ارتفاع 80 سانتی‌متر بررسی شد.

برای برر سی شرایط میانگین در صد رو شنایی‌مفیدنور روز UDI در اتاقی با این یک منبع روشنایی طبیعی، شبیه‌سازی‌های زیر انجام شده است. ابعاد پنجره برابر با 45 در صد از م ساحت دیوار جنوبی ا ست که در مدل به صورت 2.5 متر در 4 متر ارتفاع با فاصله از کف 40 سانتی‌متر روی صفحه سنسورها در ارتفاع 80 سانتی‌متر بر روی سطح میز کار در نظر گرفته شده است. در شکل4 میانگین رو شنایی مفید نور روز سالانه در انواع سیستم‌های شیشه‌ای شبیه سازی شده در نمودار با کد اختصار آن‌ها قرارگرفته ا ست و میزان رو شنایی آن‌ها و به‌ترتیب از بیشترین تا کمترین آن‌ها قرارگرفته است. بیشترین میزان رو شنایی مربوط به سیستم Low-E3 است و کمترین میزان روشنایی مفید نور روز سالانه دریافتی در فضای داخلی مربوط به سیستم شیشه‌ای Th-A است. در این آنالیزها با آستانه روشنایی 500 لوکس در نظر گرفته شده و میانگین درصد روشنایی مفیدنور روز در تمام سنسورهای صفحه کار در ساعات کاری و ا شغال کاربر در فضا برای ساعت 8 صبح تا 18 بعد از ظهر است. این شبیه‌سازی برای کل ساعات سال که معادل 8760 ساعت است انجام شده است.



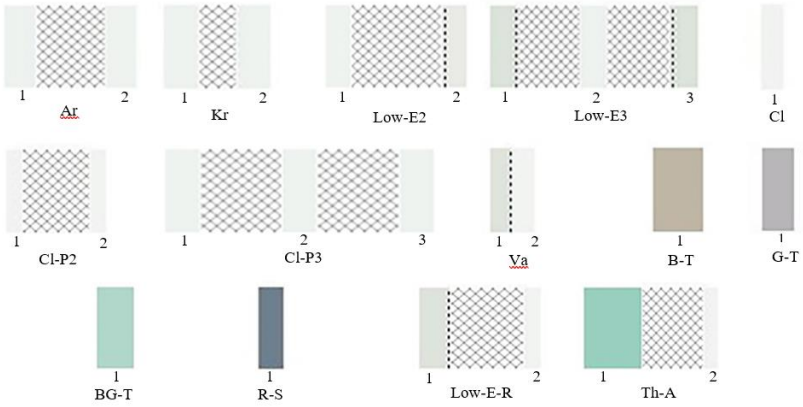
شکل 1- الگوریتم روند پژوهش

Fig. 1- Research process algorithm



شکل 2- ارائه مدل دفتر اداری مرجع پژوهش مورد استفاده در شبیه سازی. چپ: پرسپکتیو نمونه متداول ساختمان‌های اداری شهر همدان. راست: پرسپکتیو دفتر اداری مورد مطالعه با پوسته شیشه ای (WWR= 45 درصد)

Fig. 2- Presenting the office reference model of the research reference used in the simulation. Left: Perspective of a typical example of office buildings in Hamadan. Right: Perspective of the studied office with glazed façade (WWR =%45)



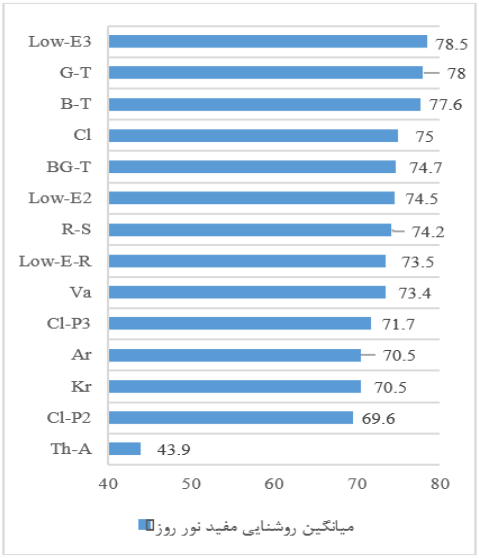
شکل3- مقطع انواع سیستم های شیشه‌ای پیچیده شبیه‌سازی شده و کد اختصار آنها

Fig. 3 - section of various simulated complex Fenestration systems and their code

جدول2- انواع مختلف سیستم‌های پیچیده و نوین پوسته شیشه‌ای شبیه‌سازی شده و مورد استفاده در پژوهش

Tab. 2- Different types of complex Fenestration systems glazed façade simulated and used in research

سیستم‌های شیشه‌ای	کد اختصار	لایه های سیستم شیشه‌ای (از سمت‌راست فضا داخلی به سمت‌چپ محیط بیرون و ضخامت برحسب میلیمتر)	U-value	SHGC	Tvis
پرشده از گاز	Ar	معمولی 6 ،گاز آرگون 12 ، معمولی 6	2.4	0.7	0.7
	Kr	معمولی 6 ،گاز کریپتون 6 ، معمولی 6	2.4	0.7	0.8
روکش‌های کم گسیل	Low-E2	معمولی6، روکش کم گسیل، هوا 12.7، معمولی 6	1.6	0.4	0.6
	Low-E3	معمولی6 ، روکش کم گسیل، آرگون 12.7، معمولی، آرگون 12.7، روکش کم گسیل، معمولی 6	0.7	0.3	0.5
پنجره ها با دیواره های گوناگون	Cl	معمولی6	5.5	0.8	0.9
	Cl-P2	معمولی6، هوا 12.7، معمولی 6	2.6	0.8	0.8
	Cl-P3	معمولی6 ، هوا 12.7، معمولی 6، هوا 12.7، معمولی 6	1.7	0.7	0.7
محصولات خاص	Va	معمولی4، شیشه با روکش کم‌گسیل4	0.6	0.4	0.7
شیشه‌های رنگی	B-T	شیشه برنزی 13.5	5	0.5	0.5
	G-T	شیشه طوسی5	5.4	0.6	0.5
	BG-T	شیشه سبزآبی12.7	5.2	0.5	0.6
روکش‌های بازتابشی	R-S	شیشه با روکش های بازتابشی نقره‌ای 4	4.9	0.2	0.2
پنجره دو دیواره با یک شیشه رنگی و روکش بازتابشی	Low-E-R	معمولی3، هوا 12.7، شیشه با روکش کم‌گسیل5.6	1.6	0.4	0.7
ترموکرومیک	Th-A	معمولی3، هوا12.7، ترموکرومیک 12	2.7	0.2	0.1

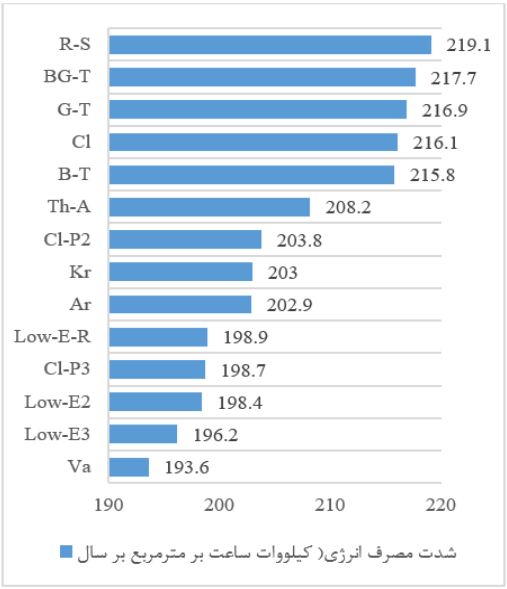


شکل 4- نمودار میزان روشنایی نور روز مفید سالانه انواع سیستم‌های پیچیده و نوین شبیه‌سازی شده برای دفتر اداری مدل پژوهش با 45 درصد پوسته شیشه‌ای در جبهه جنوبی در شهر همدان و نحوه توزیع آن روی صفحه ای سنور در ارتفاع 80 سانتی متر سطح میز کار

Fig. 4- Diagram of useful daylight illuminance of various complex fenestration systems simulated for the office of the research model with %45glazed facade on the southern envelope in the city of Hamadan and how to distribute it on a screen at a height of 80cm above the surface desk

2-3- تحلیل نتایج شبیه سازی شدت م صرف انرژی سالانه EUI در سیستم‌های نوین شیشه‌ای

کاهش انرژی در شدت مصرف انرژی سالانه با سیستم‌های شیشه‌ای مختلف در دفتر اداری مرجع پژوهش ویژگی‌های ساختمان توضیح داده شده در شکل 2، مصرف برق سالانه برای ساختمان اداری مرجع از مصرف برق ساعتی پیش‌بینی شده توسط IES محا سبه شده ا ست. برای سنجش نحوه کارکرد شدت ا ستفاده از انرژی سی ستم‌های شی شه‌ای نوین در شهر همدان، مدل به‌دست‌آمده را در شرایط مدل‌سازی آسمان مبتنی بر اقلیم است، که شبیه‌سازی‌های پیچیده را در طول یک سال ارزیابی می‌کنند و به طراحان برای شبیه‌سازی دقیق در واقعیت مجازی کمک می‌کند. مدل‌سازی آسمان مبتنی بر اقلیم برگرفته از فایل آب‌وهوایی این شهر در سایت انرژی پلاس است. پوسته شی شه‌ای در جبهه جنوبی شبیه سازی شده همان‌طور که در مشخصات مدل مورد مطالعه نیز بیان شد، این اتاق اداری از یک منبع روشنایی که همان پوسته شیشه‌ای جبهه‌جنوبی است، ابعاد پنجره برابر با 45 درصد از مساحت دیوار جنوبی است، برخوردار است. این شبیه سازی از اول ژانویه تا 31 د سامبر انجام شد. کاهش در مصرف انرژی سرمایش سالانه در دفتر اداری مرجع پژوهش به دلیل جایگزینی سیستم شیشه معمولی با هر نوع شیشه محاسبه شده در اینجا به عنوان نسبت کاهش مصرف انرژی سالانه با توجه به شدت مصرف انرژی سالانه در زمانی که ساختمان سی ستم شی شه‌ای معمولی ا ست، در د سترس ا ست. مصرف برق سالانه پیش‌بینی شده برای انواع مختلف شی شه در ساختمان اداری مرجع پژوهش در شکل 5 نشان‌داده شده است.



شکل5- نمودار شدت استفاده از انرژی سالانه در انواع سیستم‌های پیچیده و نوین شبیه‌سازی شده برای دفتر اداری مدل پژوهش با 45 درصد پوسته شیشه‌ای در جبهه جنوبی در شهر همدان

Fig. 5- Diagram of annual energy use intensity in a variety of complex Fenestration systems simulated for the office of the research model with %45 glazed facade on the southern front in the city of Hamadan

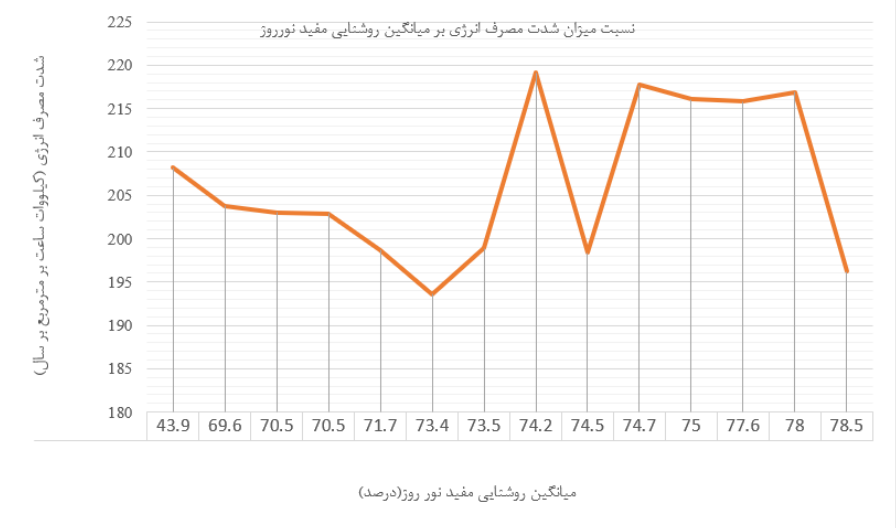
همان‌طور که این نمودار نشان می‌دهد، استفاده از سی ستم‌های شی شه‌ای نوین منجر به صرفه‌جویی در مصرف برق در محدوده 193.6 تا 219.1 کیلووات ساعت در سال بر متر مربع بر سال بوده است. با توجه به نتایج

به‌دست آمده سیستم شیشه‌ای Va کمترین میزان مصرف برق سالانه در ساختمان اداری مرجع پژوهش مشخص شده است، و پس از آن سیستم شیشه‌ای Low-E3 محاسبه شده و به ترتیب در ادامه بقیه سیستم‌های شیشه‌ای شبیه‌سازی شده قرار گرفته است که انرژی مصرفی بیشتری داشته‌اند.

3-3- ارزیابی نتایج

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد، سیستم‌های شیشه‌ای متنوع قادر است میزان روشنایی‌مفید نور روز سالانه را در فضای داخلی دفتر اداری شبیه‌سازی شده، با توجه به اهمیت میزان روشنایی در فضاهای اداری افزایش داده است و همچنین این سیستم‌ها قادر هستند، بارهای سرمایشی، گرمایشی، تجهیزات الکتریکی و روشنایی مصنوعی این فضا که در مجموع اهمیت شدت استفاده از انرژی سالانه بر واحد مترمربع را مشخص می‌کنند، را به میزان چشمگیری کاهش دهند. این کاهش مصرف انرژی و افزایش میزان روشنایی (دو هدفی که این پژوهش در پی پاسخ‌گویی به آن‌ها بود) از طریق سیستم‌های شیشه‌ای نوین شبیه سازی شده، به نتیجه رسید. همان‌گونه که در شکل 6 مشخص است کمترین میزان شدت مصرف انرژی به‌ترتیب مربوط به سیستم Va با مصرف انرژی 193.6 کیلووات ساعت بر مترمربع بر سال و سپس سیستم Low-E3 با مصرف انرژی 196.2 کیلووات ساعت بر مترمربع بر سال است. بیشترین میزان میانگین در صد رو شنایی نور روز مفید سالانه سیستم شیشه‌ای Low-E3 با میزان رو شنایی 78.5 است. در جدول 3 میزان شدت مصرف انرژی و میانگین رو شنایی مفید نور روز سالانه را با کد اختصار هر کدام از سیستم‌های شبیه سازی شده نشان داده است.

شرکت تولید شیشه ونوس در ایران از سال 1384 فعالیت خود را آغاز کرده و در تولید شیشه های ساختمان‌های شاخصی همچون برج میلاد، پردیس سینمایی ملت، باغ کتاب تهران، باغ موزه بانک مرکزی ایران و بسیاری از پروژه‌های عظیم دیگر را تأمین نموده است (Venusglass, 2021). این شرکت برای پروژه‌های نام برده شده در بالا به جز برج میلاد از شیشه‌های v-cool استفاده کرده است که بسیار مشابه به شیشه Low-E3 در این پژوهش است.



شکل6- نمودار بهینه سازی خطی شدت استفاده از انرژی سالانه نسبت به میزان روشنایی نور روز مفید سالانه در انواع سیستم-های پیچیده و نوین شبیه‌سازی شده برای دفتر اداری مدل پژوهش با 45 درصد پوسته شیشه‌ای در جبهه جنوبی در شهر همدان

Fig .6- Linear optimization diagram of the intensity energy use of annual relative to the amount of useful daylight illuminance of annual in a variety of complex fenestration systems simulated for the office of a research model with % 45glazed facade on the southern front in the city of Hamadan

جدول 3- جدول شدت مصرف انرژی سالانه و میزان روشنایی نور روز مفید سالانه در انواع سیستم‌های پیچیده و نوین شبیه‌سازی شده برای دفتر اداری مدل پژوهش با 45 درصد پوسته شیشه‌ای در جبهه جنوبی در شهر همدان

Tab. 3- annual energy use intensity and amount of useful daylight illuminance in a variety of complex fenestration systems simulated for the office of the research model with %45glazed facade on the southern front in the city of Hamadan

سیستم شیشه‌ای	میانگین روشنایی مفید نور روز سالانه (درصد)	شدت مصرف انرژی (کیلووات ساعت بر مترمربع بر سال)
Th-A	43.9	208.2
Cl-P2	69.6	203.8
Kr	70.5	203
Ar	70.5	202.9
Cl-P3	71.7	198.7
Va	73.4	193.6
Low-E-R	73.5	198.9
R-S	74.2	219.1
Low-E2	74.5	198.4
BG-T	74.7	217.7
Cl	75	216.1
B-T	77.6	215.8
G-T	78	216.9
Low-E3	78.5	196.2

4- نتیجه‌گیری

استفاده از دیواره‌های نورگذر و بازشوها، اتلاف انرژی بسیاری در برابر دیگر دیواره‌های ساختمان دارند، این موضوع اهمیت انتخاب سیستم‌های شیشه‌ای را نشان می‌دهد که با کاهش اتلاف انرژی و افزایش روشنایی نور روز دریافتی برای فضای داخلی ساختمان در مجموع انرژی مصرفی ساختمان را می‌توان به میزان چشم‌گیری کاهش داد. در اقلیم سرد همدان در ماه‌های سرد سال انرژی زیادی بین دیواره های داخلی و خارجی اتلاف می شود با در نظر گرفتن سیستم شیشه‌ای مناسب اتلاف انرژی کمتر و روشنایی نور روز دریافتی کافی را در طراحی‌های ساختمان می‌توان فراهم کرد.

در این پژوهش بررسی عملکرد سیستم‌های شیشه‌ای نوین از نظر میزان روشنایی نور روز و مصرف انرژی در شهر همدان محاسبه شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد استفاده از سیستم شیشه‌ای با بیشترین میزان روشنایی مفید نور روز سالانه UDI سبب شده که نیاز به استفاده از روشنایی مصنوعی برای فضای داخلی به کمینه خود رسیده و حجم زیادی از روشنایی مورد نیاز به صورت طبیعی از طریق پوسته شیشه‌ای وارد فضا شود. با این حال در نظر گرفتن اتلاف انرژی از طریق این سیستم شیشه بسیار حائز اهمیت است و با محاسبه شدت مصرف انرژی سالانه EUI در فضای اداری شبیه سازی شده مصرف انرژی سالانه محاسبه شد.

نمونه مورد بررسی، در بین 14 نوع سیستم شیشه‌ای نوین مختلف (در جدول 2 معرفی شده‌اند) انتخاب شد. داده‌ها پژوهش، در تمام فصول سال برای اقلیم سرد، با اطلاعات اقلیمی به دست آمده از شهر همدان در سایت انرژی پلاس بررسی شد. با در نظر گرفتن 45 درصد دیواره شیشه‌ای در جبهه جنوبی مدل پژوهش، سیستم شیشه‌ای Low-E3 با مشخصات لایه‌ها به ترتیب از فضا بیرون به فضا درون شیشه معمولی 6 میلی‌متر، روکش کم گسیل،گاز آرگون 12.7 میلی‌متر، شیشه معمولی 6 میلی‌متر، گاز آرگون 12.7 میلی‌متر، روکش کم گسیل، شیشه معمولی 6 میلی‌متر ایده‌آل‌ترین سیستم شیشه‌ای برای همدان بوده است. در محاسبات انجام شده، این سیستم شیشه‌ای 78.5 درصد روشنایی مفید نور روز سالانه در زمان اشغال فضا توسط کاربر را برای مدل پژوهش تأمین نموده است. همچنین از نظر بررسی مطابق جدول 3 شدت مصرف انرژی سالانه 196.2 کیلووات ساعت بر متر مربع انرژی مصرفی سالانه برای مدل مرجع پژوهش بود که در مقایسه با سیستم شیشه معمولی که در محاسبات شدت مصرف انرژی آن 216.1 کیلووات ساعت بر متر مربع شدت انرژی مصرفی سالانه برای مدل مرجع پژوهش بوده 19.9 کیلووات ساعت بر متر مربع شدت انرژی مصرفی سالانه کمتری داشته است.

لازم به ذکر است تفاوت متغیرهای حاصل از تغییر سیستم‌های شیشه‌ای نما در ساعات اداری 8 صبح تا 18 عصر، برای کل روزهای اداری سال بوده است. بنابراین

می‌توان چنین نتیجه گرفت که تغییر سیستم‌های شیشه‌ای نمای ساختمان در موقعیت جغرافیایی شهر همدان می‌تواند راهکاری مؤثر در بهبود مصرف انرژی و روشنایی دریافتی نور روز باشد. امید است نتایج به‌دست آمده از بررسی سیستم‌های شیشه‌ای راه‌گشای ساختمان‌های آینده شهر همدان و در جهت کمتر شدن مصرف انرژی ساختمان مؤثر باشد.

پی‌نوشت

[1] Complex Fenestration System (CFS)
[2] Useful Daylight Illuminance (UDI)
[3] Energy Use Intensity (EUI)

منابع

Aburas, M., Soebarto, V., Williamson, T., Liang, R., Ebendorff-Heidepriem, H., & Wu, Y. (2019). Thermochromic smart window technologies for building application: A review. Applied Energy.

Asfour, O. S. (2020). A comparison between the daylighting and energy performance of courtyard and atrium buildings considering the hot climate of Saudi Arabia. Journal of Building Engineering. h

Borgstein, E. H., Lamberts, R., & Hensen, J. L. M. (2016). Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review. Energy and Buildings.

Brembilla, E., Chi, D. A., Hopfe, C. J., & Mardaljevic, J. (2019). Evaluation of climate-based daylighting techniques for complex fenestration and shading systems. Energy and Buildings.

EnergyPlus. (2020a). Retrieved from https://energyplus.net/

EnergyPlus. (2020b). Weather file sources. Hamedan EPW. Retrieved from https://www.ladybug.tools/epwmap/

Fang, Y., & Cho, S. (2019). Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance. Solar Energy.

Ghiai, Mohammad Mahdi, Pour Hajjar, Ali Hossein. (2013). The Relation of Energy Consumption and Opening Ratio in High Rise Buildings, Memari-va-shahrsazi Paydar, Vol 1, Tehran, Iran. [in Persian]

Grasshopper. (2020). Retrieved from https://www.grasshopper3d.com/

Jonsson, J. C., & Brandén, H. (2007). Obtaining the bidirectional transmittance distribution function of isotropically scattering materials using an integrating sphere. Optics Communications.

Ladybug & Honeybee. (2020). Retrieved from https://parametricmonkey.com/2016/03/13/ladybug-honeybee/

Liu, C., Wu, Y., Zhu, Y., Li, D., & Ma, L. (2018). Experimental investigation of optical and thermal performance of a PCM-glazed unit for building applications. Energy and Buildings.

Microsoft. (2020). Microsoft Excel. Retrieved from www.microsoft.com

Mirhashemi, Seyyed Mahdi, Shapourian, Seyyed Mohammad Hadi, Ghiabaklou, Zahra. (2010). A NEW METHOD OF OPTIMIZING SINGLE GLAZED WINDOWS, Honar-ha-ye-ziba Memari-va-shahrsazi, Vol 43, Tehran, Iran. [in Persian]

Mohammadi, Maryam, Heidari, Shahin. (2015). Air Flow WindowAn Effective Element in Reduction of Buildings' Energy Consumption in Tehran, Honar-ha-ye-ziba Memari-va-shahrsazi, Vol 20, Tehran, Iran. [in Persian]

Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2005). Useful daylight illuminance: A new paradigm for assessing daylight in buildings. Lighting Research and Technology.

Nabil, Azza, & Mardaljevic, J. (2006). Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. Energy and Buildings.

Pilechiha, Peiman. (2018). Multi Objective Optimization of Energy ،Day Lighting and View Quality In High Rise Office Building (PhD thesis), Tarbiat Modares university, Tehran, Iran. [in Persian]

Pilechiha, P., Mahdavinejad, M., Pour Rahimian, F., Carnemolla, P., & Seyedzadeh, S. (2020). Multi-objective optimisation framework for designing office windows: quality of view, daylight and energy efficiency. Applied Energy.

Robin Mitchell, Christian Kohler, D. C., & Ling Zhu, Simon Vidanovic, S. C. and D. A. (2019). WINDOW 7 User Manual (Environmental Energy Technologies Division Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, California. University of California Berkeley, California.). Retrieved from http://windows.lbl.gov/software/software.html

Solatube. (2019). Innovating the Application of BSDF Files for Radiance Modeling of Spaces Using Tubular Daylighting Devices.

Venusglass. (2021). Retrieved from http://viewer.ipaper.io/luxtarinha/catalog/venusglass/?page=.2 , Tehran, Iran. [in Persian]

WINDOW. (2020). Retrieved from https://windows.lbl.gov/software/window.

Radiance. (2020). Retrieved from https://floyd.lbl.gov/radiance/refer/short.html

Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America.

Reinhart, C. F. R., & Stein, R. (2014). Daylighting Handbook. Retrieved from https://books.google.com/books?id=XWc4vwEACAAJ

Rhinoceros v6. (2020). Retrieved from https://www.rhino3d.com/