بهینه سازی چند هدفه شاکله پنجره به منظور تامین هم زمان مولفه های آسایش بصری و کارایی انرژی از طریق الگوریتم ژنتیک (نمونه موردی: کلاس درس ابتدایی در تهران– ایران)

فیروزه محمدی [۱]، سید مجید مفیدی شمیرانی [*۲]

[۱] دکتری معماری، گروه عمران و معماری، موسسه آموزش عالی اوج، قزوین، ایران
[۲] استادیار گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۲۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۲۱

چکیده

حرکت به سوی ساختمان‌های پایدار نیازمند آن است تا تأکید بیشتری بر ارزیابی دقیق عملکرد نور روز و انرژی شود. این امر به خصوص در مورد ساختمان‌های آموزشی دارای اهمیت ویژه است، چرا که تامین میزان نور کافی هم‌زمان با ممانعت از ایجاد خیرگی و نیز کاهش مصرف انرژی در این فضاها چالش بزرگی محسوب می‌شود. در این مقاله به منظور تامین هم زمان مولفه های آسایش بصری(افزایش روشنایی و کاهش خیرگی) و کارایی انرژی(کاهش مصرف انرژی) در ساختمان‌های آموزشی(کلاس درس مدارس ابتدایی) شهر تهران یک کلاس درس به عنوان مدل پایه مدلسازی پارامتریک شد و شبیه سازی پویای عملکرد نور روز و انرژی بر روی آن انجام گرفت. سپس جهت دستیابی به مقادیر بهینه پارامترهای طراحی پنجره فرآیند بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی از طریق الگوریتم ژنتیک و به صورت اتوماتیک در نرم افزار گرسهاپر بصورت چند هدفه صورت گرفت. نتایج حاصل، لزوم تعدیل شرایط با اولویت وزنی به عملکرد نور روز را نشان می دهند. بهترین راه حل پارتو بر اساس کمترین فاصله تا بهینه جهانی عملکرد بهتری را نسبت به مدل پایه نشان می دهد که میزان بهبود شاخص های DGP،UDI وEUI به ترتیب۱۱، ۱۵و ۲۲ درصد است. در نهایت، بهینه سازی چند هدفه با تجسم مرزهای فضای راه حل به طور قابل ملاحظه پیچیدگی مشکل را کاهش داده و می تواند طراح را در دستیابی به مجموعه ای از متغیر هایی که به طور همزمان مقادیر نسبتا خوب از تمام توابع هدف در نظر گرفته شده و امکان انتخاب گزینه هایی با الویت هر یک از اهداف متضاد برای دستیابی به توافق بین انتظارات پروژه و طراحی نهایی را پشتیبانی کند.

کلید واژه‌ها: عملکرد نور روز، عملکرد انرژی، ساختمان‌های آموزشی، شاکله پنجره، الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی چندهدفه.

[*] نویسنده عهده دار مکاتبات: s.m.mofidishemirani@gmail.com

مقدمه

نورروز به عنوان منبع اولیه ای مهم در روشنایی ساختمان های آموزشی، فاکتوری کلیدی برای سلامتی، تندرستی و ارتقاء کیفیت محیط داخلی نیز به حساب می آید. از سویی دیگر امروزه موضوع مهم پتانسیل صرفه جویی در انرژی از طریق طراحی موثر نورروز در ساختمانهای آموزشی نیز مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. مساله اصلی در زمینه عملکرد نورروز و انرژی در ساختمان های آموزشی عدم وجود مطالعات کافی با در نظر گرفتن همزمان مولفه های آسایش بصری و کارایی انرژی تحت پارادایم جدید با رویکردی پویا (برخلاف رویکردهای ایستای متداول که فاقد واقع گرایی لازم هستند) در ارزیابی های نورروز است. همچنین باید در نظر داشت که تامین اهداف آسایش بصری و مصرف انرژی گاهی اوقات با یکدیگر در تضادند. بنابراین لزوم توجه به پنجره، این شریان اصلی نور روز و در عین حال ضعیف ترین نقطه ساختمان از نظر اتلاف حرارتی، و تأثیر بنیادی آن بر مقدار مصرف انرژی، و نیز شرایط آسایش داخلی گسترده تر شده است. پنجره های بزرگ در ساختمان های آموزشی که به صورت معمول و در نمونه های رایج کشور عموما فاقد سایبان هستند، گرچه نور روز زیادی فراهم می کنند، اما به همین نسبت موجب ایجاد خیرگی و گرمایش بیش از حد فضا نیز می گردند. مضاف بر 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 می کند، این امر در کنار این موضوع که اغلب اوقات کاربران نمی توانند محل استقرار خود در کلاس را به سادگی تغییر دهند و یا پرده های داخلی را متناسب نظر خود باز و بسته کنند، منجر به تشدید این احساس عدم آسایش خواهد شد. بنابراین تابش مستقیم که بر آسایش بصری و حرارتی تاثیرگذار است و می تواند شرایط عدم آسایش و در نتیجه نیاز به انرژی برای تامین روشنایی و سرمایش را افزایش دهد باید در مراحل اولیه طراحی مورد توجه باشد. هدف اصلی پژوهش ارائه راهکاری برای طراحان در جهت بهینه سازی الگوهای طراحی شاکله پنجره از نظر عملکرد همزمان نورروز و انرژی در ساختمانهای آموزشی(کلاس درس در مدارس ابتدایی) در شهر تهران به منظور تامین همزمان مولفه های آسایش بصری(تامین روشنایی و کاهش خیرگی) و کارایی انرژی(کاهش مصرف انرژی) می باشد که از طریق سنجش میزان کارایی روش بهینه سازی چند هدفه جهت تحقق این هدف صورت می پذیرد تا بتوان در جهت اثبات توانایی این روش برای تجسم مرزهای فضای راه حل گام برداشت.

مرور ادبیات

طراحی معماری یک فرایند پیچیده است که نیاز به ادغام ساختمان، خواسته های ساکنان و شرایط مرزی محیطی دارد. یکی از رویکردهای مشترک که طراحان به دنبال دستیابی به بهترین راه حل طراحی به کار می‌گیرند روش طراحی با آزمایش و مقایسه است که در آن متغیرهای مختلف طراحی برای ایجاد گزینه های طراحی چندگانه ترکیب شده و طراحی مطلوب از طریق مقایسه عملکرد آنها پیدا می‌شود. این فرآیند ادراکی و انعطاف پذیر است. بنابراین به طور گسترده ای در مسائل کاربردی و پژوهشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این رویکرد که در جوامع علمی به نام بهینه سازی شناخته می‌شود به فرآیند یا روش ایجاد یک طرح یا تصمیم به صورتی که تا حد ممکن کاملا بی نقص، کاربردی یا موثر باشد اشاره می‌کند. از نظر ریاضی، بهینه سازی روند یافتن حداقل یا حداکثر مقدار یک تابع با انتخاب بهترین

متغیرها است. بهینه سازی امکان کشف تعداد زیادی از راه حل های طراحی را به طور موثر فراهم می‌کند(۱). با توسعه طراحی پارامتریک، شبیه سازی عملکرد ساختمان و تکنولوژی های بهینه سازی در سال های اخیر، بهینه سازی عملکرد ساختمان تا حد زیادی امکان‌پذیر شده است. اغلب مطالعات در زمینه بهینه سازی عملکرد ساختمان با استفاده از شبیه سازی انرژی ساختمان و یک موتور بهینه سازی الگوریتمی‌در اواخر قرن ۲۰ منتشر شده‌اند. افزایش چشمگیر تعداد مقالات بهینه سازی از سال ۲۰۰۵ نشان می‌دهد که علاقه زیادی به تکنیک های بهینه سازی در میان جوامع تحقیقات ساختمان ایجاد شده است.

داگراک و همکاران(۲) یک روش مبتنی بر نظرات تخصصی برای ارزیابی و بهینه سازی متغیرهای ساختمان مدرسه با توجه به جنبه های آسایشی: حرارت، آکوستیک، نور طبیعی و عملکرد انجام داده اند و نتایج نشان داده اند که به حداکثر رساندن جنبه های گوناگون آسایش ممکن نیست اما می‌توان به راه حل های سازشی دست یافت. هو و همکاران(۳) عملکرد چهار گونه طراحی سایه بان با ترکیب ارتفاع و عرض مختلف برای طراحی کلاس درس را بررسی کردند و طراحی بهینه با حداکثر توزیع روشنایی یکنواخت را یافتند. با این حال، تنها گزینه های طراحی محدودی می‌توانند در این روش مورد بررسی قرار گیرند. ژانگ و همکاران(۴) از یک الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای بهینه سازی عملکرد حرارتی و نور روز یک ساختمان مدرسه واقع در آب و هوای سرد تیانجین (چین) استفاده کردند. ابتدا، طرح های مختلف پلان، یعنی راهروهای باز یک طرفه، راهرو بسته یک طرفه و راهرو دو طرفه، به دلیل نمایندگی از ساختارهای ساختمان مدارس در چین، به عنوان نمونه های اصلی مورد توجه قرار گرفتند. نتایج اصلی نشان می‌دهد که بهترین حالت مربوط به طرح راهرو دو طرفه، به طور عمده به سمت جنوب، به منظور استفاده از مزایای جذب تابش در طول زمستان است.

سچی و همکاران(۵) یکی دیگر از تحلیل‌های یکپارچه حرارتی و نور روز را برای یک کلاس درس موجود به سمت شرق و در شهر توسکان (ایتالیا) انجام دادند. در این مورد، یک حالت بهینه میان در دسترس بودن نور روز خوب – همانطور که توسط میانگین DF[1] و نسبت یکنواختی بیان شد– و شرایط آسایش حرارتی و نیازهای انرژی برای گرمایش فضا، با در نظر گرفتن انواع شیشه های مختلف (پانل های کم گسیل و انتخابی) و پیکره بندی لوورها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی های انجام شده با استفاده از ریلوکس و انرژی پلاس نشان می‌دهد که در شرایط آسمان صاف، لوورها بهترین راه حل در بهبود دسترسی نور روز بدون کاهش جذب تابش در زمستان هستند. تئو دوسیو و اردومپوزیانیست(۶) به بررسی راندمان انرژی، محیط حرارتی و کیفیت هوای داخل ساختمان در مهدکودک و ساختمان‌های ابتدایی در شهر کوزانی در کشور یونان با اندازه گیری های میدانی و پرسشنامه پرداختند. متغیرهای اصلی که عملکرد را تحت تأثیر قرار دادند، پوسته ساختمان و سیستم های کنترل گرمایش و روشنایی شناسایی شدند. بکر و همکاران(۷) طرح های مختلف تهویه و عوامل طراحی برای کلاس‌های درس مختلف با استفاده از نرم افزار انرژی پلاس جهت بهبود عملکرد انرژی همزمان با حصول اطمینان از تهویه مطبوع در محیط داخلی را پیشنهاد دادند. مونته نگرو و همکاران(۸) اثر تغییرات تیپولوژیک ساختمان مدارس را بر آسایش بصری، حرارتی، کیفیت هوای داخل ساختمان و عملکرد انرژی با استفاده از نرم افزار IES-VE مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که بهترین عملکرد به طور پیوسته با گونه های خطی در دو اقلیم مرتبط است.

---

[1]. Daylight Factor

زمردیان و تحصیلدوست(۹) تلاش کردند تا تحلیل دینامیکی آسایش حرارتی و بصری از هر دو کلاس شمالی و جنوبی در تهران (ایران) را با استفاده از برخی شاخص‌های حرارتی و نور روز که قادر به در نظر گرفتن تغییرات زمانی و فضایی سطح آسایش است را انجام دهند. راه حل های شیشه کاری، از پانل های تکی شفاف تا پانلهای کم گسیل سه جداره، و همچنین سایه بان‌های مختلفی از قبیل یک سایه بان مات ثابت خارجی، به عمق ۰.۶ متر و یک سیستم لوور افقی، مدلسازی شد. بر اساس یافته های آنها، عوامل موثر بر شرایط آسایش در یک کلاس درس، به ترتیبWWR، SHGC [1] (ضریب جذب حرارت خورشیدی) شیشه، سایه اندازی ها، جهت گیری و ضریب انتقال حرارتی پنجره است. به طور خاص، مقادیر U value پایین برای مقادیر بالای WWR به منظور کاهش شار گرما خروجی مطلوبند، در حالیکه سایه بانها و لوورها عمدتا به عنوان سیستم های اصلاحی برای دهانه های بیش از حد بزرگ دیده می‌شوند. در نهایت جالب است که اشاره شود که کیم و همکاران(۱۰) ارزیابی نور روز مکان های آموزشی واقع در مجتمع های مسکونی بلند مرتبه در یک شهر کره ای را بر طبق ۳ چیدمان ممکن برای کلاس‌های درس انجام دادند. بر اساس پرسشنامه هایی که در مورد درک و رضایت دانشجویان از نور روز و با مطالعه بازی سایه ها –از طریق برنامه نرم افزاریSUNLIGHT توسط مجتمع های مسکونی بلند مرتبه اطراف انجام شد به این نتیجه رسیدند که در هنگام طرح ریزی و تعیین شکل کلاس‌های درس به منظور آسیب جدی نزدن به آسایش بصری دانش آموزان باید تاثیر محیط اطراف با دقت مورد توجه قرار گیرد. هیت و همکاران(۱۱) بررسی تأثیر شیشه کاری بر نور روز و صرفه جویی در انرژی در ساختمان ها و تکنیک های مختلف بهینه سازی بکار رفته در تحقیقات مختلف را مورد بررسی قرار دادند. از آنجا که عملکرد شیشه کاری به هزینه ها مربوط می‌شود، ارزیابی فنی و اقتصادی پیشنهاد شده است . بوبکری و بایور(۱۲) تاثیر اندازه پنجره بر روی خیرگی بر مبنای دریافت خیرگی ساکنین و با استفاده از از الگوریتم های پیش بینی خیرگی در یک اتاق اداری معمول را آزمایش کردند. آنها نشان دادند که خیرگی درک شده بسیار کمتر از میزان محاسبه شده بود.

تا کنون مطالعات انجام شده عمدتا به منظور بهینه سازی عملکرد انرژی پوسته و سیستم ساختمان، با اهمیت ثانویه برای آسایش حرارتی و معمولا نادیده گرفتن آسایش بصری وکیفیت هوای داخل ساختمان انجام شده اند(۱۳). علاوه بر این، حتی زمانی که مسائل آسایش حل می‌شود، انواع وسیع معیارهای استفاده شده غالبا مانع از امکان مقایسه مستقیم نتایج می‌شود. درباره بهینه سازی آسایش بصری، اکثر محققین تنها مقداراروشنایی را در منطقه تحت اشغال (معمولا در مرکز اتاق) در نظر می‌گیرند، در حالی که تعداد کمی از پژوهش‌ها شاخص‌های کمی پیچیده و یا یکنواختی توزیع نور و خطر خیرگی را بکار می‌گیرند.

این مقاله به دنبال ارائه راهکارهای طراحی بهینه شاکله پنجره از نظر عملکرد نوروز و انرژی درساختمان‌های آموزشی(کلاس درس در مدارس ابتدایی) در شهر تهران به منظور تامین همزمان مولفه‌های آسایش بصری(تامین روشنایی و کاهش خیرگی) و کارایی انرژی(کاهش مصرف انرژی کل) از طریق بکارگیری روش بهینه‌سازی چند هدفه می‌باشد. در پژوهش های مشابه عملکرد نوروز و انرژی به صورت جداگانه و اغلب با رویکرد ایستا به نوروز مورد بررسی قرار گرفته اند. در این مقاله مهمترین نوآوری اتخاذ یک رویکرد جامع در ارزیابی عملکرد پنجره در فضاهای آموزشی از نظر نوروز و انرژی با رویکردی پویا می باشد که موجب ساده سازی(زمان، هزینه، دقت)

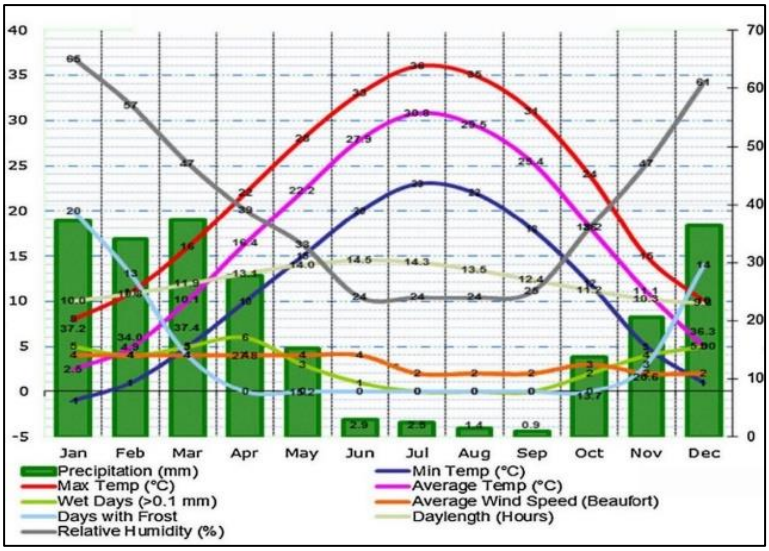
[1]. Solar Heat Gain Coefficient

تحقیقات بیشتر مانند تحلیل بهینه سازی خواهد شد و اتخاذ یک رویکرد جامع در زمینه بهینه سازی همزمان عملکرد نورروز و انرژی را ممکن می سازد را ارائه می‌دهد .

روش شناسی تحقیق

مشخصات اقلیمی و جغرافیایی سایت

در این پژوهش یک ساختمان مدرسه معمولی سه طبقه در تهران (35°40_N, 51°19_E) به عنوان مدل پایه انتخاب شده است،که بر طبق دسته بندی اقلیمی کوپن گیگر در منطقه Bsk(شرایط اقلیمی نیمه گرم و نیمه خشک)، قرار دارد(۱۴). فایلهای اطلاعات سالانه آب و هوایی در قالب epw برای شبیه سازی استفاده شده است. براساس داده های آب و هوایی، آسمان تهران ۶۷٪ صاف، ۲۴٪ نیمه ابری و ۹٪ تمام ابری در طول سال است. بنابراین پتانسیل تابش خورشیدی جهانی در تهران قابل توجه است. حداکثر و حداقل تابش مستقیم به ترتیب در ماه تیر و دی رخ می دهد. در حالی که حداکثر تابش انتشاری خورشید در ماه مرداد و حداقل آن در ماه آذر رخ می دهد



تصویر۱: نمودار اقلیمی شهر تهران(۱۴)

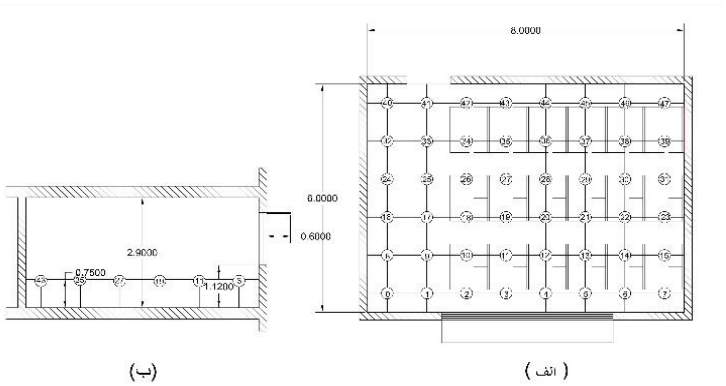
جدول۱ : تعداد ساعات آفتابی در شهر تهران(۱۵)

	Annual	Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	Jul	Jun	May	Apr	Mar	Feb	Jan
solar radiation	۱۲:۰۰	۰۹:۴۷	۱۰:۱۵	۱۱:۱۲	۱۲:۲۲	۱۳:۲۸	۱۴:۱۸	۱۴:۳۱	۱۴:۰۲	۱۳:۰۴	۱۱:۵۵	۱۰:۵۰	۱۰:۰۲
Sun altitude at solar noon on the 21st day (°).	۵۴/۷	۳۰/۹	۳۴/۳	۴۳/۵	۵۵	۴.۶۶	۷۴/۷	۷۷/۷	۷۴/۵	۶۶/۲	۵۴/۵	۴۳/۷	۳۴/۴

شبیه سازی پارامتریک مدل پایه پژوهش

مدل پایه در این مطالعه بر اساس ضوابط و استانداردهای موجود به عنوان پرکاربردترین گونه کلاس‌های درس با شباهت تقریبی به شرایط واقعی مدل سازی شده است که با مساحت ۴۸ متر مربع در جبهه جنوبی در طبقه دوم ساختمانی با ارتفاع ۳ طبقه با جهت گیری شرقی غربی، که در آن کلاسهای درس در امتداد یک راهرو مرکزی قرار گرفته اند، واقع شده است و با پنجره ای با نسبت مساحت پنجره به دیوار(WWR) ۲۰٪ با فضای خارجی در ارتباط است. پنجره بصورت تک جداره با انتقال مرئی ۰.۸۸ با یک رف نوری و بدون مبلمان و لوازم جانبی دیگر در فضا در نظر گرفته شد. خواص نوری سطوح در جدول۲ (بر اساس نوع مصالح و همچنین رنگ معمول در کلاس های درس مدارس) و همچنین مشخصات مدل پایه در جداول۳ ارائه شده است. تجزیه و تحلیل پارامتریک در ارتفاع ۰.۷۵ متر (سطح کار) در امتداد محور مرکزی فضا انجام شده است. همچنین محاسبات مربوط به خیرگی بر روینقاطی بر روی یک سطح در ارتفاع خط دید ناظر در حالت نشسته و بصورت دقیقه ای برای طول یک سال انجام شده و نتایج بصورت درصد نشان داده میشود.

شبیه سازی ها بر اساس برنامه اشغال: از شنبه تا چهارشنبه از ساعت ۸ صبح تا ۱ بعد از ظهر شهر تهران -گام زمانی شبیه سازی ساعتی در یک سال کامل منهای سه ماه تابستان و پنجشنبه و جمعه انجام شده است. روشنایی مصنوعی با چگالی قدرت روشنایی 9 W/m2 و کنترل نورپردازی بصورت سیستم کاهنده برای تامین روشنایی هدف ۳۰۰ لوکس تنظیم شد. فتوسلها روشنایی مصنوعی را تا وقتی که میزان روشنایی کلی سطح کار (نور روز و نور الکتریکی) به حداقل آستانه روشنایی برسد کاهش می دهند. در مرحله نخست شبیه سازی ساعتی برای یک روز در ساعات اشغال انجام شد(تصویر ۴) و نتایج حاصل از آن از طریق مطالعات میدانی تایید شد. در ادامه شبیه سازیهای پارامتریک سالانه برای ترکیب بندیهای مختلف پنجره با تغییر پارامترهای شاکله پنجره مدلسازی شدند. این فرآیند بر روی رایانه ای با پردازنده core i7 با RAM: 16 GB و گرافیک ۱.۷۰ و hard SSD: 256 انجام شد.



تصویر۲: پلان و مقطع کلاس درس در جبهه جنوبی در طبقه سوم ساختمان مدرسه

تصویر۳: جهت گیری ساختمان مدرسه

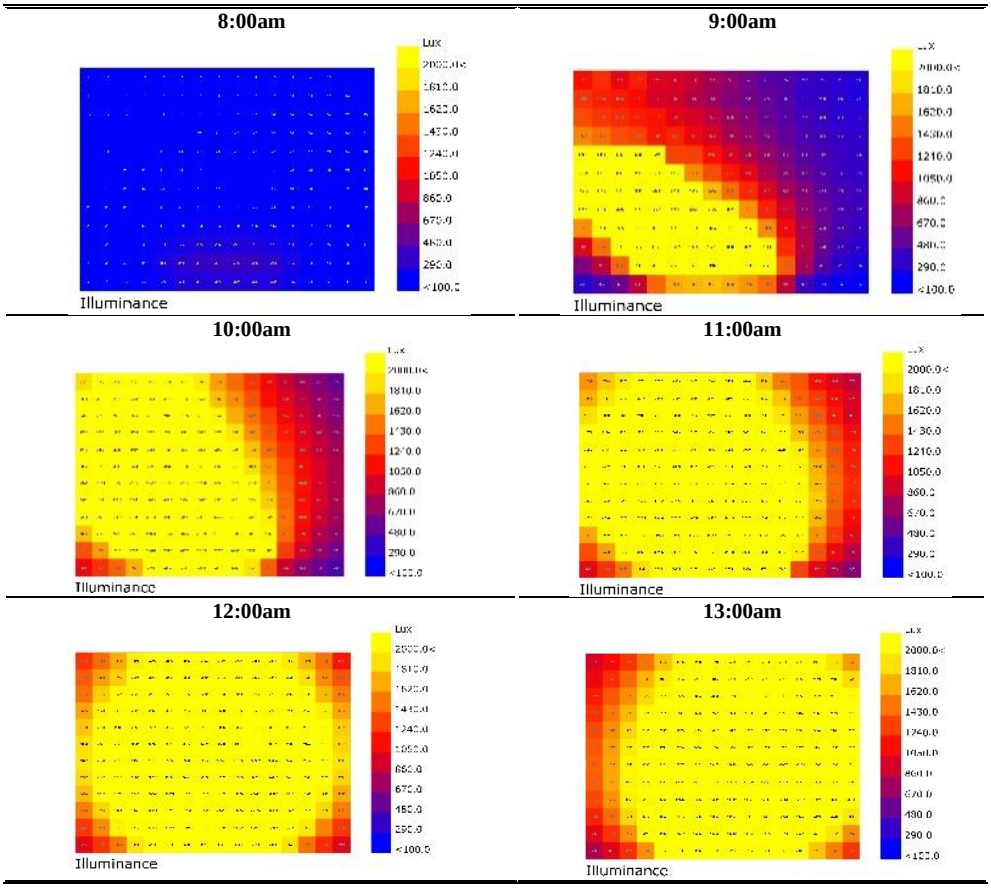
جدول ۲ : خواص نوری سطوح مدل پایه

خواص نوری سطوح	عناصر ساختمانی
بازتاب ۸۵٪	سقف
بازتاب ۴۰٪	کف
بازتاب ۴۵٪	دیوار داخلی

بازتاب ۶۰٪	دیوار خارجی
بازتاب ۸۰٪	سایه بان

جدول۳ : مشخصات فیزیکی مدل پایه

متغیر		مقدار
نسبت مساحت پنجره به مساحت دیوار	WWR(%)	۲۰
ارتفاع کف پنجره	Win Sill(m)	۱/۱۰
ارتفاع سر پنجره	Win Head(m)	۲/۴۰
ضریب عبور نور مرئی شیشه	VT(%)	۰/۸۸
ضریب دریافت تابش خورشیدی شیشه	SHGC(%)	۰/۸۱
نوع پنجره	Window Type	شیشه تک جداره شفاف با قاب آلومینیومی حرارت شکن



تصویر ۴ : نمونه نتایج شبیه سازی ساعتی نوروز مدل پایه در نرم افزار رادیانس(۱ دی ماه(انقلاب زمستانی)

اندازه گیریهای محیطی (برداشت میدانی- محیطی)

برای اطمینان از صحت نتایج شبیه سازی، ابتدا نتایج از طریق مطالعات میدانی در کلاس‌های درس ساختمان یک مدرسه معمولی سه طبقه در منطقه ۵ تهران منطبق با مدل پایه (ساخته شده بر طبق ضوابط ساخت ساختمان‌های آموزشی ایران(۱۶)) اعتبار سنجی شدند. اندازه گیری های میدانی در یک روز آفتابی انجام شد (۱ دی ماه ۱۳۹۶). سطح روشنایی توسط نور سنج ST-1301 (accuracy: 5% 10d (<10,000 Lux/fc)) در سه نقطه در سه منطقه جلو(A)، میانه(B) و دور(C) از پنجره بر روی سطوح میز (۰.۷۵ متر) هر ساعت از ۸:۰۰ تا ۱۳:۰۰ بعد از ظهر مورد سنجش قرار گرفت.

جدول۴: سطوح روشنایی در شبیه سازی و اندازه گیری میدانی در مدل پایه در ۱ دی ماه

ساعتهای اندازه گیری در تاریخ ۱ دی ماه	سطح روشنایی(لوکس)	نقطه A	نقطهB	نقطه C
8:00	اندازه گیری میدانی شبیه سازی	125.02 145,40	34.77 42,88	13.15 15,76
9:00	اندازه گیری میدانی شبیه سازی	3121.13 3354,20	4301.91 4576,99	728.09 755,23
10:00	اندازه گیری میدانی شبیه سازی	8559.24 8900,60	6928.25 7102,74	1723.71 1957,82
11:00	اندازه گیری میدانی شبیه سازی	8787.87 9150,63	10018.49 10201,22	2016.15 2120,06
12:00	اندازه گیری میدانی شبیه سازی	12468.51 12870,32	12082.4 12110,49	2284.41 2573,35
13:00	اندازه گیری میدانی شبیه سازی	10083.51 10403,76	12041.52 12105,39	2274.45 2580,09

برای دستیابی به نتایج قابل اطمینان تر، چراغ ها خاموش شدند و پرده ها عقب کشیده شدند. مقایسه سطوح روشنایی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده متوسط خطای ۱(MBE) ۰.۱۹را نشان می دهد که در دامنه قابل قبولی است. MBE از طریق معادله ۱ محاسبه می شود، جایی که N تعداد نقاط حسگر، Es روشنایی شبیه سازی شده و Em روشنایی اندازه گیری شده است(۱۷)

$$MBE = \frac{1}{N}\sum_{K=1}^{N}(\mathrm{Es} - \mathrm{Em}/\mathrm{Em}) \qquad : \text{معادله} 1.$$

انتخاب مولفه های پژوهش

متغیرهای مستقل پژوهش، مرتبط با طراحی شاکله پنجره در فضای کلاس درس و متغیرهای وابسته پژوهش مرتبط با شاخص های پویای سنجش عملکرد نور روز و انرژی می باشند. همچنین سایر مولفه های طراحی به عنوان متغیرهای کنترل در نظر گرفته شدند. ۵ متغیر مستقل طراحی برای شاکله پنجره تعیین شده است. تغییر این متغیرها باعث ایجاد گزینه های طراحی متعدد می شود. هر متغیر به ۸ گام در محدوده خود تقسیم می شود که با تراز ۱ تا ۸ نشان داده شده است. در جدول ۵ سطوح این تغییرات تعیین و میزان مربوط به مولفه ها در مدل پایه نیز مشخص شده است. همچنین شاخص های ارزیابی عملکرد نور روز و انرژی به عنوان متغیرهای وابسته در نظر گرفته شده اند. در حال حاضر دو رویکرد اصلی ایستا و پویا در حوزه شاخص های ارزیابی نور روز وجود دارد که بر اساس پژوهش ها صورت گرفته برتری رویکرد پویا بر رویکرد ایستا به اثبات رسیده است. بنابراین در پژوهش حاضر در راستای اهداف پژوهش که شامل تامین مولفه های آسایش بصری شامل، در دسترس بودن نور روز و ممانعت از وقوع خیرگی و همچنین کارایی انرژی می باشند سه شاخص عملکردی شامل یک شاخص مبتنی بر روشنایی و یک شاخص مبتنی بر درخشندگی و یک شاخص انرژی انتخاب شده به شرح زیر هستند:

- شاخص پویای ارزیابی نور روز مبتنی بر روشنایی $(\mathrm{UDI\ avg})^2$

---

۱. **Mean Bias Error**

2 . **Useful Daylight Illuminance**

- شاخص پویای ارزیابی نور روز مبتنی بر درخشندگی [1](DGP)
- شاخص شدت مصرف انرژی ۲(EUI)

جدول ۵ : سطوح تغییرات پارامترهای منتخب طراحی شاکله پنجره در شبیه سازی

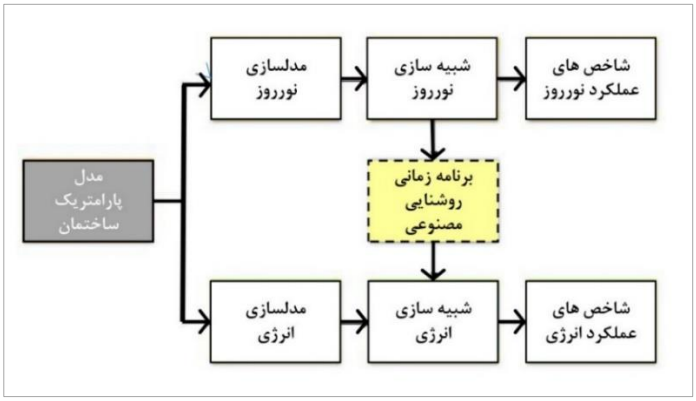
	متغیر های طراحی پنجره		تراز۱	تراز۲	تراز۳	تراز۴	تراز ۵	تراز۶	تراز ۷	تراز ۸
W1	نسبت مساحت پنجره به مساحت دیوار	WWR(%)	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰
W2	ضریب عبور نور مرئی شیشه	VT(%)	۰/۵۰	۰/۵۵	۰/۶۰	۰/۶۵	۰/۷۰	۰/۷۵	۰/۸۰	۰/۸۵
W3	ضریب دریافت تابش خورشیدی شیشه	SHGC(%)	۰/۵۰	۰/۵۵	۰/۶۰	۰/۶۵	۰/۷۰	۰/۷۵	۰/۸۰	۰/۸۵
W4	ضریب انتقال حرارتی شیشه	Uvalue	1/5	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴	۴/۵	۵
W5	عمق رف نوری	Depth of Light shelf(m)	۰/۴۰	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۵۵	۰/۶۰	۰/۶۵	۰/۷۰	۰/۷۵

شبیه سازی یکپارچه نور روز و انرژی

از آنجا که تعداد محدودی از نرم افزارهای موجود می توانند شاخص های پویای ارزیابی نور روز و انرژی جدید مبتنی بر اقلیم را محاسبه کنند، برای این شبیه سازی، نرم افزار گرافیکی راینو و افزونه گرسهاپر برای کنترل مولفه های هندسی استفاده شد. به طور پیوسته، افزونه لیدی باگ و هانی بی برای شبیه سازی نور روز با استفاده از رادیانس و شبیه سازی انرژی با استفاده از انرژی پلاس استفاده شد و بعد داده ها به دی سیم وارد شد تا تحلیل سالانه نور روز انجام شود.

تصویر ۵ روند شبیه سازی یکپارچه انرژی و نور روز را در نرم افزار گرسهاپر نشان می دهد. در فرایند شبیه سازی نور روز و انرژی، اطلاعات دقیق ساختمان مانند اطلاعات مجاورت هندسی، نوع سازه و مصالح، بارها، برنامه اشغال و بهره برداری به مدل پارامتریک اختصاص داده می شود. شبیه سازی نور روز ابتدا به محاسبه روشنایی در موقعیت سنسورهای روشنایی برای هر ساعت در طول یک سال نیاز دارد و روشنایی الکتریکی با توجه به روشنایی نور روز موجود خاموش شده یا کاهش می یابد. کنترل روشنایی می تواند سطح نور الکتریکی را برای تکمیل روشنایی ارائه شده توسط نور روز تنظیم کند، یا چراغها را هنگامی که روشنایی نور روز مناسب است خاموش کند. سپس یک برنامه روشنایی سالانه تولید خواهد شد که به مدل انرژی وارد می شود تا تقاضای انرژی روشنایی الکتریکی، گرمایش و سرمایش را در نتیجه نور روز در نظر بگیرد. لیدی باگ و هانی بی دارای توابع ورودی و خروجی برنامه روشنایی هستند که باعث می شود هر یک از توالی شبیه سازی نور روز و انرژی اتوماتیک شود.

[1] . **Discomfort Glare Probability**
[2] . **Energy Use Intensity (kBtu/ft2/yr)**



تصویر ۵ : شبیه سازی یکپارچه نور روز و انرژی

جدول ۶ : مشخصات سیستم سرمایش و گرمایش مدل پایه

متغیر		مقدار
ساعات کار سیستم تهویه مطبوع	HVAC System on(h)	۸:۰۰-۱۳:۰۰
دمای مبنای دوره سرمایش	Cooling set poit(c)°	۲۶
(محدوده آسایش حرارتی بر اساس استاندارد اشری و با لحاظ کردن عوامل سن، پوشش و فعالیت کاربران فضا در نظر گرفته شده است.)		
دمای مبنای دوره گرمایش	Heating set poin(c)°	۲۲
دمای مبنای تهویه طبیعی	Natural ventilation set point(c)°	۲۴
نرخ تعویض هوا	Air flow rate(m^3/s)	۰/۰۰۳
نفوذ هوا	Infiltration(ACH)	۰/۵

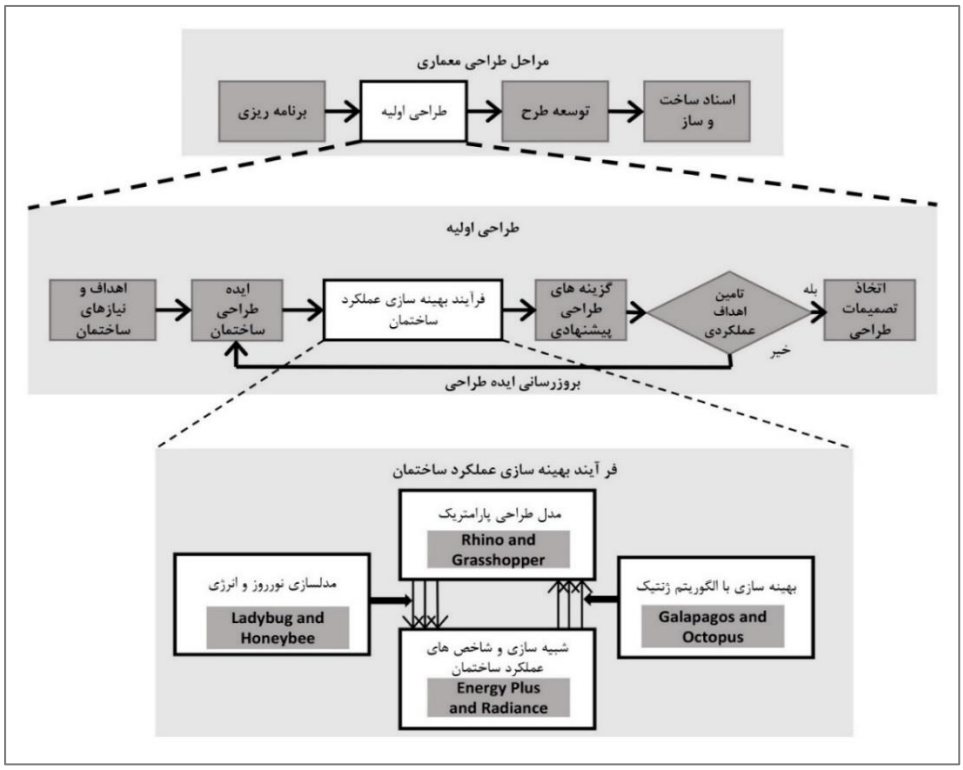
جدول ۷ : ضرایب انتقال حرارت سطوح مدل پایه

ضرایب انتقال حرارت مرجع عناصر ساختمانی (مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران) (W/m^2k)		
دیوار	U_W	۰/۸
بام	U_R	۰/۳۸
کف در تماس با هوا	U_F	۰/۵۷
جدار نورگذر	U_G	۳/۴
در	U_D	۴/۴۱
جدارهای مجاور فضای کنترل نشده	U_{WB}	۰/۶۹

بهینه سازی عملکرد ساختمان

فرایند پیشنهادی بهینه سازی عملکرد ساختمان با مرحله طراحی اولیه که یک مرحله مهم در طراحی معماری است یکپارچه است (تصویر ۶). پس از درک اهداف و الزامات پروژه، معماران، مرحله اولیه طراحی ساختمان، شامل ترسیم های مطالعاتی که روابط فضایی، مقیاس و شکل طراحی را نشان می دهند را توسعه می دهند. اگر گزینه های طراحی پیشنهادی فرایند بهینه سازی با هدف عملکردی و سایر الزامات طراحی مطابقت داشته باشند، طراحی به مرحله بعدی راه می یابد. اگر گزینه ها رضایت بخش نباشند، مفهوم اولیه طراحی می تواند اصلاح شود و این فرایند بهینه سازی می تواند چندین بار تکرار شود تا یک طراحی مطلوب به دست آید. بهینه سازی عملکرد یک ساختمان یک مساله

چند متغیره است که منجر به تعداد زیادی از راه حل های جایگزین می شود که نمی توانند در یک بازه زمانی متناسب با مرحله طراحی یک ساختمان شبیه سازی شوند. برای کشف تعداد بسیار زیادی از متغیرهای ساختمان در زمان نسبتا کوتاه، روش متداول متشکل از شناسایی مولفه های طراحی برای بهینه سازی، تعریف گزینه ها یا دامنه تغییرات برای هر مولفه طراحی، اجرای شبیه سازی از طریق یک موتور شبیه سازی پویا و حرکت به سمت انتخاب مولفه های طراحی از طریق یک موتور بهینه سازی می باشد. چهار مولفه اصلی در این چارچوب، طراحی مولفه های یک ساختمان، مدلسازی انرژی و نور روز، شبیه سازی و شاخص های عملکرد ساختمان و فرآیند بهینه سازی است. هدف این است که این چهار مولفه به طور یکپارچه به یکدیگر متصل شده و ایجاد طرح ساختمان، شبیه سازی عملکرد و روند بهینه سازی اتوماتیک شود. در تصویر ۷ گروه A مولفه های توسعه هندسه ساختمان است. هندسه به مولفه های گروه B برای مدل سازی انرژی و نور روز متصل شده است. مدل نور روز به اجزاء گروه C برای شبیه سازی نور روز متصل شده است. گروه D مدل انرژی از گروه B و خروجی شبیه سازی نور روز از گروه C برای شبیه سازی انرژی را به هم متصل می کند .گروه E مولفه های بهینه سازی است و بالاخره گروه F مولفه های خروجی داده است.



تصویر ۶: چارچوب فرآیند بهینه سازی عملکرد ساختمان

بهینه سازی چند هدفه

الگوریتم گالاپاگوس و اختاپوس ابزارهای بهینه سازی در محیط گرسهاپر هستند. الگوریتم گالاپاگوس به عنوان افزونه برای موتور اجرا کننده الگوریتم ژنتیک به صورت تک هدفه و الگوریتم اختاپوس به عنوان افزونه برای موتور اجرا کننده الگوریتم ژنتیک به صورت چند هدفه در نرم افزار گرسهاپر هستند. افزونه های لیدی باگ و هانی بی توسط ترکیب با الگوریتم گالاپاگوس و اختاپوس به کاربر این امکان را می دهند که فرآیند بهینه سازی تک هدفه و چند هدفه را در گرسهاپر اجرا کند(۲۴).

جدول۸ : تنظیمات الگوریتم ژنتیک در فرآیند بهینه سازی

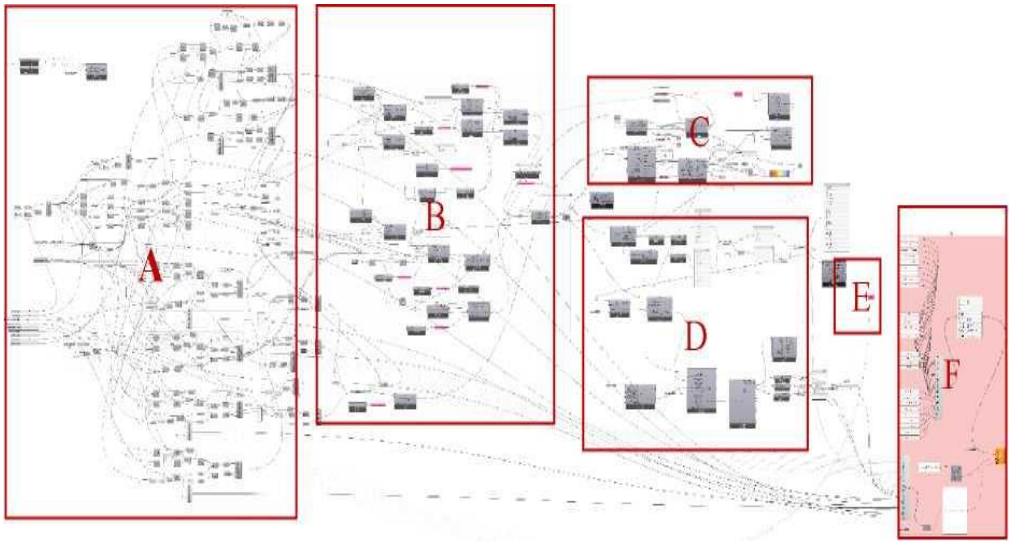
Maximum Generation	Population Size	Crossover Rate	Mutation Rate	Mutation Probability	Elitism
۱۱	۱۰۰	۰/۸۰۰	۰/۵۰۰	۰/۰۱۰	۰/۵۰۰

از آنجا که افزونه هانی بی اتصال بین گرسهاپر و نرم افزارهای تخصصی تحلیلی را برقرار می کند، با توجه به محتویات و امکاناتی که دارد، نسبت به لیدی باگ برای پژوهش ها و تحلیل های پیشرفته تری مورد استفاده قرار می گیرد. تنظیمات انجام شده جهت الگوریتم ژنتیک در پژوهش حاضر مطابق جدول صورت گرفت. در این پژوهش سه هدف بهینه سازی حداکثرسازی شاخص UID، حداقل سازی شاخص های DGP و EUI است. هدف یافتن طرحی با عملکرد متعادل بین نور روز و انرژی است. اختاپوس به طور پیش فرض حداقل ارزش هر هدف را پیدا می کند، بنابراین هدف حداکثر کردن UID باید در -۱ ضرب شود. بعد از فرآیند بهینه سازی، مرزهای پارتو با هماهنگ سازی بین هر شاخص عملکرد پیدا می شوند.

مفهوم بهینگی پارتو[۱]

کارایی پارتو یا بهینگی پارتو یک مفهوم در علم اقتصاد است که همچنین کاربردهایی در مهندسی و علوم اجتماعی دارد. این مفهوم حالتی از تخصیص منابع است که در آن امکان بهتر نمودن وضعیت یک فرد بدون بدتر کردن وضعیت فردی دیگر وجود ندارد. این اصطلاح پس از ویلفردو پارتو به این نام نامیده شد. او یک مهندس و اقتصاددان ایتالیایی بود که از این مفهوم در مطالعاتش در زمینه کارایی اقتصادی و توزیع در آمد استفاده کرد(۲۲). این مفهوم در زمینه های دانشگاهی مانند اقتصاد، مهندسی و علوم زیستی کاربرد دارد. در یک تخصیص اولیه از منابع در بین مجموعه ای از افراد، تغییر در این تخصیص که باعث می شود شرایط فردی بدون تغییر منفی در شرایط فردی دیگر رخ دهد، ارتقاء پارتو نامیده می‌شود. تخصیصی، بهینه پارتو نامیده میشود که نتوان ارتقاء پارتو را در آن اعمال نمود(۲۳). می‌توان همین منطق و مفهوم را در ارتباط با معیارهای دریافت نور روز و مصرف انرژی به عنوان افراد و مقدار آنها به عنوان درآمد در نظر گرفت.

[۱] .Pareto



تصویر ۷ : فرآیند انجام مدلسازی، شبیه سازی نور روز و انرژی در گرسهاپر

بنابراین مدل یا حالتی بهینه پارتو نامیده می شود که نتوان هر کدام از معیارهای نور روز و انرژی را ارتقاء داد مگر این که در دیگری کاهش مقدار رخ دهد. الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه سازی چند هدفه کمک می کند که تولید پلان ها و فرم ها به سمت ایجاد بهینگی بروند و حتی در زمانی که بهینه محلی رخ می دهد با ایجاد جهش ژنتیکی باعث برونرفت از آن خواهد بود. بنابراین پس از تولید فرم های متعدد که در آن ها تلاش شده به سمت اهداف بهینگی باشند تعدادی از آنها به لحاظ مقادیر به دست آمده اصطلاحا در جبهه پارتو قرار می گیرند و اگر در دستگاه مختصات معیارهای هدف قرار بگیرند کمترین فاصله فضایی با مبدا را پیدا خواهند کرد(معادله ۲). جبهه پارتو این امکان را فراهم می کند که مرزهای فضای راه حل تجسم شود، که در بیشتر موارد به طور قابل ملاحظه پیچیدگی را کاهش می دهد. هنگامی که مرزهای فضای راه حل تعیین شده است، تیم طراحی دارای گزینه هایی برای انتخاب بر اساس اولویت هر یک از اهداف متضاد (مثلا آسایش بصری و مصرف انرژی) برای دستیابی به توافق بین انتظارات پروژه و طراحی نهایی می باشند.

$$A\ best = Min\left(\sqrt{\left(\left(\frac{(Ei-Emin)}{Emin}\right)^2+\left(\frac{UDIi-UDImax}{UDImin}\right)^2+\left(\frac{DGPi-DGPmin}{DGPmin}\right)^2\right)}\right)$$

معادله ۲: یافتن بهینه ترین نقطه در میان راه حلهای غیر غالب پارتو

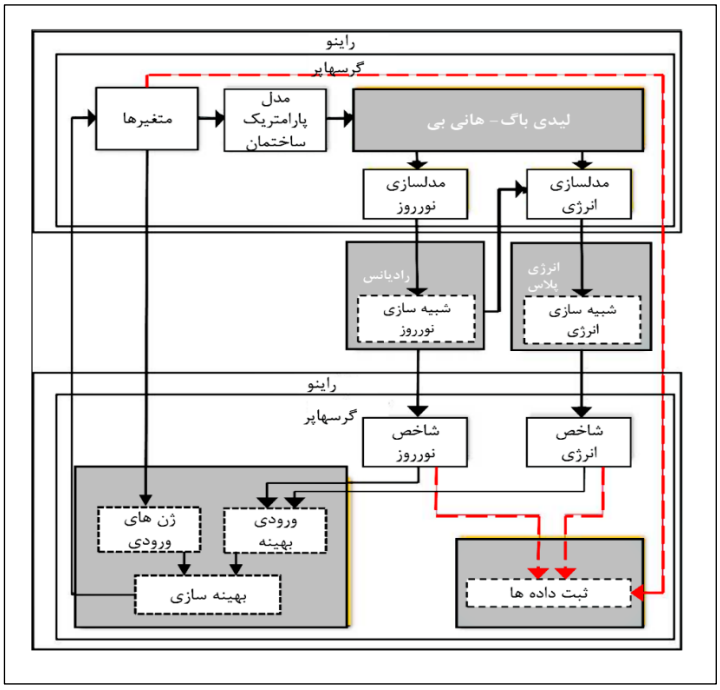
در این پژوهش بر اساس فرآیند بهینه سازی چند هدفه و توسط نرم افزار گرسهاپر، شاکله های مختلف پنجره بصورت خودکار و البته هدفمند تولید می شوند. الگوریتم ژنتیک سعی می کند تا از طریق تولید شاکله های مختلف پنجره(که هر کدام یک ژنوم[1] خوانده می شوند) در هر کدام از این سه شاخص عملکردی نور روز و انرژی بهبودی حاصل کند. به این معنا که سعی در افزایش مقدار UDIavg و کاهش مقدار DGP و EUI می شود.

[1]. **Genome**

متغیرها، توابع هدف و محدودیت های بهینه سازی

فرآیند بهینه سازی نیاز به سه نوع ورودی دارد: متغیرها، توابع هدف و محدودیت ها. در بهینه سازی حاضر متغیرهای بهینه سازی، متغیرهای طراحی شاکله پنجره شامل WWR، SHGC، VT، U-Value و عمق سایه بان هستند. برای یک مسأله، ممکن است جواب‌های مختلفی موجود باشد که برای مقایسه آنها و انتخاب جواب بهینه، تابعی به نام تابع هدف تعریف می‌شود. انتخاب این تابع به طبیعت مسأله وابسته است. توابع هدف در این پژوهش بر اساس سه شاخص ارزیابی عملکرد انرژی و نوروز هستند.

Min EUI (kWh/m^2)
Max UDIavg $_{500\text{-}2000lux} \geq 50\%$ (%)
Min $DGP_{>0.35} \leq 50\%$ (%)



تصویر ۸ : فرآیند بهینه سازی همزمان نور روز و انرژی در گرسهاپر

محدودیت های اعمال شده در فرآیند بهینه سازی در این پژوهش از نوع بازه ای می باشند که محدوده ای را برای هر یک از متغیرهای مستقل طراحی تعیین می کنند. محدودیت های مربوط به جنس شیشه بر اساس محدوده تغییرات متغیرهای محصولات موجود در بازار مطابق جدول ۸ تعیین شده اند.

برای بهینه سازی تک هدفه، تابع هدف، حداقل یا حداکثر مقدار هر یک از این شاخص های عملکردی است. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک رابطه بین مولفه های طراحی شاکله پنجره و شاخص های عملکرد نوروز و انرژی بررسی می شود و گزینه های طراحی جدیدی برای عملکرد بهتر تولید می شود. بهینه سازی های چند هدفه شامل یافتن راه حل های میانجی برای اهداف مختلف هستند. فرایند بهینه سازی صورت گرفته در پژوهش حاضر یک فرآیند بهینه سازی چند منظوره با توجه همزمان به نوروز و انرژی برای مدل پایه است. در ادامه تجزیه و تحلیل و ارزیابی داده های شبیه سازی صورت می گیرد و طراحی بهینه پس از فرآیندهای بهینه سازی انجام می شود تا طرح های بهینه

از نظر کارایی مقایسه شوند. روند بهبود عملکرد ساختمان نیز تحلیل می شوند. در نهایت، باید توجه نمود که بهینه سازی چند هدفه در جستجوی یک راه حل منحصر به فرد نیست، بلکه می تواند طراح و یا تیم طراحی را در دستیابی به مجموعه ای از متغیر هایی که به طور همزمان مقادیر نسبتا خوب از تمام توابع هدف در نظر گرفته شده را تامین می کنند، پشتیبانی کند.

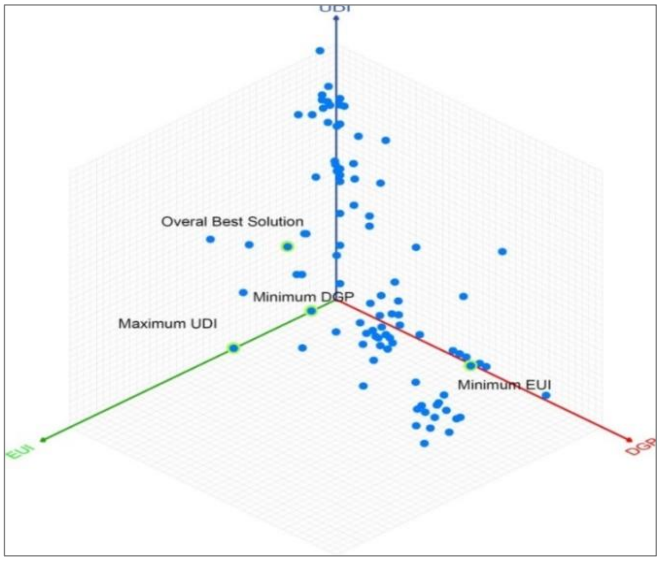
جدول ۸ : مشخصات انواع پنجره -شورای ملی رتبه بندی بازشو(NFRC[1])

نوع پنجره	U value (w/m^2k)	SHGC	VT	گاز پرکننده	فاصله بین جداره ها	LSG
شیشه تک جداره	۶/۳۰	۰/۸۱	۰/۸۸	n/a	-	۱/۰۸
شیشه تک جداره کم گسیل(e2=0.4)	۵/۰	۰/۷۸	۰/۸۵	n/a	-	۱/۰۸
شیشه تک جداره کم گسیل(e2=0.2)	۴/۳۵	۰/۷۲	۰/۸۱	n/a	-	۱/۱۲
شیشه دو جداره ۱	۳/۴۰	۰/۶۹	۰/۷۸	هوا	۰/۰۰۶	۱/۱۳
شیشه دو جداره۲	۲/۸۰	۰/۷۲	۰/۷۷	آرگون	۰/۰۱۲	۱/۰۶
شیشه دو جداره کم گسیل(e2=0.0.4)	۲/۷۰	۰/۴۴	۰/۷۰	هوا	۰/۰۰۶	۱/۶
شیشه سه جداره	۲/۰۰	۰/۶۸	۰/۷۴	هوا	هوا	۱/۰۸
شیشه سه جداره کم گسیل(e5=0.1)	۱/۳۰	۰/۵۸	۰/۷	آرگون	۰/۰۱۲	۱/۲
شیشه سه جداره کم گسیل(e2=e5=0.1)	۱/۲۰	۰/۴۷	۰/۶۶	هوا	۰/۰۱۲	۱/۴

نتایج

در فرایند بهینه سازی چند هدفه، ۸۹۷ شبیه سازی انجام شد. اهداف بهینه سازی دستیابی به حداکثر-UDIavg 500 2000lux $\geq$ 50%، حداقل DGP>0.35 $\leq$ 50% و حداقل EUI بودند. اختاپوس راه حل های بین سه هدف را از طریق جبهه پارتو پیدا کرد. حلقه شبیه سازی برای ۵۰ نسل با ۵۰ راه حل جداگانه اجرا شد. بدین ترتیب، در نهایت ۷۵۰۰ طرح با محدودیت زمانی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از پژوهش مجموعه ای از را ه حل های بهینه غیر غالب (پارتو) طراحی حاصل از فرآیند بهینه سازی مبتنی بر شبیه سازی از طریق الگوریتم ژنتیک بصورت چند هدفه را در جهت تامین همزمان مولفه های آسایش بصری(تامین روشنایی و کاهش خیرگی) و کارایی انرژی(کاهش مصرف انرژی کل) به همراه راهکارهایی در جهت انتخاب بر اساس اولویتهای طراحی ارائه می دهد. در این پژوهش ۴ طرح برای درک ارتباط بین متغیرهای طراحی و اهداف از جبهه پارتو انتخاب شده اند(تصویر ۹). راه حل های با بهترین عملکرد در هر هدف بدون در نظر گرفتن عملکرد آنها در دو هدف دیگر انتخاب و مقایسه شده اند. بر این اساس گزینه ۱ دارای بهترین عملکرد در زمینه شدت روشنایی UDI،گزینه ۲ دارای بهترین عملکرد در زمینه احتمال بروز خیرگیDGP و گزینه ۳ دارای بهترین عملکرد در زمینه شدت مصرف انرژی EUI است. گزینه ۴ دارای عملکرد نسبتا متعادل در هر سه جنبه است که بهترین امتیاز را در مجموع به دست می آورد و به مبدا مختصات در شکل جبهه پارتو نزدیک ترین است که با استفاده از معادله ۲ محاسبه می شود. مقادیر متغیرهای طرح بهینه و شاخص های عملکرد نور روز و انرژی مربوط به هر گزینه در جداول ۱۰ و ۱۱نشان داده شده است.

[1]. National Fenestration Rating Council



تصویر ۹ : جبهه راه حل های پارتو(غیر غالب)

جدول ۹ : عملکرد نور روز و انرژی در مدل های پایه

شاخص های عملکرد نوروز (٪)	$UDIavg_{500\text{-}2000lux}$	۴۴/۸۹
	$DGPs_{\geq 0.45}$	۳۰
شاخص عملکرد انرژی (kwh/m^2)	EUI_{total}	۱۲۵/۹۲

جدول ۱۰ : مقادیر متغیرهای گزینه های طراحی بهینه پارتو

		مدل بهینه انرژی Par(EUI)	مدل بهینه خیرگی Par(DGP)	مدل بهینه روشنایی Par(UDI)	مدل بهینه چند هدفه PARETO
متغیرهای طراحی شاکله پنجره	نسبت مساحت پنجره به مساحت دیوار(WWR %)	۲۲	۳۸	۴۹	۳۴
	ضریب جذب حرارت خورشیدی(SHGC)	۰/۶۷	۰/۵۲	۰/۶۴	۰/۷۲
	ضریب عبور نور مرئی(VT)	۰/۶۳	۰/۵۴	۰/۷۲	۰/۵۷
	ضریب انتقال حرارتی(U value)	۳/۵۲	۳/۵۶	۱/۴	۳/۱۵
	عمق رف نوری(cm)	۵۵	۶۵	۵۳	۶۱

جدول۱۱ : عملکرد نور روز و انرژی گزینه های طراحی بهینه پارتو

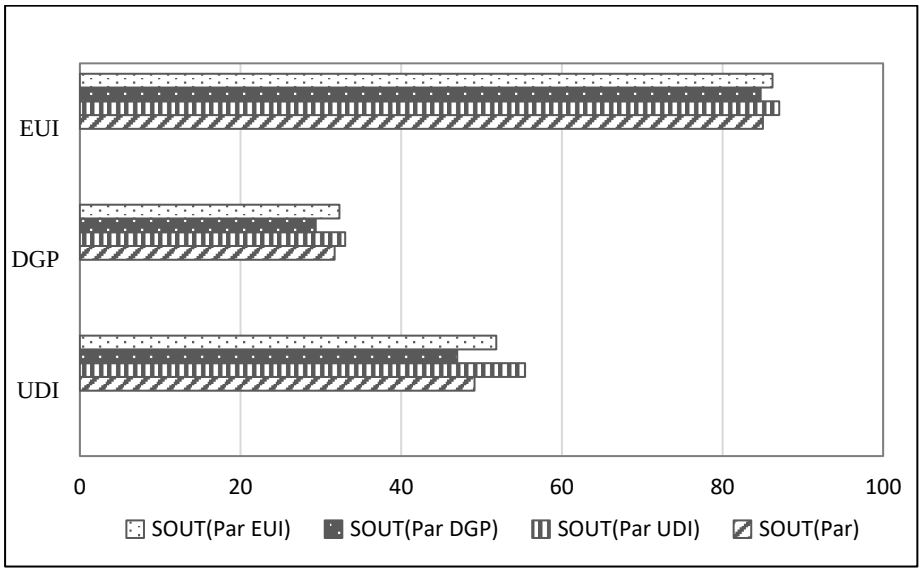
	$UDIavg_{500\text{-}2000}$ lux	$DGPs_{\geq 0.45}$	EUI_{total}
مدل بهینه روشنایی Par(UDI)	۵۳/۴۳	۲۷/۰۴	۸۷/۰۵
مدل بهینه خیرگی Par(DGP)	۴۴/۹۸	۲۳/۳۶	۸۶/۷۴
مدل بهینه انرژی Par(EUI)	۵۱/۸۳	۲۶/۳۰	۸۶/۲۵
مدل بهینه چند هدفه PARETO	۵۲/۱۳	۲۵/۱۰	۸۶/۹۵

بر اساس نتایج بدست آمده در مدل های بهینه متعلق به جبهه پارتو مدل با الویت UDI، ۱۹ درصد، مدل با الویتDGP، ۱۹درصد و مدل با الویت EUI، ۲۴ درصد بهبود نسبت به مدل پایه را نشان می دهند. همچنین بهترین راه حل پارتو بر اساس کمترین فاصله تا بهینه جهانی، عملکرد بهتری را نسبت به مدل پایه نشان می دهد که میزان

بهبود اهداف UDI،DGP و EUI به ترتیب۱۱، ۱۵و ۲۲ درصد می باشد. یکی دیگر از نتایج حاصل عدم ایجاد تغییر عمده در هر یک از دو هدف دیگر در مدلهای منتخب با الویت یکی از اهداف سازی می باشد که خود همگرایی شاخص های ارزیابی را اثبات می کند. اما همچنان برای طرح های بهینه با مجموعه اهداف بهبود متعادل بیشتری در هر سه هدف نسبت به مدل های پایه وجود دارد(نمودار ۱).

جدول ۱۲ : میزان بهبود اهداف در بهینه سازی ها نسبت به مدل پایه(٪)

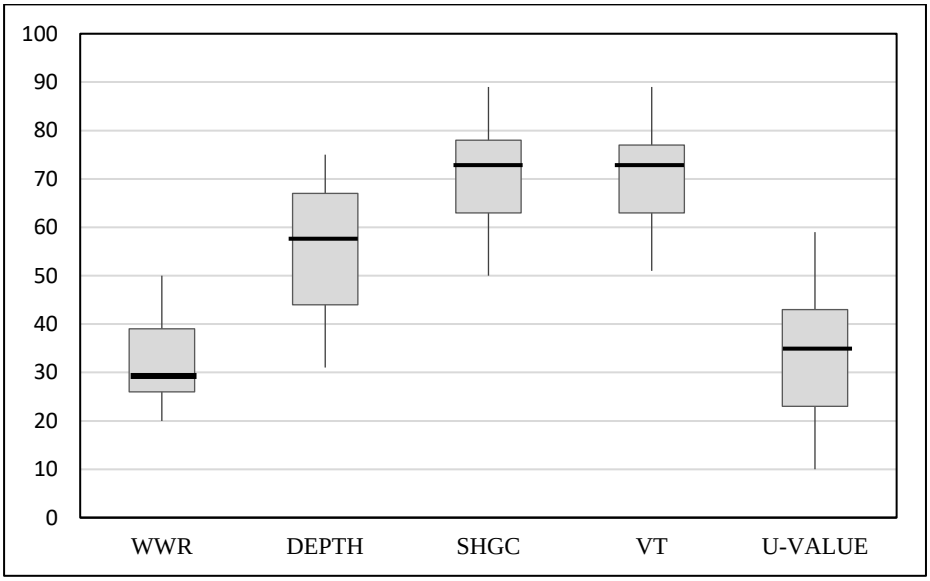
مدل بهینه پارتو روشنایی Par(UDI)	۱۹
مدل بهینه پارتو خیرگی Par(DGP)	۱۹
مدل بهینه پارتو انرژی Par(EUI)	۲۴



نمودار 1: مقایسه مقادیر راه حلهای بهینه منتخب در جبهه پارتو

طرح های بهینه متعلق به جبهه پارتو بر اساس متغیر های طراحی برای تجزیه و تحلیل بهتر در نمودار جعبه ای۲ دسته بندی شدند. همان گونه که مشاهده می شود برای نسبت مساحت پنجره به دیوار WWR ترجیح داده می شود یک کلاس درس با پنجره با متوسط WWR، ۳۰ درصد داشته باشد. نتایج با توجه به عمق مورد نیاز سایه بان میانه ۰/۴۸ متر را نشان می دهد در حالی که بازه حدود ۰/۴۴ تا ۰/۶۷ متر پتانسیل بهبود عملکرد بالایی را دارند و این نشان دهنده تمایل به داشتن سایه بان است. محدوده بزرگ عرض سایه بان در مدل های بهینه پارتو نشان می دهد که اگرچه در برخی از راه حل ها شیشه های موجود کم گسیل مقدار بسیار کم SHGC را تامین می کنند اما گزینه های دیگر کاهش بار خورشیدی در جهت کاهش مصرف انرژی کل اغلب بیشتر مطلوب هستند. این گزینه ها شامل سایه بان های بیرونی هستند که نصب آنها در WWR پایین تر باید با دقت مورد بررسی قرار گیرد زیرا می تواند باعث کاهش شدید UDI شود.همچنین نتایج نشان می دهند که استفاده از پنجره های دو جداره و سه جداره همیشه بهترین انتخاب نیستند. نتایج نشان می دهند که طاقچه های نوری مکانیسم تصحیح کننده ای برای پنجره های بزرگ هستند و امکان افزایش سطح پنجره را ضمن کنترل مصرف انرژی و تامین آسایش بصری می دهند. این موضوع به خصوص در مورد مدارس به علت هزینه اولیه پایین باید مورد توجه قرار بگیرد. نتایج با توجه به VT از نظر مقدار میانه مشابه نتایج مربوط SHGC و برابر ۰/۷۰ است. از آنجا که هدف ایجاد تعادل بین اهداف متضاد در زمینه عملکرد نور روز و انرژی

است و با توجه به اینکه انتخاب مصالح شیشه کاری محدود به گزینه های موجود در بازار می باشد و این امکان که هر دو ویژگی SHGC و VT مربوط به گزینه های طراحی بهینه پارتو قابل دسترسی نباشند و نیز از آنجا که هر یک از این دو ویژگی تنها بر یکی از اهداف موثرند بنابراین جهت حصول این یکپارچگی و تعادل بین اهداف توصیه میشود که از نسبتی بین این دو ویژگی انتخاب صورت گیرد که به نسبت آنها در گزینه های بهینه نزدیک باشد. در این حالت ممکن است میزان عملکرد طرح نسبت به طرح پارتو پایین تر باشد اما همچنان رابطه بین اهداف متعادل خواهد بود. نتایج آشکار می سازند که شیشه های با SHGC پایین و VT بالا می توانند جانشین مناسبی برای سایه بانهای خارجی در زمانی باشند که استفاده از آنها به دلایل زیبایی، سازه ای و یا دید امکان پذیر نیست. نتایج با توجه به U-Value از نظر مقدار میانه حدود ۳۵ درصد است. نتایج نشان می دهند پنجره های با U-Value پایین در حالت پایین بودن درصد WWR عملکرد مناسبی ندارند، زیرا انتقال حرارتی پایین از اتلاف حرارتی جلوگیری می کند و باعث گرمایش بیش از حد فضا می شود.



نمودار2: مقایسه بازه تغییرات مولفه های طراحی شاکله پنجره در مجوعه راه حلهای غیر غالب (پارتو)

بحث

بهینه سازی چند هدفه این امکان را فراهم می کند که مرزهای فضای راه حل تجسم شود، که در بیشتر موارد به طور قابل ملاحظه پیچیدگی مشکل را کاهش می دهد. هنگامی که مرزهای فضای راه حل تعیین شده است، تیم طراحی دارای گزینه هایی برای انتخاب هر یک از اهداف برای دستیابی به توافق بین انتظارات پروژه و طراحی نهایی است و این موضوع بار مسئولیت را برای طراحانی که می خواهند عملکرد ساختمان و کیفیت محیط را با برنامه های شبیه سازی پیش بینی و ارتقاء دهند، کاهش می دهد. با این وجود، برای دستیابی به نتایج معنی دار، متغیرهای و محدودیت های طراحی باید با دقت مورد توجه قرار گیرد. بیشتر تحلیل های صورت گرفته در پژوهش های پیشین بهینه سازی برای یافتن بهترین و بدترین سناریو کاربرد دارد. در حالی که در رویکردهای جدید در حوزه بهینه سازی هدف هدایت طراح به سمت انتخاب گزینه های بهینه از میان مجموعهای از راه حلهای پیشنهادی بر اساس اولویت ها و نیازهای مختص به هر پروژه می باشد.

الگوریتم بهینه سازی در این تحقیق، یعنی الگوریتم ژنتیک، افراد را به صورت تصادفی از جمعیت فعلی انتخاب می کند و از آنها به عنوان والدین برای تولید کودکان برای نسل بعدی استفاده می کند. به دلیل فرآیند انتخاب تصادفی، طبیعی است که هر فرآیند بهینه سازی، گزینه های طراحی متفاوت با عملکرد متفاوت را تولید می کند. گزینه طراحی بهینه از طریق هر فرایند بهینه سازی یکی از بهترین گزینه هاست. بنابراین از نظر ریاضی، طراحی بهینه جهانی را نمی توان یافت. همچنین فرآیند بهینه سازی به شدت بر قدرت محاسباتی تکیه دارد. زمان بهینه سازی هر سناریو بسته به سرعت پردازشگر کامپیوتر است. مدل طراحی پیچیده می تواند انتقال داده ها بین برنامه ها را از بین ببرد و روند بهینه سازی را متوقف کند. بهینه سازی حتی برای مدل های فضای پایه ساده به علت الزامات سخت متغیرهای شبیه سازی رادیانس بسیار زمان می برد. به عنوان یک نتیجه، این ممکن است با پیشرفت سریع برخی از پروژه های طراحی واقعی هماهنگ نباشد.

همچنین محدودیتهایی شامل بازه زمانی محدود پژوهش میدانی، تجهیزات مرتبط با اندازه گیری و دشواری های مرتبط با کار میدانی در محیط آموزشی، در پژوهش وجود دارند. علاوه بر این، مطالعات نشان می دهدند که پروژکتورهایی که در حال حاضر به طور گسترده در کلاس درس نصب شده و برای آموزش استفاده می شود به دلیل موقعیت و درخشندگی پروژکتور، همراه با زاویه شیب و مصالح تخته، منجر به یک محیط پیچیده در محیط نورپردازی می شود. با این وجود، در حال حاضر هیچ روشی برای ارزیابی تاثیر همزمان نورروز و نورپردازی مصنوعی در درک خیرگی یا عدم آسایش بصری وجود ندارد.

پس از بدست آمدن الگوهای طراحی شاکله پنجره بهینه، عواملی که در پژوهش ثابت در نظر گرفته شده بودند می توانند به عنوان متغیرهای مستقل در پژوهش های آتی مورد بررسی و معیار دهی قرار گیرند. لازم به ذکر است که به رغم تاثیر متغیرهای طراحی مذکور بر شرایط آسایش بصری و مصرف انرژی اما این عوامل به تنهایی نمی توانند شرایط آسایش بصری و حرارتی فضا را تامین کنند و پژوهش های آتی نیازمند بررسی اهداف بهینه سازی و سیع تری شامل هزینه، آسایش حرارتی، عملکرد چرخه حیات ساختمان و غیره بصورت یکپارچه و بررسی سیستم های کنترل نورروز و تهویه و انواع الگوریتم های دیگر و همچنین شاخص های ارزیابی مناسب جهت استفاده در این الگوریتمهای شبیه سازی چند هدفه می باشد. پژوهش های دیگری برای توسعه این راهکارها در اقلیم های دیگر، اجزاء دیگر فضاهای آموزشی و همچنین کاربری های متنوع تر لازم می باشد. همچنین قابلیت ایجاد کدهایی در الگوریتم های شبیه سازی به منظور بومی سازی آنها جهت استفاده در شهرها و اقلیم های مختلف ایران بر اساس نیازها و شرایط ویژه هر منطقه وجود دارد. استفاده از چنین الگوریتمهایی برای طراحان امکان دستیابی به گزینه های طراحی کارآمدتر و نزدیک به شرایط واقعی را فراهم می کند. در نهایت پژوهش های آتی، شامل توسعه ابزارهای بهینه سازی خواهد بود. ابزار بهینه سازی ایده آل باید دارای رابط کاربر گرافیکی، الگوریتم های بهینه سازی قدرتمند، نتایج بهینه سازی دقیق و کاهش زمان بهینه سازی باشد. همکاری چند جانبه بین متخصصین در حوزه های مختلف در این پروسه ضروری است.

منابع:

1. -Nguyen, A., Reiter, S., Rigo, P., **A Review on Simulation-Based Optimization Methods Applied to Building Performance Analysis**, Applied Energy, Vol. 113, pp. 1043-1058, 2014.
2. da Grac, V.A.C., Kowaltowski, J.R.D. , Petreche, J.R.D. , **An Evaluation Methodfor School Building Design at the Preliminary Phase with Optimisation of Aspects of Environmental Comfort for the School System of the State São Pauloin Brazil,** Build. Environ, Vol. 42 , No.2, pp. 984–999, 2007.

3. Ho, M., Chiang, C., Chou, P., Chang, K., Lee, C., **Optimal Sun-Shading Design for Enhanced Daylight Illumination of Subtropical Classrooms**, Energy and Buildings, Vol. 40, No.10, pp. 1844-1855, 2008.
4. Zhang, A., Bokel, R., van den Dobbelsteen, A., Sun, Y.,Huang, Q., Zhang, Q., **Optimization of Thermal and Daylight Performance of School Buildings Based on a Multi-Objective Genetic Algorithm in the Cold Climate of China**, Energy Build, Vol.139, pp. 371–384, 2017.
5. Secchi, S.,Sciurpi, F., Pierangioli, L., Randazzo, M., **Retrofit Strategies for the Improvement of Visual Comfort and Energy Performance of Classrooms with Large Windows Exposed to East**, Energy Procedia, Vol.78, pp.3144–3149, 2015.
6. Theodosiou, T.G., Ordoumpozanis, K.T., Energy, **Comfort and Indoor Air Qualityin Nursery and Elementary School Buildings in the Cold Climatic Zone of Greece**, Energy Build, Vol.40, No. 12, pp. 2207–2214, 2008.
7. Becker, R., Goldberger, I., Paciuk, M., **Improving Energy Performance of School Buildings While Ensuring Indoor Air Quality Ventilation**, Build. Environ, Vol. 42, No.9, pp. 3261–3276, 2007.
8. Montenegro, E., Potvin, A., Demers, C., **Impact of School Building Typologies on Visual Thermal and Energy Performances**, in: Proceedings of the 28thInternational Conference on Passive and Low Energy Architecture, Lima, Perú, 2012.
9. Zomorodian, Z.S., Tahsildoost, M., **Assessment of Window Performance in Classrooms by Long Term Spatial Comfort Metrics**, Energy Build, Vol.134, pp. 80–93, 2017..
10. Kim, T.W., Hong,W..H., Kim, H.T, **Daylight Evaluation for Educational Facilities Established in High-Rise Housing Complexes in Daegu**, South Korea. Build. Environ, Vol.78, pp. 137–144, 2014.
11. Hee, W.J., Alghoul, M.A. , Bakhtyar, B., Elayeb, O., Shameri, M.A., Alrubaih, M.S. , Sopian, K., **The Role of Window Glazing on Daylighting and Energy Saving inBuildings**, Renew. Sustain. Energy Rev,Vol. 42, pp. 323–343,2015.
12. Boubekri, M. , Boyer, L.L., **Effect of Window Size and Sunlight Presence on Glare**, Light. Res. Technol, Vol. 24 , No.2, pp. 69–74, 1992.
13. Attia, S., Hamdy, M., O'Brien, W., Carlucci, S. , **Assessing Gaps and Needs for Integrating Building Performance Optimization Tools in Net Zero Energy Buildings Design**, Energ. Buildings, Vol.60, pp.110–124, 2013.
۱۴. https://fa.wikipedia.org/wiki/جغرافیای- تهران
15. http://www.tehran.climatemps.com/sunlight.php
16. Reinhart C, Breton PF. **Experimental validation of Autodesk® 3ds Max® Design 2009 and DAYSIM** 3.0.Leukos, 2009, No. 1, Vol. 6, pp. 7-35.
17. Ibarra.D, **Teaching Daylight Simulations Improving Modeling Workflows for Simulation Novices**, Proceeding of BS2013, 13th conference of International Building Performance Simulation Association, (Chambery, France), pp.1126-1135, 2013.
18. A.Nabil, J. Mardaljevic, **Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm For assessing Daylight in Buildings**, Light. Res. Technol. 37 (1) ,pp. 41–57,2005.
19. J. Mardaljevic, L. Heschong, E. Lee, **Daylight Metrics and Energy Savings,** Light.Res. Technol. 41 (3) , pp.261–283,2009.
20. S. Olbina, Y. Beliveau, **Developing a Transparent Shading Device as a Daylighting System**, Build. Res. Inf. 37 (2) ,PP.148–163, 2009.
21. M. David, M. Donn, F. Garde, A. Lenoir, **Assessment of the Thermal and Visual Efficiency of Solar Shades**, Build. Environ. 46 (7) , 1489–1496, 2011.
22. Fudenberg.D, Tirole.J, Game Theory **,The MIT Press, Massachusetts Institute of Technology,1991,pp.101-110.**
23. www.wikipedia.org/wiki/fa./ کارایی پارتو /(accessed on 1/2018, at 11:55).
24. Sadeghipour Roudsari, M.,Pak ,M., **Ladybug: A Parametric Environmental Plugin For Grasshopper To Help Designers Create An Environmentally-Conscious Design**, Proceedings of 13th Conference of International Building Performance Association, Chambery, France, August 2013.
25. Evins, R., **A Review of Computational Optimisation Methods Applied to Sustainable Building Design**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 22, pp. 230-245, 2013.