

تحلیل عملکرد رف نوری در ترکیب با پنجره در بهبود شرایط آسایش بصری و کارایی انرژی در فضای آموزشی

(موردپژوهی: آتلیه معماری دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان)

زهرا شریفیان¹، نرگس دهقان^{2*}، مهدی حمزه نژاد³ و زهرا سادات زمردیان⁴

تاریخ دریافت: 1402/10/11

تاریخ پذیرش: 1403/05/18

(صفحات 33-53)

چکیده

هدف: در دهه‌های اخیر، ملاحظات محیطی و همچنین لزوم کاهش مصرف انرژی سبب شده است که استفاده از نور طبیعی در ساختمان‌ها به عنوان یکی از جنبه‌های اصلی طراحی مطرح شود. استفاده مناسب از نور روز در فضاهای آموزشی باعث افزایش بهره‌وری انرژی و تأثیر مثبت بر عملکرد، تمرکز و کیفیت یادگیری دانش‌آموزان می‌شود. بنابراین، دستیابی به فضایی که هم دغدغه‌های آسایش بصری و هم صرفه‌جویی در مصرف انرژی را برآورده کند، نیاز به اتخاذ راهبردهای طراحی یا اصلاحی دارد که نور روز را فراهم و کنترل نماید. از این رو هدف پژوهش حاضر، بررسی بهبود شرایط آسایش بصری مرتبط با نور روز و کارایی انرژی در یک آتلیه معماری منتخب شهر اصفهان، با به‌کارگیری سیستم رف نوری در ترکیب با پنجره به عنوان راهبرد اصلاحی است.

روش تحقیق: فرایند انجام این پژوهش شامل: 1. شناسایی متغیرهای رف نوری و جداره نور گذر، 2. اجرای فرایند شبیه‌سازی روشنایی و انرژی، 3. تعیین میزان تأثیر متغیرها بر توابع هدف (دریافت نور مناسب و کاهش مصرف انرژی) با استفاده از آنالیز حساسیت، اجرای فرایند بهینه‌سازی و استخراج مدل‌های بهینه است.

نتایج و بحث: یافته‌ها نشان داد که طراحی بهینه رف نوری در ترکیب با پنجره، تأثیر قابل توجهی در بهبود آسایش بصری و کارایی انرژی در فضای آموزشی در اقلیم شهر اصفهان داشت.

نتیجه‌گیری: با مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل پایه و برخی از پاسخ‌های بهینه، می‌توان مشاهده نمود که استفاده از رف نوری در این اقلیم و جبهه جنوب شرقی، منجر به بهبود شاخص نور روز (SUDI) به میزان 36.10، 37.50، 38.90، 37.50 درصد می‌شود. این در حالی است که این میزان ورود نور، نه تنها باعث افزایش میزان خیرگی آزاردهنده در فضای داخلی نمی‌شود، بلکه خیرگی آزاردهنده را به میزان 72 و 75 درصد کاهش می‌دهد. همچنین استفاده از این سیستم، منجر به کاهش مصرف انرژی (EUI) به میزان 21.60، 25.00، 22.60، 23.50 درصد نیز می‌شود.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی نور روز و انرژی، آنالیز حساسیت، کارگاه معماری، رف نوری، اصفهان.

¹ دانشجوی دکتری، گروه معماری، مرکز تحقیقات افق‌های نوین در معماری و شهرسازی، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

² استادیار، گروه معماری، مرکز تحقیقات افق‌های نوین در معماری و شهرسازی، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران (نویسنده مسئول) dehghan@par.iaun.ac.ir

³ استادیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

⁴ استادیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر بهره‌گیری از نور روز در ساختمان به مثابه یک راهبرد طراحی در کاهش مصرف انرژی، بهبود آسایش بصری و بهره‌وری کاربران توسعه یافته است. حضور نور روز در فضا علاوه بر بالا بردن سطح رضایتمندی کاربران از آسایش بصری و حرارتی محیط، بر تنظیم ملاتونین که به شدت وابسته به نور دریافت شده است، تأثیر دارد (Acosta, Campano, Leslie, & Radetsky, 2019). در کنار فواید استفاده از نور روز باید توجه داشت که زیاد از حد بودن مقدار نور در فضا و عدم کنترل آن، منجر به بروز ناراحتی بصری و کاهش بهره‌وری کاربران می‌شود.

حضور نور روز در فضاهای آموزشی به جهت ارتقای سطح سلامت جسمی و روحی دانش آموزان، افزایش تمرکز و ارتقا کیفیت یادگیری و بهبود کارایی آنان (Heschong, 2003) از اهمیت بالایی برخوردار است. از میان انواع فضاهای آموزشی، تأمین روشنایی مناسب با توزیع یکنواخت در آتلیه‌های طراحی معماری به سبب فعالیت‌های متنوع دانشجویان (کار با قلم و کاغذ، کار با رایانه و...) که برای هرکدام از آن‌ها میزان متفاوتی از روشنایی مطلوب است، طولانی بودن زمان حضور هنرجویان در کارگاه و متنوع بودن طیف سنی آنان (استادان و دانشجویان) (Bellia, Musto, & Spada, 2011)، نیازمند توجه بیشتری است و می‌تواند از بروز خستگی چشم و کاهش دقت جلوگیری کند.

نور روز را می‌توان توسط پنجره‌ها که قابلیت هدایت نور مرئی خورشید را به فضای داخلی دارند تأمین کرد، اما با افزایش فاصله پنجره، میزان نور به سرعت کاهش می‌یابد. یک پنجره معمولاً نور روز را تا فاصله‌ای تقریباً برابر با ارتفاع خود تأمین می‌کند (Zazzini, Romano, Lorenzo, Portaluri, & Crescenzo, 2020). در نتیجه در برخی از نواحی، روشنایی مورد نیاز تأمین نمی‌شود و تاریک می‌ماند، از سویی وجود هم‌زمان نواحی تاریک و روشن در محدوده دیداری آزاردهنده می‌شود. پنجره‌ها، به منزله منابع اصلی اتلاف حرارت ساختمان‌ها، بخش قابل توجهی از مصرف انرژی در یک فضا را بخود اختصاص داده‌اند. طراحی پنجره یک مسأله چند هدفه

پیچیده است که البته به تنهایی نمی‌تواند نقش به‌سزایی در بهبود آسایش ساکنان داشته باشد، بنابراین سیستم‌های پیشرفته کنترل نور روز با توزیع یکنواخت تر نور در فضا می‌توانند به تأمین آسایش در ساختمان و کاهش مصرف انرژی کمک کنند (Ascione, Bianco, De Masi, Mauro, & Vanoli, 2015). سیستم نور روز بایستی متناسب با کاربری فضا و با در نظر گرفتن امکان ترکیب آن با پنجره و دیگر سیستم‌های روشنایی انتخاب شود (Tabadkani, Roetzel, Li, & Tsangrassoulis, 2021). از آن جایی که رویکرد اصلی این تحقیق، بهبود شرایط فضا با حداقل دستکاری و تخریب در طرح موجود است، از سیستم رف نوری در ترکیب با پنجره، جهت بهبود روشنایی طبیعی فضا و کارایی انرژی، استفاده شود.

رف نوری یک سیستم طراحی غیر فعال است که به صورت افقی یا مایل در ارتفاع بالایی از پنجره نصب می‌شود و ضمن سایه‌اندازی در فصول گرم سال و کاهش خیرگی آزار دهنده در داخل فضا، سبب افزایش عمق نفوذ نور به بخش‌های مرکزی و عمیق تر فضا شده و مصرف انرژی را کاهش می‌دهد (Motazedian & Mahdavejad, 2015) و البته مانع دید به بیرون فضا نمی‌شوند و به همین دلایل یکی از پرتفردارترین فناوری‌ها محسوب می‌شود. از آنجا که این سیستم بیشترین کارایی را در هوای صاف و آفتابی دارد (Mahdavejad, Tahbaz, & Dolatabadi, 2016)، در این پژوهش به بررسی نحوه استفاده و تناسبات بهینه این سیستم در شهر اصفهان، با توجه به میزان بالای روزهای آفتابی در این شهر (به‌طور میانگین 3029 ساعت در طول سال) (Province, 2016) پرداخته می‌شود.

1-1- مروری بر پیشینه پژوهش

با بررسی مطالعات پیشین بر روی رف‌های نوری، برخی از پژوهش‌ها، به طبقه‌بندی الگوهای مختلف رف نوری و متغیرهای آن، برای فضاهای مختلف پرداخته‌اند (Motazedian & Mahdavejad, 2015)، (salahsoor & Zarandi, 2023)، (Moazzeni & Zahra Ghiabaklou, 2016). برخی دیگر

است، پس از بررسی پژوهش‌های انجام شده بر روی ساختار رف نوری، بیشترین تمرکز بر روی ارزیابی مطالعاتی انجام شد که در ارتباط با طراحی بهینه رف نوری یا پنجره و یا ترکیب آن دو، بودند تا مشخص شود آیا تحقیقات کافی در زمینه ی طراحی هر دو سیستم به منظور تأمین اهداف مدنظر با در نظر گرفتن میزان اثر بخشی هر متغیر روی اهداف، انجام شده و یا به نتیجه مطلوب دست‌یافته‌اند؟ به منظور تقویت ادبیات مروری و دسته‌بندی تحقیقات موجود، برخی از مطالعات در این حوزه در جدول 1 سازماندهی شده اند. مهمترین نکات این مقالات نیز در این جدول آمده است. در ادامه روش‌های ارزیابی و نتایج این پژوهش‌ها آورده شده است.

از پژوهش‌ها ضمن توجه به اقلیم با استفاده از روش‌های پارامتریک بدنبال یافتن راه حل‌های بهینه جهت طراحی رف نوری، به مطالعه در این زمینه پرداخته‌اند (A. A. S. Bahdad, Fadzil, Onubi, & BenLasod, 2021 (Mahdavinejad et al., 2016) (Mangkuto,) (Mandourah, & Hareri, 2022 (Feradi, Putra, Atmodipoero, & Favero, 2018 Ebrahimi-Moghadam, Ildarabadi, Aliakbari, &) (Fadaee, 2020 (A. Bahdad, Syed Fadzil, & Taib,) (2020). از آنجایی که این تحقیق بر طراحی بهینه رف نوری در ترکیب با پنجره جهت رسیدن به اهداف مد نظر متمرکز

جدول 1- طبقه‌بندی برخی از مطالعات مهم اخیر در زمینه ی طراحی بهینه نور روز و انرژی مرتبط با سیستم رف نوری و پنجره
 Tab.1 - Classification of some recent important studies in the field of optimal design of daylight and energy related to the light shelf system

منبع	اهداف	شاخص	متغیرها	الگوریتم	نوع ارزیابی
(Ziaee & Vakilinezhad, 2022)	بهینه سازی عملکرد نور روز و آسایش حرارتی در کلاس های درس با رف های نوری	sDA, ASE, UDI	عمق بیرونی و داخلی / زاویه داخلی	SPEA-2 and HypE	-
(Mangkuto, Feradi, et al., 2018)	بهینه سازی نور روز بر اساس اصلاح پارامترهای طراحی رف نوری.	sDA, ASE	عرض خارجی/ داخلی، زاویه شیب خارجی، ضریب انعکاس	SPEA-2 (Octopus program)	-
(A. A. S. Bahdad et al., 2021)	بهینه سازی چند هدفه برای پارامترهای طراحی رف های نوری جهت آسایش بصری و عملکرد انرژی حرارتی.	sDA, UDI, EU	زاویه قسمت خارجی داخلی، نسبت عمق خارجی داخلی.	SPEA-2 (Octopus program)	+
(Ebrahimi-Moghadam, Ildarabadi, Aliakbari, & Fadaee, 2020)	بهینه سازی چند هدفه مصرف انرژی و آسایش حرارتی با استفاده از رف های نور داخلی.	EUI	زاویه، عمق و تعداد رف های نوری.	SPEA-2 (Octopus program)	+
(Bakmohammadi & Noorzai, 2020)	بهینه سازی نور و انرژی با هدف آسایش کاربران و مصرف انرژی در یک کلاس درس.	UDI, DA ASE, DGP TEUI, LEUI, CRT	WWR، تعداد پنجره ها و مشخصات شیشه (نوع شیشه و SHGC)		-
(Peiman Pilechiha, Mahdavinejad, Pour Rahimian, Carnemolla, & Seyedzadeh, 2020)	بهینه سازی چند هدفه نور، انرژی و کیفیت دید از طریق طراحی پنجره	sDA, ASE	ابعاد و موقعیت پنجره	NSGAII EnergyPlu s	-
(Keshtkar Ghalati & Ahmadian, 2024)	اثرات قرارگیری پنجره و رف نوری بر مصرف انرژی و روشنایی روز در کلاس های درس	EUI, sDA, CDA, DLA	عمق پنجره و موقعیت قرار گیری رف نوری	Ladybug/ Honeybee plugins	-
پژوهش حاضر	بهبود آسایش بصری و بهره وری انرژی با استفاده از رف های نوری.	UDI, sDGP, EUI	عمق رف خارجی داخلی، زاویه، جنس رف، ارتفاع پنجره، ارتفاع کله‌سوری، پنجره	NSGAII	+

در پژوهشی که توسط بهداد و دیگران انجام شد، یک فضای اداری مطلوب که هم در دسترس بودن نور روز مناسب و هم بهبود عملکرد انرژی حرارتی را برآورده سازد، معرفی شده است. چهارچوب این مطالعه ترکیبی از طراحی پارامتریک، ابزارهای شبیه‌سازی انرژی و روشنایی و الگوریتم ژنتیک است. راه‌حل‌های بهینه از بهترین متغیرهای طراحی رف نوری، می‌تواند میانگین کل روشنایی مفید نور روز را به میزان 62.50، 56.25، 57.50 و 68.13 درصد عملکرد انرژی حرارتی را با 1.15، 4.60، 6.70 و 3.05 درصد بهبود بخشند (A. A. S., Bahdad et al., 2021). در این پژوهش علاوه بر متغیرهای رف نوری، سه متغیر از شیشه و ارتفاع پنجره به عنوان متغیرهای دیگر این مطالعه جهت بررسی تأثیر آنها در بهبود شرایط در نظر گرفته شد. همچنین سعی شد میزان تأثیر هر متغیر در بالا بردن کیفیت محیط بررسی شود تا متغیرهایی که بیشترین تأثیر را بر بازدهی سیستم دارند شناسایی شوند و در هنگام طراحی سیستم بیشتر مورد توجه قرار گیرند.

در مطالعه دیگری با موضوع بهینه‌سازی چند هدفه نور روز و آسایش حرارتی با به‌کارگیری رف نوری، که توسط ضیایی و وکیلی نژاد در دو شهر تهران و ساری انجام شد، بررسی اثر آسمان ابری در عملکرد رف نوری بر اهداف کلاس‌ها بررسی شد. چهار متغیر رف نوری شامل ارتفاع، طول قسمت بیرونی، طول و زاویه قسمت داخلی به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که استفاده از رف نوری در تهران با آسمان ابری کمتر در مقایسه با ساری، از نظر تأمین نور روز و آسایش حرارتی، مؤثرتر است (Ziaee & Vakilinezhad, 2022) و (Mohammadjavad, Mansooreh, & Mahnaz, 2016). مطالعه حاضر در شهر اصفهان با تعداد بالای روزهای آفتابی که در بیشتر مواقع آسمان صاف است، انجام شد.

تأثیر حضور رف در ایجاد یک فضای مطلوب به گونه‌ای که آسایش بصری و حرارتی کاربران را در ساختمان‌ها مسکونی بهبود بخشد توسط مقدم و دیگران مورد بررسی قرار گرفته است. پنج گونه رف نوری برای بهبود شرایط حرارتی و بصری ساختمان پیشنهاد و سپس تحلیل

روشنایی برای ساختمان با و بدون حضور رف نوری انجام شده و با توجه به بیشترین و کمترین شدت نور در فضاهای مورد بررسی، مناسب‌ترین گونه رف نوری که شرایط بصری بهینه را برای فضا فراهم می‌کند، انتخاب شده است. سپس نقش رف نوری بهینه در شاخص‌های آسایش حرارتی و انرژی (گرمایش، سرمایش و برق) بررسی و با وضعیت پایه مقایسه شد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که استفاده از رف نوری بهینه باعث بهبود متوسط سالانه 18%، 11% و 7% در تقاضای گرمایش، سرمایش و برق ساختمان در طول سال می‌شود (Ebrahimi-Moghadam, Ildarabadi, Aliakbari, Arabkoohsar, & Fadaee, 2020).

صباغ و دیگران در پژوهشی به بررسی بهبود کیفیت نور طبیعی در یک کلاس درس در عربستان سعودی از طریق بهینه‌سازی رف‌های نوری پرداخته‌اند. چهار گونه طرح برای رف نوری در نظر گرفته و سپس جهت بررسی میزان تأثیر حضورشان بر کمیت و کیفیت نور روز در کلاس، شبیه‌سازی انجام شد. بررسی و مطالعه نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از رف نوری در این مورد چندان مؤثر نبوده است، اما می‌تواند به‌عنوان روشی ساده به کاهش تفاوت در سطوح روشنایی بین نواحی نزدیک پنجره و دور از آن، در کلاس کمک کند و به‌طور کلی کنتراست را کاهش دهد (Sabbagh et al., 2022). در این مطالعه مدل‌های بهینه رف نوری با بهینه‌سازی متغیرهای این سیستم به دست می‌آید و سپس مدل‌های بهینه با مدل پایه مقایسه تا میزان بهبود شرایط محیط در حضور رف مشخص شود.

کشتکار و احمدیان در پژوهشی حضور رف‌های نوری و پنجره‌های عمیق را به منظور افزایش بهره‌وری انرژی و روشنایی روز در کلاس‌های درس در آبادان مورد بررسی قرار دادند. با مقایسه انواع رف‌های خارجی، داخلی و مرکزی و در موقعیت‌های مختلف عمق پنجره، نتایج زیر به دست آمد: با استفاده ترکیبی از رف‌های نوری و پنجره‌های عمیق: در رف‌های نوری مرکزی، مصرف انرژی 20 درصد و خیرگی 53.37 درصد کاهش یافت. نصب پنجره در عمق دیوار تأثیر چندانی در کاهش مصرف انرژی نداشت اما تا حدی شدت تابش نور را

متغیرهای تأثیر گذار بر اهداف استفاده شد. انجام آنالیز حساسیت در این مطالعه، در مراحل اولیه طراحی، پیش از فرآیند بهینه‌سازی، که انعطاف پذیری بیشتری در طراحی وجود دارد، انجام شد. در صورتی که در مطالعات مشابه (Fang & Cho, 2019) و (Najafi, Gorji, Mahlabani, & Pilechiha, 2023)، از آنالیز حساسیت بعد از فرآیند بهینه‌سازی استفاده شده است.

✓ روش این مطالعه ترکیبی از طراحی پارامتریک، تحلیل حساسیت و الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر مسلط جهت بهینه‌سازی چند هدفه برای ارائه راه‌حل‌های طراحی مطلوب است. این روش به طراح اطمینان می‌دهد که مسیر مناسبی را برای انتخاب گزینه‌های طراحی انتخاب نموده است.

✓ الگوریتم مورد استفاده در این نوع بهینه‌ساز NSGA-II است که از نظر شرایط در موارد محدود و بدون محدودیت بهترین عملکرد را از نظر کیفیت نتیجه و عملکرد محاسباتی دارد (Wright, Brownlee, Mourshed, & Wang, 2013; Rafati, Hazbei, & Eicker, 2023).

از این رو پژوهش حاضر، در پی ارائه راهکارهای اصلاحی در آتلیه طراحی معماری جهت افزایش آسایش بصری مرتبط با نور روز و کاهش مصرف انرژی از طریق طراحی بهینه رف نوری در ترکیب با پنجره است.

2- روش تحقیق

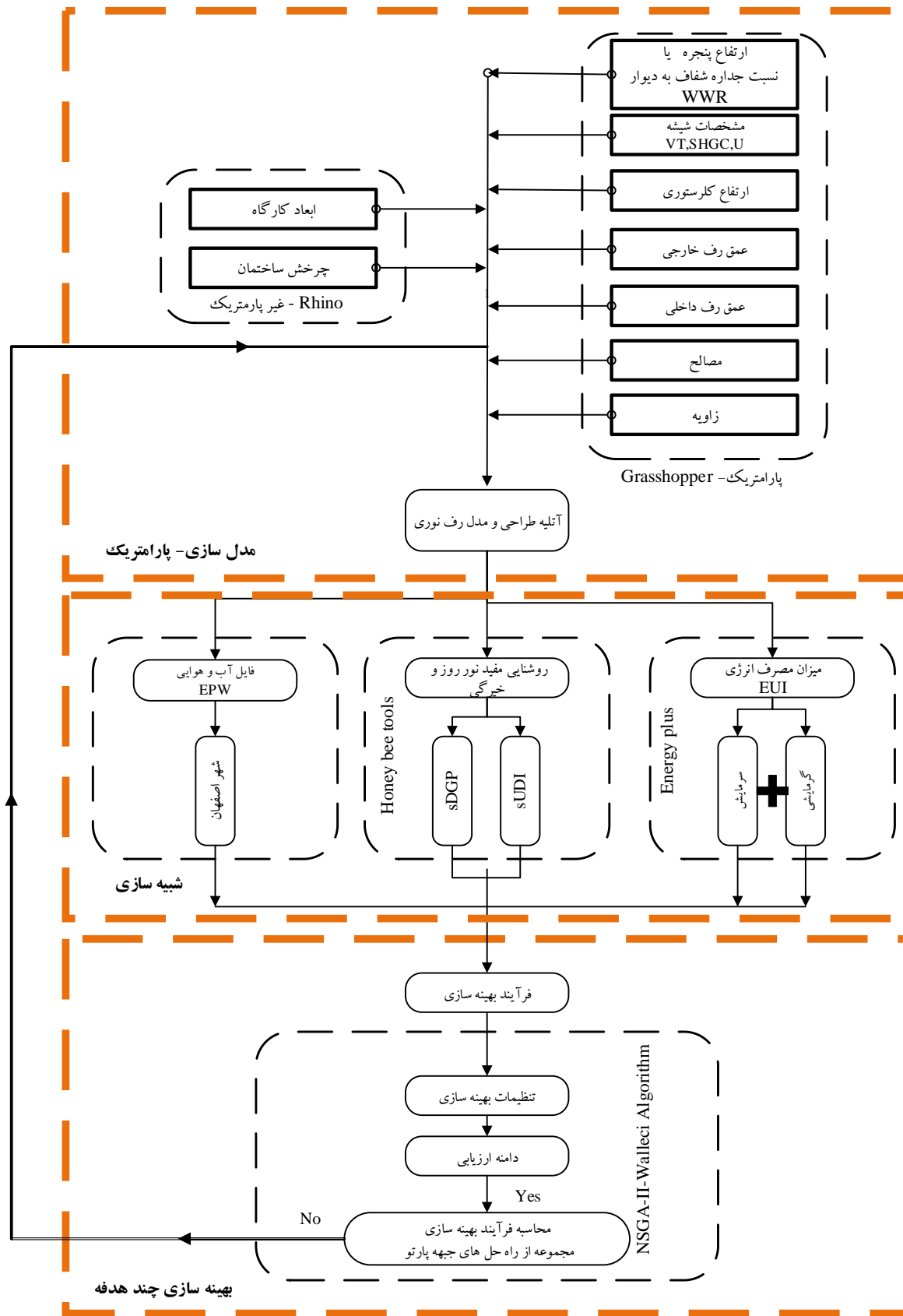
با توجه به ماهیت کاربردی این تحقیق، رویکرد تحقیق کمی و راهبرد آن مدل‌سازی و شبیه‌سازی است. برای پاسخ به پرسش‌های تحقیق، ابتدا مدل‌سازی آتلیه هدف انجام شد و با استفاده از شبیه‌سازی وضعیت اولیه آتلیه از لحاظ میزان مصرف انرژی و روشنایی مورد بررسی قرار گرفت سپس، فرآیند بهینه‌سازی چند هدفه با به‌کارگیری رف نوری در ترکیب با پنجره انجام شد و در نهایت با تحلیل منطقی و قیاسی گزینه‌های طراحی مطلوب، انتخاب شدند. فرآیند انجام پژوهش و نرم‌افزارهای مورد نیاز در شکل 1 نشان داده شده است.

کنترل می‌کرد. پنجره عمیق مصرف انرژی (13٪) را کاهش داده است و استفاده از رف‌های نوری عملکرد انرژی (14 تا 20٪) بهبود بخشیده است. در مقایسه با مدل پایه، رف‌های نوری ترکیبی UDI را 20٪ و خیرگی را تا 53٪ کاهش دادند، در حالی که رف‌های نوری داخلی UDI را 14٪ و خیرگی را 30٪ کاهش دادند. بنابراین، نصب رف‌های نوری همیشه سبب کاهش تابش خیره کننده می‌شود. اما اگر هدف صرفاً صرفه جویی در مصرف انرژی است، رف‌های نوری مرکزی و خارجی در موقعیت پنجره عمیق بسیار مفید هستند. در میان مطالعات بررسی شده مشخص شد، شکاف‌های قابل توجهی در ادبیات پژوهش در رابطه با بهینه‌سازی چند هدفه، ترکیب سیستم رف نوری با پنجره و متغیرهای آنان وجود دارد که نیاز به اتخاذ یک رویکرد جدید که طراحی یا راهکارهای اصلاحی را با در نظر گرفتن همزمان اهداف متعدد ارائه نماید، پدیدار شد. در ادامه به موارد توجه شده در این مطالعه پرداخته می‌شود.

✓ ارتقای عملکرد فضاهایی آموزشی موجود، از منظر دریافت نور روز مطلوب و بهره‌وری انرژی بر اساس شرایط اقلیمی منطقه با ارایه راهبردهای اصلاحی که حداقل دستکاری و تخریب در طرح موجود را دارند.

✓ در بیشتر مطالعات، طراحی رف نوری بدون توجه به ویژگی‌های پنجره‌ای که بر روی آن قرار می‌گیرد، انجام می‌شود در نتیجه رسیدن به اهداف آسایش بصری کاربران و کارایی انرژی را به طور کامل فراهم نمی‌سازد (Ziaee & Mangkuto, Feradi, et al., 2018; A. A. S. Bahdad et al., 2022; Vakilinezhad, 2021). بنابراین در این مطالعه سعی شد طراحی بهینه رف نوری در ترکیب با طراحی پنجره، انجام شود. بررسی مشخصات معماری مناسب پنجره‌ها و تأثیر آن بر عملکرد نور روز و کارایی انرژی فضا در این مطالعه، سبب شد سه متغیر اصلی شیشه (VT, SHGC, Uvalue) در کنار ارتفاع پنجره مورد ارزیابی قرار گیرند.

✓ در فرآیند بهینه‌سازی این پژوهش به دلیل وجود متغیرهای متعدد، جهت ساده‌سازی و تسریع در فرآیند بهینه‌سازی، از آنالیز حساسیت جهت شناسایی



شکل 1 - فرآیند روش پژوهش

Fig.1- Research workflow



متغیرهای طراحی رف شامل: عمق داخلی و خارجی، مصالح، زاویه شیب سیستم، ارتفاع شیشه و ارتفاع پنجره بالایی (کلستوری) است. در این پژوهش سعی شده محدودیتهای هر یک از متغیرهای رف نوری بر اساس بررسی پژوهش‌های پیشین در این حوزه و محدوده متغیرهای مرتبط با جداره نور گذر بر اساس استانداردها (مبحث 19 و استاندارد اشرفی) مشخص شود. جدول 2 برخی از متغیرهای رف نوری که در پژوهش‌های اخیر به آنها پرداخته شده است، را نشان می‌دهد. ابعاد و تناسب‌های رف‌های نوری بایستی با در نظر گرفتن شرایطی مانند مشخصات فیزیکی فضا، نوع کاربری و ویژگی‌های اقلیمی محل انجام پروژه تعیین شود. در ادامه در خصوص متغیرهای رف نوری و پنجره که در پژوهش حاضر، جهت طراحی بهینه رف نوری در نظر گرفته شده‌اند، توضیحاتی ارائه شده است.

2-1- متغیرهای پژوهش

در این پژوهش با کمک شاخص‌های ارزیابی روشنایی مفید نور روز، خیرگی و مصرف انرژی (UDI, sDGP, EUI) که به عنوان متغیر وابسته در این پژوهش تعریف شده‌اند، میزان اثر گذاری هر یک از متغیرهای مستقل (متغیرهای طراحی رف و مشخصات جداره نور گذر) بر اهداف مورد نظر (مقادیر شاخص‌ها) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. یکی از چالش‌های کلیدی در افزایش مؤثر عملکرد نور روز ساختمان‌ها با استفاده از رف نوری، فقدان اطلاعات کافی در مورد متغیرهای مؤثر این سیستم در بهبود شرایط محیط است. متغیرهای بهینه برای تضمین کارایی مطلوب، یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در طراحی رف نوری است.

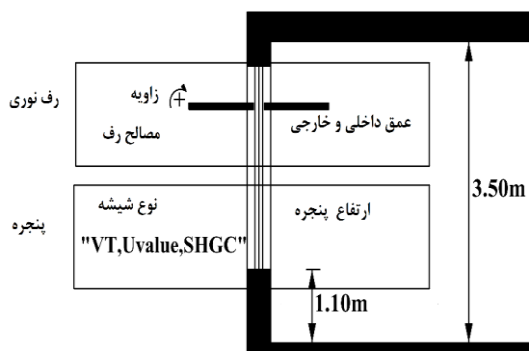
2-2- متغیرهای رف نوری

جدول 2- بررسی متغیرهای طراحی رف نوری که پژوهش‌ها ذکر شده بر روی آنها کار کرده‌اند

Tab.2- Examining the design variables of the light shelf that the mentioned researchers have worked on

منبع	متغیرهای رف نوری					
	ارتفاع		زاویه	مصالح	جانمایی و عمق	
	ارتفاع کلستوری	ارتفاع شیشه			داخلی	خارجی
(Tabadkani et al., 2021)					*	
Salahsoor & Zarandi,) (2023)			*	*		
Mohammadjavad et) (al., 2016)	*		*		*	
Kontidakis,) Tsangrassoulis, Doulos, (& Zerefos, 2018)	*	*	*	*	*	
Ebrahimi-Moghadam,) Ildarabadi, Aliakbari, & (Fadaee, 2020)			*		*	
Joarder, Ahmed, Price,) (& Mourshed, 2009)		*				
(Sabbagh et al., 2022)			*	*	*	
Ziaee & Vakilinezhad,) (2022)		*	*		*	
Mangkuto, Feradi, et) (al., 2018)			*	*	*	
A. A. S. Bahdad et al.,) (2021)		*	*		*	
Mohammad Hossein) Moazzeni & Zahra (Ghiabaklou, 2016)			*		*	
پژوهش حاضر	*	*	*	*	*	

مهمی دارد و از آنجایی که سطوح نیمه‌آینه‌ای عملکرد بهتری نسبت به سایر مصالح براق و سطوح آینه‌ای دارند در این پژوهش از مصالح آلومینیوم برای رف نوری استفاده شد. مقطعی از یک رف نوری به همراه متغیرهای طراحی که در این پژوهش در نظر گرفته شده‌اند در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2- مقطعی از یک رف نوری به همراه متغیرهای طراحی
Fig.2- Section of a light shelf and design factors

با توجه به انتخاب متریال آلومینیوم برای رف نوری، انواع مختلفی از آن جهت شبیه‌سازی انرژی و روشنایی در نظر گرفته شده که به تفکیک موتور انرژی پلاس و ری‌دینس در جدول 3 ارائه شد. ویژگی بازتابی مصالح انتخاب شده از ری‌دینس کالر پیکر¹ (R.C. Picker, 2017) گرفته شده است. همچنین بازتاب خورشیدی (SR) و بازتاب مرئی (VR) مصالحی انتخابی رف برای شبیه‌سازی انرژی، نشان داده شده است.

2-2- متغیرهای پنجره

در این مطالعه برخی از مشخصات جداره نور گذر مانند VT, SHGC, Uvalue در کنار ارتفاع آن، به عنوان متغیرهای پنجره انتخاب شدند تا از این طریق بتوان به بهبود شرایط نوری و عملکرد انرژی در فضای موردنظر در کنار سیستم رف نوری، کمک نمود. در این پژوهش از 7 مدل پنجره با ویژگی‌های مشخص جهت بهینه‌سازی به تفکیک، استفاده شد. جدول 4، نوع پنجره‌ها و مقادیر متغیرهای آن‌ها را نشان می‌دهد.

عمق داخلی و خارجی: هرچه به عمق رف نوری اضافه شود خیرگی کمتری رخ می‌دهد، اما ورود نور نیز به همان نسبت کمتر می‌شود. بنابراین تعیین عمق مناسب بایستی با انجام شبیه‌سازی برای هر مدل انجام گیرد. با توجه به کاربری پژوهش حاضر (آموزشی)، حداکثر عمق داخلی به دلیل پیش‌گیری از حواس‌پرتی بصری کاربران، 50 سانتی متر در نظر گرفته شد. از آنجایی که حداقل عرض سایبان در مبحث 19 در جبهه جنوب شرقی 70 سانتی متر برای شهر اصفهان است و همچنین با در نظر گرفتن المان‌های عمودی بر روی جداره نمای آلتیه مدنظر به عرض 0.45 متر، بازه 30 تا حداکثر 90 سانتی متر برای عمق خارجی با توجه به این دو عامل در نظر گرفته شد. بازه تعیین شده، فضای کافی برای بازتاب نور روز را فراهم می‌کند و از سوئی مانع دید کاربران به بیرون فضا نمی‌شود. زاویه: Lee (2019) در مطالعه‌ای، استفاده از رف‌های نوری را برای کاهش مصرف انرژی مورد بررسی قرار داد، جایی که تمرکز بر تغییر زوایای رف‌های نوری و تأثیر آنها بر کیفیت نور طبیعی بود. این مطالعه بر اهمیت تغییر زاویه رف با توجه به زاویه تابش خورشید در فصول مختلف در اقلیم مد نظر تأکید دارد. از آن جایی که در این پژوهش با توجه به شرایط و کاربری فضا، رف نوری استاتیک مد نظر قرار گرفت، جهت انتخاب بهترین حالت، بازه بین 0 تا 40 درجه برای زاویه رف (مثبت با سطح افق) در نظر گرفته شد. این بازه بر اساس زاویه تابش خورشید در اصفهان که در 31 خرداد به حداکثر میزان $80.95^\circ (SA(\text{Max}) = 90^\circ - L + 23.5^\circ)$ و در 30 آذر به کمترین میزان $34.05^\circ (SA(\text{Min}) = 90^\circ - (L - 23.5^\circ))$ می‌رسد، انتخاب شد. از طرفی زاویه‌ای برای رف به سمت خارج (منفی) در نظر گرفته نشد تا مانع دید کاربران به بیرون فضا نشود. در این پژوهش رف داخلی در موقعیت افقی قرار دارد، چراکه با توجه به عرض محدود داخلی، زاویه‌دار نمودن رف داخلی نسبت به افق غیر عملی تلقی می‌شود. بنابراین هیچ تغییری در زاویه رف داخلی داده نشد. متریال: نوع متریال استفاده شده در رف نوری بر میزان خیرگی و نور فضا نقش بسیار

جدول 3- ویژگی مصالح انتخاب شده رف نوری برای شبیه سازی انرژی و نور روز

Tab.3 -Characteristics of the selected materials of the optical shelf for simulating energy and daylight

Energy plus			Radiance					مصالح	کد
Vis-ref	Sol-ref	Roughness	Specularity	B-ref	G-ref	R-ref	ρ		
0.883	0.883	0.02	0.80	0.88	0.80	0.90	0.885	آلومینیوم	0
0.752	0.750	0.05	0.850	0.70	0.70	0.70	0.70	آلومینیوم برس خورده ¹	1
0.405	0.405	0.65	0.680	0.310	0.310	0.310	0.310	آلومینیوم نورد شده ²	2
0.436	0.436	0.02	0.30	0.436	0.481	0.487	0.480	آلومینیوم اکسید شده ³	3

جدول 4- مشخصات پنجره ها و مقادیر متغیرهای آن

Tab.4 - Window properties and values of its variables

مشخصات جدارهای نورگذر			نوع پنجره	
VT	SHGC	U value - w/m2k		
0.76	0.63	1.80	clearsungate-400	0
0.85	0.78	5	Single low-E (e2=0.4)	1
0.81	0.72	4.35	Single low-E (e2=0.2)	2
0.78	0.69	3.40	Double Clear(a)	3
0.77	0.72	2.80	Double Clear(b)	4
0.75	0.44	2.70	Double low-E (e2=0.0.4)	5
0.75	0.68	2	Triple pane	6
0.70	0.58	1.30	Triple Low-E (e5=0.1)	7

در تمامی پنجره ها نسبت ضریب عبور نور مرئی به ضریب بهره گرمایی خورشید(TV/SHGC) بیشتر از 1 است.

در ادامه، دامنه مقادیر هر متغیر که به صورت جداگانه بر اساس استانداردهای معتبر و مطالعات قابل قبول در این زمینه، تعیین و در جدول 5 نشان داده شده است.

جدول 5- متغیرهای رف نوری، جداره نور گذر و دامنه هر

یک از متغیرها جهت فرایند شبیه سازی

Tab.5 -variables of the light shelf, Glass's Visible transmittance, and the range of each variable for the simulation process

پارامترها	حداقل	حداکثر	توضیحات
عرض داخلی	20 سانتی -	60 سانتی متر	
عرض خارجی	30 سانتی -	90 سانتی متر	
ضریب انعکاس مصالح-آلومینیوم	ضرایب در جدول شماره 5 به تفکیک نوع شبیه سازی بیان شده است.		

پارامترها	حداقل	حداکثر
زاویه نسبت به افق - صرفاً در مورد رف خارجی	0	40 درجه
ارتفاع پنجره	1.50 متر	2.20
ارتفاع کلرستوری	30 سانتی -	60 سانتی متر
ضریب عبور نور شیشه	70	85
ضریب انتقال حرارت سطحی مرجع - (W/ m ² .k)	1.30	5 (حداقل مقدار مطابق با مبث 19)
ضریب بهره گرمایی خورشیدی	0.40	0.80 (بر اساس طبقه بندی اقلیمی شهر مورد نظر)

** 8 مدل پنجره مطابق با مشخصات ارایه شده در جدول 5 به گونه ای انتخاب شدند که متغیرهای VT,SHGC,Uvalue در محدوده بازه مد نظر قرار گیرند.

2-1- شاخص های ارزیابی نور روز و مصرف انرژی

برای نشان دادن عملکرد فضای تعریف شده، شاخص های sUDI، sDGP و EUI در ارزیابی عملکرد نور روز، میزان خیرگی آزاردهنده و میزان مصرف انرژی به صورت سالانه در نظر گرفته شدند. به طور کلی، ویژگی این شاخص ها به شرح زیر است:

شاخص sUDI، در حقیقت یک نسخه تغییر یافته از شاخص UDI است که برای ارزیابی حوزه فضایی استفاده می شود. UDI نسبتی از دوره اشغال در طول یک سال است که روشنایی افقی در یک نقطه مشخص، در بازه مشخصی (300 تا 3000 لوکس) باشد (Shafavi, Tahsildoost, & Zomorodian, 2020). مزیت اصلی

روشنایی مصنوعی برای همه سناریوها و شبیه‌سازی‌ها ثابت است و خروجی انرژی برای شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش محاسبه میزان بار سالانه‌ی سرمایه‌ش و گرمایش در هر مترمربع است (Rafati et al., 2023). شاخص‌های نام برده در جدول 6، شرح داده شده‌اند.

2-2- بخش میدانی - شرایط زمانی و مکانی تحقیق
 پروژه حاضر در شهر اصفهان با طول جغرافیایی 32.751 شمالی واقع شده است. بر اساس فایل آب‌وهوایی TMYx که از سایت climate.onebuilding استخراج شد، طبقه‌بندی اقلیمی اصفهان بر اساس اشرفی و کوپن-گیگر به ترتیب 3B (گرم‌وخشک) و BSk (خشک بیابانی سرد) است. در این پژوهش، یکی از آتلیه‌های معماری واقع در دانشکده معماری و شهرسازی خوراسگان به دلیل نزدیک بودن ابعاد فضای آتلیه به ابعاد استاندارد کارگاه‌های معماری، با مساحت 64.20 متر مربع در نظر گرفته شد. نسبت سطح شیشه‌خور به سطح نما در این آتلیه حدود 25 درصد و ارتفاع آن 3.50 متر است. هیو در مطالعه‌ای که بر روی سیستم رف نوری انجام داده بود، ارتفاع مناسب سقف برای این سیستم را، 3.40 تا 3.65 می‌داند (Motazedian & Mahdavinejad, 2015).

شاخص sUDI نسبت به شاخص UDI این است که یک عدد برای کل فضا بیان می‌شود، برعکس شاخص UDI که برای هر یک از نقاط شبکه، یک عدد بیان می‌شود. شاخص sUDI هر دو ویژگی فضایی و زمانی عملکرد نور روز را در نظر می‌گیرد (Mangkuto, Siregar, Handina, & Faridah, 2018).

DGP یکی از شاخص‌های خیرگی است که به‌طور گسترده برای ارزیابی آسایش بصری در محیط‌های روشن استفاده شده است. DGP یکی از معیارهای کلیدی مبتنی بر آب‌وهوا برای ارزیابی کیفیت نور روز است. این شاخص بر اساس درخشندگی منبع و زمینه، میزان روشنایی وارد شده بر چشم و زاویه دید ناظر به منبع نور محاسبه می‌شود که تا 0.40 قابل قبول است (Fadaii, Ardestani, Nasser Mobaaraki, Ayatollahi, & Zomorrodian, 2018). در این پژوهش sDGP برای هشت جهت مختلف در هر نقطه از شبکه به‌صورت ساعتی در طول سال محاسبه می‌شود.

شاخص EUI (KWh/m²) یک معیار مصرف انرژی کل ساختمان است که از تقسیم کل بارهای انرژی سالانه بر مساحت خالص کف ساختمان به دست می‌آید. ذکر این نکته ضروری است که در این پژوهش فعالیت ساکنان، استفاده از وسایل الکتریکی و انتشار حرارت حاصل از

جدول 6- شاخص‌های بررسی شده در پژوهش

Tab.6 - Metrics used in the research

شاخص	ضابطه ارزیابی	معیارهای ارزیابی فضا
sUDI	%Area with (UDI300-3000≥50%) این شاخص درصدی از فضا که میزان مشخصی از روشنایی طبیعی را در محدود تعیین شده در بیش از 50 درصد از زمان اشغال سالانه فضا دریافت می‌کند، نشان می‌دهد.	ارزیابی فضا از نظر مقدار نور
sDGP	%Area with (DGP≤0.40) ≥75% در حداقل 75% از مساحت فضا، در مدت زمان اشغال فضا در یک سال، نقاط تابش خیره کننده (DGP ≤0.40) دریافت نمی‌کنند. حدود قابل قبول برای شاخص DGP:	ارزیابی فضا از نظر خیرگی
	✓ خیرگی نا محسوس (>0.35)	
	✓ خیرگی محسوس (0.35-0.40)	
	✓ خیرگی آزاردهنده (0.40-0.45)	
	✓ خیرگی ناتوان کننده (<0.45)	
EUI	(KWh/m ²) مجموع مصرف انرژی سرمایه‌ش، گرمایش، روشنایی و تجهیزات به ازای هر متر مربع در سال.	ارزیابی فضا از نظر مصرف انرژی

بر حفظ آن‌ها گرفته و باعث شد عرض پنجره‌ها در فرایند بهینه‌سازی ثابت بماند. این المان‌های عمودی به عمق 45 سانتی متر به فاصله 1.20 از یکدیگر قرار دارند. در زیر پنجره‌ها هم رادیاتورها قرار دارند به همین دلیل امکان تغییر در ارتفاع دست‌انداز پنجره وجود ندارد. در شکل 3، سایت دانشکده، تصاویر و ویژگی‌های کلاس شکل 3، سایت دانشکده، تصاویر و ویژگی‌های کلاس مدنظر آورده شده است. لازم به ذکر است که زمان شروع کلاس در این کارگاه از 8:00 صبح تا 5:00 پس از ظهر است. در ادامه سایر ویژگی‌های مدل پایه، به منظور شبیه‌سازی روشنایی و انرژی بیان شده است. جهت شبیه‌سازی روشنایی مدل پایه، بر اساس وضعیت آتلیه موجود، ضریب بازتاب سطوح داخلی و درصد شفافیت شیشه مطابق با آنچه در جدول 7 آمده است، در نظر گرفته شد. به جز مشخصات جداره نورگذر، سایر ضرایب بازتاب سطوح برای دیگر فرایندها یکسان در نظر گرفته شده است.

جبهه نورگیری جانبی این آتلیه در سمت جنوب شرقی قرار دارد. در پژوهشی که توسط نصیری و محمودی به منظور دستیابی به اصول طراحی رف‌های نوری با کارایی بالا در ساختمان‌های آموزشی انجام گرفت بیان شد که موقعیت و جبهه‌های رو به جنوب در صورت کنترل نور ورودی، به عنوان اولویت اول و جبهه شمال به عنوان اولویت دوم در کلاس درس محسوب می‌شوند (nasiri & zarandi, 2020). در این جبهه، ساختمان بلندمرتبه‌ای که موجب ایجاد سایه بر روی جداره نما شود، وجود ندارد. مطابق با رویکرد پژوهش از آنجایی که این مطالعه بر روی یک آتلیه طراحی معماری موجود انجام می‌شود لازم است راهکارهای اصلاحی با حداقل هزینه و تأثیر بر طرح ارائه شود. در نمای این دانشکده یکسری المان‌های عمودی در کل سطح نما بدون عملکرد سازه‌ای، قرار دارند که تخریب آن هزینه‌بر و زمان‌بر است، بنابراین مطابق با رویکرد مطالعه، تصمیم



شکل 3- مشخصات کالبدی آتلیه مورد بررسی (نمای جنوب شرقی آتلیه، سایت دانشکده، فضای داخلی و پلان آتلیه)

Fig.3-physical specifications of the studio (southeast front of the studio, faculty site, interior space and studio plan)

جدول 7- ضریب بازتاب سطوح داخلی و درصد شفافیت شیشه در نظر گرفته شده در شبیه سازی

Tab.7-Building material optical properties considered in the simulation

مصلح	میزان انعکاس	نوع مصلح
دیوار	رنگ سفید: 70 درصد، ازاره سنگی تا ارتفاع 1 متر: 45 درصد، نمای بیرونی آجری: 10%	ریدینس مات
سقف	رنگ سفید: 60 درصد	ریدینس مات
کف	سنگ کرم رنگ: 45 درصد	ریدینس مات
نوع پنجره	مشخصات جداره نور گذر: VT=0.75, SHGC=0.85, Uvalue=5.82, WWR=25%	ریدینس شفاف

در فرآیند مدل سازی انرژی، مدل ساختمان به مصالح موجود در انرژی پلاس¹ متصل می شود و سپس به یک منطقه حرارتی که دارای چهار دیوار، سقف و کف است، متصل می شود. در مدل وضع موجود، به جز دیوار جنوب شرقی، سایر دیوارها آدیباتیک است. دیوارهای آدیباتیک کمک می کند تا بتوان تمرکز تحقیق را بر روی طراحی رف نوری و پنجره و تأثیر آنها بر مصرف انرژی ساختمان و روشنایی روز در نظر گرفت. مشخصات حرارتی مصالح ساختمانی کلاس مد نظر با توجه به منطقه بندی اشری (3B) منطبق با استاندارد اشری² (Standard)، در نظر گرفته شده که در جدول 8 نمایش داده شد.

جدول 8- ویژگی های حرارتی جداره های ساختمان

Tab.8 -Thermal properties of building material.

منطقه بندی اقلیمی اشری	شهر	جداره	U-Value (W/m ² .k)	Solar Heat Gain Coefficient
3B	اصفهان	دیوار	0.701	N/A
		سقف	0.220	N/A
		کف	0.420	N/A
		پنجره	3.07	0.23

2-3- شبیه سازی و مدل سازی نور روز و انرژی

پژوهش حاضر از یک روش طراحی پارامتریک استفاده می کند که در نرم افزارهای راینو و گرس هاپر، لیدی باگ³ و هانی بی⁴، توسعه یافته است. ترکیب این ابزارها برای

دستیابی به اهداف این مطالعه ضروری بود: راینو به عنوان یک ابزار مدل سازی، گرس هاپر به عنوان رابط پارامتریک و ابزار لیدی باگ و هانی بی، برای تحلیل نور روز و انرژی بر اساس موتور Radiance و Energy Plus. استفاده از طراحی پارامتریک در این پژوهش این امکان را فراهم می سازد که با اصلاح متغیرهایی که امکان تغییر دارند در جهت بهبود شرایط موجود اقدام شود. در فرآیند مدل سازی نور روز، مدل ساختمان به کامپوننت مصالح در برنامه ریدینس⁵ وصل می شود، به گونه ای که میزان بازتاب نور از اجسام صلب و میزان عبور نور از مصالح شفاف مشخص می شود. مشخصات مصالح جداره ها به منظور شبیه سازی روشنایی در جدول 7 آورده شده است. همچنین، تنظیمات پارامترهای ریدینس از بالاترین دقت برخوردارند، به عنوان مثال، پرش های محیط (ab)، تقسیم بندی های محیط (ad)، نمونه های فوق العاده محیط (as)، بازتاب محدود (Ir) و وزن محدود (Iw)، به ترتیب روی 6، 8، 4096، 25000 و $10^{-7} * 4$ تنظیم شده است.

2-4- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت در تحلیل عملکرد ساختمان مهم است و می توان از آن برای شناسایی متغیرهای کلیدی که بر روی هر یک از اهداف تأثیر می گذارد، استفاده کرد (Fang & Cho, 2019) که معمولاً در مراحل اولیه طراحی که در آن مقادیر گسترده ای برای هر عامل وجود دارد، انجام می شود. انجام آن قبل از فرآیند بهینه سازی این امکان را می دهد که بتوان تأثیرگذارترین، متغیرهای طراحی را انتخاب نمود به طوری که می توان مسأله بهینه سازی را ساده کرد و زمان را به میزان قابل توجهی کاهش داد (Mangkuto, Rohmah, & Asri, 2016). در حالت ایده آل، طراحان باید قبل از فرآیندهای بهینه سازی، تجزیه و تحلیل حساسیت را انجام دهند تا مقدار هر پارامتر و محدوده مناسب آن را پیدا کنند (Naji, Aye, & Noguchi, 2021). برای انجام تجزیه و تحلیل حساسیت، نیاز به داده هایی است که توزیع متوازی برای متغیرها را داشته باشند. بنابراین 3 مقدار برای هر متغیر از بازه انتخاب شده برای آن، در

رگرسیون به عنوان پرکاربردترین روش برای این تحلیل، استفاده شد. شاخص تحلیل حساسیت برای این مطالعه، ضرایب رگرسیون استاندارد (SRC) است. مقدار قدر مطلق بالای فاکتور SRC، نشان دهنده تأثیر بیشتر یک متغیر طراحی بر شاخص عملکرد است. SRC مثبت نشان دهنده تأثیر مثبت بر شاخص عملکرد و SRC منفی نشان دهنده تأثیر منفی است. با این حال، وقتی یک متغیر تأثیر مثبت/منفی دارد، به این معنا نیست که مقدار بزرگتر/کوچکتر همیشه بهتر است. این فقط یک روند کلی را برای همه گزینه‌های طراحی نشان می‌دهد (Rafati et al., 2023). جدول 10 مقادیر SRC برای 7 متغیر به تفکیک شاخص‌ها را نشان می‌دهد. این مقادیر بر اساس قدر مطلق SRC رتبه‌بندی می‌شوند.

در این رتبه‌بندی، ارتفاع پنجره، میزان شفافیت شیشه و میزان بازتاب پوشش آلومینیوم صفحه رف نوری، بیشترین تأثیر را در دریافت نور روز دارند. ارتفاع پنجره، زاویه خارجی رف و میزان شفافیت شیشه بیشترین تأثیر را در میزان خیرگی آزار دهنده دارند. در پژوهش انجام شده توسط پور احمدی و دیگران نیز، تأثیر تغییر در میزان نسبت پنجره به دیوار (WWR) و تغییر در میزان عبور بصری پنجره در رتبه بعدی، بر تغییرات DGP قابل توجه ذکر شده است (Khanmohamadi, Pourahmadi, & Mozaffar, 2019).

نظر گرفته شد که به سبب آن مقادیر، دامنه کامل فرایند بهینه‌سازی را پوشش دهد و سپس با استفاده از افزونه کولیبری (Colibri)، که به ابزارهای تحلیل انرژی و روشنایی متصل می‌شود (هانی بی و انرژی پلاس)، فرایند ترکیب متغیرها انجام شد که تعداد 2187 حالت شبیه‌سازی تولید شد. در جدول 9 مقادیر در نظر گرفته برای متغیرها، جهت آنالیز حساسیت نشان داده شده است.

جدول 9- مقادیر در نظر گرفته شده برای متغیرها جهت

آنالیز حساسیت

Tab.9 - Values considered for variables for sensitivity analysis.

پارامترها	مقادیر در نظر گرفته شده برای آنالیز حساسیت
عرض داخلی	0.20- 0.40- 0.60 (متر)
عرض خارجی	0.30- 0.60- 0.90 (متر)
ضریب انعکاس مصالح-آلومینیوم	Aluminum – Brushed Al – Rolled Al
زاویه رف خارجی نسبت به افق	0- 20 - 40 درجه
ارتفاع پنجره	1.50- 1.80- 2.20 (متر)
ارتفاع کلرستوری	0.20- 0.40- 0.60 (متر)
ضریب عبور نور شیشه	70- 77.50- 85 درصد

در این مطالعه، از نرم‌افزار SPSS برای تجزیه و تحلیل آماری جهت انجام تحلیل حساسیت و همچنین از روش

جدول 10- رتبه‌بندی متغیرها بر اساس میزان اثربخشی آنان بر میزان روشنایی فضا، کنترل خیرگی آزار دهنده و مصرف انرژی با

کمک شاخص‌ها

Tab.10- Variables ranked by influence on sUDI, sDGP and EUI.

شاخص‌ها	sUDI	sDGP	EUI
متغیر	رتبه SRC	رتبه SRC	رتبه SRC
میزان شفافیت جداره نورگذر	2	3	1
ارتفاع پنجره	1	1	2
عمق خارجی	7	4	3
ارتفاع کلرستوری	5	7	5
عمق داخلی*	6	5	7
زاویه خارجی	4	2	4
مصالح رف نوری	3	6	6

* این متغیر در مورد شاخص EUI، دارای $sig > 0.05$ می‌باشند، بنابراین همبستگی معناداری با شاخص ندارند. در سایر حالت‌ها $sig < 0.05$ است.

از سوی دیگر، میزان شفافیت شیشه، ارتفاع پنجره و عمق خارجی بیشترین تأثیر را در مصرف انرژی دارند. بنابراین بر اساس رتبه هر متغیر در میزان اثر بخشی‌اش بر اهداف، تعداد 3 تا 8 حالت جهت فرایند بهینه سازی در نظر گرفته شد که در جدول 11، نمایش داده شده است. به بعضی از متغیرها مانند عمق داخلی رف نوری با رتبه پایین، شانس مجدد جهت بررسی میزان اثرگذاری آن بر اهداف مد نظر داده شد (به این دلیل که در بعضی از مقالات از تأثیر نسبتا بالای آن بر اهداف مدنظر، اشاره دارند) و سپس فرایند بهینه سازی آغاز شد.

جدول 11- تعداد حالات هر متغیر بر اساس آنالیز حساسیت
 Tab.11-The number of states of each variable based on sensitivity analysis

تعداد حالات	پارامترها
5	عرض داخلی
5	عرض خارجی
4	ضریب انعکاس مصالح-آلومینیوم
7	زاویه نسبت به افق - صرفا در مورد رف خارجی
8	ارتفاع پنجره
4	ارتفاع کله‌ستوری
8	ضریب عبور نور شیشه
	ضریب انتقال حرارت سطحی مرجع - حداقل مقدار مطابق با مبحث 19
	ضریب بهره گرمایی خورشیدی - مطابق با استاندارد اشری در منطقه اقلیمی 3B

*با توجه به تأثیر ضریب عبور نور شیشه، 8 حالت برای پنجره انتخاب شد.

2-5- بهینه‌سازی چندهدفه

بهینه‌سازی روشی است برای یافتن مقدار حداقل یا حداکثر یک تابع با انتخاب تعدادی از متغیرها با محدودیت. بر اساس تعداد اهداف می‌تواند بهینه‌سازی تک هدف یا چند هدفه باشد. هدف بهینه‌سازی چند هدفه این است که مجموعه‌ای از نقاط را پیدا کند که با توجه به اهداف متناقض، بهترین باشند (Wortmann & Natanian, 2020).

مهمترین اصل برای انتخاب راهبرد بهینه‌سازی مطلوب، طبقه‌بندی الگوریتم‌های بهینه‌سازی و همچنین انتخاب الگوریتم مناسب برای یک مسأله مشخص است. الگوریتم ژنتیک محبوبترین الگوریتم تکاملی است (Rafati,

2021). آنها از اصول انتخاب طبیعت برای ایجاد مجموعه‌ای از راه حل‌ها به سمت یک راه حل مطلوب استفاده می‌کنند. در میان الگوریتم‌های ژنتیک در این پژوهش، از الگوریتم نخبه‌گرای مرتب‌سازی ژنتیکی غیر مغلوب NSGA-II که نتایج بهتری را در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه ارائه می‌دهد (Rafati et al., 2023)، استفاده شد. الگوریتم NSGA-II می‌تواند با استفاده از یک روش مرتب‌سازی غیر غالب و یک استراتژی حفظ نخبگان در عملیات انتخاب، یک راه حل پارتو ارائه دهد (Li, Zheng, & Wu, 2008). یک پاسخ، زمانی از نظر پارتو، بهینه یا غالب است که راه حل ممکن دیگری که بدون تضعیف کردن هدف دیگری، یک هدف را بهینه کند، وجود نداشته باشد (P. Pilechiha, 2020).

در این پژوهش، متغیرها بر اساس تعداد حالاتی که پس از آنالیز حساسیت (نتایج رتبه‌بندی متغیرهای) به آنها اختصاص داده شده توسط الگوریتم نخبه‌گرای مرتب‌سازی ژنتیکی غیر مغلوب (II-NSGA) بهینه‌سازی می‌شوند تا بهترین انتخاب‌ها برای دستیابی به کمینه مصرف انرژی (EUI) و میزان خیرگی آزار دهنده (sDGP) و همچنین بیشینه نور روز (sUDI) انتخاب شوند. پس از اتمام بهینه‌سازی، نتایج جبهه پارتو و نسل آخر بررسی و مشخصات گزینه‌های طراحی با توجه به مقادیر هدف آن‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفتند. ملاک این تحقیق در فرایند بهینه‌سازی، حداکثر تعداد نسل است. بنابراین برای این الگوریتم 50 نسل و برای هر نسل 20 جمعیت در نظر گرفته شد. تعداد نسل‌های زیاد و اندازه جمعیت کوچک، رسیدن به نتیجه قابل اعتماد را سریع‌تر تضمین می‌کنند. با این حال، هر چه اندازه جمعیت بزرگ‌تر باشد، احتمال یافتن نتایج مطلوب بیشتر می‌شود ولی از سوی دیگر زمان بهینه‌سازی افزایش می‌یابد. در این مطالعه برای احتمال متقاطع مقدار 0.90 در نظر گرفته شد. یک انتخاب خوب برای احتمال متقاطع، بین 0.30 و 0.90 است، که به این معنی است که تعداد زیادی از والدین، فرزند خواهند داشت (Naji et al., 2021). از سوی دیگر، احتمال جهش معمولا کم تنظیم می‌شود، زیرا مقدار نسبتا بالایی از احتمال جهش منجر به



فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه در این پژوهش منجر به ارائه انواع راه‌حل‌های مطلوب شده است. در جدول 13، مجموعه‌ای از گزینه‌های طراحی بهینه که مناسب‌ترین مقادیر از شاخص‌های sUDI، sDGP و EUI است، جهت درک بهتر رابطه بین متغیرهای طراحی و اهداف، ارائه شد. از آنجایی که عملکرد اصلی رف نوری در درجه نخست افزایش مقدار نور روز در دسترس است و از طرفی با توجه به کاربری فضای مد نظر، لازم است که تأثیرگذارترین معیار در انتخاب راه‌حل‌ها در اولویت اول، دریافت نور روز مطلوب با حداقل خیرگی آزردهنده و اولویت دوم میزان مصرف انرژی باشد. لازم به ذکر است، تفاوت بین کمیت شاخص‌ها در پاسخ‌های جبهه پارتو، به‌اندازه کافی زیاد نبود که بر انتخاب بهترین نتایج تأثیر بگذارد.

در شکل 3، تصاویر مرتبط با شبیه‌سازی برخی از پاسخ‌های جبهه پارتو، نسل آخر و مدل پایه به همراه شاخص‌های مرتبط به آنها، نشان داده شده است.

جستجوی تصادفی اولیه می‌شود. احتمال جهش با $nv/1$ محاسبه می‌شود، nv مخفف تعداد متغیرهاست. از آنجایی که در این مسأله 7 متغیر وجود دارد، 0.143 به عنوان احتمال جهش برای الگوریتم انتخاب می‌شود. جدول 12 تمام تنظیمات الگوریتم را خلاصه می‌کند.

جدول 12- تنظیمات الگوریتم NSGA-II

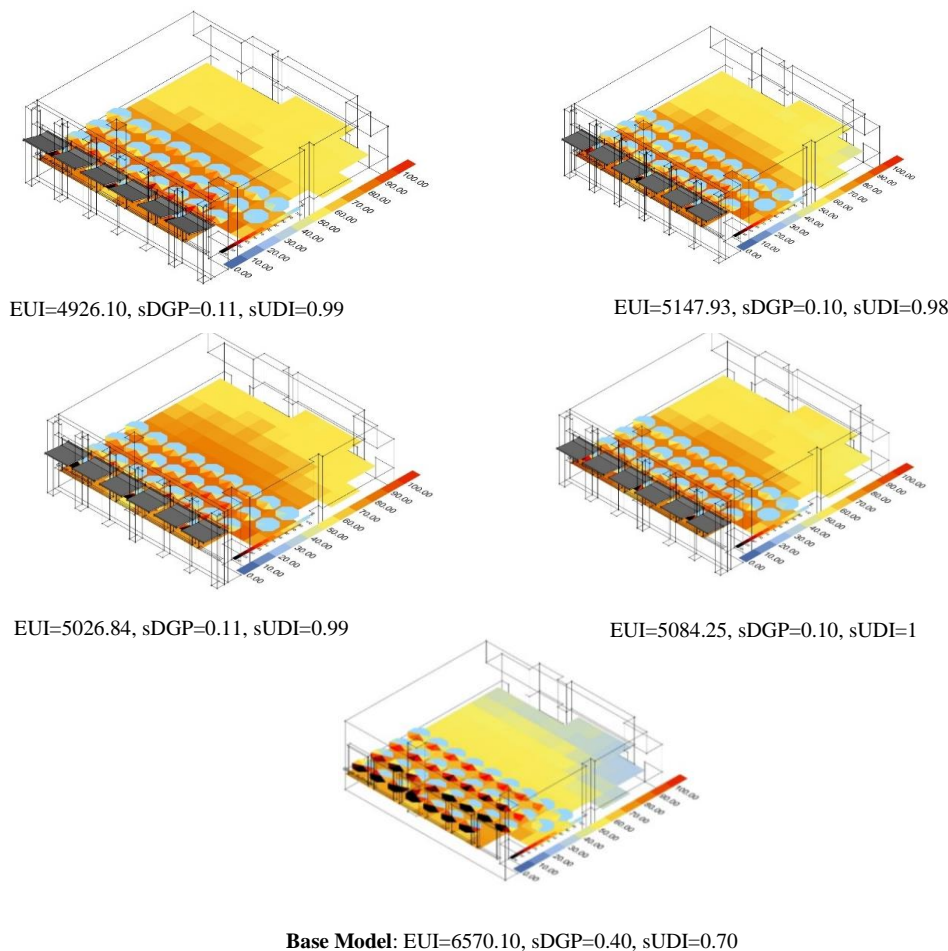
Tab.12 - NSGA-II settings	
NSGA-II	تنظیمات
20	شمارش جمعیت ¹
50	تعداد نسل‌ها ²
0.90	احتمال متقاطع ³
0.147	احتمال جهش ⁴
Tournament	عملکرد انتخاب ⁵
3	تعداد اهداف ⁶
7	تعداد ژن‌ها ⁷
44	تعداد ارزش‌ها ⁸
2.6e5	اندازه فضای جستجو ⁹

جدول 13- متوازن‌ترین جواب‌ها در دریافت نور روز، کنترل خیرگی و مصرف انرژی - پاسخ‌های جبهه پارتو و تعدادی از نسل آخر

Tab.13- The most balanced answers in receiving daylight, glare control and energy consumption - Pareto front answers and some of the last generation

جبهه پارتو/ نسل آخر	نوع پنجره	ارتفاع شیشه	عمق خارجی	ارتفاع کلرستوری	عمق داخلی	زاویه خارجی	مصالح رف	sUDI	sDGP	EUI
{15;14}	6	1.5	0.9	0.3	0.3	5	AL	0.9844	0.1075	5147.9324
{18;17}	7	1.5	0.9	0.4	0.4	5	AL	0.9609	0.0952	4935.1420
{20;16}	7	1.5	0.9	0.4	0.4	0	AL	0.9297	0.0777	4942.8619
{23;15}	7	1.5	0.9	0.4	0.4	10	AL	0.9844	0.1084	4932.2000
{27;15}	7	1.5	0.9	0.4	0.4	10	Brushed AL	0.9375	0.1070	4932.1758
{28;2}	7	1.5	0.9	0.4	0.4	0	Brushed AL	0.7813	0.0724	4942.8616
{30;1}	7	1.5	0.9	0.4	0.4	15	Brushed AL	0.9922	0.1160	4926.0966
{30;13}	7	1.5	0.9	0.4	0.4	5	Brushed AL	0.8828	0.0933	4935.1472
{32;4}	6	1.5	0.9	0.4	0.4	5	AL	1.0000	0.1094	5084.2579
{34;15}	7	1.5	0.9	0.4	0.4	15	AL	0.9922	0.1203	4925.4326
نسل آخر	7	1.6	0.9	0.4	0.4	0	AL	0.9688	0.0994	5031.0980
نسل آخر	7	1.6	0.9	0.4	0.4	5	AL	0.9922	0.1108	5026.8424
مدل پایه	**	1.5	-	-	-	-	-	0.728	0.366	6570.078

WIN COD 6: VT:0.75, SHGC: 0.68, U_{VALUE}:2. WIN COD 7: VT:0.70, SHGC: 0.58, U_{VALUE}:1.30



شکل 3- شبیه‌سازی برخی از پاسخ‌ها ایده‌آل در حضور رف نوری و شبیه‌سازی مدل پایه

Fig.3 - Simulation of some appropriate responses in the presence of a light shelf and simulation of the base model

3- نتایج و بحث

(sDGP) و همچنین کمترین میزان مصرف انرژی را داشته باشند (براساس شاخص EUI)، انتخاب شوند. همانند نتایج سایر پژوهش‌ها (Mohammad Hossein A. A. S.)، (Moazzeni & Zahra Ghiabaklou, 2016 Mangkuto, Feradi, et al.,)، (Bahdad et al., 2021 Ziaee & Vakilinezhad, 2022) ، با هدف بررسی میزان تأثیر حضور رف نوری بر بهبود آسایش بصری و کارایی انرژی، در این پژوهش نیز حضور رف نوری در جبهه مد نظر تأثیر قابل توجهی در بهبود اهداف مشابه داشته است. با در نظر گرفتن رف نوری بر روی مدل پایه، افزایش 25 درصدی در کارایی انرژی و 40 درصدی در مقدار روشنایی مفید نور روز و همچنین کاهش 80 درصدی خیرگی آزار دهنده در فضا، حاصل می‌شود. لازم به ذکر است این نتایج بر اساس مقایسه

در میان سیستم‌های روشنایی روز، رف نوری به دلیل سازگاری فیزیکی در مقایسه با سایر سیستم‌های نور روز، توانایی بیشتری برای تأمین نیازهای آسایش بصری همراه با افزایش بهره‌وری انرژی دارد (Tabadkani et al., 2021)، (al., 2021 Tabadkani, Roetzel, Li, &)، (Tsangrassoulis, 2020). بنابراین با توجه به مزایای این سیستم، در مطالعه حاضر پس از مرور مطالعات مرتبط با موضوع و مشخص نمودن متغیرهای پژوهش، نسبت به طراحی بهینه رف نوری در ترکیب با پنجره، از منظر آسایش بصری و کارایی انرژی اقدام شد تا بهترین گزینه‌ها جهت دریافت بیشینه مقدار نور روز بر اساس شاخص sUDI به گونه‌ای که کمترین میزان خیرگی آزار دهنده را در داخل محیط ایجاد کنند (بر اساس شاخص

نمی‌شود، بلکه خیرگی را به میزان حدود 75 درصد بهبود می‌بخشد. افزودن رف نوری سبب شد، مقدار شاخص sUDI در نواحی دور از پنجره بهبود یابد و میزان خیرگی آزاردهنده در نقاط نزدیک پنجره کاهش چشم‌گیری داشته باشند و در نتیجه بهبود شرایط آسایش بصری در فضا حاصل می‌شود. به طور کلی استفاده از رف نوری منجر به افزایش میزان روشنایی طبیعی یکنواخت در فضای داخلی می‌شود و همچنین به کاهش مجموع بار سرمایش و گرمایش فضا کمک می‌کند.

بر اساس ارزیابی گونه‌های مختلف رف نوری در جبهه پارتو و نسل آخر، نتایج در موارد زیر خلاصه می‌شود:

بیشترین تکرار نوع پنجره برای دستیابی به حداکثر نور روز، کمترین میزان خیرگی آزاردهنده و مصرف انرژی، به پنجره‌های Triple pane و Triple Low-E ($e5=0.1$)، که به ترتیب دارای مشخصات ($VT=0.75$)، ($SHGC=0.68$, $Uvalue=2$) و ($SHGC=0.58$, $Uvalue=1.30$) است، تعلق دارد. بر اساس گزینه‌های طراحی جبهه پارتو و مقایسه پاسخ‌هایی که در آن‌ها صرفاً نوع پنجره متفاوت است می‌توان به این نتیجه دست‌یافت، که شرایط پنجره Triple pane از لحاظ میزان ورود نور روز به داخل فضا بهتر ولی از لحاظ میزان خیرگی آزاردهنده و مصرف انرژی نسبت به پنجره Triple Low-E، شرایط نامناسب‌تری دارد. لازم به ذکر است این تفاوت‌ها در مقدار شاخص‌ها، میزان قابل توجهی نیست.

در این پژوهش از پوشش آلومینیوم با ضرایب انعکاسی متفاوت برای رف استفاده شد. بر اساس گزینه‌های طراحی جبهه پارتو، سطوح آلومینیومی با ضرایب انعکاسی 0.885 و 0.700، بیشترین تکرار را داراست و از سویی با مقایسه پاسخ‌هایی که متغیرهای دیگر در آن‌ها یکسان است، می‌توان مشاهده نمود که پوشش آلومینیومی با ضریب انعکاسی 0.883 نسبت به آلومینیوم برآش Brushed AL با ضریب انعکاسی 0.752 سبب می‌شود، نور روزی بیشتری به داخل فضا منتقل شود در حالی که میزان مصرف انرژی و میزان خیرگی در آن‌ها تغییر محسوسی نمی‌کند.

بهترین پاسخ‌های جبهه پارتو برای هر شاخص با نتایج شبیه‌سازی مدل پایه است. این میزان بهبودی در مقدار روشنایی مفید نور روز با نتایج پژوهش‌های (A. A. S. Bahdad et al., 2021)، (Berardi & Anaraki, 2015) و (Berardi & Anaraki, 2016) هماهنگ است، ولی با نتیجه پژوهش (Sabbagh et al., 2022)، که نشان می‌دهد استفاده از رف نوری به میزان 17% برکیفیت و توزیع نور روز در کلاس‌ها تأثیر می‌گذارد و بیشترین تأثیر را در کاهش کنتراست بین منطقه نزدیک به پنجره و فضای داخلی کلاس دارد، متفاوت است.

4- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات قبلی، تحقیقات متعددی در مورد گونه‌شناسی و طراحی رف نوری انجام شده است. با این حال، مطالعات اندکی به مروری جامع بر روی متغیرهای رف نوری در ترکیب با پنجره بر بهبود عملکرد ساختمان، پرداخته‌اند. با توجه به رویکرد در نظر گرفته شده در این پژوهش، حداقل تخریب و دستکاری در طرح موجود، این امکان فراهم شد که بر اساس نتایج بهترین گزینه‌های طراحی سازگار با اقلیم، نسبت به تغییر و اصلاح در طرح موجود اقدام شود. از آن جایی که بالا رفتن شاخص روشنایی در این پژوهش، باعث افت کارایی (افزایش میزان خیرگی آزار دهنده و مصرف انرژی) قابل توجه در دیگر شاخص‌ها نمی‌شود، لذا با توجه به کارایی آموزشی فضای مورد نظر و استفاده به عنوان فضای آتلیه، بهترین پاسخ را می‌توان بر حسب شرایط فضا و با در نظر گرفتن هزینه و سهولت اجرای آن از میان گزینه‌های طراحی انتخاب نمود.

با مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل پایه و برخی از بهترین متغیرهای رف نوری که حاصل جبهه پارتو و نسل آخر هستند می‌توان مشاهده نمود که استفاده از رف نوری در ترکیب با پنجره در این اقلیم و جبهه مورد بررسی، منجر به بهبود روشنایی مفید نور روز فضایی به میزان 36.10، 37.50، 38.90 درصد و کاهش مصرف انرژی به میزان 21.60، 25.00، 22.60، 23.50 درصد می‌شود. این در حالی است که این میزان ورود نور، نه تنها باعث افزایش میزان خیرگی آزاردهنده در فضای داخلی

- ⁸ Honeybee
⁹ Radiance
¹⁰ Population count
¹¹ Generation size
¹² Crossover probability
¹³ Mutation probability
¹⁴ Selection function
¹⁵ No. of Fitness Objectives
¹⁶ No. of Genes
¹⁷ No. of Values
¹⁸ Size of Search Space

علائم اختصاری

abbreviations			
SHGC	Solar Heat Gain coefficient	EUI	Energy Use Intensity
sDGP	Spatial Daylight Glare Probability	SR	Solar Reflectance
sUDI	Spatial Daylight Illuminance	VR	Visible Reflectance
WWR	Window-to-Wall Ratio	AS	Ambient super-Samples
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II	AD	Ambient Divisions
GA	Genetic Algorithm	AB	Ambient Bounces
IES	International Energy Standard	LW	Limit Weight

مراجع

Acosta, I., Campano, M. Á., Leslie, R., & Radetsky, L. (2019). Daylighting design for healthy environments: Analysis of educational spaces for optimal circadian stimulus. *Solar Energy*, 193, 584-596. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.004>

Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2015). Design of the Building Envelope: A Novel Multi-Objective Approach for the Optimization of Energy Performance and Thermal Comfort. *Sustainability*, 7(8), 10809-10836. <https://doi.org/10.3390/su70810809>

Bahdad, A., Syed Fadzil, S., & Taib, N. (2020). Optimization of Daylight Performance Based on Controllable Light-shelf Parameters using Genetic Algorithms in the Tropical Climate of Malaysia. *Journal of Daylighting*, 7, 122-136. <https://dx.doi.org/10.15627/jd.2020.10>

Bahdad, A. A. S., Fadzil, S. F. S., Onubi, H. O., & BenLasod, S. A. (2021). Sensitivity analysis linked to multi-objective optimization for adjustments of light-shelves design parameters in

زاویه رف نوری خارجی یکی دیگر از متغیرها حیاتی در طراحی رف نوری است. انتخاب زاویه مناسب برای رف نوری با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی، بر مصرف انرژی و بهینه‌سازی نور روز تأثیر می‌گذارد. در این مطالعه، محدوده رف نوری از 0 تا 40 درجه تعریف شده است. بر اساس پاسخ‌های جبهه پارتو، با مقایسه پاسخ‌هایی که جز در زاویه در سایر متغیرها با یکدیگر مشابهند، نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که زاویه 5 درجه نسبت به زاویه افق نتیجه بهتری بر میزان نور دریافتی دارد. افزایش زاویه رف نوری تا میزان 15 درجه، سبب می‌شود میزان نور ورودی به داخل فضا افزایش یافته و از سویی باعث تغییرات محسوس در دو شاخص دیگر نمی‌شود.

ارتفاع پنجره بیشترین تأثیر را در بین سایر متغیرها، بر کیفیت نور روز دریافتی و شدت خیرگی آزردهنده، دارد. نتایج نشان می‌دهد که ارتفاع پنجره به میزان، 1.50 و 1.60 متر برای این جبهه از فضا، مناسب است. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد ارتفاع 1.60 متر، نور روز دریافتی فضا را افزایش می‌دهد ولی از سویی، سبب افزایش شدت خیرگی و مصرف انرژی می‌شود که البته این میزان افزایش قابل توجه نیست. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت، عمق رف بیرونی تأثیر بیشتری بر اهداف مد نظر نسبت به عمق رف داخلی دارد. عمق بیرونی 0.90 متر، تنها عمق مناسب در بین پاسخ‌های جبهه پارتو محسوب می‌شود. در مورد عمق داخلی رف نوری، بیشترین تکرار به عمق 0.40 متر تعلق دارد. در مورد ارتفاع پنجره بالایی (ارتفاع کلرستوری)، بیشترین تکرار به ارتفاع 0.40 متر تعلق دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند راهنمای اجرایی برای مهندسان ساختمان و بهره‌برداران برای ارتقای عملکرد فضاهایی آموزشی موجود، از منظر دریافت نور روز مطلوب و بهره‌وری انرژی بر اساس شرایط اقلیمی هر منطقه، باشد.

پی‌نوشت

- ¹ Radiance color picker
² Brushed Aluminum
³ Rolled Aluminum
⁴ Oxidized Aluminum
⁵ Energy Plus
⁶ ASHRAE 90.1 2019
⁷ ladybug



daylighting and energy performance. *Solar Energy*, 191, 7-18. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.039>

Heschong, L. (2003). *Windows and Classrooms: A Study of Student Performance and the Indoor Environment*: California Energy Commission, 2003. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26759.449> 64

Joarder, P., Ahmed, Z., Price, A., & Mourshed, M. (2009). A simulation assessment of the height of light shelves to enhance daylighting quality in tropical office buildings under overcast sky conditions in Dhaka, Bangladesh. https://www.researchgate.net/publication/48354594_A_simulation_assessment_of_the_height_of_light_shelves_to_enhance_daylighting_quality_in_tropical_office_buildings_under_overcast_sky_conditions_in_Dhaka_Banlgadesh.

Khanmohamadi, M., Pourahmadi, M., & Mozaffar, F. (2019). Windows optimization based on the glare performance in educational building of Iran hot and dry climate. *Journal of Sustainable Architecture and Urban Design*, 7(1), 113-128. [https://jsaud.sru.ac.ir/article_1158.html?lang=en\[in Persian\]](https://jsaud.sru.ac.ir/article_1158.html?lang=en[in Persian]).

Keshtkar Ghalati, A., & Ahmadian, M. (2024). Effects of Window and Light Shelf Configurations on Energy Consumption and Daylight Illuminance in Classrooms. *Renewable Energy Research and Applications*, 5(1), 107-119. <https://doi.org/10.22044/rera.2023.12563.1194>.

Kontadakis, A., Tsangrassoulis, A., Doulos, L., & Zerefos, S. (2018). A Review of Light Shelf Designs for Daylit Environments. *Sustainability*, 10(1), 71. <https://doi.org/10.3390/su10010071>.

Lee, H. (2019). Performance evaluation of a light shelf with a solar module based on the solar module attachment area. *Building and Environment*, 159, 106161. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106161>.

Li, M., Zheng, J., & Wu, J. (2008). *Improving NSGA-II Algorithm Based on Minimum Spanning Tree* (Vol. 5361). https://doi.org/10.1007/978-3-540-89694-4_18.

Mahdavejad, M., Tahbaz, M., & Dolatabadi, M. (2016). Optimization of Properties and Light Shelf System in Architecture of Learning Building. *Journal of Fine Arts: Architecture & Urban Planning*, 21(2), 81-92.

response to visual comfort and thermal energy performance. *Journal of Building Engineering*, 44, 102996. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102996>.

Bakmohammadi, P., & Noorzai, E. (2020). Optimization of the design of the primary school classrooms in terms of energy and daylight performance considering occupants' thermal and visual comfort. *Energy Reports*, 6, 1590-1607. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2020.06.008>

Bellia, L., Musto, M., & Spada, G. (2011). Illuminance measurements through HDR imaging photometry in scholastic environment. *Energy and Buildings*, 43(10), 2843-2849. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.006>

Berardi, U., & Anaraki, H. K. (2015). Analysis of the Impacts of Light Shelves on the Useful Daylight Illuminance in Office Buildings in Toronto. *Energy Procedia*, 78, 1793-1798. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.310>

Berardi, U., & Anaraki, H. K. (2016). The benefits of light shelves over the daylight illuminance in office buildings in Toronto. *Indoor and Built Environment*, 27(2), 244-262. <https://doi.org/10.1177/1420326X16673413>

Ebrahimi-Moghadam, A., Ildarabadi, P., Aliakbari, K., Arabkoohsar, A., & Fadaee, F. (2020). Performance analysis of light shelves in providing visual and thermal comfort and energy savings in residential buildings. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02565-2>

Ebrahimi-Moghadam, A., Ildarabadi, P., Aliakbari, K., & Fadaee, F. (2020). Sensitivity analysis and multi-objective optimization of energy consumption and thermal comfort by using interior light shelves in residential buildings. *Renewable Energy*, 159, 736-755. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.127>.

Fadaii Ardestani, M. A., Nasser Mobaaraki, H., Ayatollahi, M. R., & Zomorrodian, Z. S. (2018). The Assessment of Daylight and Glare in Classrooms Using Dynamic Indicators; the Case of SBU Faculty of Architecture and Urban Planning. *Soffeh*, 28(4), 25-40. [https://soffeh.sbu.ac.ir/article_100759.html?lang=en\[in Persian\]](https://soffeh.sbu.ac.ir/article_100759.html?lang=en[in Persian]).

Fang, Y., & Cho, S. (2019). Design optimization of building geometry and fenestration for



Architecture and Urban Design, 11(1), 45-58. https://jsaud.sru.ac.ir/article_1799.html?lang=en. [in Persian].

Naji, S., Aye, L., & Noguchi, M. (2021). Multi-objective optimisations of envelope components for a prefabricated house in six climate zones. *Applied Energy*, 282, 116012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116012>

Nasiri, b. s., & zarandi, M. m. (2020). Achieving the Principles of High Performance of Light Shelves Design in Educational Buildings. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2(22), 359-369. <https://sanad.iau.ir/en/Article/837011>. [in Persian].

Pilechiha, P. (2020). Optimization Methods and Algorithms in Architectural and Urban Design, Basic Mathematical Solutions. *Naqshejahan-Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning*, 10(3), 205-217. <https://bsnt.modares.ac.ir/article-2-42128-en.html>. [in Persian].

Pilechiha, P., Mahdaveinejad, 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*, 261, 114356. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114356>

Province, M. D. o. I. (2016). Retrieved from <https://esfahanmet.ir/Researchese>.

R.C. Picker, J. (2017). Radiance Color Picker Retrieved from http://www.jaloxa.eu/resources/radiance/colour_pic

Rafati, N., Hazbei, M., & Eicker, U. (2023). Louver configuration comparison in three Canadian cities utilizing NSGA-II. *Building and Environment*, 229, 109939. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109939>

Rafati, N., Sanaieian, H., & Faizi, M. (2021). Comparison of different louver configurations for daylight and energy optimization in Bandar Abbas and Tabriz. *Journal of Fine Arts: Architecture & Urban Planning*, 26(3), 71-84. https://jfaup.ut.ac.ir/article_86391.html. [in Persian].

https://jfaup.ut.ac.ir/article_60164.html?lang=en. [in Persian].

Mangkuto, R. A., Feradi, F., Putra, R. E., Atmodipoero, R. T., & Favero, F. (2018). Optimisation of daylight admission based on modifications of light shelf design parameters. *Journal of Building Engineering*, 18, 195-209. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.03.007>

Mangkuto, R. A., Rohmah, M., & Asri, A. D. (2016). Design optimisation for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand: A case study of buildings in the tropics. *Applied Energy*, 164, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.046>

Mangkuto, R. A., Siregar, M. A. A., Handina, A., & Faridah. (2018). Determination of appropriate metrics for indicating indoor daylight availability and lighting energy demand using genetic algorithm. *Solar Energy*, 170, 1074-1086. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.025>

Moazzeni, M. H., & Ghiabaklou, Z. (2016). Investigating the Influence of Light Shelf Geometry Parameters on Daylight Performance and Visual Comfort, a Case Study of Educational Space in Tehran, Iran. *Buildings*, 6(3), 26. <https://doi.org/10.3390/buildings6030026>.

Moazzeni, M. H., & Ghiabaklou, Z. (2016). Investigating the Influence of Light Shelf Geometry Parameters on Daylight Performance and Visual Comfort, a Case Study of Educational Space in Tehran, Iran. *Buildings*, 6(3). <https://doi.org/10.3390/buildings6030026>

Mohammadjavad, M., Mansooreh, T., & Mahnaz, D. (2016). Optimization of Properties and Light Shelf System in Architecture of Learning Building. *HONar - ha - ye - ziba Memari - va - shahrsazi*, 21(2), 81-92. https://jfaup.ut.ac.ir/article_60164.html?lang=en. [in Persian].

Motazedian, F., & Mahdaveinejad, M. (2015). Light Shelves' Typology and their Characteristics. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 8, 91-103. https://www.armanshahrjournal.com/article_39343.html?lang=en. [in Persian].

Najafi, G. s., Gorji Mahlabani, Y., & Pilechiha, P. (2023). Sensitivity analysis and optimization of building geometry with energy-daylight efficiency approach. *journal of Sustainable*



Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., & Tsangrassoulis, A. (2021). Daylight in Buildings and Visual Comfort Evaluation: the Advantages and Limitations. *Journal of Daylighting*, 8, 181-203. <https://doi.org/10.15627/jd.2021.16>.

Wortmann, T., & Natanian, J. (2020). *Multi-Objective Optimization for Zero-Energy Urban Design in China: A Benchmark*. https://www.researchgate.net/publication/341592609_Multi-Objective_Optimization_for_Zero-Energy_Urban_Design_in_China_A_Benchmark

Wright, J., Brownlee, A., Mourshed, M., & Wang, M. (2013). Multi-objective optimization of cellular fenestration by an evolutionary algorithm. *Journal of Building Performance Simulation*, 7, 33-51. <https://doi.org/10.1080/19401493.2012.762808>.

Zazzini, P., Romano, A., Lorenzo, A., Portaluri, V., & Crescenzo, A. (2020). Experimental Analysis of the Performance of Light Shelves in Different Geometrical Configurations Through the Scale Model Approach. *Journal of Daylighting*, 7, 37-56. <https://doi.org/10.15627/jd.2020.4>

Ziaee, N., & Vakilinezhad, R. (2022). Multi-objective optimization of daylight performance and thermal comfort in classrooms with light-shelves: Case studies in Tehran and Sari, Iran. *Energy and Buildings*, 254, 111590. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111590>

Sabbagh, M., Mandourah, S., & Hareri, R. (2022). Light Shelves Optimization for Daylight Improvement in Typical Public Classrooms in Saudi Arabia. *Sustainability*, 14(20), 13297. <https://doi.org/10.3390/su142013297>

Salahsoor, Z., & Zarandi, M. M. (2023). The Effect of the Performance of the Optical Shelf (External) in Creating a Comfortable Environment in Architectural Studios in Latitude 35. *Journal of Space and Place Studies*, 1(3), 91-102. [https://sanad.iau.ir/en/Article/1079648?FullText.\[in Persian\]](https://sanad.iau.ir/en/Article/1079648?FullText.[in Persian]).

Shafavi, N. S., Tahsildoost, M., & Zomorodian, Z. S. (2020). Investigation of illuminance-based metrics in predicting occupants' visual comfort (case study: Architecture design studios). *Solar Energy*, 197, 111-125. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.051>.

ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2022: "Energy Standard for Buildings except Low-Rise Residential Buildings, SI Edition". *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*. Atlanta, GA. <https://nclose.us.com/wp-content/uploads/2024/02/ASHRAE-90.1-2022-.pdf>

Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., & Tsangrassoulis, A. (2020). A review of automatic control strategies based on simulations for adaptive facades. *Building and Environment*, 175, 106801. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106801>.

