

سازگاری حرارتی به‌عنوان شاخص نهایی سنجش کیفیت سایه‌اندازی سایبان‌های خارجی نمونه مورد مطالعه: ساختمان مسکونی در شیراز

نیلوفر هاشمی^۱، شاهین حیدری^{۲*}، مرتضی رهبر^۳

^۱ دانشجوی دکتری معماری، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران.

^۲ استاد گروه معماری، دانشکده معماری دانشکده‌گان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

^۳ استادیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۲، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱)

چکیده

سایبان‌های خارجی یکی از اجزای بسیار مهم و کاربردی در طراحی معماری پایدار به‌ویژه در اقلیم‌های گرم هستند که تأثیر زیادی بر کنترل مصرف منابع انرژی برای کاربردهایی چون بار حرارتی، نور روز و آسایش حرارتی دارند که به نظر می‌رسد کم‌تر تحقیقی در مورد تأثیر کیفیت سایه‌اندازی بر این عملکردها به‌ویژه بر سازگاری حرارتی انجام شده باشد. برای این منظور، این مقاله با کمک برداشت‌های میدانی از یک ساختمان مسکونی در شیراز و شبیه‌سازی و اعتبارسنجی آن و سپس تولید یک سایبان پارامتریک خلاقانه با قابلیت تولید سایه‌اندازی‌های متنوع و در نهایت با استفاده از تکنیک نمونه‌برداری LHS و همچنین استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم NSGA III توانسته است نمونه‌های سایبانی بهینه‌ای را تولید کند که در نهایت بر مبنای میزان سازگاری حرارتی طبقه‌بندی شده‌اند. این طبقه‌بندی نشان می‌دهد که در سایبان‌های بهینه با وجود اینکه شاخص‌های نور روز در محدوده استاندارد هستند و می‌توانند ۵۳٪ تا ۷۳٪ در بار سرمایشی و ۸٪ تا ۱۰٪ نیز در بار گرمایشی صرفه‌جویی ایجاد کنند اما مدت‌زمان تأمین آسایش حرارتی توسط آنها بین ۴ تا ۸ ماه متغیر است که این خود نشان‌دهنده اهمیت تأثیر کیفیت سایبان‌ها بر آسایش حرارتی است.

واژه‌های کلیدی

سیستم سایبان پارامتریک، تکنیک نمونه‌برداری LHS، شبکه عصبی مصنوعی، بهینه‌سازی چندهدفه، سازگاری

حرارتی

* مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری نگارنده اول با عنوان «بررسی کیفیت سایه‌اندازی سایبان‌های خارجی با رویکرد سازگاری حرارتی در فضاهای مسکونی و تأثیر آن بر عملکردهای ساختمان در اقلیم گرم و خشک شیراز» می‌باشد که با راهنمایی نگارندگان دوم و سوم ارائه شده است.

** نویسنده مسئول: تلفن: ۰۲۱-۶۱۱۲۴۹۶، شماره: ۰۲۱-۶۶۴۹۰۱۶۱، E-mail: shheidari@ut.ac.ir

مقدمه

گرم و یا بسیار سردی در داخل ساختمان ایجاد شود، فضا یا بسیار روشن و دارای مشکلات خیرگی شود و یا تاریک و ناکارآمد شود، و در نهایت مصرف انرژی افزایش یابد. سایه‌اندازی بر روی ساختمان، از آنجا که باعث حذف تابش مستقیم و کاهش دمای تشعشعی در داخل فضا می‌شود می‌تواند به‌طور مستقیم آسایش حرارتی را تحت تأثیر قرار دهد. از سوی دیگر در اکثر تحقیقات، ابعاد سایبان به مساحت پنجره محدود می‌شود و با اینکه سایه‌اندازی بر روی بخش صلب پوسته‌ها بسیار حائز اهمیت است و باعث کاهش دمای سطح پوسته و در نتیجه کاهش انتقال حرارت از پوسته می‌شود، اما این موضوع از سوی محققین و طراحان نادیده گرفته می‌شود. از این‌رو هدف این مقاله مطالعه تأثیر سایه‌اندازی کل نمای ساختمان بر عملکردهای ساختمانی شامل بار حرارتی، نور روز و آسایش حرارتی به‌صورت هم‌زمان است که به دنبال آن کیفیت سایه‌اندازی نیز مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

تمام مدل‌ها پیدا کند و به این ترتیب صرفه‌جویی انرژی به میزان ۸۰٪ را گزارش نموده است. از آنجا که کوچک‌ترین تغییر در هر کدام از متغیرهای سایبان می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر روی نور روز ایجاد کند، بنابراین تحقیقات بسیار زیادی در مورد تأثیر سایبان‌های خارجی بر روی شاخص‌های روشنایی مانند UDI, sDA, ASE, DGI انجام شده است (Eltaweel et al., 2017; Wagdy et al., 2016; Mangkuto et al., 2021; Tabadkani et al., 2019; Samadi et al., 2020; Yi, 2019; Mangkuto et al., 2018; da Fonseca et al., 2013; Arb-ab et al., 2021; Lim et al., 2012). در این تحقیقات از روش‌های متعددی بهره گرفته شده است. یکی از محبوب‌ترین روش‌ها استفاده از بهینه‌سازی‌های تک‌هدفه و یا چندهدفه است که با انواع الگوریتم‌های تکاملی قابل انجام است. برای مثال (Yi, 2019) یک سری تیغه‌های افقی را با کمک یک الگوریتم پارامتریک بر اساس عمق و زاویه و فاصله آنها به تیغه‌های موج تبدیل نموده و سپس با استفاده از الگوریتم تکاملی چندهدفه برای دستیابی به بهترین sDA و ASE و بر اساس معیارهای زیبایی‌شناسی، میزان بازشوهای میان تیغه‌های موج را بهینه نموده است (Arbab et al., 2021). نیز با به‌کارگیری هوش مصنوعی و مقایسه اعتبار و دقت چندین روش کاربردی ماشین لرنینگ و شبکه عصبی مصنوعی توانسته است تأثیر متغیرهای سایبان‌های لوور (مانند: تعداد، عمق، زاویه، فاصله بین تیغه‌ها و انعکاس نور از تیغه‌ها) را بر روی شدت روشنایی فضای داخلی بررسی نموده و گزارش داده است که نتایج مربوط به شبکه عصبی نسبت به سایر الگوریتم‌های ماشین لرنینگ دقیق‌تر و معتبرتر هستند. از آنجا که متغیرهای سایبانی هم‌زمان هم بر بار حرارتی و هم بر کیفیت نور روز تأثیر می‌گذارند بنابراین بررسی هم‌زمان این دو هدف، موضوع تحقیقات بسیار زیادی قرار گرفته است (Kirimtat et al., 2016; Manzan et al., 2017; Taveres-Cachat et al., 2019; Kirimtat et al., 2019; Toutou et al., 2018; Fang et al., 2019; Mandalaki et al., 2012). در این تحقیقات تلاش شده تا بهینه‌ترین مقادیر متغیرهای سایبانی را بر اساس حداقل مصرف انرژی و استانداردهای نور روز پیدا کنند. برای مثال (Kirimtat et al., 2019) با کمک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II، یک سایبان خارجی

صنعت ساختمان‌سازی با توجه به بحران‌های زیست‌محیطی در دهه‌های اخیر به یکی از نگرانی‌های اصلی بشر منجر شده است (Hos-ain et al., 2018; Pal et al., 2017) و به همین دلیل آیین‌نامه‌ها و برنامه‌ریزی‌های زیادی برای مدیریت این صنعت در راستای پایداری و هماهنگی با محیط زیست تدوین شده است (Marszal et al., 2011) که از این میان می‌توان به آیین‌نامه‌ها و ضوابط مربوط به ساختمان‌های صفر انرژی اشاره نمود (Pulido-Arcas et al., 2020). سایبان‌های خارجی یکی از عناصر معماری پایدار هستند که می‌توانند با کنترل مناسب نفوذ تابش، عملکردهای ساختمانی به‌ویژه بار حرارتی، نور روز و آسایش حرارتی را بهبود و ارتقاء بخشند (Hall, 2010). طراحی یک سایبان بهینه و کارآمد بسیار حساس است زیرا تغییر اندکی در ابعاد آن می‌تواند تابش مستقیم بسیار زیادی وارد فضا کند و یا مانع از دریافت کافی تابش شود که در هر حال موجب می‌شود تا شرایط حرارتی بسیار

پیشینه پژوهش

این مقاله تأثیر سایبان‌های ثابت خارجی را بر عملکردهای ساختمانی مورد مطالعه قرار داده است. این مرور کوتاه بر تحقیقات گذشته، بر سه موضوع اصلی تمرکز دارد. نخست اینکه در هر تحقیق چه متغیرهای مستقلی مربوط به سایبان در نظر گرفته شده است. ثانیاً تأثیر این متغیرها بر کدام عملکردهای ساختمانی مورد بررسی قرار گرفته است و در نهایت اینکه بررسی این تأثیرات با چه روشی انجام شده است. جدای از اینکه نوع سایبان چه باشد، یک سری متغیرهای سایبانی ثابتی وجود دارند که تقریباً همه تحقیقات به آنها پرداخته‌اند. برای مثال مهم‌ترین متغیرهای هندسی سایبان در سایبان‌های تیغه‌ای لوور مانند عبارت از تعداد تیغه‌ها، عمق تیغه‌ها، زاویه چرخش هر تیغه به‌صورت مستقل و یا واحد، و فاصله تنمای ساختمان هستند و یا مثلاً در سایبان‌های تیغه‌ای افقی و عمودی، عمق تیغه‌ها و تعداد آنها اهمیت پیدا می‌کند. حتی در سایبان‌های پارامتریک و یا بدون شکل نیز متغیرهایی مانند تعداد، عرض، محل قرارگیری در راستای عمودی، زاویه چرخش در دو آکس افقی و عمودی، و جابه‌جایی گوشه‌های هر تیغه در محور افقی و عمودی به‌عنوان متغیرهای مستقل اصلی تحقیق محسوب می‌شوند.

با توجه به ثابت بودن متغیرهای مستقل سایبانی، آنچه تحقیقات مختلف را اساساً از هم تفکیک می‌کند، نوع عملکردها و یا متغیرهای وابسته‌ای هستند که به‌واسطه تغییر متغیرهای مستقل سایبانی مورد توجه قرار می‌گیرند. برای مثال بسیاری از محققین (Chua et al., 2010; Cho et al., 2014; Valladares-Rendon et al., 2014; Jayathissa et al., 2017; Valladares-Rendon et al., 2017; Liu et al., 2019; Sherif et al., 2012; Yeon et al., 2019; Baldinelli, 2009) تأثیر متغیرهای سایبانی را فقط بر روی بار حرارتی و مصرف انرژی بررسی کرده‌اند و عمدتاً نیز از روش‌های شبیه‌سازی و مقایسه‌ای استفاده نموده‌اند که از این میان (Jayathissa et al., 2017) با تلفیق پانل‌های فتوولتائیک بر روی پانل‌های مربع‌شکل کوچک و با در نظر گرفتن چرخش مستقل هر پنل در دو محور افقی و عمودی، با شبیه‌سازی همه حالات ممکن توانسته است بهترین مدل را از میان

تأمین حداکثری سازگاری حرارتی در طول سال، برای سایبان‌ها کیفیت قائل می‌شود و آنها را بر این اساس تفکیک می‌کند و به‌نوعی سازگاری حرارتی را به‌عنوان مهم‌ترین شاخص برای ارزیابی کیفیت سایه‌اندازی سایبان‌ها مورد توجه قرار می‌دهد.

روش‌شناسی

این مقاله با به‌کارگیری ترکیبی از روش‌های مطالعات میدانی، شبکه عصبی مصنوعی و بهینه‌سازی توانسته است اعتبار و دقت نتایج و سرعت محاسبات را افزایش دهد. بدین منظور در گام نخست یک ساختمان مسکونی در شهر شیراز جهت انجام مطالعات میدانی انتخاب شده است. پارامترهای دمای هوا و رطوبت نسبی در چند زون مختلف از این پروژه اندازه‌گیری شده‌اند و سپس یکی از زون‌ها مورد شبیه‌سازی کامپیوتری قرار گرفته و نتایج شبیه‌سازی با نتایج مطالعات میدانی اعتبار سنجی شده است. سپس جهت مطالعه تأثیر سایه‌اندازی‌های متفاوت، یک سایبان پارامتریک با قابلیت تولید محدوده بسیار وسیعی از حالت‌های مختلف سایبان و با میزان سایه‌اندازی‌های بسیار متنوع طراحی و بر روی نمای خارجی زون مذکور شبیه‌سازی گردیده است. سپس با تکنیک LHS یک نمونه‌برداری از حالت‌های مختلف سایبان به‌صورت کاملاً پخش و یکنواخت انجام و شبیه‌سازی شده است. سپس داده‌های ورودی و خروجی از شبیه‌سازی، توسط شبکه عصبی آموزش داده شده‌اند و در نهایت یک امولاتور تولید و جهت انجام بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. در پایان تأثیر هرکدام از سایبان‌های بهینه بر سازگاری حرارتی بررسی و تحلیل شده است.

۱- مطالعات میدانی

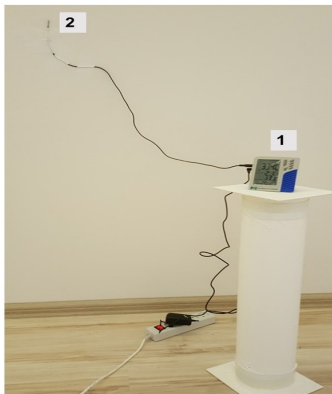
جهت تأیید اعتبار نتایج شبیه‌سازی، پارامترهای محیطی در یک ساختمان مسکونی در شیراز (تصویر ۳) با اقلیم گرم و خشک اندازه‌گیری شد و به‌عنوان معیاری برای اعتبار سنجی شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. بررسی‌های بسیار زیادی در فضاهای مختلف این ساختمان، در طبقات مختلف و در جنبه‌های متفاوت، در طول تابستان ۱۳۸۸ انجام شد. آنچه در این مقاله ارائه گردیده است تنها بخش کوچکی از این مطالعات می‌باشد. زون مورد مطالعه، در این مقاله، با ابعاد $7.8m \times 6m \times 3.24m$ در راستای ۴۹ درجه جنوب غربی (۲۲۹ درجه شمالی) واقع شده است که در همین راستا دارای یک پنجره به طول $5.25m$ و ارتفاع $2.80m$ می‌باشد. پارامترهای دمای هوای داخل و خارج، رطوبت نسبی داخل و خارج و دمای سطح داخلی و خارجی دیوار خارجی در این زون در روزهای ۱۸، ۱۹ و ۲۰ جولای (به مدت سه روز کامل معادل ۷۲ ساعت) با فواصل هر ۵ دقیقه و توسط دو عدد دیتالاگر مدل MIC-98586J اندازه‌گیری شده است (تصاویر ۱ تا ۳).

۲- شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل

شبیه‌سازی با کمک نرم‌افزار راینو و پلاگین‌های لیدی‌باگ و هانی‌بی انجام شده است. برای بالا بردن دقت مدل شبیه‌سازی تلاش شده تا تمامی جزئیات از جمله مصالح جداره‌ها، شرایط باز و بسته بودن پنجره‌ها و میزان تهویه طبیعی با وضع موجود (ساختمان مورد مطالعه) تطابق داشته باشند. جزئیات دیوار خارجی به ترتیب از داخل به بیرون عبارت است از 3cm اندود گچ، 20cm بلوک اتوکلاو پرین، زیرسازی با پروفیل‌های فلزی و چوبی برای نما، نمای ترمو وود (چوب حرارتی).

غیرهندسی را برای رسیدن به حداقل مصرف انرژی (حدود ۱۴٪ صرفه‌جویی) و حداکثر UDI (بیشتر از ۵۰٪) بهینه نموده است. تأثیر متغیرهای سایبانی بر آسایش حرارتی را به‌طور قطع نمی‌توان نادیده گرفت اما متأسفانه تحقیقات اندکی وجود دارد که تأثیر متغیرهای سایبانی بر آسایش حرارتی را بررسی کرده باشند (Amini et al., 2021; Bessoudo et al., 2010; Carletti et al., 2016; Khoroshiltseva et al., 2016; Sghiori et al., 2018; Zhao et al., 2020; Park et al., 2020; Naderi et al., 2020; Razmi et al., 2021; Stazi et al., 2014). با این حال (Bessoudo et al., 2010) با اندازه‌گیری دمای تشعشعی و اندازه‌گیری شدت روشنایی در محیط داخل و خارج، تأثیر زوایای مختلف تیغه‌های سایبان کرکره‌ای خارجی را بر کیفیت روشنایی و دمای تشعشعی محیط داخلی یک اتاق مسکونی بررسی نموده است و به بهترین استراتژی کنترلی برای این نوع سایبان دست یافته است و به این ترتیب شرایط آسایش حرارتی داخل اتاق را ارزیابی نموده است. هرچند که به‌کارگیری سایبان بهینه می‌تواند درصد رضایت حرارتی در زمستان و تابستان را افزایش دهد اما لزوماً موجب کاهش نیاز انرژی نمی‌شود به‌ویژه اگر تأمین نور روز در کنار توابع بار حرارتی و آسایش حرارتی جزء توابع هدف در نظر گرفته نشده باشد (Khoroshiltseva et al., 2016)، زیرا در این صورت ممکن است با وجود کاهش بار حرارتی و بهبود نسبی آسایش حرارتی، فضا بیش‌ازحد روشن و یا بیشتر اوقات تاریک باشد و در نتیجه مصرف انرژی افزایش یابد. بنابراین لزوم بررسی هم‌زمان بار حرارتی، نور روز و آسایش حرارتی با توجه به تغییر پارامترهای سایبانی بسیار واجب و با اهمیت است.

پژوهش‌ها نشان می‌دهند که متغیرهای سایبان مربوط به هر نوع سایبان، محدود به پارامترهای کلی مشخصی مانند ابعاد، زاویه، محل قرارگیری، و مصالح می‌باشند. از سوی دیگر مرور جامعی که (Kir et al., 2016) بر پژوهش‌های از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۵ در مورد مدل‌های شبیه‌سازی برای سیستم‌های سایبانی انجام داده است نشان می‌دهد که مهم‌ترین عملکردهای ساختمانی متأثر از متغیرهای سایبانی شامل عملکرد حرارتی، نور روز و آسایش حرارتی می‌باشد. همچنین مطالعات نشان می‌دهند که ۴ روش کلی شامل روش‌های شبیه‌سازی و مقایسه‌ای، برداشت‌های میدانی، بهینه‌سازی، و هوش مصنوعی در پژوهش‌ها به‌کارگرفته شده که در هر پژوهش یکی از این روش‌ها و یا ترکیبی از چند روش مورد استفاده قرار گرفته است. پژوهش حاضر با ترکیب روش‌های مطالعات میدانی، شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری، بهینه‌سازی و شبکه عصبی مصنوعی، ضمن اعتبارسنجی نتایج توانسته است سرعت محاسبات و آنالیزهای بهینه‌سازی را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. مطالعه نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که وجود سایبان‌های خارجی تأثیر بسیار زیادی بر رفتار حرارتی، مصرف انرژی و کیفیت نور روز می‌گذارد و به‌ویژه در اقلیم‌های گرم طراحی سایبان‌های خارجی کارآمد بسیار ضروری است. با این حال تاکنون در هیچ پژوهشی کیفیت سایه‌اندازی مورد توجه نبوده است و صرفاً اگر یک سایبان موجب کاهش مصرف انرژی شود و شاخص‌های نور روز را نیز تأمین نماید و آسایش حرارتی فضای داخل را نیز بهبود بخشد به‌عنوان یک سایبان بهینه و کارآمد تلقی می‌شود در حالی این پژوهش علاوه بر لزوم کاهش مصرف انرژی و تأمین استانداردهای نور روز با تأکید بر



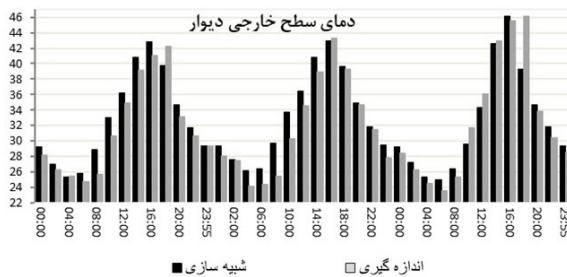
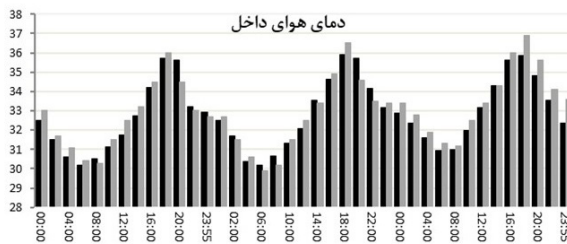
تصویر ۲- موقعیت قرارگیری دستگاه دیتالاگر داخلی، ۱- دستگاه اصلی بر روی یک پایه به ارتفاع تقریبی 90cm گذاشته شده و دمای هوا و رطوبت نسبی محیط داخل را ثبت می‌کند؛ ۲- سیم ترموکوپل دستگاه بر روی دیوار چسبانده شده است و دمای سطح داخلی دیوار را ثبت می‌کند.



تصویر ۱- موقعیت قرارگیری دستگاه دیتالاگر در مجاورت نمای خارجی، ۱- دستگاه اصلی در داخل یک محفظه با قابلیت تهویه قرار گرفته است و دمای هوا و رطوبت نسبی محیط بیرون را ثبت می‌کند؛ ۲- سیم ترموکوپل دستگاه در داخل یک محفظه بر روی نمای بیرون نصب شده و دمای سطح خارجی دیوار را ثبت می‌کند.

جدول ۱- محاسبه مقادیر شاخص‌ها برای پارامترهای T_i , T_{s_i} , T_{s_o} .

	NMBE	CV(RMSE)	R2
T_i	0.5	1.3	0.999
T_{s_i}	-0.4	1.2	0.999
T_{s_o}	-1.8	5.5	0.988



تصویر ۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در رابطه با دمای هوای داخل، دمای سطح داخلی و خارجی پوسته.



تصویر ۳- موقعیت زون مورد مطالعه - ساختمان مسکونی در شیراز.

دیوارهای داخلی نیز شامل 10cm بلوک اتوکلاو پیرین با دو طرف اندود گچ می‌باشند. پنجره از نوع دوجداره، با قاب PVC، ضریب هدایت $2W/m^2k$ ، ضریب عبور $0.52(VT)$ ، و ضریب جذب خورشیدی 0.4 (SHGC) می‌باشد. کف این زون در مجاورت فضای مسکونی زیرین است و سقف آن در مجاورت فضای بیرون می‌باشد که با جزئیات بام سبز اجرا شده است. این زون به صورت کنترل نشده و با تهویه طبیعی شبیه‌سازی شده است. این زون دارای سایبان‌های خارجی افقی و عمودی به عمق 30cm در جبهه جنوب غربی می‌باشد. همچنین چندین تیغه عمودی به عمق 10cm بر روی نما قرار گرفته است که بیشتر جنبه تزئینی دارند (تصویر ۳).

از دیگر اقداماتی که برای بالا بردن دقت شبیه‌سازی انجام شده این است که اطلاعات دمای هوای خارج و رطوبت نسبی خارج که توسط دستگاه دیتالاگر در بازه انجام مطالعات میدانی اندازه‌گیری شده است بر روی فایل اقلیمی EPW که توسط نرم‌افزار برای اقلیم شیراز ساخته می‌شود، جایگزین شده است. همچنین سرعت جریان هوای بیرون در مدت زمان آزمایش نیز از ایستگاه هواشناسی شیراز دریافت و بر روی فایل اقلیمی جایگزین شده است. این کار با کمک نرم‌افزار *Run Elements 1.0.4* انجام گردید. جهت اعتبار سنجی مدل شبیه‌سازی، مقادیر سه پارامتر دمای هوای داخل زون، دمای سطح داخلی و دمای سطح خارجی نما نسبت به برداشت‌های میدانی مقایسه شدند (*Calix*-

to-Aguirre et al., 2021; Sang et al., 2017; Dahanayake et al., 2017; Andelkovic et al., 2016; Sima et al., 2015; Hashemi et al., 2010). شاخص‌های مورد استفاده جهت بررسی دقت مدل (*Calix*-) شامل (ASHRAE 14-2002; Ramos Ruiz et al., 2017) (ASHRAE 14-2014) شامل $R2$, $CV(RMSE)$, $NMBE$ می‌باشد. مقادیر این شاخص‌ها برای دمای

بنابراین بدیهی است که نمی‌توان تمامی حالات ممکن را شبیه‌سازی نمود. تکنیک LHS کمک می‌کند تا با یک نمونه‌برداری یکنواخت در کل جامعه هدف بتوان جمعیت نمونه‌ای را تولید نمود که از تمام قسمت‌های فضای جستجو نمونه‌برداری کند. به این ترتیب با بررسی یک نمونه با جمعیت بسیار کم‌تر از جمعیت جامعه هدف می‌توان تمام ویژگی‌های جامعه هدف را با دقت نسبتاً خوبی بررسی نمود (Viana, 2016; Levy et al., 2010; Tian et al., 2018; Loepky et al., 2009, Singh et al., 2016, Zhang et al., 2020). در این مقاله تعداد ۱۰,۲۰۰ حالت مختلف سایبان (از ترکیب ۳۴ تیغه سایبانی) یعنی ۳۰۰ برابر تعداد متغیرهای مستقل (۳۴ تیغه) جهت آموزش شبکه عصبی و تعداد ۳۴۰۰ حالت مختلف دیگر (یعنی ۱۰۰ برابر تعداد متغیرهای مستقل) نیز جهت آزمایش شبکه عصبی به‌صورت جداگانه با این روش تولید شده است.

۵- شرایط و جزئیات شبیه‌سازی برای جمعیت نمونه

تمامی ۱۳,۶۰۰ حالت مختلف سایبان که توسط تکنیک LHS در مرحله قبل تولید شدند (مجموع دیتاست آموزش و تست)، توسط پلاگین‌های لیدی‌باگ، هانی‌بی و هانی‌بی پلاس مورد شبیه‌سازی قرار گرفتند. به این ترتیب هر کدام از حالت‌های سایبان به‌صورت جداگانه شبیه‌سازی شدند و مقادیر ۱۵ تابع هدف (متغیرهای وابسته) حاصل از خروجی هر شبیه‌سازی از جمله اندازه سیستم‌های سرمایش و گرمایش، شاخص‌های نور روز (sDA, UDI, ASE)، سازگاری حرارتی و غیره ثبت شدند. لیست کامل توابع هدف و سایر مشخصات این شبیه‌سازی‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است. در هر شبیه‌سازی پنجره‌ها به‌صورت بسته فرض شده‌اند (بدون تهویه طبیعی) تا از این طریق بتوان تأثیر تابش و سایه را دقیق‌تر بررسی نمود. سیستم Ideal Air Load برای سیستم تهویه مطبوع انتخاب شده است. متغیرهای مستقل شامل ۳۴ تیغه سایبانی است که در بخش ۳-۳ توضیح داده شد. ضریب تابش پراکنده برای هر تیغه برابر با ۰.۵ و مقادیر درخشندگی و سختی نیز برابر با صفر در نظر گرفته شده است به این ترتیب هر مصالحی که برای سایبان فرض شود چنانچه دارای ضرایب گفته شده باشد، در محاسبات روشنایی و بار حرارتی به جواب یکسانی خواهند رسید. از این‌رو در این تحقیق جنس هر تیغه نوعی ترموود با ضرایب گفته‌شده در نظر گرفته شده است. همچنین شبیه‌سازی‌ها برای کل سال و به‌صورت ماهانه انجام شده‌اند. اما مقادیر کسب تابش برای دوره سرد و گرم سال تفکیک شده است. با کمک نرم‌افزار Climate Consultant 6.0 و انتخاب معیار «مدل سازگاری حرارتی در استاندارد اشری ۲۰۱۰-۵۵»، دوره گرم سال در شیراز از روز ۷ آپریل آغاز می‌شود و تا روز ۲۲ اکتبر ادامه دارد. سایر روزهای سال نیز به‌عنوان دوره سرد و نیاز به تابش برای اقلیم شیراز محسوب می‌شوند.

جدول ۲- فهرست توابع هدف (متغیرهای وابسته) حاصل از خروجی شبیه‌سازی.

حداکثر دمای سطح خارجی دیوار	اندازه سیستم سرمایش ^I (W)
حداکثر دمای سطح داخلی دیوار	اندازه سیستم گرمایش ^{II} (W)
درصد اوقات آسایش ^{III} PTC	بار سرمایش ^{III} (KWh/m ²)
درصد اوقات خیلی گرم ^{IX} PTH	بار گرمایش ^{IV} (KWh/m ²)
درصد اوقات خیلی سرد ^X PTTC	شاخص روشنایی ^V ASE
کسب تابش در دوره گرما (KWh)	شاخص روشنایی ^{VI} sDA
کسب تابش در دوره سرما (KWh)	شاخص روشنایی ^{VII} UDI
	حداکثر دمای هوای داخل

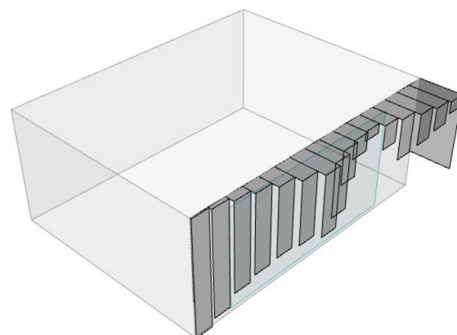
هوای داخل Ti دمای سطح داخلی دیوار Tsi و دمای سطح خارجی دیوار Tso محاسبه شده است و در جدول (۱) نشان داده شده است. مقدار R2 برای هر کدام از پارامترهای Ti، Tsi و Tso به ترتیب برابر با ۰/۹۹۹، ۰/۹۹۹ و ۰/۹۹۸ می‌باشد که نشان‌دهنده دقت بالای شبیه‌سازی‌ها است و برای انجام ادامه مطالعات معتبر می‌باشد. نمودارهای تصویر (۴) مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری در رابطه با دمای هوای داخل، دمای سطح داخلی و خارجی پوسته را نشان می‌دهد.

۳- تولید سایبان ثابت پارامتریک

برای اینکه بتوان تأثیر سایه‌اندازی نما را بر روی کارایی ساختمان ارزیابی نمود نیاز است که یک سایبان پارامتریک به‌گونه‌ای طراحی شود که تمامی متغیرهای هندسی سایبان را دارا باشد و بتواند زاویه، عمق، ارتفاع و موقعیت خود را در طول نمای ساختمان تغییر دهد و به این ترتیب سایه‌اندازی‌های متنوعی را ایجاد کند. برای این منظور یک سایبان پارامتریک شامل ۳۴ تیغه که هر کدام می‌توانند به‌صورت مستقل در محدوده مجاز تغییر طول دهند بر روی نمای ساختمان طراحی شده است. این سایبان شامل ۱۶ تیغه افقی (با عرض حدود 50cm) بر بالای نما، ۱۶ تیغه عمودی در جلوی نما (با عرض حدود 50cm) و ۲ تیغه عمودی نیز در دو طرف انتهایی نما می‌باشد. عمق تیغه‌های افقی و همچنین عمق تیغه‌های عمودی طرفین می‌تواند بین صفر تا حداکثر 120cm (حداکثر حد مجاز پیش‌آمدگی ساختمان بر اساس ضوابط شهرداری شیراز (طرح تفصیلی شیراز، ۱۳۹۳) و ارتفاع تیغه‌های عمودی نیز می‌تواند بین صفر تا 3m (حداکثر برابر با ارتفاع ساختمان یا ارتفاع یک طبقه) متغیر در نظر گرفته شود. از ترکیب ابعاد مختلف این تیغه‌ها می‌توان تعداد حالات بسیار زیادی سایبان تولید کرد (تصویر ۵).

۴- روش نمونه‌برداری LHS

تمامی حالت‌های ممکن تولید سایبان در این مدل پارامتریک می‌تواند بیش از ۱۰^{۶۸} حالت مختلف شود. با در نظر گرفتن این نکته که زمان هر شبیه‌سازی به‌صورت میانگین حدود ۶ دقیقه طول می‌کشد،



تصویر ۵- طراحی سایبان ثابت پارامتریک بر روی نمای خارجی مدل شبیه‌سازی شده.

۶- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی یک الگوریتم هوشمند است که متغیرهای مستقل ورودی را به متغیرهای وابسته خروجی نگاشت می‌کند. هدف از ایجاد چنین شبکه‌ای در این مقاله تولید یک مولاتور است به نحوی که با وارد کردن هر حالتی از سایبان به داخل شبکه بتوان در کم‌تر از ۱ ثانیه مقادیر توابع هدف را پیش‌بینی نمود. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد محدوده تغییرات تیغه‌های افقی بین صفر تا 1.2m و مقادیر تیغه‌های عمودی بین صفر تا 3m تعیین شده است که این اعداد برای ورود به شبکه در بازه صفر تا یک نگاشت شده‌اند و به این ترتیب هر ترکیب از این ۳۴ عدد، یک ردیف از ماتریس داده‌های ورودی به شبکه ANN را تشکیل می‌دهد و از آنجا که تعداد کل حالات شبیه‌سازی شده برای آموزش برابر با 10200 حالت است بنابراین ابعاد ماتریس ورودی برابر با 10200×34 می‌باشد که هر ردیف نشان‌دهنده یک حالت متفاوت از نوع قرارگیری تیغه‌های سایبان است. از آنجا که توابع هدف (متغیرهای وابسته) دارای ماهیت‌های متفاوتی هستند بنابراین شبکه عصبی برای هر کدام از این توابع به صورت جداگانه آموزش داده شده است. مقادیر توابع هدف در بازه‌های متفاوتی هستند اما در اینجا مقادیر توابع هدف در بازه بین صفر و یک نگاشت شده‌اند تا عملیات آموزش بهتر انجام شود. پس از پایان آموزش، کدی نوشته شده است که هر کدام از مقادیر توابع هدف را به بازه اصلی آن برمی‌گرداند و اعداد واقعی هر تابع را نمایش می‌دهد.

همه این توابع هدف به‌جز توابع مربوط به سازگاری حرارتی از نوع پیوسته هستند. از آنجا که تابع فعال‌ساز *Leaky Relu* نسبت به سایر توابع از دقت بالاتری برخوردار است (Salam, 2021; Szandala, 2021). بنابراین برای آموزش شبکه عصبی از این تابع استفاده شده است و به این ترتیب لایه خروجی در هر کدام از این شبکه‌ها دارای یک گره است که همان مقدار تابع هدف می‌باشد. اما توابع هدف مربوط به سازگاری حرارتی از نوع ناپیوسته هستند و بنابراین شبکه عصبی باید به صورت دسته‌بندی‌شده آموزش ببیند و به همین دلیل تابع فعال‌ساز مورد استفاده تابع *SoftMax* است و در لایه آخر نیز از تکنیک "One-HotEncoder" استفاده شده است. در این توابع دسته‌بندی، تعداد کلاس‌ها برای تابع "PTC" و «PTTC» برابر با ۷ و برای تابع "PTTH" برابر با ۱۲ می‌باشد. تمام روند برنامه‌نویسی با استفاده از کتابخانه‌های تانسورفلو (TensorFlow Team, 2015) و کراس (Chollet, 2015) در زبان برنامه‌نویسی پایتون اجرا شده است.

معماری‌های زیاد و متنوعی برای آموزش این توابع در شبکه عصبی مورد آزمایش قرار گرفتند و نکته جالب اینکه معماری تشکیل شده از

چهار لایه پنهان که در هر لایه ۳۲ گره وجود دارد بهترین دقت را برای همه توابع هدف تأمین نموده است. به این ترتیب معماری هر شبکه شامل لایه ورودی با ۳۴ داده (اطلاعات مربوط به ابعاد تیغه‌ها)، ۴ لایه پنهان هر کدام با ۳۲ گره، و یک لایه خروجی است که برای توابع رگرسیون دارای یک گره می‌باشد ولی برای توابع دسته‌بندی تعداد گره‌ها برابر با تعداد کلاس‌ها است (تکنیک OneHotEncoder) (تصاویر ۶ تا ۷).

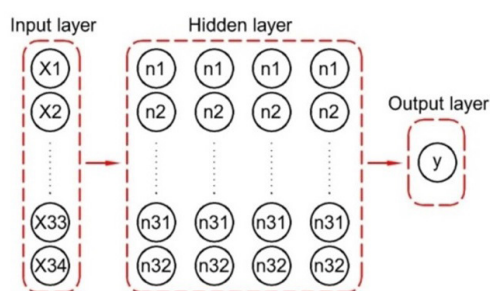
۷- بهینه‌سازی

هدف از این بهینه‌سازی یافتن مدل‌هایی از سایبان پارامتریک است که بتواند از یک سو بار سرمایشی و گرمایشی و شاخص ASE را به حداقل و از سوی دیگر مقدار sDA و UDI را به حداکثر برساند. الگوریتم‌های تکاملی به صورت گسترده‌ای در مسائل چندهدفه مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از محبوب‌ترین و قوی‌ترین الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم NSGA-II است (Deb et al., 2002) که در حوزه حل مسائل معماری و انرژی بسیار مورد استقبال واقع شده است (Chatzikonstantinou et al., 2015; Yufka et al., 2017; Karaman et al., 2017; Yi, 2019; Ascione et al., 2019; Asadi et al., 2015; Carlucci et al., 2014). با این وجود الگوریتم NSGA-III که در مقایسه با NSGA-II ضمن جدیدتر بودن، قابلیت ارائه Pareto front to front بهینه‌تری را دارد (Deb et al., 2013; Emmerich et al., 2016; al., 2018; Ciro et al., 2016) است. از این رو در این تحقیق جهت حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم پیشرفته NSGA-III بهره گرفته شده است. تعداد جمعیت در هر نسل برابر با ۵۰۰ و تعداد کل نسل‌ها برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. جهت اجرای این الگوریتم، در این مقاله، از کتابخانه Pymoo و زبان برنامه‌نویسی پایتون استفاده شده است. بهینه‌سازی مورد استفاده در این مقاله از نوع بدون قید بوده است. پس از پایان بهینه‌سازی، پاسخ‌های بهینه مجدداً وارد شبکه عصبی شده‌اند تا بتوان مقادیر سایر توابع هدف (جدول ۲) را پیش‌بینی نمود. سپس پاسخ‌های بهینه بر اساس مقادیر استاندارد شاخص‌های روش‌نمایی فیلتر شده‌اند تا به این ترتیب بتوان بهترین پاسخ‌ها را از میان نتایج بهینه‌سازی معین نمود.

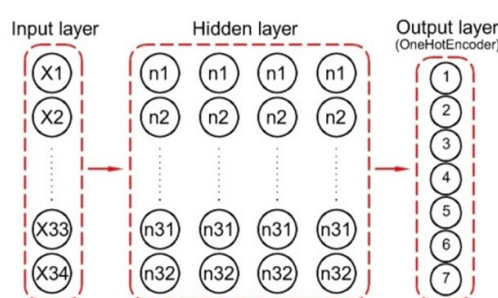
۲- آنالیز داده‌ها

۲-۱. نتایج شبکه عصبی

شاخص اندازه‌گیری دقت برای توابع پیوسته R2 score و برای توابع گسسته F1 score در نظر گرفته شده است. تمامی توابع هدف با دقت بیش از ۹۰٪ آموزش داده شده‌اند که مقادیر آنها در جدول (۳)



تصویر ۷- معماری شبکه عصبی برای توابع رگرسیون.



تصویر ۶- معماری شبکه عصبی برای توابع دسته‌بندی با ۷ کلاس.

ارزایی کنیم کافی است که مقادیر توابع هدف برای آن در محدوده‌های ارائه شده در این جدول باشد. برای مثال اگر سایبانی طراحی شود که اندازه سیستم سرمایش آن در محدوده 570-983w، اندازه سیستم گرمایش آن در محدوده 627-645w و مقدار ASE کم‌تر از ۹/۹٪ باشد و به همین ترتیب سایر توابع هدف آن نیز در محدوده‌های قابل قبول مطابق با جدول (۵) باشد، به این ترتیب می‌توان مطمئن شد که این یک سایبان بهینه و کارآمد خواهد بود.

۳- بحث در نتایج

۳-۱. تأثیر سایه‌اندازی بر بار حرارتی و اندازه سیستم‌های حرارتی

نتایج نشان می‌دهد که وجود سایبان مناسب می‌تواند درصد قابل قبولی از نیاز حرارتی و همچنین اندازه سیستم‌های سرمایش و گرمایش را کاهش دهد. چنانچه محدوده بار حرارتی و اندازه سیستم‌ها برای نمونه‌های بهینه را با مدل پایه (بدون سایبان) مقایسه کنیم به این نتیجه خواهیم رسید که سایه‌اندازی بهینه می‌تواند اندازه سیستم سرمایشی را بین ۵۳٪ تا ۷۳٪، اندازه سیستم گرمایشی را بین ۸٪ تا ۱۰٪ و بار سرمایشی را بین ۵۹٪ تا ۷۴٪ کاهش دهد. در مدل بدون سایبان میزان بار گرمایش ماهانه به صفر می‌رسد اما این به معنای قابل قبول بودن شرایط آسایش حرارتی در این دوره از سال نیست زیرا نتایج شبیه‌سازی مربوط به مدل پایه نشان می‌دهد که به دلیل دریافت بیش‌ازحد تابش در دوره سرد سال و عدم استفاده از تهویه طبیعی و سیستم مکانیکی، شرایط حرارتی فضای داخل به شدت گرم است و نه تنها نیازی به گرمایش نیست بلکه باید محیط را نیز خنک نمود. از این رو وجود سایه‌اندازی بهینه نه تنها شرایط حرارتی فضای داخل را برای دوره گرم سال بهبود می‌بخشد بلکه موجب بهبود شرایط حرارتی در دوره سرد سال نیز می‌شود.

۳-۲. تأثیر سایه‌اندازی بر میزان کسب تابش

نفوذ بیش‌ازحد تابش به داخل هم موجب عدم آسایش بصری و هم موجب عدم آسایش حرارتی می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد اگر میزان نفوذ تابش کنترل نشود شرایط حرارتی بسیار گرم و نامطلوبی در دوره سرد و گرم سال ایجاد می‌شود و به همین دلیل در اقلیم نه‌چندان سردی مثل شیراز در تمام طول سال نیازمند کنترل میزان کسب تابش هستیم به‌ویژه زمانی که نمای ساختمان در راستای

جدول ۵- کمینه و بیشینه توابع هدف برای ۲۴۴ نمونه سایبان بهینه و منتخب.

اندازه سیستم گرمایش (W)	627 - 645
بار سرمایش (KWh/m ²)	12.4 - 19.4
بار گرمایش (KWh/m ²)	0.83 - 5.05
شاخص روشنایی ASE	0.99% - 9.9%
شاخص روشنایی sDA	40.1% - 86.6%
شاخص روشنایی UDI	82.8% - 86.3%
حداکثر دمای هوای داخل Co	34.1 - 37
حداکثر دمای سطح خارجی دیوار C ^o	30.8 - 32
حداکثر دمای سطح داخلی دیوار C ^o	33.9 - 36.6
درصد اوقات آسایش PTC	33.3% - 66.67%
درصد اوقات خیلی گرم PTTH	25% - 41.6%
درصد اوقات خیلی سرد PTTC	0% - 33.3%
کسب تابش در دوره گرما (KWh)	617 - 1080
کسب تابش در دوره سرما (KWh)	392 - 828

ارائه شده است. به این ترتیب این مدل می‌تواند مقادیر توابع هدف را با سرعت و دقت بسیار بالایی پیش‌بینی نماید. هرکدام از این توابع به‌صورت جداگانه آموزش دیده‌اند اما برای اینکه بتوان تمامی توابع هدف را برای هر مدل سایبان ورودی به‌صورت پیوسته پیش‌بینی نمود، یک تابع در پایتون نوشته شده است که با دریافت هر مدل دلخواه سایبان (هر ترکیب ۳۴ تایی دلخواه از اندازه تیغه‌های سایبان) قادر است مقادیر پیش‌بینی شده همه توابع هدف به ازای این مدل سایبان را ارائه دهد.

۲-۲. معیار انتخاب مدل‌های قابل قبول حاصل از بهینه‌سازی

جبهه پرتو در بهینه‌سازی چندهدفه در واقع نشان‌دهنده پاسخ‌های بهینه و کارآمد هستند که به طراح این اجازه را می‌دهند که بتواند با توجه به این پاسخ‌ها و آنالیزهای رفت و برگشتی، بهترین پاسخ را در راستای اهداف تحقیق انتخاب نماید. در واقع پاسخ‌های نهایی در جبهه پرتو هیچ برتری نسبت به هم ندارند و محقق بر اساس معیارها و اهداف خود می‌تواند مناسب‌ترین پاسخ را از میان پاسخ‌های جبهه پرتو انتخاب نماید. تعداد پاسخ‌های پرتو نهایی در این بهینه‌سازی برابر با ۳۶ پاسخ است که پس از اعمال فیلتر به ۲۱ پاسخ بهینه می‌رسد. معیار فیلتر بر اساس مقادیر استاندارد تعرف شده برای شاخص‌های روشنایی می‌باشد (https://climatestudiodocs.com). به عبارتی از آنجا که مقادیر شاخص ASE و sDA اگر به ترتیب بیشتر از ۱۰ و کم‌تر از ۴۰ باشند غیر قابل قبول محسوب می‌شوند بنابراین کلیه پاسخ‌هایی که دارای ASE و sDA غیر قابل قبول بودند حذف گردیدند. به این ترتیب محدوده بیشینه و کمینه توابع هدف حاصل از بهینه‌سازی مشخص می‌گردد که در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به محدوده‌های بهینه توابع هدف، کلیه نمونه‌های موجود در دیتاست اصلی (مجموع دیتاهای آموزش و تست که برابر با ۱۳۶۰۰ نمونه سایبان است) نیز بررسی و نمونه‌های قابل قبول بیرون کشیده شدند. مقادیر توابع هدف برای این نمونه‌ها در بازه‌های قابل قبول مطابق با جدول (۴) می‌باشد. به این ترتیب تعداد ۲۲۳ پاسخ بهینه دیگر نیز به مجموع پاسخ‌های بهینه حاصل از روند بهینه‌سازی افزوده شد و بنابراین تعداد کل پاسخ‌های بهینه قابل قبول به ۲۴۴ مورد رسید.

۲-۳. محدوده توابع هدف برای پاسخ‌های بهینه

محدوده قابل قبول کلیه توابع هدف برای تمامی ۲۴۴ پاسخ بهینه در جدول ۵ ارائه شده است. به عبارتی چنانچه بخواهیم یک سایبان را

جدول ۳- دقت شبکه عصبی آموزش دیده برای هر کدام از توابع هدف.

اندازه سیستم گرمایش	0.993	حداکثر دمای سطح خارجی دیوار	0.97
بار سرمایش	0.982	حداکثر دمای سطح داخلی دیوار	0.978
بار گرمایش	0.993	درصد اوقات آسایش PTC	0.944
شاخص روشنایی ASE	0.96	درصد اوقات خیلی گرم PTTH	0.962
شاخص روشنایی sDA	0.989	درصد اوقات خیلی سرد PTTC	0.977
شاخص روشنایی UDI	0.993	کسب تابش در دوره گرما	0.981
		کسب تابش در دوره سرما	0.992

جدول ۴- کمینه و بیشینه توابع هدف بر اساس پاسخ‌های بهینه.

UDI	sDA	ASE	HeatingLoad (KWh/m ²)	CoolingLoad (KWh/m ²)
82.8	40	0.99	0.64	12.4
86.3	86.6	9.9	5.05	19.38
				min
				max

جدول ۶- گروه‌بندی سایبان‌ها بر اساس مقادیر PTC.

محدوده کاهش اندازه سیستم سرمایش	محدوده کاهش انداز سیستم گرمایش	محدوده ASE	محدوده SDA
گروه ۱ PTC = 33.3%	60.2% - 62.8%	9.4% - 10.5%	40.1% - 42.6%
گروه ۲ PTC=41.6%	54.4% - 66.9%	8.1% - 10.1%	40.1% - 69.3%
گروه ۳ PTC = 50%	53.4% - 71.7%	7.8% - 10.3%	40.1% - 643%
گروه ۴ PTC=58.3%	56.7% - 73%	8.1% - 10.2%	41.1% - 86.6%
گروه ۵ PTC=66.6%	67.2% - 70.6%	8.9% - 9.6%	53.9% - 67.3%

بسیار سرد و خارج از محدوده آسایش حرارتی می‌باشد. جهت بررسی اهمیت سایه‌اندازی بر روی نما و تأثیر آن بر وضعیت آسایش حرارتی، مدل مورد نظر بدون هیچ سایبانی (مدل پایه) شبیه‌سازی شد و نتایج سازگاری حرارتی آن با نتایج نمونه‌های دارای سایه‌اندازی بهینه (تمامی ۲۴۴ نمونه بهینه حاصل از مجموع پاسخ‌های بهینه‌سازی و فیلترینگ دیتاست) مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که اگر هیچ سایه‌اندازی بر روی نما ایجاد نشود، هیچ‌گاه در طول سال، چه در دوره گرم و چه در دوره سرد، آسایش حرارتی برقرار نخواهد شد و در واقع شرایط حرارتی همیشه، حتی در زمستان، بسیار گرم و خارج از محدوده آسایش حرارتی خواهد بود. لازم به یادآوری است که تمام شبیه‌سازی‌ها در شرایط بدون تهویه طبیعی و بدون سیستم مکانیکی انجام شده‌اند. بررسی مقادیر PTC برای ۲۴۴ نمونه بهینه نشان می‌دهد که سایبان‌های بهینه می‌توانند مقدار PTC را حداقل به ۳۳٪ برسانند یعنی موجب می‌شوند که حداقل ۴ ماه از سال آسایش حرارتی ایجاد شود. از سوی دیگر این سایبان‌ها حداکثر PTC ای که ایجاد می‌کنند برابر با ۶۶٪ است به این معنا که بهترین سایبان‌های بهینه حداکثر می‌توانند ۸ ماه از سال آسایش حرارتی (مدل سازگاری) را ایجاد نمایند. در این حالت از ماه July تا ماه Oct وضعیت حرارتی بسیار گرم و خارج از محدوده آسایش است و حداکثر دمای هوای داخل زون نیز بین ۳۵ تا ۳۵/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. این در حالی است که اگر هیچ سایبانی وجود نداشت میانگین دمای هوای داخل در این ماه‌ها می‌توانست به‌راحتی به ۴۷ درجه سانتی‌گراد هم برسد.

این نتایج به‌خوبی نشان می‌دهند که با وجودی که یک سایبان بهینه می‌تواند بار حرارتی را کاهش دهد و هم‌زمان نور روز را نیز در حد استاندارد تأمین نماید، اما احتمال دارد که نتواند شرایط آسایش حرارتی را به‌خوبی تأمین کند. برای مثال اگر ۲۴۴ نمونه سایبان بهینه‌ای که در این مقاله تولید شده‌اند، بر اساس مقدار PTC طبقه‌بندی شوند، ۵ گروه سایبان ایجاد می‌شود. جدول (۶) با ارائه این گروه‌بندی نشان می‌دهد که هر ۵ گروه سایبان با وجودی که از نظر صرفه‌جویی در بار حرارتی و شاخص‌های روشنایی در حد قابل قبول و نزدیک به هم هستند اما به لحاظ کیفیت آسایش حرارتی بسیار متفاوت عمل می‌کنند. مثلاً گروه ۵ می‌تواند تا ۸ ماه از سال آسایش حرارتی را تأمین کند در حالی که گروه ۱، تنها تا ۴ ماه از سال آسایش حرارتی را تأمین می‌کند. از هر کدام از این گروه‌ها یک سایبان به‌عنوان نمونه انتخاب شده است و مقادیر ابعدی هر ۳۴ تیغه برای آن در جدول (۷) نشان داده شده است.

جنوب غربی قرار گرفته و دارای پنجره با مساحت زیاد است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سایه‌اندازی بهینه می‌تواند میزان کسب تابش در دوره گرم نیاز به سایه را حدود ۶۴٪ تا ۸۰٪ و در دوره سرد سال نیز حدود ۶۲٪ تا ۸۲٪ کاهش دهد. این میزان کاهش دریافت تابش در حالی است که هم استانداردهای شاخص‌های روشنایی رعایت شده است و هم میزان بار حرارتی و اندازه سیستم‌های حرارتی در کم‌ترین حالت خود هستند. کاهش کسب تابش در دوره سرد سال موجب حذف شرایط بسیار گرم و حتی گاهی ایجاد شرایط بسیار سرد می‌شود اما با این حال در نمونه‌های سایبان‌های بهینه با $PTC=66.67\%$ شرایط بسیار سرد در دوره سرد سال حذف می‌شود و به این ترتیب شرایط حرارتی در دوره سرد سال در حد مطلوب قرار می‌گیرد.

۳-۳. تأثیر سایه‌اندازی بر دمای سطح داخلی و خارجی دیوار

دمای سطح خارجی دیوار در مدل پایه (بدون سایبان) حداکثر به ۵۴/۴ درجه سانتی‌گراد در روز ۳۰ اگوست ساعت ۱۵:۰۰ می‌رسد. این در حالی است که در همین لحظه دمای هوای داخل برابر با ۵۳/۹ درجه سانتی‌گراد و دمای سطح داخلی دیوار نیز برابر با ۵۱ درجه سانتی‌گراد می‌گردد (این نتایج بر اساس شبیه‌سازی ساعتی حاصل شده است). با این وجود زمانی که از سایبان‌های بهینه استفاده می‌شود، حداکثر دمای سطح خارجی بسته به نوع مدل سایبان بین ۴/۳۴ تا ۴۹/۴ درجه سانتی‌گراد می‌تواند متغیر باشد یعنی به حدود ۱۱ الی ۵ درجه سانتی‌گراد کم‌تر از مدل پایه می‌رسد. اما نکته جالب توجه این است که دمای هوای داخل حدود ۱۸-۱۷ درجه سانتی‌گراد و دمای سطح داخلی دیوار نیز حدود ۱۴/۹ - ۱۵/۸ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابند. در این حالت با اینکه دمای هوای داخل برابر با ۳۵/۶ - ۳۶/۸ می‌شود و همچنان خارج از محدوده آسایش حرارتی است، اما در میزان بار حرارتی صرفه‌جویی قابل توجهی ایجاد می‌گردد.

۳-۴. تأثیر سایه‌اندازی بر سازگاری حرارتی

در این مقاله از مدل سازگاری حرارتی (حیدری، ۱۳۹۳؛ ASHRAE 2010-55) جهت انجام مطالعات استفاده شده است که در این راستا ۳ پارامتر PTH، PTTT، PTC برای هر نمونه سایبان محاسبه شده است که در واقع درصد وجود آسایش حرارتی در طول سال را نشان می‌دهد برای مثال $PTC = 50$ ، $PTTH = 33.3$ و $PTTC = 16.67$ به ترتیب به این معناست که ۵۰٪ از اوقات سال (۶ ماه) آسایش حرارتی برقرار است، ۳۳.۳٪ از اوقات سال (۴ ماه) شرایط حرارتی داخل فضا بسیار گرم و ۱۶.۶۷٪ از اوقات سال (۲ ماه) شرایط حرارتی داخل فضا

سازگاری حرارتی به‌عنوان شاخص نهایی سنجش کیفیت سایه‌اندازی سایبان‌های خارجی نمونه مورد مطالعه: ساختمان مسکونی در شیراز

جدول ۷- ابعاد فیزیکی سایبان‌های بهینه - در هر گروه، ابعاد یکی از سایبان‌ها، به‌عنوان نماینده، نوشته شده است.

نوع تیغه	شماره تیغه‌ها	گروه ۱ PTC = 33.3%	گروه ۲ PTC = 41.6%	گروه ۳ PTC = 50%	گروه ۴ PTC = 58.3%	گروه ۵ PTC = 66.6%
تیغه‌های افقی (m)	تیغه ۱	1.2	0.36	0.576	1.13	1.2
	تیغه ۲	0.6	1.11	0.64	1.19	1.16
	تیغه ۳	0.6	1.09	0.9	0.67	1.13
	تیغه ۴	1.2	0.94	0.64	0.17	1.09
	تیغه ۵	1.2	1.08	0.08	0.72	1.06
	تیغه ۶	0.6	0.5	0.06	0.9	1.02
	تیغه ۷	0.6	0.06	0.74	0.63	0.98
	تیغه ۸	1.2	1.17	1.08	0.57	0.95
	تیغه ۹	1.2	1.17	0.12	1	0.91
	تیغه ۱۰	0.6	1.06	0.69	0.99	0.88
	تیغه ۱۱	0.6	1.02	0.8	0.48	0.84
	تیغه ۱۲	1.2	1.06	1.05	0.86	0.8
	تیغه ۱۳	1.2	1.02	0.13	0.97	0.77
	تیغه ۱۴	0.6	0.55	0.51	0.23	0.73
	تیغه ۱۵	0.6	0.86	1.05	0.72	0.7
	تیغه ۱۶	1.2	0.3	0.36	0.31	0.66
تیغه‌های عمودی (m)	تیغه ۱	3	0.51	0.81	0.84	3
	تیغه ۲	2.88	2.07	2.49	1.32	2.49
	تیغه ۳	2.76	2.04	1.35	3	1.98
	تیغه ۴	2.64	2.01	2.13	1.17	1.5
	تیغه ۵	2.52	2.07	2.43	1.59	1.5
	تیغه ۶	2.4	2.28	2.31	2.64	1.5
	تیغه ۷	2.28	2.97	2.16	2.1	1.5
	تیغه ۸	2.1	2.7	2.01	2.34	1.5
	تیغه ۹	2.1	0.87	2.79	2.94	1.5
	تیغه ۱۰	2.22	1.62	1.62	1.68	1.5
	تیغه ۱۱	2.34	1.86	2.16	1.35	1.5
	تیغه ۱۲	2.64	2.28	1.89	2.58	1.5
	تیغه ۱۳	2.58	2.64	2.13	1.17	1.5
	تیغه ۱۴	2.7	2.61	2.61	1.74	1.98
	تیغه ۱۵	2.82	1.83	1.17	0.6	2.49
	تیغه ۱۶	3	1.23	0.03	2.22	3
تیغه عمودی چپ (m)	3	1.62	0.33	1.71	3	
تیغه عمودی راست (m)	3	1.71	0.54	1.11	3	

واژه‌های مخفف

ASE	Annual Sun Exposure
ANN	Artificial Neural Network
CV (RMSE)	Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error
LHS	Latin Hypercube System
NMBE	Normalized Mean Bias Error
NSGA	Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
PTC	Percent of Time Comfortable
PTTC	Percent Of Time Too Cold
PTTH	Percent Of Time Too Hot
R2	Coefficient of Determination
sDA	spatial Daylight Autonomy
UDI	Useful Daylight Illuminance

نتیجه

این تحقیق تأثیر مستقیم سایه‌اندازی بر آسایش حرارتی را اثبات نمود و نشان داد که کاهش بار حرارتی و تأمین شاخص‌های روشنایی بدون در نظر گرفتن شرایط آسایش حرارتی نمی‌تواند معتبر باشد. بررسی ۲۴۴ نمونه سایبان بهینه این موضوع را به‌خوبی ثابت کرد که اگرچه می‌توان با یک سایه‌اندازی بهینه بار حرارتی را به میزان چشمگیری کاهش داد (بین ۵۳٪ تا ۷۳٪ کاهش بار سرمایشی و حدود ۸٪ تا ۱۰٪ کاهش بار گرمایشی) و هم‌زمان شاخص‌های روشنایی را نیز در حد استاندارد نگه داشت، اما درصد اوقاتی که آسایش حرارتی در فضای داخل برقرار است (PTC) می‌تواند بین ۳۳.۳٪ (۴ ماه) تا ۶۶.۶۷٪ (۸ ماه) در سال

در این پژوهش با کمک برداشت‌های میدانی از یک مدل واقعی و شبیه‌سازی و اعتبار سنجی آن، و سپس تولید یک سایبان پارامتریک خلاقانه بر روی مدل و تولید ۱۳,۶۰۰ نمونه سایبانی متنوع و با بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی و بهینه‌سازی، تأثیر سایه‌اندازی بر روی عملکردهای بار حرارتی، نور روز و سازگاری حرارتی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. پس از انجام بهینه‌سازی چندهدفه (با ۵ تابع هدف: بار سرمایش، بار گرمایش، ASE، sDA، UDI) و تولید نمونه‌های سایبان‌های بهینه، مقدار PTC به‌عنوان معیاری اساسی جهت سنجش کیفیت سایه‌اندازی مورد توجه قرار گرفت.

از سایر راهکارهای معماری فعال یا غیرفعال حس می‌شود. با این حال کاهش ۱۸ درجه‌ای دمای هوای داخل نسبت به مدل پایه، نشان‌دهنده کاهش چشمگیر مصرف انرژی می‌باشد. از سوی دیگر سایه‌اندازی بهینه در دوره سرد سال به راحتی شرایط بیش‌ازحد گرم و بیش‌ازحد سرد را حذف می‌کند و آسایش حرارتی را در طول دوره سرد تأمین می‌نماید. دوره سرد سال در شیراز کوتاه است و دمای هوا به ندرت به زیر صفر می‌رسد بنابراین با کنترل مناسب میزان نفوذ تابش به داخل، در طول روزهای زمستان، می‌توان شرایط آسایش حرارتی را به صورت غیرفعال برای فصل سرد در شیراز فراهم نمود.

متغیر باشد و این همان نکته‌ای است که معمولاً از نظر طراحان نادیده گرفته می‌شود. دستیابی به سایبانی که بتواند هم‌زمان بار حرارتی و شاخص‌های روشنایی را تأمین کند و حداکثر PTC را ایجاد نماید، نیازمند داشتن کیفیت بالای سایه‌اندازی است. به عبارتی باید میزان سایه‌اندازی بر روی نما در دوره گرم و سرد سال کاملاً کنترل شده و به میزان نیاز باشد. همچنین این تحقیق نشان داد که سایه‌اندازی بهینه در دوره گرم سال هرچند که موجب بهبود آسایش حرارتی می‌شود و دمای هوای داخل را بسیار کاهش می‌دهد (دمای هوای داخل نسبت به شرایط بدون سایبان می‌تواند تا ۱۸ درجه خنک‌تر شود)، اما نمی‌تواند آسایش حرارتی را به‌طور کامل ایجاد نماید و در نتیجه نیاز به استفاده

nance. *Applied Artificial Intelligence*. Apr. 16; 35(5): 373-92.

Asadi E, da Silva MG, Antunes CH, Dias L, Glicksman L. (2014). Multi-objective optimization for building retrofit: A model using genetic algorithm and artificial neural network and an application. *Energy Build*; 81: 444-56.

Ascione F, Bianco N, Mauro GM, Vanoli GP. (2019). A new comprehensive framework for the multi-objective optimization of building energy design: Harlequin. *Appl Energy*; 241:331-61.

Baldinelli G. (2009). Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. *Building and Environment*. 44(6): 1107-1118 doi:10.1016/j.buildenv.2008.08.005

Bessoudo M, Tzempelikos A, Athienitis AK, Zmeureanu R. (2010). Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices-Part I: Experiments and building thermal model. *Building and environment*. 2010 Nov 1; 45(11): 2506-16. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.013>.

Calama-Gonzalez CM, Suárez R, León-Rodríguez ÁL. (2022). Thermal comfort prediction of the existing housing stock in southern Spain through calibrated and validated parameterized simulation models. *Energy and Buildings*. Jan 1; 254: 111562.

Calixto-Aguirre I, Huelsz G, Barrios G, Cruz-Salas MV. (2021). Validation of thermal simulations of a non-air-conditioned office building in different seasonal, occupancy and ventilation conditions. *Journal of Building Engineering*. Dec 1; 44: 102922.

Carletti C, Sciarpi F, Pierangioli L, Asdrubali F, Pisello AL, Bianchi F, Sambuco S, Guattari C. (2016). Thermal and lighting effects of an external venetian blind: Experimental analysis in a full scale test room. *Building and Environment*. 2016 Sep 1; 106: 45-56. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.017>.

Carlucci S, Cattarin G, Causone F, Pagliano L. (2015). Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II). *Energy Build* 2015; 104: 378-94.

Chatzikonstantinou I, Sariyildiz S, Bittermann MS. (2015). *Conceptual airport terminal design using evolutionary computation*. In: IEEE congress on evolutionary computation; 2015. pp. 2245-52.

پی‌نوشت‌ها

1. Cooling Zone sizing.
2. Heating Zone Sizing.
3. Cooling Load.
4. Heating Load.
5. Annual Sun Exposure.
6. Special Daylight Autonomy.
7. Useful Daylight Illuminance.
8. Percent of Time Comfortable.
9. Percent of Time Too Hot.
10. Percent of Time Too Cold.

فهرست منابع

حیدری شاهین (۱۳۹۳)، *سازگاری حرارتی در معماری* (نخستین قدم در صرفه‌جویی مصرف انرژی)، چاپ اول، دانشگاه تهران، تهران.
طرح تفصیلی شیراز (۱۳۹۳)، ضوابط و مقررات شهرسازی و ساختمانی، ۳، مهندسان مشاور برنامهریز، شهر ساز و معمار شهر و خانه.

ASHRAE 55-(2010): *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Atlanta. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE 55 ASHRAE Standard 55-2010.

ASHRAE 14-(2014): *American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE). Guideline 14- Measurement of Energy and Demand Savings; Technical Report; American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers: Atlanta, GA, USA, 2014.

ASHRAE 14-(2002): *American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers*, ASHRAE Guideline 14-for Measurement of Energy and Demand Savings, Atlanta, GA.

Amini R, Ghaffarianhoseini A, Ghaffarianhoseini A, Berardi U. (2021). Numerical investigation of indoor thermal comfort and air quality for a multi-purpose hall with various shading and glazing ratios. *Thermal Science and Engineering Progress*. May 1; 22: 100812.

Andelkovic AS, Mujan I, Dakić S. (2016). Experimental validation of a EnergyPlus model: Application of a multi-storey naturally ventilated double skin façade. *Energy and Buildings*. Apr 15; 118: 27-36.

Arbab M, Rahbar M, Arbab M. (2021). A Comparative Study of Artificial Intelligence Models for Predicting Interior Illumi-

- energy consumption of temporary works in building construction: A case study in Hong Kong. *Building and Environment*. Sep 1; 142: 171-9. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.026>. <https://climatestudiodocs.com/docs/daylightLEEDOpt1.html>
- Jayathissa P, Luzzatto M, Schmidli J, Hofer J, Nagy Z, Schluter A. (2017). Optimising building net energy demand with dynamic BIPV shading. *Applied Energy*. Sep 15; 202: 726-35. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.083>.
- Karaman S, Ekici B, Cubukcuoglu C, Koyunbaba BK, Kahraman I. (2017). Design of rectangular façade modules through computational intelligence. In: 2017. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*. pp. 1021-8.
- Khoroshiltseva M, Slanzi D, Poli I. (2016). A Pareto-based multi-objective optimization algorithm to design energy-efficient shading devices. *Applied Energy*. Dec 15; 184: 1400-10. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.015>
- Kirimtat A, Koyunbaba BK, Chatzikonstantinou I, Sariyildiz S, Suganthan PN. (2016). Multi-objective optimization for shading devices in buildings by using evolutionary algorithms. *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. doi:10.1109/cec.2016.7744286
- Kirimtat A, Koyunbaba BK, Chatzikonstantinou I, Sariyildiz S. (2015). Review of simulation modeling for shading devices in buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 23-49, Jan. 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.08.020.
- Kirimtat A, Krejcar O, Ekici B, Tasgetiren MF. (2019). Multi-objective energy and daylight optimization of amorphous shading devices in buildings. *Solar Energy*. Jun 1; 185: 100-11.
- Levy S, Steinberg DM. (2015). Computer experiments: a review. *ASSTA Advances in Statistical Analysis*. 2010 Dec; 94(4): 311-24. doi:10.1016/j.rss.12.002
- Lim YW, Kandar MZ, Ahmad MH, Ossen DR, Abdullah AM. (2012). Building façade design for daylighting quality in typical government office building. *Building and Environment*. 2012 Nov 1; 57: 194-204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.04.015>.
- Liu S, Kwok YT, Lau KK, Chan PW, Ng E. (2019). Investigating the energy saving potential of applying shading panels on opaque façades: A case study for residential buildings in Hong Kong. *Energy and Buildings*. 2019 Jun 15; 193: 78-91. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.044>.
- Loepky JL, Sacks J, Welch WJ. (2009). Choosing the sample size of a computer experiment: A practical guide. *Technometrics*. Nov 1; 51(4): 366-76. <http://dx.doi.org/10.1198/TECH.2009.08040>
- Mandalaki M, Zervas K, Tsoutsos T, Vazakas A. (2012). Assessment of fixed shading devices with integrated PV for efficient energy use. *Solar Energy*. Sep 1; 86(9): 2561-75. doi:10.1016/j.solener.2012.05.026
- Mangkuto RA, Feradi F, Putra RE, Atmodipero RT, Favero F. (2018). Optimisation of daylight admission based on modifications of light shelf design parameters. *Journal of Building Engineering*, 18, 195-209. doi:10.1016/j.job.2018.03.007
- Mangkuto RA, Koerniawan MD, Soelami FN. (2021). Daylight Annual Illuminance Investigation in Elementary School
- Cho J, Yoo C, Kim Y. (2014). Viability of exterior shading devices for high-rise residential buildings: Case study for cooling energy saving and economic feasibility analysis. *Energy and Buildings*. 2014 Oct 1; 82: 771-85.
- Chollet F. Keras [WWW Document]. GitHub. URL <https://github.com/fchollet/keras>. 2015.
- Chua KJ, Chou SK. (2010). *Evaluating the performance of shading devices and glazing types to promote energy efficiency of residential buildings*. In Building Simulation. Sep (Vol. 3, No. 3, pp. 181-194). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s12273-010-0007-2>.
- Ciro GC, Dugardin F, Yalaoui F, Kelly R. (2016). A NSGA-II and NSGA-III comparison for solving an open shop scheduling problem with resource constraints. *IFAC-PapersOnLine* 2016; 49(12): 1272-7.
- Coakley D, Raftery P, Molloy P. (2012). Calibration of whole building energy simulation models: detailed case study of a naturally ventilated building using hourly measured data. *Proceedings First Building Simulation and Optimization Conference*. 57-64.
- Da Fonseca RW, Didoné EL, Pereira FO. (2013). Using artificial neural networks to predict the impact of daylighting on building final electric energy requirements. *Energy and Buildings*. 2013 Jun 1; 61: 31-8. doi: 10.1016/j.enbuild.02.009.
- Dahanayake KK, Chow CL. (2016). Studying the potential of energy saving through vertical greenery systems: Using EnergyPlus simulation program. *Energy and Buildings*. 2017 Mar 1; 138: 47-59. doi:10.1016/j.enbuild.12.002.
- Deb K, Jain H. (2013). An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints. *IEEE Trans Evol Comput*; 18(4): 577-601.
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans Evol Comput*; 6(2): 182-97.
- Eltaweel A, Su Y. (2017). Controlling venetian blinds based on parametric design; via implementing Grasshopper's plugins: A case study of an office building in Cairo. *Energy and Buildings*, 139, 31-43. doi:10.1016/j.enbuild.2016.12.075
- Emmerich MT, Deutz AH. (2018). A tutorial on multiobjective optimization: fundamentals and evolutionary methods. *Nat Comput*; 17(3): 585-609.
- Fang Y, Cho S. (2019). Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance. *Solar Energy*. 2019 Oct 1; 191: 7-18. doi: 10.1016/j.solener.2019.08.039.
- Hall MR. (2010). *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*. Woodhead Publishing Series in Energy, eBook ISBN: 9781845699277.
- Hashemi N, Fayaz R, Sarshar M. (2010). Thermal behaviour of a ventilated double skin facade in hot arid climate. *Energy and Buildings*. Volume 42, Issue 10, pp. 1823-1832, ISSN 0378-7788. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.019>.
- Hossain MU, Poon CS. (2018). Global warming potential and

- Sghoui H, Mezrhab A, Karkri M, Naji H. (2018). Shading devices optimization to enhance thermal comfort and energy performance of a residential building in Morocco. *Journal of Building Engineering*. Jul 1;18:292-302.
- Sherif A, El-Zafarany A, Arafa R. (2012) External perforated window Solar Screens: The effect of screen depth and perforation ratio on energy performance in extreme desert environments. *Energy and Buildings*, 52, pp. 1-10. doi:10.1016/j.enbuild.2012.05.025
- Sima E, Chagolla-Aranda MA, Huelsz G, Tovar R, Alvarez G. (2015) Tree and neighboring buildings shading effects on the thermal performance of a house in a warm sub-humid climate. *Building Simulation*, 8(6): 711–723. doi:10.1007/s12273-015-0247-2
- Singh R, Lazarus IJ, Kishore VV. (2016) Uncertainty and sensitivity analyses of energy and visual performances of office building with external venetian blind shading in hot-dry climate. *Applied Energy*. 2016 Dec 15;184:155-70. doi:10.1016/j.apenergy.2016.10.007
- Stazi F, Marinelli S, Di Perna C, Munafò P. (2014). Comparison on solar shadings: Monitoring of the thermo-physical behaviour, assessment of the energy saving, thermal comfort, natural lighting and environmental impact. *Solar Energy*. 2014 Jul 1; 105: 512-28. doi:10.1016/j.solener.2014.04.005
- Szandala T. (2021). *Review and comparison of commonly used activation functions for deep neural networks*. In *Bio-inspired neurocomputing* (pp. 203-224). Springer, Singapore.
- Tabadkani A, Valinejad Shoubi M, Soflaei F, Banihashemi S. (2019) Integrated parametric design of adaptive facades for user's visual comfort, *Automation in Construction*, Volume 106, 102857, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102857>.
- Taveres-Cachat E, Lobaccaro G, Goia F, Chaudhary G. A. (2019). methodology to improve the performance of PV integrated shading devices using multi-objective optimization. *Applied energy*. Aug 1; 247: 731-44. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.033>.
- TensorFlow Team. TensorFlow: (2015) *Large-scale machine learning on heterogeneous systems*.
- Tian W, Heo Y, De Wilde P, Li Z, Yan D, Park CS, Feng X, Augenbroe G. (2018). A review of uncertainty analysis in building energy assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Oct 1; 93: 285-301. doi:10.1016/j.rser.2018.05.029
- Toutou A, Fikry M, Mohamed W (2018). The parametric based optimization framework daylighting and energy performance in residential buildings in hot arid zone. *Alexandria engineering journal*. Dec 1; 57(4): 3595-608.
- Valladares-Rendon LG, Lo SL. (2014) *Passive shading strategies to reduce outdoor insolation and indoor cooling loads by using overhang devices on a building*. In *Building Simulation Dec (Vol. 7, No. 6, pp. 671-681)*. Springer Berlin Heidelberg. doi. 10.1007/s12273-014-0182-7
- Valladares-Rendon LG, Schmid G, Lo SL. (2017) Review on energy savings by solar control techniques and optimal building Classrooms for the Tropic of Lhokseumawe, Indonesia. *Journal of Applied Science and Engineering*. Jul;25(1):129-39.
- Manzan M, Clarich A. (2017). FAST energy and daylight optimization of an office with fixed and movable shading devices. *Building and Environment*. Feb 15;113:175-84. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.035>.
- Marszal AJ, Heiselberg P, Bourrelle JS, Musall E, Voss K, Sartori I. (2011). Napolitano A. Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies, *Energy and Buildings*, Volume 43, Issue 4, Pages 971-979, ISSN 0378-7788. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022>.
- Naderi E, Sajadi B, Behabadi MA, Naderi E. (2020). Multi-objective simulation-based optimization of controlled blind specifications to reduce energy consumption, and thermal and visual discomfort: Case studies in Iran. *Building and Environment*. Feb 1; 169: 106570. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106570>.
- Pal SK, Takano A, Alanne K, Siren K. (2017). A life cycle approach to optimizing carbon footprint and costs of a residential building. *Building and Environment*, 123, 146–162. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.051>.
- Park JH, Yun BY, Chang SJ, Wi S, Jeon J, Kim S. (2020). Impact of a passive retrofit shading system on educational building to improve thermal comfort and energy consumption. *Energy and Buildings*. 2020 Jun 1; 216:109930. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109930>.
- Pulido-Arcas JA, Rubio-Bellido C, Perez-Fargallo A, Oropeza-Perez I. (2020). *Zero-Energy Buildings - New Approaches and Technologies*, Net-Zero Energy Buildings: Principles and Applications (chapter 4). ISBN: 978-1-78985-246-2. doi:10.5772/intechopen.87727
- Ramos Ruiz G, Fernandez Bandera C. (2017). Validation of calibrated energy models: Common errors. *Energies*. Oct 12; 10(10): 1587. doi:10.3390/en10101587
- Razmi A, Rahbar M, Bemanian M. (2021). PCA-ANN integrated NSGA-III framework for dormitory building design optimization: Energy efficiency, daylight, and thermal comfort. *Appl. Energy*, vol. 305, no. September 2021, p. 117828, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117828.
- Salam A, El Hibaoui A, Saif A. (2021). A comparison of activation functions in multilayer neural network for predicting the production and consumption of electricity power. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. Feb 1; 11(1): 163-70.
- Samadi S, Noorzai E, Beltrán LO, Abbasi S. (2020) A computational approach for achieving optimum daylight inside buildings through automated kinetic shading systems. *Frontiers of Architectural Research*. Jun 1; 9(2): 335-49. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.10.004>.
- Sang Y, Zhao JR, Sun J, Chen B, Liu S. (2017). Experimental investigation and EnergyPlus-based model prediction of thermal behavior of building containing phase change material. *Journal of Building Engineering*. Jul 1; 12: 259-66. doi:10.1016/j.job.2017.06.011

ment. Jun 1; 156: 178-90.

Yufka M, Ekici B, Cubukcuoglu C. (2017). Chatzikonstantinou I, Sariyildiz IS. Multi-Objective skylight optimization for a healthcare facility foyer space. In: 2017. *IEEE congress on evolutionary computation*. pp. 1008–14.

Zhang F, Cheng L, Wu M, Xu X, Wang P, Liu Z. (2020). Performance analysis of two-stage thermoelectric generator model based on Latin hypercube sampling. *Energy Conversion and Management*. 2020 Oct 1; 221: 113159. doi:10.1016/j.enconman..113159

Zhao J, Du Y. (2020). Multi-objective optimization design for windows and shading configuration considering energy consumption and thermal comfort: A case study for office building in different climatic regions of China. *Solar Energy*. Aug 1; 206:997-1017. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.090>

orientation for the strategic placement of façade shading systems. *Energy and Buildings*. 2017 Apr 1; 140: 458-79. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.073>.

Viana FA. (2016). A tutorial on Latin hypercube design of experiments. *Quality and Reliability Engineering International*. Jul; 32(5): 1975-85. doi:10.1002/qre.1924

Wagdy A, Fathy F, Altomonte S. (2016). Evaluating the daylighting performance of dynamic façades by using new annual climate-based metrics. *PLEA (the 32nd Int. Conf. Passiv. Low Energy Archit.*, no. July, pp. 941–947, 2016.

Yeon S, Yu B, Seo B, Yoon Y, Lee KH. (2019). ANN based automatic slat angle control of venetian blind for minimized total load in an office building. *Sol. Energy*, vol. 180, no. January, pp. 133–145, 2019, doi: 10.1016/j.solener.01.027.

Yi YK. (2019). Building facade multi-objective optimization for daylight and aesthetical perception. *Building and Environ-*

Adaptive Thermal Comfort as the Final Metric for Evaluating the Quality of the Exterior Shading on Building Envelopes; Case Study: A Residential Building in Shiraz, Iran*

*Niloofar Hashemi¹, Shahin Heidari^{**2}, Morteza Rahbar³*

¹Phd Candidate of Architecture, Department of Architecture, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran.

²Professor, Department of Architecture, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.

³Assistant Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

(Received: 12 May 2022, Accepted: 23 Aug 2022)

One of the main problems in the world is global warming, which is caused by the building sector and carbon emissions. Researchers have come to the conclusion that managing and reducing building energy consumptions and promoting sustainable building practices are crucial. Particularly in hot areas, exterior shading devices are one of the most significant and useful criteria for sustainable passive architecture design. They can have an impact on managing the building's energy resources, including thermal load, daylight, and adaptive thermal comfort. The application of the shadings is highly effective when shading design parameters have carefully and accurately been studied and designed because an inefficient shading device can easily increase the thermal load and create glare or darkness at the same time, or while keeping daylight indicators within the standard range, increase energy consumptions. Although many studies have investigated the design parameters of exterior shading devices including dimensions, materials, and the location of installation through optimization methods, it seems that none of the researches have considered the effect of shade quality on building performances. To investigate the quality of shading, through field measurement in a residential building in Shiraz, Iran, a model was simulated and validated and then a novel parametric exterior fixed shading device added to the model was created in grasshopper plugin which was able to produce a variety range of shadings. A large dataset of 13600 samples of the parametric shading was produced by applying the LHS technique, which created an outspread community of shading samples and executed the energy simulation for each sample. Then this large data set was used to train and test an Artificial Neural Network (ANN). This ANN was applied as a fast emulator and the searching space for multi-objective optimization through NSGA_III algorithm. The major goals in the optimization process are considered to be the least cooling and heating load, the minimum annual sun ex-

posure (ASE), the maximum spatial daylight autonomy (sDA), and the minimum useful daylight illumination (UDI). These five functions are considered as independent variables. Finally, using an adaptive thermal comfort model, the Pareto front solutions have been categorized based on the Percent of Time Comfortable (PTC). This classification clearly demonstrates that although the optimized shading devices can keep the daylight standard indicators (ASE, sDA, and UDI) within acceptable ranges and reduce the cooling load from 53% to 73% and the heating load by from 8% to 10%, the values of PTC could vary by as much as 33.3% (i.e. 4 months of the year) to 66.67% (i.e. 8 months of the year). This range in PTC value is significant because, although certain optimal shading devices can maintain the PTC in interior spaces at 33.3%, other cases with the same rate of energy saving and daylight standard indicators can raise the PTC value to 66.67%. Therefore, this paper introduces the PTC in adaptive thermal comfort model as a new metric for evaluating the quality of the shading produced by any shading device types.

Keywords

Parametric Shading Devices, Latin Hypercube Sampling Technique, Artificial Neural Network, Multi-Objective Optimization, Adaptive Thermal Comfort.

*This article is extracted from the first author's doctoral dissertation, entitiled: "The impact of exterior shading on the building energy performance; with the approach of artificial intelligent in the city of Shiraz" under the supervision of the second and third authors.

**Corresponding Author: Tel: (+98-021) 61112496, Fax: (+98-021) 66490161, E-mail: shheidari@ut.ac.ir.