طراحی بهینه هندسه ساختمان و بازشوها با رویکرد انرژی- نورکارآیی

قدسیه سادات نجفی[1]، یوسف گرجی مهلبانی*[2] و پیمان پیله‌چی‌ها[3]

تاریخ دریافت: 1400/08/22
تاریخ پذیرش: 1401/02/29

چکیده

مقدمه: استفاده مناسب از نور روز، استفاده از منبع رایگان روشنایی است و توجه به کمیت و کیفیت آن، از بعد مصرف انرژی نیز در مراحل اولیه طراحی معماری مهم است. استراتژی موفق آن است که در عین بهره‌مندی از نور روز، مصرف انرژی را نیز کاهش دهد. با توجه به اینکه تغییر در هندسه فرم بنا می‌تواند پاسخ‌های متفاوتی (و حتی بعضا متضادی) در بحث نور و انرژی داشته باشد، یافتن فرم بهینه هندسی ساختمان اهمیت دوچندانی پیدا می‌کند. به‌علاوه دانستن اینکه کدام پارامترهای هندسی تأثیر بیشتری بر تعادل بخشی به دریافت نور مناسب و کاهش مصرف دارد نیز سوأل دیگری است که این پژوهش در پی پاسخ به آن است. بهینه‌سازی ساختمان در یافتن راه‌حل بهینه طراحی و بهبود کارایی ساختمان مؤثر است این در حالی است که این فرآیند همواره با عدم قطعیت همراه است. باوجود تأثیر بالای فرآیند تحلیل حساسیت در تحلیل عملکرد انرژی ساختمان و کاهش زمان شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پژوهش‌های اندکی در این زمینه انجام شده است. این پژوهش به دنبال بهینه‌سازی تناسبات هندسه‌ی یک ساختمان اداری در شهر قم (اقلیم گرم‌وخشک) است.

روش تحقیق:روش این پژوهش از چهار بخش اصلی: مدل‌سازی (مدل‌سازی نور، مدل‌سازی انرژی)/اجرای فرآیند شبیه‌سازی/اجرای فرآیند بهینه‌سازی/اجرای فرآیند تحلیل حساسیت.

نتایج و بحث: شبیه‌سازی مقداری نور و انرژی در مدل پایه پژوهش انجام شده و پارامترهای هندسی طول، عرض و ارتفاع ساختمان و همچنین اندازه پنجره شمالی و جنوبی و تعداد سایه‌بان در مدل‌های مختلف به کمک الگوریتم ژنتیک بررسی‌شد تا مدل‌های بهینه استخراج شود. سپس تأثیر این پارامترهای هندسی بر اهداف پژوهش و عدم قطعیت آن‌ها به کمک محاسبات ریاضی در روش تحلیل حساسیت سراسری و بر مبنای شاخص SRC انجام و پارامترها رتبه‌بندی شد. این شاخص بر مبنای محاسبات ریاضی و رگرسیون‌های خطی تحلیل حساسیت را انجام می‌دهد.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از پژوهش حاکی از آن است که در مدل بهینه، نسبت طول به عرض ساختمان 1.13 و نسبت پنجره به دیوار برای جبهه جنوبی ساختمان 43 درصد و نسبت پنجره به دیوار برای جبهه شمالی ساختمان 10 درصد است و تعداد سایه‌بان جبهه جنوبی 2 عدد است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت حاکی از آن است که طول اتاق و بعد از آن عرض اتاق مؤثرترین پارامترهای هندسی ساختمان دررسیدن به یک طراحی انرژی-نور کارآ در بستر این پژوهش بود.

واژگان کلیدی: تحلیل حساسیت، بهینه‌سازی، نور روز، هندسه ساختمان، الگوریتم ژنتیک.

این مقاله برگرفته از رساله کارشناسی ارشد نگارنده اول با عنوان: طراحی و بهینه سازی پوسته ساختمان اداری در اقلیم گرم‌وخشک با رویکرد کاهش مصرف انرژی ساختمان به راهنمایی نگارنده دوم و مشاوره نگارنده سوم در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) است.

[1] **کارشناسی ارشد،** معماری و انرژی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
[2] **استاد،**گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران. (نویسنده مسئول) gorji@arc.ikiu.ac.ir
[3] **دکتری** معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

1- مقدمه

طراحی سنتی ایران همواره توجه ویژه‌ای به طراحی اقلیمی داشته است و به دنبال مقابله با شرایط سخت آب و هوایی و دستیابی به آسایش در فضاست. درگذشته این علوم به کمک آزمایش‌های عملی و به مرورزمان به دست آمده است. این آزمایش‌ها بسیار زمان‌بر و پرهزینه است، اما امروزه به کمک شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای می‌توان علاوه بر زمان در هزینه نیز صرفه‌جویی کرد. در دهه‌های مختلف شبیه‌سازهای رایانه‌ای کمک شایانی به پژوهشگران در حوزه مهندسی و طراحی داشته‌اند تا طراحان و پژوهشگران بتوانند رفتار ساختمان را تا حد قابل توجهی تجزیه‌وتحلیل کنند. در این بین آگاهی از دانش محاسباتی در این حوزه می‌تواند علاوه بر هوشمند کردن شبیه‌سازی، زمان فرآیند را مدیریت کند. یکی از این روش‌ها استفاده از بحث‌های آماری و به‌طور ویژه تحلیل حساسیت است که به کمک آن می‌توان درک بهتری از رفتار ساختمان به دست آورد.

امروزه الزامات عملکردی مصرف انرژی ساختمان‌ها به‌تدریج و باهدف کاهش مصرف انرژی و کاهش اثرات محیطی روند رو به رشدی را دنبال می‌کند، این در حالی است که آگاهی عمومی به طور فزاینده‌ای در حال رشد است و تأثیرات نسبی زیست‌محیطی از مرحله ساخت‌وساز در مقایسه با مرحله بهره‌برداری افزایش پیداکرده است. همچنین به‌منظور افزایش تأثیرات روش‌های بهینه‌سازی بهتر است در مراحل اولیه ساخت‌وساز مورد ارزیابی قرار بگیرد. (Miles et.al, 2001)

در این میان ساختمان‌ها سهم عمده‌ای در مصرف انرژی دارند به همین جهت طراحی ساختمان تأثیر مستقیم بر روی مصرف انرژی کل کشور دارد. امروزه در آغاز هزاره سوم، انجمن تبرید آمریکایی (ASHRAE) در بخش مهندسی گرمایش و تهویه مطبوع طراحی ساختمان خوب را شامل موارد زیر می‌داند: فراهم کردن نیازهای مالکین و ساکنان، رعایت کلیه استانداردها و مقررات، فراهم کردن کیفیت محیط داخلی، احترام به محیط تاریخی و توجه به ویژگی‌های فرهنگی و توجه به احساسات ساکنین و بیننده فضا. (Michel Samaan et.al, 2018)

پوسته ساختمان نخستین عنصر پیونددهنده انسان با ساختمان است و در انتقال حرارت نقش به‌سزایی دارد. لذا طراحی هدفمند از جمله مواردی است که باید مورد توجه طراحان قرار بگیرد. طراحان و مهندسان در فرآیند طراحی همواره با محدودیت‌های اجتماعی، زیست‌محیطی، اقتصادی و زیبایی‌شناسی روبرو هستند اما با توجه به شرایط کنونی و نگرانی‌های ناشی از مصرف انرژی و آلودگی‌های ناشی از آن امروزه طراحی ساختمان بیش از پیش پیچیده شده است(Kheiri, 2018). طراحی کارآمد می‌تواند تأثیر مثبتی بر میزان مصرف انرژی و روشنایی داشته باشد. این امر نیز به کمک طراحی بهینه نیز امکان‌پذیر خواهد بود. پنجره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رفاه و آسایش سرنشینان لحاظ شده است. همچنین پنجره‌ها نه‌تنها در تأمین روز نقش مهمی دارند بلکه در میزان مصرف انرژی نیز مؤثر خواهند بود(Mangkuto, 2018).

1-1-پیشینه پژوهش

مطالعات بسیاری در زمینه نور روز و انرژی انجام شده که ابعاد وسیعی را شامل می‌شوند، این پژوهش‌ها در زمینه های مختلفی از جمله ابعاد بهینه پنجره از لحاظ دریافت نور خورشید، میزان اتلاف انرژی و تولید کربن دی‌اکسید انجام شده است که تأثیر پارامترهای مؤثر بر پنجره از جمله انواع شیشه از نظر اتلاف حرارتی، قاب پنجره و درزبندی آن و ... در آن‌ها مورد بررسی قرارگرفته است. پنجره‌ها به دلیل تأثیر مثبتی که در سلامت و رفاه ساکنین دارند به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای ساختمان محسوب می‌شوند. همچنین پنجره‌ها علاوه بر تأمین نور روز، در دید نیز نقش مهمی دارند. امروزه طراحان در تلاش برای به حداکثر رساندن میزان نفوذ نور روز هستند که در این بین تناقضاتی رخ می‌دهد که به خاطر وجود پنجره‌های بزرگ است. این در حالی است که برای کاهش مصرف انرژی لازم است تا از پنجره‌های کوچک استفاده شود (Kim & Wineman, 2005).

پنجره از مهم‌ترین عناصر پوسته ساختمان است که سهم قابل توجهی در مصرف انرژی ساختمان دارد. ارتفاع پنجره از کف، طول و عرض پنجره، نوع و مصالح پروفیل پنجره و نوع شیشه از مهم‌ترین عواملی هستند که بر

میزان دریافت نور طبیعی و مصرف انرژی تأثیر خواهد گذاشت (Bakhtiari morjani & Mohammadkari, 2012) (Mantserkohasari et.al, 2013), همچنین اگر پنجره‌ها دارای سایه‌بان باشند مصرف انرژی در حدود 20 درصد کاهش پیدا خواهد کرد. طراحی سایه‌بان برحسب جهت جغرافیایی وابسته به طول سایه‌بان، عرض سایه‌بان، ضخامت سایه‌بان، جنس سایه‌بان، فاصله قرارگیری از پنجره، زاویه سایه‌بان و تعداد آن است. بهینه‌سازی سایه‌بان‌ها به کمک نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مختلف همچون دیزاین بیلدر[1] و انرژی پلاس[2] و بر مبنای الگوریتم ژنتیک[3] و الگوریتم ترکیب سطوح انجام می‌شود (Manzan & Clarich, 2017)، (Mirrahimi et.al, 2016)، (Bichiou et.al. 2011)، (Khoroshiltseva et.al, 2016)، (Mangkuto et.al, 2016).

مطالعات بسیاری در زمینه نور روز و انرژی صورت گرفته است که ابعاد وسیعی را شامل می‌شوند، این تحقیقات در زمینه‌های مختلفی از جمله ابعاد بهینه پنجره از لحاظ دریافت نور خورشید، میزان اتلاف انرژی و تولید کربن دی‌اکسید انجام‌شده است که تأثیر پارامترهای مؤثر بر پنجره از جمله انواع شیشه از نظر اتلاف حرارتی، قاب پنجره و درزبندی آن و ... در آن‌ها مورد بررسی قرارگرفته است (Mohammadi & Mofidi Shemiraniemail, 2019)

مطالعات اولیه در خصوص تأثیر پوسته ساختمان حاکی از آن است که عواملی چون نسبت طول به عرض و هندسه ساختمان تأثیر به‌سزایی در مصرف انرژی ساختمان دارند. به طور عمده هندسه مستطیلی و ذوزنقه‌ای کمترین میزان مصرف انرژی را دارا هستند از آنجا که نسبت طول به عرض وابسته به اقلیم است این نسبت در اقلیم‌های سرد بزرگ‌تر است (Thuhus-Dubrow & Krati, 2010), (Yi, 2019), (Lu et.al 2020), (Fang et.al. 2019), (Fang & Cho, 2019), (Bichiou & Karti, 2011).

از دیگر عواملی که در میزان مصرف انرژی مؤثر خواهد بود هندسه سقف و میزان بازتاب آن است که این امر وابسته به میزان دریافت تابش خورشیدی است (Rakha & Nassar, 2011), (Caruso & Kämpf, 2015). عامل دیگر جنس، جهت‌گیری پوسته ساختمان و تعداد جداره‌ها است که منجر به کاهش محسوس دمای داخل ساختمان و احساس رضایت بیشتر آن‌ها و به دنبال آن کاهش مصرف انرژی خواهد بود (Khatami et.al, 2013), (Madhaghi & Abbasi, 2017) (Güçyeter & Günaydın, 2012), (Gossard et.al, 2013), (Tuhus-Dubrow et.al. 2010).

یکی از عوامل بسیار مؤثر در میزان نور دریافتی و مصرف انرژی هندسه ساختمان است که پیچیدگی یا سادگی آن نیز در زمینه مصرف انرژی بسیار مؤثر است همچنین هندسه قطعات می‌تواند به‌گونه‌ای انتخاب شود که قابلیت چرخش داشته باشد و ورود نور روز به فضا را کنترل کنند و از ایجاد خیرگی جلوگیری کند (Mahmoud & Elghazi, 2016)، (Mahdavinejad & Nazar, 2017)، (Hachem-Vermette, 2018).

پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص بهینه‌سازی عملکرد ساختمان حاکی از اهمیت هندسه ساختمان و بازشوها در خصوص بحث آسایش حرارتی و نور روز و آسایش بصری است. این در حالی است که در پژوهش‌های مختلف اهمیت وزنی پارامترهای مختلف مورد ارزیابی قرار نگرفته است به‌عنوان مثال پژوهش (Pilechiha et.al, 2020)به دنبال یافتن بهینه‌ترین تناسبات هندسه ساختمان و موقعیت قرارگیری پنجره از لحاظ تأمین نور، کاهش مصرف انرژی و افزایش دید به بیرون بوده است، این در حالی است که پارامترهای مؤثر در بحث نور روز و دید مشخص نشده است به طور مثال در تعیین پنجره بهینه اولویت پارامتر طول نسبت به عرض یا بالعکس مشخص نشده است. بنابراین پژوهش حاضر به دنبال مشخص کردن بهینه‌ترین پاسخ در مسأله مطرح شده به عبارت‌دیگر تعیین اولویت پارامترهاست.

مطالعات صورت گرفته در خصوص بهینه‌سازی پوسته ساختمان با استفاده از رگرسیون‌های بهینه‌سازی حاکی از آن است که درصورتی‌که از متا مدل‌ها استفاده شود زمان آنالیز افزایش پیدا خواهد کرد ولی به دنبال آن دقت نتایج بالاتر می‌رود. همچنین الگوریتم‌های بهینه‌سازی امکان بررسی چندین متغیر از جمله جنس مصالح، عایق حرارتی و تعداد جداره را فراهم می‌آورد. در نهایت به کمک این روش میزان مصرف انرژی به‌طور محسوسی کاهش پیدا خواهد کرد (Romani et.al, 2015).

بررسی پارامترهای مختلف هندسی ساختمان به کمک روش تحلیل حساسیت موریس حاکی از آن است که جهت‌گیری ساختمان بیشتر تأثیر را نسبت به

پارامترهای ضریب انتقال حرارتی دیوارهای خارجی، ضریب جذب سطوح دیوارهای خارجی، ضخامت عایق پشم‌شیشه، عمق سایه‌بان، نسبت مساحت بازشو به دیوار، زاویه ساختمان نسبت به جنوب، نرخ نفوذ هوای پنجره، ضریب عبور نور مرئی، نوع شیشه و ضریب بازتاب سطوح داخلی در مصرف انرژی و نور روز دارند (Mohammadzadeh et.al, 2019).

پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص مصرف انرژی در حوزه ساختمان اداری و تهیه استانداردهایی در این زمینه حاکی از آن است که درصورتی‌که میزان مصرف انرژی سالیانه در بازه (0-70) کیلووات ساعت باشد بیشترین کارآیی را خواهد داشت و در صورتی‌که در بازه 420-490 کیلووات ساعت قرار بگیرد کمترین کارآیی را خواهد داشت (Bagheri et.al, 2013).

بررسی‌های صورت گرفته در حوزه بهینه‌سازی ساختمان حاکی از آن است برخی از عوامل موثر مانند مصالح دیوار، هندسه سقف، پنجره و تعداد سایه‌بان در پژوهش‌های مختلف مورد ارزیابی قرارگرفته است. به منظور بررسی در دسترس بودن نور روز در فضاهای اداری لازم است تا سایر پارامترهای مرتبط با مصرف انرژی و نور روز در ساختمان از جمله تعداد سایه‌بان، تناسبات ساختمان (طول، عرض و ارتفاع) و نسبت پنجره به دیوار نیز مورد ارزیابی قرار بگیرد. اهمیت بهینه‌سازی دو هدفه از آن جهت است که پاسخ‌های مطلوب و بهینه نور روز با پاسخ‌های بهینه انرژی بعضا متضاد هستند و این امر از مواردی است که پیش از این در سایر پژوهش‌ها بدان کمتر توجه شده است. هدف این پژوهش بهینه‌سازی تناسبات هندسه ساختمان اداری و نسبت پنجره به دیوار و تعداد سایه‌بان به‌منظور کاهش مصرف انرژی و دریافت بهینه و حداکثری نور روز بر مبنای الگوریتم ژنتیک است. منظور از فرآیند بهینه‌سازی یافتن نقاط کمینه از بعد مصرف انرژی و نقاط بیشینه از بعد دریافت نور روز بر اساس تابع هدف است. در این پژوهش ساختمانی اداری واقع در اقلیم گرم‌وخشک به عنوان نمونه موردی شهر تهران در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه هندسه ساختمان و پنجره‌ها اهمیت بالایی در اتلاف انرژی و جذب خورشیدی به واسطه اتلاف گرما دارند و همچنین عدم توجه پژوهش‌های پیشین بر این پارامترها، تمرکز این پژوهش بر این موارد است. لذا با تغییر پارامترهای متفاوت همچون نسبت پنجره به دیوار، میزان عمق سایه‌بان و ... به بهبود دریافت نور طبیعی و کاهش مصرف انرژی پرداخته شده است. رویکرد این پژوهش بهینه‌سازی عملکرد نور و انرژی هندسه پوسته ساختمان و پنجره و سایه‌بان به منظور ارزیابی عملکرد انرژی و نور روز است. همچنین نظر به اهمیت تعیین پارامترهای مؤثر در فرآیند بهینه‌سازی و تمرکز طراحان بر این موارد لازم است تا تحلیل حساسیت مبنی بر پارامترهای انجام شود. به کمک تحلیل حساسیت می‌توان مؤثرترین پارامترها در نتایج شبیه‌سازی نور روز و انرژی را مشخص کرد، همچنین می‌توان رفتار ساختمان را با توجه به میزان حساسیت نسبت به پارامترهای مختلف پیش‌بینی کرد. تجزیه‌وتحلیل حساسیت در این پژوهش بر اساس شاخص رگرسیون خطی چندگانه SRC انجام‌شده است. همان‌گونه که رفتار ساختمان نیز به صورت حالتی پویا و غیرخطی است لازم است تا تجزیه‌وتحلیل آن نیز به کمک روش‌های غیرخطی بررسی شود.

2-1- مبانی نظری

1-2-1-نور روز مفید [4]

به نسبت تعداد ساعاتی از سال که نور روز در محدوده مفید است به تعداد ساعتی در سال که فضا توسط ساکنین اشغال شده است نور روز مفید گفته می‌شود (Arab Anwari & Fayaz, 2018)، (Reinhart et.al, 2006). نور روز مفید دارای سه بازه زیر 100 لوکس، بین 100 تا 2000 لوکس و بالای 2000 لوکس است، که بازه مطلوب بازه 100 تا 2000 لوکس است. نور روز حالتی پویا دارد و میزان آن از صبح تا عصر متغیر است. نور مستقیم خورشید در حالت آفتابی به 100000 لوکس می‌رسد و در حالت ابری به عدد 10000 لوکس می‌رسد و همچنین به‌منظور اثربخشی سطح نور باید بیشتر از 1000 لوکس باشد. نور روز دارای پارامترهای بصری مانند شدت، طیف، مدت (الگو)، تاریخچه و زمان‌بندی است و این موضوع منجر به پیچیده کردن فرآیند آنالیز و شبیه‌سازی می‌شود زیرا این عوامل به یکدیگر وابسته و در تعامل هستند (Preto & Gomes, 2011). مزیت اصلی معیارهای پویا در کارایی نور نسبت به معیارهای

ایستا، در لحاظ نمودن کیفیت و ویژگی‌هایی است که در طول روز با توجه به شرایط محیطی ایجاد می‌شود (Reinhart, et.al. 2006).

1-2-2-سایه‌بان

گرم شدن بیش از حد فضا در اقلیم‌های گرم‌وخشک همواره به عنوان مانعی برای مقررات انرژی محسوب می‌شود. سیستم‌های غیر فعال همواره برای به حداقل رساندن مصرف انرژی کاربرد دارند. این عناصر می‌توانند در راستای دستیابی به دو هدف متضاد دریافت نور روز و حداقل مصرف انرژی مؤثر باشند. این عناصر برحسب ویژگی‌های اقلیمی و جبهه ساختمان به صورت افقی یا عمودی قرار می‌گیرند. همچنین زاویه و محل قرارگیری این عناصر در تحقق فرآیند بهینه‌سازی مؤثر خواهد بود (Kirimtat et.al, 2019).

1-2-2-بهینه‌سازی

بهینه‌سازی فرآیند یافتن بهترین پاسخ از میان حداقل یا حداکثر مقدار برای تابع مورد نظر است. بهینه سازی چند هدفه فرآیندی متداول در تحلیل عملکرد ساختمان است و هدف آن شناسایی راه حلی واحد برای پاسخ دادن به مسأله نیست بلکه دست‌یابی به مجموعه‌ای از راه حل‌ها بر مبنای معیارهای مشخص شده است (De Angelis et.al, 2013).

بهینه‌سازی ساختمان فرآیندی است که به کمک نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ساختمان و بر اساس محاسبات برگرفته از الگوریتم‌های تصادفی همانند ژنتیک، ازدحام ذرات، حرکت مورچگان، بهینه‌سازی تکاملی و... انجام می‌شود. این الگوریتم‌ها بر اساس ورودی‌هایی همچون متغیرها و توابع هدف فرآیند بهینه‌سازی را انجام می‌دهند (Fang et.al, 2019).

1-2-3-الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک زیرمجموعه الگوریتم‌های تکاملی محسوب می‌شود و به روش مشابهی برای یافتن پاسخ بهینه روی یک موضوع کار می‌کند. به طورکلی الگوریتم ژنتیک شامل دو بخش تولید گزینه‌ها و ارزیابی آن‌ها است. این الگوریتم یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه است، این الگوریتم مبتنی بر رتبه‌بندی نامغلوب است که نخستین بار توسط دپ به‌منظور بهینه‌سازی ساختمان طراحی‌شده است. پس از آن چانترله ابزاری بر پایه این الگوریتم ساخت و برای بهینه‌سازی چندهدفه بازسازی ساختمان از آن استفاده کرد. در این الگوریتم تولید نسل حاصل از فرآیندهای تقاطع و جهش والد است فرزندان یا به عبارتی گزینه‌های برتر باقی می‌مانند و ژن‌های برتر نیز در دوره‌های بعدی و در ساختار بنیادین جمعیت‌های پاسخ تکرار می‌شود. (Kheiri, 2018), (Roudsari et.al, 2013).

1-2-4-تحلیل حساسیت در بهینه‌سازی ساختمان

تحلیل حساسیت به معنای تشخیص میزان تأثیر یک یا چندین پارامتر ورودی بر پارامتر خروجی است. به کمک تحلیل حساسیت می‌توان تعداد پارامترهای مورد بررسی در فرآیند بهینه‌سازی را کاهش داد همچنین فرآیند شبیه‌سازی نیز به طور هوشمندانه‌تری انجام می‌شود (Gagnon, 2017). آنالیز حساسیت ازجمله روش‌هایی است که به تعیین پارامترهای مؤثر در فرآیند شبیه‌سازی کمک شایانی خواهد کرد. در این روش عوامل مؤثر دسته‌بندی شده و بهترین راه‌حل با استفاده از رگرسیون‌های خطی ساده یا چندگانه انتخاب می‌شود (Mangkuto et.al. 2016)

تحلیل حساسیت در بررسی عملکرد ساختمان نقش به سزایی دارد و در تشخیص پارامترهای مهم و کلیدی مؤثر است. روش تحلیل حساسیت بر مبنای رویکرد طراحی و هدف پژوهش مشخص می‌شود. تحلیل حساسیت بر مبنای دسته‌بندی سالتلی در سه دسته عمده روش محلی، سراسری و جهانی می‌شوند.

روش محلی: تغییر یک پارامتر منجر به تغییر سایر پارامترها خواهد شد و تأثیر پارامترها به صورت تأثیر وزنی است.

روش سراسری: این روش برخلاف روش محلی به تأثیر هم‌زمان پارامترها بر یکدیگر می‌پردازد و مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

SRC: ضریب رگرسیون استانداردشده[12] قدرت همبستگی بین داده خروجی و ورودی معین را با استفاده از رگرسیون‌های خطی محاسبه می‌کند. این شاخص در تحلیل حساسیت شبیه‌سازی ساختمان و محاسبات

آماری کاربرد دارد (Breesch & Janssens, 2010), (Dominguez munoz, 2010), (Nguyen, 2013).

این شاخص بر اساس رگرسیون‌های خطی برای بررسی توابع خروجی است و کمترین تحلیل رگرسیون مربع اعمال‌شده محاسبه می‌شود. در این صورت $y \in (y1, y2, \dots, yN)$ و N سایز جامعه و x ماتریس داده‌های ورودی است. ضریب رگرسیون را می‌توان به کمک رابطه زیر محاسبه کرد:

$$Y(x) = f_0 + \sum_{j=1}^{kA=\pi r^2} f_i(X_i) + \sum_{j>i}^{k} fij(X_i, X_j) + f_{1,2,\dots,k}(X_1, \dots, X_K) \quad (1)$$

$$f_i(X_i) = b_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (2)$$

که در این رابطه k تعداد متغیرها است و ε خطا محاسبات است. Y خروجی مدل بر مبنای ورودی X_j به‌منظور محاسبه رگرسیون خطی است.

$$F(x) = f_0 + \sum_{i=1}^{k} f_i(X_i) \quad (3)$$

به‌منظور تعیین رابطه بین پارامتر ورودی و خروجی بایستی از واریانس استفاده شود که رابطه آن به شرح زیر است.

$$SRC_i = \frac{f_i V(x_i)}{V(V(X))} \quad (4)$$

درصورتی‌که مدل ساختمانی به‌صورت غیرخطی باشد شاخص SRC معتبر نیست. لذا به‌منظور اندازه‌گیری مدل خطی تقریبی متناسب با مدل ساختمان از ضریب تعیین (R^2) استفاده می‌شود که بیانگر این است که تا چه حد می‌توان واریانس مدل ساختمان y_i را به‌صورت مدل خطی F(y) توضیح داد.

$$R^2 = \frac{V(F(X))}{V(Y(X))} \quad (5)$$

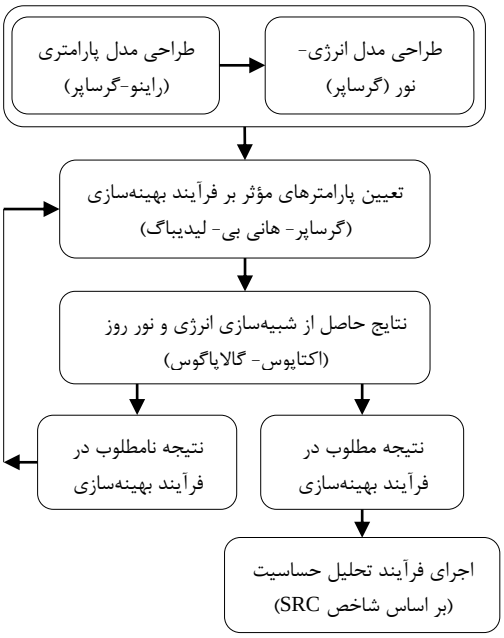
R^2 در بازه 1+ تا 1- قرار می‌گیرد و درصورتی‌که عدد R^2 کم باشد به معنای ارتباط کم بین پارامتر ورودی و خروجی و مناسب نبودن پارامتر انتخابی به‌منظور پیش‌بینی مدل است. با توجه به اینکه عدد R^2 با افزایش تعداد پارامترهای وابسته همواره افزایش پیدا می‌کند و این امر در حالی است که پارامتر جدید ممکن است ارتباط معناداری نداشته باشد. لذا لازم است تا از ضریب تعیین تعدیل‌شده Adjusted R^2 استفاده کرد و افزایش آن به معنای افزایش کارایی مدل است. به‌عبارت‌دیگر ضریب تعیین تعدیل‌شده صرفا وقتی افزایش پیدا می‌کند که پارامتر جدید نقشی در مدل داشته باشد.

روش جهانی یا مبتنی بر غربالگری: با استفاده از تعیین تأثیرگذارترین پارامترها و چندین مرحله شبیه‌سازی، کلیه پارامترهای ورودی مؤثر تعیین می‌شوند. این روش نتایج کیفی را برحسب اهمیت یا تأثیرگذاری نسبی بر یکدیگر بدون در نظر گرفتن نتیجه کلی بررسی می‌کنند (Rivalin et.al, 2016).

2- روش تحقیق

روش این پژوهش از چهار بخش اصلی تشکیل‌شده است که در ادامه به‌طور مفصل شرح داده‌شده است (شکل 1).

1- مدل‌سازی (مدل‌سازی نور، مدل‌سازی انرژی)
2- اجرای فرآیند شبیه‌سازی
3- اجرای فرآیند بهینه‌سازی
4- اجرای فرآیند تحلیل حساسیت

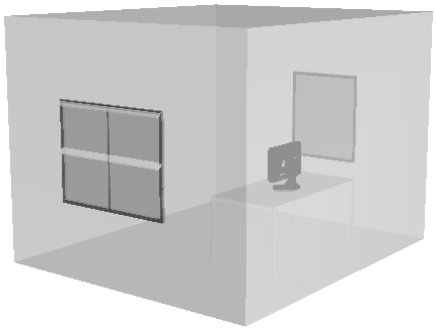


شکل 1- فرآیند و روش پژوهش
Fig.1- Research process and method

2-1-مدل‌سازی

نمونه مورد پژوهش ساختمانی اداری تک طبقه با پنجره‌ای در جبهه‌های شمالی و جنوبی و سایه‌بان‌هایی افقی در جبهه جنوبی است. طراحی مدل پایه بر مبنای مدل پایه ساختمان اداری رینهارت (Reinhart, 2013) است با این تفاوت که پارامترهایی همچون ابعاد و

تناسبات ساختمان نسبت به مدل رینهارت متفاوت است. با توجه به اینکه پارامتر های مختلف اتاق اداری رینهارت در پژوهش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است اما در کمتر پژوهشی به بررسی تاثیر هر پارامتر به صورت جداگانه توجه شده است این پژوهش به دنبال ارزیابی این عامل است. طراحی مدل پایه در نرم‌افزار راینو انجام‌شده است و طراحی پارامتری آن به‌منظور قابلیت تغییر هر قسمت در پلاگین گرساپر[5] انجام‌شده است. پلاگین گرسهاپر به‌منظور تولید فرم پارامتریک و سه‌بعدی استفاده می‌شود. این پلاگین به‌عنوان بستری برای عملگر هانی بی و لیدی باگ استفاده می‌شود (شکل 2).



شکل 2 – مدل پایه پژوهش در نرم افزار راینو.
Fig.2 - Basic research model in rhino software

پس از طراحی هندسه مدل پایه به تعیین پارامترهای پژوهش پرداخته شده است که این پارامترها به صورت پارامترهای ثابت و پارامترهای متغیرند که برحسب اقلیم، کاربری ساختمان، هدف پژوهش تعیین می‌شوند. در این پژوهش پارامترهایی همانند اقلیم، نوع هندسه ساختمان (مربع، مستطیل و...)، مقیاس بنا، تراکم بنا، تعداد طبقات، ساعات اشغال ساکنین، مقاومت حرارتی مصالح، ضخامت مصالح، محل قرارگیری پنجره، هندسه پنجره، نوع پنجره، نوع سایه‌بان (ثابت یا متحرک) و نوع تأسیسات مکانیکی به‌عنوان پارامترهای ثابت معرفی شده‌اند. پارامترهای متغیر نیز در این پژوهش شامل طول، عرض ساختمان، نسبت پنجره به دیوار و تعداد سایه‌بان است؛ که در جدول ذیل به‌طور کامل شرح داده شد (جدول شماره 1).

پس از تعیین پارامترهای مربوط به هندسه مدل پایه لازم است تا مشخصات مربوط به مصالح برحسب اقلیم مشخص شود لذا مصالح با توجه به اقلیم موردنظر و بر اساس مبحث مقررات ملی ویرایش 1399 در نظر گرفته‌شده است. جدول شماره 2 مشخصات این مصالح را نشان می‌دهد.

جدول شماره 1- دامنه تغییرات پارامترها
Tab. 1- Range of parameters change

متغیرها	بازه	توضیحات	تعداد حالات
طول ساختمان	3-7 متر	بازه تغییرات 0.1	41
عرض ساختمان	3-7 متر	بازه تغییرات 0.1	41
ارتفاع ساختمان	3-3.2 متر	بازه تغییرات 0.1	3
نسبت پنجره به دیوار جبهه شمالی	10-60 درصد	بازه تغییرات 10 درصد و ارتفاع پنجره 150 سانتی‌متر	51
نسبت پنجره به دیوار جبهه جنوبی	10-60 درصد	بازه تغییرات 10 درصد و فاصله از کف زمین 90 سانتی‌متر	51
تعداد سایه‌بان	1-3	عمق سایه‌بان 20 سانتی‌متر، زاویه سایه‌بان 35 درجه	3
مجموع تعداد حالات ممکن			39350529

جدول شماره 2- مشخصات مصالح
Tab. 2- Material specifications

متغیر	مشخصات لایه‌بندی مصالح	مقاومت حرارتی ($w/m^2.k$)
دیوار	بلوک بتنی	1/01
کف	سرامیک	6.33
بام	تیرچه‌بلوک	3.53

2-2-مدل‌سازی انرژی

پس از تعیین مشخصات اولیه مدل پایه فضای اداری تنظیمات مربوط به میزان بارهای حرارتی، برودتی و تعداد افراد مشخص می‌شوند. مدل‌سازی انرژی و نور روز در عملگر هانی بی[6] و لیدی باگ[7] انجام‌شده است. این عملگرها می‌توانند آنالیزهای دوبعدی و سه بعدی را ارائه دهد. عملگر هانی بی همانند عملگر لیدی باگ امکان لینک کردن نرم‌افزارهای معتبر و پیشرفته انرژی همچون انرژی پلاس، دیزاین بیلدر، اوپن استدیو[8]، دیسیم[9] و ... را به منظور فراهم آوردن آنالیزهای دقیق انرژی و نور روز را فراهم آورد.

مدل پایه برگرفته از الگوی ساختمان‌های اداری با پلان باز است. استانداردهای فضای اداری بر مبنای مبحث 19 مقررات ملی ساختمان ویرایش 1399 و استاندارد اشری 90.1 لحاظ شده است. برنامه زمانی حضور افراد از ساعت 7 صبح الی 5 بعدازظهر است و تمرکز ساکنین در هر مترمربع 0.1 است. با توجه به تردد نسبی فضای اداری لازم است تا از سیستم‌های تهویه مطبوع استفاده شود که نرخ تهویه در این فضا 0.3 ACH است. همچنین نرخ تهویه به ازای هر فرد $0.0018\ m^3/s.m^2$ است. مصرف تأسیسات مکانیکی در هر مترمربع 2 وات است که به منظور کاهش مصرف انرژی صبح‌ها 1 ساعت قبل از حضور ساکنین تأسیسات با نصف ظرفیت خود شروع به فعالیت می‌کنند و در پایان زمان اداری با 60 درصد ظرفیت به فعالیت خود خاتمه می‌دهند و در روزهای تعطیل دستگاه‌ها در حالت خاموشند. این امر منجر به افزایش عمر تأسیسات و کاهش مصرف انرژی این تجهیزات خواهد شد و در انتهای ساعت کاری سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی با نیمی از ظرفیت به کار خود پایان خواهد داد. دمای تأسیسات مکانیکی به منظور گرمایش فضا 24-30 درجه سانتی‌گراد و دمای سرمایش فضا 15-22 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته‌شده است. گرمایش این فضا توسط پکیج‌های گرمایشی و سرمایش آن به کمک کولرگازی تأمین می‌شود.

2-3-مدل‌سازی نور

پس از تعیین تنظیمات مربوط به مدل انرژی لازم است تا تنظیمات مدل نور روز انجام شود. در همین راستا صفحه‌ای به موازات کف فضا و به فاصله 80 سانتی‌متری (برابر با ارتفاع میز کار) از آن در نظر گرفته شده است و نقاطی به فاصله 0.2 در نظر گرفته‌شده است تا میزان نور دریافتی در هر نقطه را نشان دهد. با توجه به اینکه فضا صرفا در بخشی از ساعات روز مورد استفاده قرار می‌گیرد سنسورهایی به منظور بررسی ورود و خروج افراد در نظر گرفته شده است تا تردد آن‌ها را مورد بررسی قرار دهد. عملکرد این سنسورها به‌گونه‌ای است که به محض ورود فرد، نور مصنوعی در صورت لزوم (در دسترس نبودن نور روز) روشن می‌شود. با توجه به اینکه آستانه روشنایی فضای اداری در استانداردهای مختلف بین 300 تا 500 لوکس در نظر گرفته شده است، در این فضا نور 300 لوکس به‌عنوان آستانه روشنایی در نظر گرفته شده است. میزان متوسط نور دریافتی نیز برای کلیه ساعات سال مورد بررسی قرارگرفته است.

2-4-تنظیمات شبیه‌سازی

مدل ساختمان برگرفته از الگوی ساختمان‌های اداری با پلان باز در استان قم است. به‌منظور اجرای فرآیند شبیه‌سازی لازم است تا اطلاعات آب‌وهوایی به صورت سالیانه استفاده شود به همین منظور از فایل‌های معتبر آب و هوایی[10] همچون فایل‌های آب‌وهوایی سایت انرژی پلاس استفاده‌شده است. این اطلاعات به صورت ساعتی به همراه طول و عرض جغرافیایی در فرمت مناسب به‌عنوان داده ورودی به نرم‌افزار معرفی می‌شود. با توجه به ماهیت پژوهش لازم است تا جزییات مدل نور و انرژی به‌صورت جداگانه بررسی شود. در مدل انرژی جزییات تأسیسات مکانیکی، دمای سرمایش و گرمایش و نرخ تهویه موردبررسی قرار می‌گیرد. در مدل نور به بررسی جزییات سیستم‌های روشنایی، پرداخته‌شده است.

2-5-تنظیمات بهینه‌سازی

با توجه به اینکه هدف این پژوهش بهینه‌سازی هم‌زمان پارامترهای انرژی و نور روز است به‌گونه‌ای که بتوان هم‌زمان میزان مصرف انرژی را در حالت حداقلی و میزان دریافت نور روز را به حالت حداکثری برساند، لذا بهره‌گیری از الگوریتم‌های برگرفته از جمعیت نمونه یا محاسبات برگرفته از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ضروری است.

بهینه‌سازی این پژوهش به کمک عملگر گالاپاگوس[11] انجام‌شده است. این عملگر بر اساس محاسبات بر پایه‌ی الگوریتم ژنتیک بهترین پاسخ را از میان پاسخ‌های مختلف حاصل از زادوولد در هر نسل جستجو می‌کند و بهترین پاسخ را انتخاب می‌کند. در این پژوهش جمعیت نسل اول 35 است، به عبارتی 35 راه‌حل به‌طور تصادفی از میان کلیه راه‌حل‌ها انتخاب و اصلاح پیدا می‌کند و جمعیت نسل قبلی به‌عنوان والد در نسل بعدی قرار می‌گیرد و برای تولید نسل بعدی برای رسیدن به پاسخ

بهینه تکامل می‌یابند این فرآیند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که پاسخ‌های در بهینه‌ترین حالت ممکن مصرف انرژی و دریافت نور روز نسبت به سایر پاسخ‌ها قرار بگیرند(جدول 3).

جدول 3- تنظیمات بهینه‌سازی

Tab. 3- Optimization setting

جمعیت نسل	30 %	بیش‌تر از اندازه موردنیاز به جهت اطمینان بیشتر به نتایج
جمعیت نسل اول	35 %	بیش‌تر از اندازه موردنیاز به جهت جلوگیری از بهینه‌سازی محلی
احتمال تولیدمثل	78 %	به‌طورمعمول

این فرآیند به دو صورت خاتمه پیدا خواهد کرد. نخست درصورتی‌که تنظیمات عملگر در بیشترین تعداد نسل در نظر گرفته‌شده باشد که این تعداد نیز به‌وسیله کاربر قابل تغییر است. حالت دوم زمانی اتفاق میافتد که زمان شبیه‌سازی در بازه معینی مشخص‌شده باشد در این صورت پس از رسیدن به زمان مورد نظر شبیه‌سازی به طور خودکار متوقف خواهد شد. حالت سوم زمانی اتفاق خواهد افتاد که پاسخ‌ها همگرا شده باشند به عبارتی کاربر از نتایج به‌دست‌آمده رضایت دارد در این صورت می‌توان تحلیل را به صورت دستی متوقف کرد. در این پژوهش ترکیبی از روش‌های بالا در نظر گرفته شده است. درنهایت پس از بررسی نتایج و رسیدن به تعداد نسل مورد نظر فرآیند شبیه‌سازی متوقف شده است و بهترین پاسخ از نسل برتر به‌عنوان پاسخ مناسب در نظر گرفته شده است.

2-6-تحلیل حساسیت

روش تحلیل حساسیت در این پژوهش بر مبنای روش تحلیل حساسیت سراسری و بر مبنای شاخص SRC است. بدین منظور از محاسبات رگرسیون‌های خطی استفاده شده است به این صورت که پس از اجرای فرآیند بهینه‌سازی کلیه حالات ممکن مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. پس از اجرای فرآیند بهینه‌سازی، فرآیند تحلیل حساسیت بر مبنای پارامترهای متغیر به منظور بررسی دقیق‌تر ارتباط میان این پارامتر نسبت به پارامترهای خروجی انجام می‌شود. بدین‌سان با توجه به پارامترهای متغیر تعداد 864 حالت شبیه‌سازی انجام می‌شود.

جدول 4 - پارامترهای مورد بررسی به‌منظور تحلیل حساسیت

Tab. 4- Study parameters for sensitivity analysis

پارامتر	بازه تغییرات هر پارامتر	میانگین
طول	4-6	4.8
عرض	4-6	4.8
ارتفاع	3، 3.2	-
نسبت بهینه پنجره به دیوار جبهه شمالی	0.15-0.25	0.19
نسبت بهینه پنجره به دیوار جبهه جنوبی	0.15-0.25	0.22
تعداد سایه‌بان	1،2	-
تعداد کل حالات شبیه‌سازی	864	

3- نتایج و بحث

این بخش بر مبنای شبیه‌سازی‌های انجام‌شده و نتایج حاصل از هر بخش و تأثیر سایر عوامل و پارامترهای انتخابی به بررسی هدف پژوهش می‌پردازد. برای مشخص کردن بهینه‌ترین مدل‌ها از میان سایر مدل‌های بهینه به دست‌آمده از عملگر گالاپاگوس، از عملگر کلیبری[13] استفاده‌شده است. این افزونه این امکان را به کاربر می‌دهد تا کلیه حالات ممکن بررسی‌شده در عملگر گالاپاگوس در فایلی جداگانه با فرمت csv ذخیره شود. نتایج حاصل از پژوهش به‌صورت فایل اکسل در سایت دیزاین اکسپلورر[14] بارگذاری می‌شود و سپس با تعیین شرایط مورد نظر (کاهش انرژی و افزایش نور روز دریافتی) پاسخ‌های نهایی انتخاب می‌شود. با توجه به رویکرد پژوهش مبنی بر بهینه‌سازی دو هدفه نور و انرژی و متضاد بودن ابن دو رویکرد لازم است تا چندین پاسخ به عنوان پاسخ نهایی انتخاب شود (شکل3).

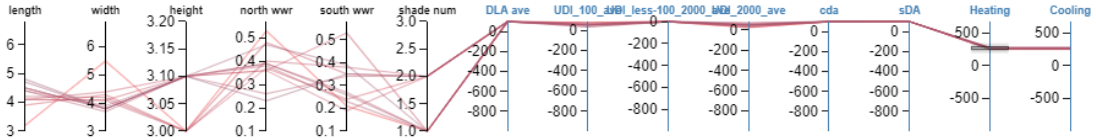
3-1-نتایج آنالیز نور روز

به منظور بررسی پاسخ‌های بهینه حاصل از شبیه‌سازی، تعدادی از پاسخ‌های بهینه مشخص و با مدل پایه مقایسه شده است. مدلی که مساحت بیشتری از فضا، از متوسط نور روز سالیانه 75% برخورد باشد به عنوان بهینه‌ترین مدل انتخاب می‌شود. (شکل 4).

شده است و میزان کاهش یا افزایش مصرف انرژی سالیانه مورد بررسی قرار گرفت و بهینه‌ترین پاسخ انتخاب شد. (شکل 5).

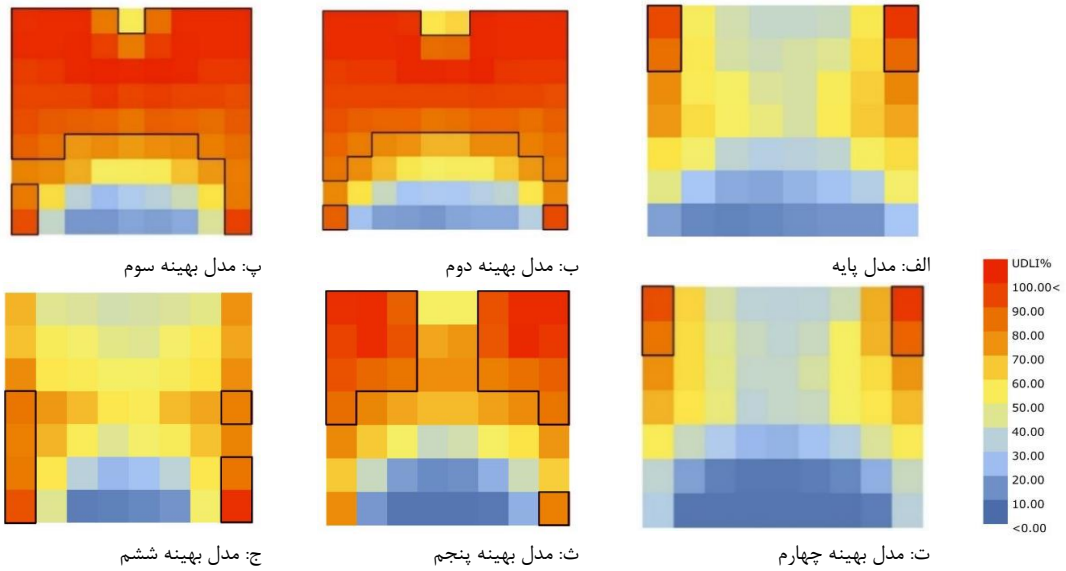
2-3-نتایج آنالیز انرژی

به منظور بررسی پاسخ‌های بهینه حاصل از شبیه‌سازی تعدادی از پاسخ‌های بهینه انتخاب و با مدل پایه مقایسه



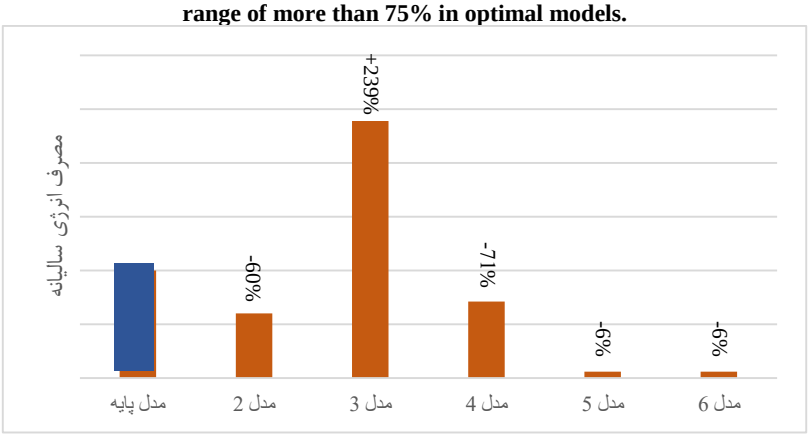
شکل 3- روند بهینه‌سازی توسط عملگر کلیبری در سایت دیزاین اکسپلور پس از انتخاب محدوده

Fig. 3- The process of optimization by Colibri on the Design Explorer Website after selecting the range



شکل 4- محدوده متوسط نور روز مفید سالیانه بین 100 تا 2000 لوکس در ساعات اشغال فضا در بازه بیشتر از 75 درصد در مدل های بهینه

Fig. 4- The average range of annual useful daylight between 100 and 2000 lux in the occupancy hour in the range of more than 75% in optimal models.



شکل 5-بررسی تغییرات مصرف انرژی مدل های بهینه نسبت به مدل پایه بر حسب درصد

Fig. 5- Study changes in energy consumption of optimal models compared to the basic model in terms of percentage

3-3-سطح بهینه پنجره

نتایج حاصل از فرآیند شبیه‌سازی در خصوص ابعاد بهینه پنجره‌ها حاکی از آن است که سطح پنجره مناسب برای استان قم به شرح زیر است:

1- نسبت پنجره به دیوار در جبهه شمالی در بازه‌ی 35 تا 38 درصد.

2- نسبت پنجره به دیوار در جبهه شمالی در بازه‌ی 11 تا 15 درصد.

3-4–تعداد سایه‌بان

سایه‌بان‌های که در این پژوهش در نظر گرفته شده است در جبهه جنوبی و در قسمت خارجی پنجره بوده است که عمق آن 20 سانتی‌متر و زاویه سایه‌بان نیز 35 درجه است. نتایج حاصل از پژوهش حاکی از آن است که پاسخ‌های بهینه دارای 1 یا 2 سایه‌بان هستند.

3-5–ابعاد بهینه ساختمان

مقایسه روند تغییرات مصرف انرژی در مدل‌های مختلف حاکی از آن است که هر چه کشیدگی ساختمان کمتر باشد، میزان مصرف انرژی پایین‌تر خواهد بود. لذا بهتر است ساختمان مورد نظر به‌صورت مربعی طراحی شود. همچنین ابعاد ساختمان به منظور جلوگیری از اتلاف انرژی گرمایشی و سرمایشی به شرح زیر تعریف می‌شود:

1- بازه تغییرات طول ساختمان از 3.5 تا 3.6 متر
2- بازه تغییرات عرض ساختمان از 3.2 تا 3.5 متر
3- بازه تغییرات ارتفاع ساختمان از 3 تا 3.1 متر

بررسی تناسبات ساختمان نشان می‌دهد هرچه این نسبت به عدد 1 تا 1.2 نزدیک باشد میزان مصرف انرژی کمتر خواهد بود. جدول شماره 4 به بررسی تأثیر تناسبات ساختمان نسبت به مصرف انرژی در مدل‌های مختلف می‌پردازد.

پس از اجزای فرآیند بهینه‌سازی، فرآیند تحلیل حساسیت بر مبنای پارامترهای متغیر بر اساس روش تحلیل حساسیت انجام شد. نتایج حاصل از فرآیند تحلیل حساسیت حاکی از آن است که مؤثرترین پارامترها در میزان مصرف انرژی طول و سپس عرض ساختمان و مهم‌ترین پارامترها در دریافت نور روز عرض و سپس طول ساختمان است (جدول شماره 5).

جدول 4- بررسی میزان مصرف بار گرمایشی و سرمایشی در مدل‌های بهینه

Tab. 4- study of heating and cooling load consumption in optimal models.

	تناسبات	بار گرمایشی (Kw/h)	بار سرمایشی (Kw/h)
مدل پایه	1/16	418/08	420/16
مدل دوم	1/11	169/07	169/89
مدل سوم	1/05	572/74	575/74
مدل چهارم	1/16	164/41	163/64
مدل پنجم	1/03	154/54	155/27
مدل ششم	1/06	145/45	146/144

جدول 5- رتبه‌بندی پارامترها بر اساس شاخص Adjusted R^2 بر مبنای تأثیر بر میزان شدت مصرف انرژی و نور روز بهینه

Tab. 5- Rating of parameters based on the Adjusted R^2 index based on the effect on the intensity of energy consumption and useful daylight

پارامتر	نور روز مفید (2000-100 لوکس)	شدت مصرف انرژی
طول	0/23	0/69
عرض	0/67	0/05
ارتفاع	0/01	0/04
نسبت پنجره به دیوار جبهه شمالی	0/11	0/008
نسبت پنجره به دیوار جبهه جنوبی	0/11	0/007
تعداد سایه‌بان	0/002	0/002

4- نتیجه‌گیری

این پژوهش به دنبال ارائه روشی جدید به منظور بهینه‌سازی همزمان انرژی و نور روز از طریق طراحی هندسه بازشو و هندسه ساختمان است. همچنین در تلاش به‌منظور یافتن مهم‌ترین پارامترها از بین پارامترهای تأثیرگذار هندسه ساختمان و بازشو در بحث نور روز و انرژی است لذا روش پیشنهاد شده در این پژوهش می‌تواند به شبیه‌سازهای انرژی می‌توانند به طراحی کارآمد باراندمان بالا کمک کنند. روش استفاده در این پژوهش مبنی بر محاسبات ریاضی به کمک تحلیل حساسیت است، لذا پاسخ‌های بهینه نخست به

کمک تابع بهینه‌سازی در پلاگین گالاپاگوس مشخص‌شده‌اند سپس به کمک تحلیل مؤثرترین پارامتر در میزان مصرف انرژی و نور روز مشخص شد. لذا در صورتی‌که تحلیل حساسیت پیش از فرآیند بهینه‌سازی انجام شود می‌توان از تأثیرات پارامتر موردنظر در فرآیند بهینه‌سازی صرف نظر کرد و زمان بهینه‌سازی را کاهش داد همچنین این روش می‌تواند برای رویکردهای دیگری در بحث شبیه‌سازی ازجمله دید، خیرگی و آسایش حرارتی نیز مفید است. نتایج حاصل از پژوهش حاکی از آن است که هندسه ساختمان تأثیر به‌سزایی در میزان مصرف انرژی و نور روز دریافتی دارد و می‌تواند کارآیی ساختمان را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد. این پژوهش به دنبال بررسی پارامترهای مؤثر در دریافت نور روز و میزان مصرف انرژی است در این راستا از شش پارامتر برای تعیین مدل‌های مختلف ساختمان اداری مشخص شد. این پارامترها بر مبنای پژوهش‌های پیشین انتخاب شده است. نتایج حاصل از پژوهش حاکی از آن است که بهینه‌ترین مدل نسبت به سایر مدل‌های بهینه از بعد مصرف انرژی و دریافت نور روز مدل شماره2 است که نسبت طول به عرض این مدل 1.11 و نسبت پنجره به دیوار در جبهه شمالی و جنوبی به ترتیب 11 درصد، 35 درصد و تعداد سایه‌بان‌ها جبهه جنوبی آن 2 است. همچنین مؤثرترین پارامتر در میزان دریافت نور روز عرض ساختمان و مؤثرترین پارامتر در میزان مصرف انرژی طول ساختمان است.

با توجه به اینکه در این پژوهش کلیه عوامل مؤثر در میزان مصرف انرژی و نور دریافتی و تهویه در نظر گرفته نشده است لازم است تا در پژوهش‌های بعدی به این عوامل و عوامل بصری همچون خیرگی توجه شود.

پی‌نوشت

[1]Design Builder
[2]Energy Plus
[3]Genetic algorithm
[4]Useful Daylight Illuminance (UDI)
[5]Grasshopper
[6]Honeybee
[7]Ladybug
[8]Open Studio
[9]Daysim
[10]Energy Plus Weather File
[11]Galapagos
[12]Standardized Regression Coefficients
[13]Colibri
[14]Design Explore

مراجع

Arab Anwari, E., Fayaz, R. (2018), Parametric simulation of building efficiency in early stage of design: mid-rise residential building in hot and dry climate. Nameh architecture and urban development. [In Persian]

Bakhtiari morjani, V., & Mohammadkari, B. (2012). Determining the optimal position of window in the facades of office buildings in Shiraz, Iranian lighting and specialist conference. [In Persian]

Bagheri, F., Mokarizadeh, V., & Jabbar, M. (2013). Developing energy performance label for office buildings in Iran. *Energy and Buildings*, *61*, 116-124.

Bichiou, Y., & Krarti, M. (2011). Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings. *Energy and Buildings*, *43*(12), 3373-3382.

Breesch, H., & Janssens, A. (2010). Performance evaluation of passive cooling in office buildings based on uncertainty and sensitivity analysis. *Solar energy*, *84*(8), 1453-1467.

Caruso, G., & Kämpf, J. H. (2015). Building shape optimization to reduce air-conditioning needs using constrained evolutionary algorithms. *Solar Energy*, *118*, 186-196.

De Angelis, E., Pasini, D., Pansa, G., Dotelli, G., & Serra, E. (2013). A Tool for the Optimization of Building Envelope Technologies–Basic Performances against Construction Costs of Exterior Walls. *Proceedings of CISBAT 2013*.

Fang, Y., & Cho, S. (2019). Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance. *Solar Energy*, *191*, 7-18.

Gagnon, R., Gosselin, L., & Decker, S. (2018). Sensitivity analysis of energy performance and thermal comfort throughout building design process. *Energy and Buildings*, *164*, 278-294.

Gossard, D., Lartigue, B., & Thellier, F. (2013). Multi-objective optimization of a building envelope for thermal performance using genetic

Multi-objective optimization of energy efficiency and daylight availability in BSk climate. *Energy Procedia*, *115*, 92-101.

Mahmoud, A. H. A., & Elghazi, Y. (2016). Parametric-based designs for kinetic facades to optimize daylight performance: Comparing rotation and translation kinetic motion for hexagonal facade patterns. *Solar Energy*, *126*, 111-127.

Mangkuto, R. A., Rohmah, M., & Asri, A. D. (2016). Design optimization 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.

Manzan, M., & Clarich, A. (2017). FAST energy and daylight optimization of an office with fixed and movable shading devices. *Building and Environment*, *113*, 175-184.

Miles, J. C., Sisk, G. M., & Moore, C. J. (2001). The conceptual design of commercial buildings using a genetic algorithm. *Computers & Structures*, *79*(17), 1583-1592.

Mirrahimi, S., Mohamed, M. F., Haw, L. C., Ibrahim, N. L. N., Yusoff, W. F. M., & Aflaki, A. (2016). The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot–humid climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *53*, 1508-1519.

Mantserkohasari, A., Fayaz, R., Mohammadkari, B. (2013), Optimizing the angle of the window canopy in terms of light and heat in residential buildings in moderate and humid climate. The fourth international conference on new approach in energy conservation. Tehran. [In Persian]

Mohammadi, F., Mofidi Shemiraniemail, M. (2019), Multi-Objective optimization of the shape of the window in order to simultaneously provide the components of visual comfort and energy efficiency through the genetic algorithm (case example: elementary classroom in Tehran, Iran). [In Persian]

Mohammadzadeh, N., Mofidi Shemirani, M., Tahbaz, M. (2019), Optimizing the energy performance and daylighting of the shell of residential buildings using genetic algorithm in Hamadan city. [In Persian]

Nguyen, A. T. (2013). Sustainable housing in Vietnam: Climate responsive design strategies to optimize thermal comfort.

algorithms and artificial neural network. *Energy and Buildings*, *67*, 253-260.

Güçyeter, B., & Günaydın, H. M. (2012). Optimization of an envelope retrofit strategy for an existing office building. *Energy and Buildings*, *55*, 647-659.

Hachem-Vermette, C. (2018). Multistory building envelope: Creative design and enhanced performance. *Solar Energy*, *159*, 710-721.

Kheiri, F. (2018). A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *92*, 897-920.

Khoroshiltseva, M., Slanzi, D., & Poli, I. (2016). A Pareto-based multi-objective optimization algorithm to design energy-efficient shading devices. *Applied energy*, *184*, 1400-1410.

Kim, J. J., & Wineman, J. (2005). Are windows and views really better? A quantitative analysis of the economic and psychological value of views. *Report, University of Michigan*.

Khatami, M., Kord Jamshdi, M., Mohammadkari, B., Zulfiqari, S.A. (2014). Optimizing the light-transmitting wall of office buildings using the hybrid algorithm of bird flight genetics, the 5th international conference on heating, cooling and air conditioning. Tehran. [In Persian]

Kirimtat, A., Krejcar, O., Ekici, B., & Tasgetiren, M. F. (2019). Multi-objective energy and daylight optimization of amorphous shading devices in buildings. *Solar Energy*, *185*, 100-111.

Lu, S., Li, J., & Lin, B. (2020). Reliability analysis of an energy-based form optimization of office buildings under uncertainties in envelope and occupant parameters. *Energy and Buildings*, *209*, 109707.

Madhaghi, S.M., Abbasi, N. (2016), Investigating the factors affecting the performance of the external shell on cooling and heating loads in order to optimize energy consumption. Case example: Educational building (Honarestan) in Mashhad. National ID of the article: IACUT03_603. Published in the third international conference on civil architecture and urban planning at the beginning millennium. Tehran. [In Persian]

Mahdavinejad, M., & Nazar, N. S. (2017). Daylightophil high-performance architecture:

the energy performance of new commercial buildings. Energy and Buildings ".Energy and Buildings489-50 .

Romani, Z., Draoui, A., & Allard, F. (2015). Metamodeling the heating and cooling energy needs and simultaneous building envelope optimization for low energy building design in Morocco. *Energy and Buildings*, *102*, 139-148.

Roudsari, M.S. Pak, M. Smith, A 2013 .Aug . "Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design ".Fra: In Proceedings of the 13th international IBPSA conference held in Lyon.3128-3135 .

Tuhus-Dubrow, D., & Krarti, M. (2010). Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and environment*, *45*(7), 1574-1581.

Yi, Y. K. (2019). Building facade multi-objective optimization for daylight and aesthetical perception. *Building and Environment*, *156*, 178-190.

Preto, S., & Gomes, C. C. (2019). Lighting in the workplace: Recommended illuminance (LUX) at workplace environs. In *Advances in Design for Inclusion: Proceedings of the AHFE 2018 International Conference on Design for Inclusion, July 21-25, 2018, Loews Sapphire Falls Resort at Universal Studios, Orlando, Florida, USA 9* (pp. 180-191). Springer International Publishing.

Rakha, T., & Nassar, K. (2011). Genetic algorithms for ceiling form optimization in response to daylight levels. *Renewable energy*, *36*(9), 2348-2356.

Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *Leukos*, *3*(1), 7-31.

Reinhart, C.F., Jakubiec, J.A. and Ibarra, D., 2013. Definition of a reference office for standardized evaluations of dynamic façade and lighting technologies. In *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International.*

Rivalin L, Stabat P, Marchio D, Caciolo M, Hopquin F 2018 .May" .A comparison of methods for uncertainty and sensitivity analysis applied to