ISSN: 2538-2594; Naqshejahan - Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2022;12(4):116-141

Investigating the effect of Voronoi shell parametric design on improving daylight efficiency in an office building in Shiraz

ARTICLE INFO

Article Type
Analytic Study

Authors

Reza Jokar [1]
Morteza Maleki [2*]

How to cite this article

Jokar R, Maleki M. Investigating the effect of Voronoi shell parametric design on improving daylight efficiency in an office building in Shiraz , 2023 Jun 1;12(4):116-141
https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1401.12.4.5.1

1. Faculty of Art and Architecture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2 Faculty of Art and Architecture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

**Correspondence*
Address: Faculty of Art and Architecture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Email: mo.maleki@basu.ac.ir
Phone: 09188140345

Article History
Received: 2022/09/21
Accepted:2022/12/20
Published: 2023/01/01

ABSTRACT

Aims: The main purpose of this article is to investigate the performance and impact of the building shell on natural lighting components and radiation reception, as components affecting the quality of the interior space, through designing a shell with Voronoi algorithm.

Materials & Methods: For this purpose, using the genetic algorithm and taking into account the Useful Daylight Illumination and the Total Radiation, optimal configurations are presented from among the design options of the shell, which is based on the Voronoi algorithm. The working method has been multi-objective optimization using NSGA-II and linear modeling in the Rhino platform and Grasshopper plugin using environmental analysis tools such as Energy Plus and Radiance for numerical calculations. Also, skins are analyzed in three cases: 1-an infilled wall without the second skin, 2-using horizontal louvers, and 3- Voronoi skin as the second skin.

Findings: It has been indicated that with Voronoi skin, the amount of average Useful Daylight Illuminance has increased by 63.86% compared to the case without the second skin, and by 21.02% compared to the case using horizontal louvers the second skin. Also, by this design idea, the amount of total solar radiation decreases by 63.86% compared to the case without the second shell and decreases by 15.38% compared to the issue of using horizontal louvers as the second shell.

Conclusion: The designed shell resulting from the optimization process and the use of Voronoi geometry has a good performance in improving the Useful Daylight Illuminance and reducing the amount of sunlight.

Keywords: daylight, parametric design, office space, multi-objective optimization, genetic algorithm, contemporary architecture, sustainability, new technologies.

CITATIONLINKS

[1]Karakoç E , Çağdaş G. Adaptive… [2] Yuan Y, et al. Bionic building energy… [3] Oxman R. Digital architecture as a… [4]Lynn G, et al. Greg Lynn Form. [5] Zhang B T. Hypernetworks: A molecular... [6]Norouzi N, Shabak M, Embi MR … [7]Wang J, Xu C, Zhang J, Zhong R … [8] Mergel I, Edelmann N, Haug N [9] Rolvink A, Van De Straat R,… [10] Labib R. Trade-off method to assess … [11]Eltaweel A; Yuehong S U. … [12] Evins R. A review of computational… [13] Kornuta D, Abbud-Madrid A, Atkinson J, … [14] Heydarian A, Carneiro JP, Gerber D, Becerik-Gerber B … [15] Roudsari MS, Pak M. Ladybug: A parametric … [16]Nguyen A, Reiter S, Rigo P. A... [17]Machairas V, Tsangrassoulis A, Axarli K. … [18]Arosha G, Richard H.A model based… [19] Amoruso FM, Dietrich U, Schuetze… [20]Machairas V, Tsangrassoulis A, Axarli K. … [21]Elbeltagi E, Hegazy T, Grierson D… [22] Chumachenko D, Meniailov I, Bazilevych K … [23] Zhang Z, Zhou H, Ma J, Xiong L,…[24]Murgul V, Vatin N, Zayats I. The role…[25]Moazzeni MH, Ghiabaklou Z. Investigating the influence… [26]Lami IM, Mecca B. Assessing social... [27]Chang MC, Shih SG… [28]Cheng S, Yunsong H, Han F... [29] Jalali Z. Optimization of Office Building… [30]Bahdad AAS, Fadzil, S F S, Taib N. Optimization of daylight… [31] Ziaee N, Vakilinezhad R. Multi-objective... [32] Xue P, Mak CM, Cheung HD. The… [33]Wang S, Yi YK, Liu N. Multi-objective …[34]Yazyeva SB, Mayatskaya IA… [35]Bardhan R, Debnath R. Daylight … [36]Chen K W, Janssen P, Schlueter… [37]Kirimtat A, Koyunbaba BK, … [38]Ahmadi J, Mahdavinejad M, Asadi S. Folded … [39]Lakhdari K, Sriti L, Painter B. … [40] Schwartz Y, Raslan R, Mumovic D… [41] Ahmed MM, Abel-Rahman AK, Ali AH…[42] Anton I, Tănase D. Informed…[43]Burger S. South Australian Health…[44]Ahmadi J, Mahdavinejad M, Larsen OK…[45] Hosseini SM, Mohammadi M, Schröder T…[46]Lartigue B, Lasternas B, Loftness…[47]Michael A, Heracleous C. Assessment of natural…[48]Omidfar A, Torghabehi OO, Buelow…[49]Onubogu NO, Chong KK, Tan MH. Review…[50] Goharian A, Mahdavinejad M.…[51]Fallahtafti R, Mahdavinejad M. Window…[52]Zafarmandi S, Mahdavinejad M…[53]Goharian A, Mahdavinejad M, Bemanian…[54]Haghshenas M, Hadianpour M…[55]Javanroodi K, Nik VM, Mahdavinejad M…[56]Saadatjoo P, Mahdavinejad M, …[57]Shaeri J, Mahdavinejad M. Prediction…[58]Mahdavinejad M, Javanroodi K. Natural …[59]Shaeri J, Mahdavinejad M, Pourghasemian …[60]Talaei M, Mahdavinejad M, Azari R …[61] Talaei M, Mahdavinejad M, Azari R…[62]Goharian A, Daneshjoo K, Mahdavinejad M, Yeganeh M

Copyright© 2021, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی تأثیر طراحی پارامتریک پوسته ورونئی در بهبود بهره‌وری نور روز در ساختمان اداری در شهر شیراز

رضا جوکار[۱]، مرتضی ملکی[۲*]

۱- گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ایران

۳- گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ایران. (نویسنده مسئول)

چکیده

اهداف: بررسی عملکرد و میزان تأثیر پوسته ساختمان بر مؤلفه‌های روشنایی طبیعی و دریافت تابش، به عنوان مؤلفه‌های مؤثر بر کیفیت فضای داخلی، درقالب طراحی یک پوسته با الگوریتم ورونوی، هدف اصلی مقاله است.

ابزار و روش‌ها: با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شاخص‌های روشنایی مفید نور روز و انرژی دریافتی از تابش خورشید، حالت‌های بهینه از بین گزینه‌های طراحی پوسته ارائه‌شده‌اند. روش کار به صورت بهینه یابی چندهدفه با استفاده ازالگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب و مدل‌سازی پارامتریک در پلتفرم راینو و افزونه گرسهاپر با بهره‌گیری از ابزارهای آنالیز محیطی همچون انرژی‌پلاس و رادیانس برای محاسبات عددی بوده است. طراحی پوسته دوم برای تمامی جبهه‌هاحالات ممکن بررسی شد و برای هر جبهه به حالت بهینه نهایی دست یافتیم و در انتها پوسته‌های طراحی انتخاب شده در سه حالتِ ۱- بدون پوسته دوم، ۲- لوورهای افقی و ۳- ایجاد پوسته ورنوی؛ موردآنالیز و مقایسه قرار گرفتند.

یافته‌ها: در حالت بهینه نهایی پوسته ورنوی به‌عنوان پوستهٔ دوم میزان افزایش روشنایی مفید نور روز نسبت به حالت بدون پوسته دوم برابر با۶۳.۲۹ درصد افزایش و نسبت به حالت استفاده از لوورهای افقی ۲۱.۰۲ درصد افزایش داشته است. همچنین استفاده از این ایده طراحی، میزان دریافت تابش خورشید در مقایسه با حالت بدون پوسته دوم برابر با ۶۳.۸۶درصد کاهش و نسبت به حالت استفاده از لوورهای افقی به عنوان پوسته دوم ۱۵.۳۸ درصد کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری: پوسته طراحی شده حاصل فرایند بهینه‌سازی و استفاده از هندسه ورونویی عملکرد مناسبی در بهبود شاخص روشنایی مفید نور روز و کاهش دریافت تابش خورشید دارد.

کلمات کلیدی: نور روز، طراحی پارامتریک، فضای اداری، بهینه‌سازی چند هدفه، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ورونویی، معماری معاصر، پایداری، فناوری‌های نوین.

مقدمه

امروزه کشورهای توسعه‌یافته اقدامات بسیاری را در کاهش تأثیر فعالیت‌های انسانی بر روی تقاضای جهانی انرژی داشته‌اند. [۱] پروسه حل یک مسئله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی به نحوی است که می‌توان با اعمال تغییراتی به‌منظور طراحی نیز از آن استفاده نمود. در اینجا الگوریتم ژنتیک علاوه بر بهینه‌سازی در پروسه طراحی نیز حضور فعال داشته و تلاش می‌کند طراحی را به‌گونه‌ای انجام دهد که ملزومات بهینه‌سازی را در برداشته و به این ترتیب طرح اولیه در راستای هدف مشخصی ارائه شود. [۲] الگوریتم‌های مولد در طراحی پارامتریک به الگوریتم‌هایی اطلاق می‌شود که بر پایه روش الگوریتمیک قادر به تولید پاسخ‌های طراحی بر مبنای داده‌های ورودی هستند.[۳] در دهه‌های اخیر به‌ویژه در پس از سال ۱۹۹۵ میلادی، کاربرد رایانه در معماری رو به افزایش بوده است. امروزه به عقیده بسیاری، تمامی وجوه معماری تحت تأثیر این گفتمان مشترک معماری و علوم رایانه قرار گرفته است؛ از مرحله مطالعه و ایده پردازی، تا ارائه و ارزیابی، همگی در چارچوب‌های مختلفی شکل می‌گیرند. معماران و محققان بسیاری، وجوه مختلف این تأثیرپذیری را موردتوجه قرار داده‌اند، نظیر لین که تأثیر این ابزارهای نوین را در مفهوم و محصول معماری بررسی کرده [۴] و یا جان فریزر که پتانسیلی که رایانه در توسعه و تکوین ایده‌های معماری در اختیار طراح قرار می‌دهد را توضیح می‌دهد.[۵] همه این موارد مؤید آن است که معماری امروز نیازمندِ تعامل با حوزه‌های علوم کامپیوتر، بیولوژی، سازه و مهندسی مواد است. به‌طورکلی می‌توان دو حوزه نفوذ برای ابزار دیجیتال در معماری برشمرد؛ اول امکان مدل‌سازی و ساده‌سازی پروژه‌های پیچیده با توجه به امکان مدیریت و تحلیل حجم زیاد اطلاعات و دوم، امکان

خلق و توسعه پیچیده‌تر ایده‌های نوین با ابزارهای رایانشی.[۶] گرچه تمام تقسیم‌بندی‌های ارائه شده در این حیطه نمی‌تواند کاملاً به درک ماهوی این حیطه کمک کند، اما این تقسیم‌بندی‌ها از حیث شناخت دامنه تأثیر و نیز درک آثار خواسته و ناخواسته این حوزه مفید خواهد بود. معماری رایانشی بر این باور استوار است که کاربرد رایانه و الگوریتم‌های موجود، نباید در جهتِ تهیه مدارک دیجیتال از ایده‌هایی باشد که به‌صورت غیردیجیتال توسعه داده شده است. گرچه اولین بارقه‌های طراحی و ساخت به کمک رایانه در همین راستا شکل گرفت و صرفاً ابزاری برای اتوماسیون و ترسیم فنی مدارک دستی تلقی می‌شد، اما درنهایت از دهه نود میلادی، از ماهیت صرفاً ابزاری خود خارج شده و تأثیر خود را بر کل پروسه طراحی نمایان نموده است.[۷] طراحی دیجیتال، در حقیقت به معنای تجزیه کردن یک فرآیند به اجزا و الگوهای گسسته و جمع‌بندی این الگوها در فایل‌هایی است که می‌تواند به‌وسیله رایانه درک و پردازش شوند. صفت دیجیتال به معنای استفاده کردن از خواص ذاتی رایانه‌هاست. ازاین رو به فرآیند منجر به تولید یک محصول نسبت داده می‌شود، نه خود محصول. اگر به طراحی دیجیتال به عنوان یک فرآیند نگاه شود، اهمیت این نکته نمایان می‌شود که برای تشخیص آنکه کدام طراحی را می‌توان جزو طراحی دیجیتال به‌حساب آورد، باید ابتدا مراحل و فرآیند طراحی آن را به‌خوبی فهمید و تشخیص داد. [۸] با تلفیق کردن طراحی پارامتریک و ابزارهای ارزیابی عملکرد ساختمان این امکان ایجادشده است که گزینه‌های طراحی مبتنی بر معیار کارایی طراحی مثل عملکرد سازه، نور و انرژی تولید شوند. [۹]برای جستجوی سیستم سازه‌ای ساختمان از رویکردهای پارامتریک استفاده کردند و نشان دادند که چگونه طراحی پارامتریک تولید گزینه‌های طراحی را فراهم می‌کند.[۱۰]از روش طراحی پارامتریک برای یافتن هندسه سایه‌بان‌ها و سقف‌ها استفاده کرد و طرح‌ها را بر اساس نور روز ارزیابی کرد. علاوه بر این، جستجوی گزینه‌های طراحی زمانی که مدل توسعه پیدا می‌کند می‌تواند به‌صورت خودکار انجام شود.[۱۱] در مسائل طراحی ساختمان، طراحان اغلب نیاز دارند تا باهدف‌های متعددی که با یکدیگر در تضادند مواجه شوند، مثل آسایش حرارتی بیشینه و کمینه شدن انرژی مصرفی یا بیشینه شدن ظرفیت تجهیزات و کمینه شدن هزینه‌ها به طور هم‌زمان. دو روش معمول برای حل این مسئله وجود دارد. روش اول مدل مجموع وزن است که وزن‌های مختلفی برای هدف‌های مختلف به کاربرده می‌شود و هدف‌های وزن دهی شده جمع می‌شوند و یک تابع هزینه واحد به دست می‌آید و سپس آن مسئله به یک مسئله تک هدفه تبدیل می‌شود. کاربرد رویکرد مجموع وزن ساده است؛ اما نتیجه آن به‌شدت به وزن اختصاص داده شده به هر هدف بستگی دارد که انجام آن نیز به دانش و تجربه زیادی نیاز دارد. روش دوم بهینه یابی پارتو است که با پیدا کردن جبهه مصالحه بین گزینه‌ها یا جبهه پارتو بین هر هدف انجام می‌شود. جبهه پارتو بر اساس کانسپت غلبه تعریف می‌شود.[۱۲] پوسته مشبک، معمولاً ساختاری بافرم و استحکام یک پوسته دو انحنایی را توصیف می‌کند، با این تفاوت که به‌جای یک صفحه صلب، از یک شبکه ساخته می‌شوند که می‌توانند دهانه‌های وسیع را با مصالح خیلی کم، پوشش بدهند. این سازه‌ها می‌توانند از هر نوع مصالحی همچون فولاد، ،آلومینیوم، چوب و یا حتی لوله‌های مقوایی ساخته شوند.[۱۳] در فرآیند طراحی معماری، طراحی پارامتریک در حال رواج و محبوبیت است. طراحی پارامتریک در معماری به معنی فرآیند مدل‌سازی هندسه‌ی

ساختمان با استفاده از پارامترها و توابع است که دارای انعطاف‌پذیری توسط برنامه‌نویسی است اما محیط کاربری گرافیکی و کدهای تصویری آن، کار با آن را ساده‌تر از کار با برنامه‌نویسی کدهای متنی می‌کند. یکی از فواید طراحی پارامتریک نسبت به طراحی سنتی توانایی آن برای تولید سریع آلترناتیوهای طراحی است.[۱۴] یکی از محبوب‌ترین نرم افزارهای طراحی پارامتریک نرم‌افزار گرس هاپر است که پلاگین نرم‌افزار راینو است. گرسهاپر یک نرم‌افزار متن باز است که می‌تواند توسط پلاگین‌ها توسعه پیدا کند. حوزه استفاده پلاگین‌ها گسترده است و شامل ارتقای هندسی ساختمان، سازه ساختمان آنالیز محیطی و مهندسی معماری است. لیدی باگ و هانی بی، گِکو و دیوا از جمله پلاگین‌های آنالیز عملکرد ساختمان هستند. [۱۵] آن‌ها بین مدل ساختمانی پارامتریک و شبیه‌سازی و مدل‌سازی انرژی مصرفی ساختمان ارتباط ایجاد می‌کنند. خروجی آن‌ها معمولاً شامل مصرف انرژی، آسایش حرارتی و آسایش دید و معیارهای نور روز است. بهینه یابی فرآیند یا روشی است که یک طرح یا تصمیم را تا حد ممکنی کاربردی و مؤثر می‌سازد. به زبان ریاضی، بهینه یابی فرآیند پیدا کردن مقدار بیشینه یا کمینه یک تابع توسط انتخاب بهترین مقدار برای متغیرهاست. بهینه یابی امکان جستجوی تعداد زیادی از راه‌حل‌های طراحی را به‌طور مؤثری فراهم می‌کند، اما تبدیل یک مسئله طراحی ساختمان به زبان ریاضی کار راحتی نیست. در سال‌های اخیر با پیشرفت‌هایی که در زمینه‌ی طراحی پارامتریک، شبیه‌سازی کارایی ساختمان و فنّاوری‌های بهینه‌یابی صورت گرفته است، بهینه‌یابی عملکرد ساختمان ممکن شده است. کاربردهای بهینه‌یابی ریاضی از زمان دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ شروع شد، اما مهم‌ترین مطالعات در زمینه بهینه‌یابی کارایی ساختمان با شبیه‌سازی انرژی ساختمان و یک موتور بهینه یابی الگوریتمیک در اواخر دهه ۲۰۰۰ منتشر شد. بهینه یابی کارایی ساختمان به طور معمول به عنوان یک فرآیند خودکار توسط یک برنامه شبیه‌سازی ساختمان و یک موتور بهینه یابی در نظر گرفته می‌شود که شامل الگوریتم‌های بهینه یابی است.[۱۶] فرآیند بهینه یابی معمولاً به دو نوع ورودی نیاز دارد؛ متغیرها و توابع هدف. در بهینه یابی عملکرد ساختمان، متغیرها مقادیری هستند که هندسه یا ویژگی‌های طراحی را کنترل می‌کنند و توابع هدف معیارهای کارایی ساختمان هستند که به طورمعمول توسط ابزارهای شبیه‌سازی محاسبه می‌شوند. متغیرهای طرح که در مطالعات بهینه یابی بررسی می‌شود به طورمعمول شامل جهت‌گیری ساختمان، شکل ساختمان، ابعاد ساختمان، متریال‌های ساخت، نسبت پنجره به دیوار، تجهیزات نور و اندازه سیستم‌های گرمایش و سرمایش است. روش‌های بهینه یابی در ابعاد گسترده‌ای از مشکلات طراحی ساختمان‌ها مثل انرژی، هزینه، جهت‌گیری طراحی نما، آسایش حرارتی، نور، حجم، سازه و آنالیز چرخه حیات به کاربرده شده است.[۱۷] رویکرد غیرمستقیم در بیومیمکری بر اساس برداشت اصول عملکردی سیستم‌های طبیعی است.[۱۸] این الگوریتم به طور پیوسته یک جمعیت از راه‌حل‌ها را با استفاده از اصولی که می‌تواند در طبیعت مشاهده شود، مثل انتخاب، جهش و تقاطع ویرایش می‌کند. الگوریتم ژنتیک به‌طور تصادفی راه‌حل‌هایی از عملکرد خوب از جمعیت موجود را انتخاب می‌کند و از آن‌ها به عنوان والدهایی برای تولید نسل بعد استفاده می‌کند و جمعیت به‌سوی یک راه‌حل بهینه تکامل پیدا می‌کند.[۱۹]. ابزارهایی که در مطالعات بهینه‌یابی کارایی ساختمان استفاده شدند می‌توانند به سه دسته مجزا تقسیم شوند: الگوریتم‌های برنامه‌ریزی‌شده سفارشی، پکیج بهینه یابی و ابزارهای بهینه‌یابی مخصوص برای طراحی ساختمان‌ها.[۲۰]

الگوریتم‌های تکاملی روش‌های جستجوی تصادفی هستند که از تکامل بیولوژیکی در طبیعت تقلید می‌کنند. چنین الگوریتم‌هایی برای رسیدن به راه‌حل‌های بهینه برای مقیاسه‌ای بهینه‌سازی بزرگ در مقیاس وسیع که روش‌های سنتی برای حل آن‌ها ممکن است شکست بخورد طراحی‌شده‌اند. در این بخش به توضیح انواع مختلف این الگوریتم‌ها پرداخته می‌شود. به عنوان مثال می‌توان به اینکه چگونه مورچه‌ها کوتاه‌ترین مسیر را به منبع غذا می‌رسانند و چگونه پرندگان مقصد خود را در طی مهاجرت پیدا می‌کنند، اشاره کرد. رفتار این گونه‌ها با یادگیری، سازگاری و تکامل راهنمایی می‌شود. برای تقلید رفتار کارآمد این گونه‌ها، محققان مختلف سیستم‌های محاسباتی را توسعه داده‌اند که به دنبال راه‌حل‌های سریع و قوی برای مشکلات بهینه‌سازی پیچیده هستند. در این بخش شش الگوریتم تکاملی ارائه شده است که به توضیح هریک پرداخته می‌شود. سپس مقایسه عملکرد بین این الگوریتم‌ها نشان داده می‌شود و دستورالعمل‌هایی برای تعیین پارامترهای صحیح برای استفاده از هر الگوریتم ارائه می‌شود .[۲۱]

پوسته ساختمان به‌واسطه‌ی قرار گرفتن در مرز جدا کننده داخل و خارج ساختمان و روبه‌رو بودن با عوامل جوی نقش مهمی در کاهش یا افزایش مصرف انرژی دارد. به‌علاوه، به دلیل هزینه زیاد طراحی و اجرای پوسته، هوشمند بودن آن می‌تواند از طریق کاهش مصرف انرژی در ساختمان این هزینه را جبران نماید. [۲۲] منابع مختلفی برای تأمین انرژی‌های تجدیدپذیر شناخته‌شده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها خورشید می‌باشد. خورشید منبعی برای تولید گرما و نور و روشنایی طبیعی است که می‌تواند به تنهایی انرژی مورد نیاز کل جهان را تأمین کند. اما مسئله اصلی نحوه بهره‌برداری صحیح از آن است. اجزای نما می‌توانند یک ابزار مناسب برای سر و سامان دادن مشکلات انرژی در معماری باشند. برای مثال می‌توانند به عنوان یک عایق عمل کنند یا بار گرمایش و سرمایش را کاهش دهند. همچنین میزان توزیع نور روز و انرژی گرمایی خورشیدی را ارتقا دهند. بنابراین کاهش مصرف نور مصنوعی از طریق راهکارهای روشنایی روز (نور طبیعی) به وسیله پوسته ساختمان، تأثیر شگرفی روی کاهش مصرف کلی انرژی می‌گذارد. [۲۳] نورپردازی با نور روز فقط با اضافه کردن پنجره یا افزایش ابعاد آن‌ها صورت نمی‌گیرد و بسیار به طرز قرار گرفتن و شکل آن‌ها بستگی دارد. [۲۴] تمام ویژگی‌های ساختمان ازجمله جهت‌گیری، شکل و فرم، جایگیری فضاها و پوسته ساختمان از عواملی هستند که بر میزان و کیفیت روشنایی فضاهای داخلی تأثیر می‌گذارند. [۲۵] معماری پایدار به عنوان معماری‌ای تلقی می‌شود که از طراحی مبتنی بر رفتار انسان پیروی می‌کند و نیاز به اطمینان از یک رابطه پایدار بین انسان‌ها و محیط ساخته‌شده دارد، یعنی معماری که در آن فضاها با رفتار و شیوه‌های زندگی انسان تا زمانی که ممکن است سازگار هستند. [۲۶] طراحی ساختمان پایدار یک دغدغه مهم در حوزه معماری است. یکی از مهم‌ترین اهداف آن، عملکرد انرژی در طول کل چرخه حیات ساختمان است. تصمیم‌گیری‌های طراحی برای ساختمان‌های پایدار اغلب با مجموعه بزرگی از متغیرها و معیارها درگیرند، بنابراین به مسائل پیچیده‌ای تبدیل می‌شوند که حل کردن یک‌باره آن‌ها مشکل است. [۲۷] به علت پیچیدگی ساختمان‌ها، نقش روش تجربی برای دستیابی به طرح‌های نزدیک به حالت بهینه به‌شدت ناکارآمد است. در مقایسه با آن اثبات شده است که روش‌های بهینه یابی نیرومند شده با الگوریتم‌های مختلف برای رسیدن به راه‌حل‌های بهینه طراحی مؤثرترند.[۲۸]

برگزیدن بهترین جواب از یک مجموعه جوابی که طراحی را از سمت یک هدف به بهترین شکل تأمین می‌کنند بهینه‌سازی در طراحی گفته می‌شود. بهینه‌سازی را می‌توان علم مشخص نمودن بهترین جواب برای یک مسئله که به‌صورت ریاضی تعریف شده است، نامید. واژه "بهتر" دال بر این است که بیش از چند جواب با مقادیر نایکسان برای یک مسئله وجود دارد و بهتر در نظر گرفتن یک جواب، به مسئله مورد بررسی، روش بررسی مسئله و محدوده

تغییرات بستگی دارد. یک مدل بهینه‌سازی به طورکلی دارای سه بخش اصلی است که عبارت‌اند از تابع هدف، محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم‌گیری. مجموعه‌ی کل متغیرهای موجود برای مسئله، فضای تصمیم را تشکیل می‌دهند. [۲۹]

در مقاله بهداد و همکاران (۲۰۲۰) یک مطالعه تحقیقاتی برای تعیین مناسب‌ترین پارامترهای طاقچه نور برای افزایش عملکرد نور روز با استفاده از شاخص روشنایی مفید نور روز، در یک فضای اداری با نمای جنوبی کاملاً شیشه‌ای، با مقایسه پیکربندی‌های مختلف طاقچه نور از طریق یک مطالعه شبیه‌سازی پارامتری انجام شده است. این رویکرد از طراحی پارامتریک، مدل‌سازی و شبیه‌سازی و الگوریتم‌های ژنتیک استفاده می‌کند. پنج پارامتر طراحی قفسه نور در دو انقلاب خورشیدی (ژوئن و دسامبر) و یک اعتدال در ماه مارس تحت شرایط آسمان مالزی بهینه شده است. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که گزینه‌های طراحی بهینه پارامترهای طاقچه نور پتانسیل زیادی برای بهبود روشنایی دارند. برای ارزیابی تناسب پیکربندی‌های مختلف طاقچه سبک برای استفاده در طراحی نما یک معیار آستانه‌های روشنایی مفید نور روز بین ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ لوکس مربوط به اثربخشی محیط اداری با نور روز تعیین شد. پس از بهینه‌سازی، عملکرد روشنایی نور روز مفید در مقایسه با مدل‌های مرجع به ترتیب با میانگین ۱۵.۶٪ و ۴.۷٪ در ۲۱ ژوئن، ۱۷.۵٪ و ۵.۸٪ در ۲۱ مارچ، و ۵.۸٪ و ۱۱.۳٪ در ۲۱ دسامبر افزایش یافته است. [۳۰] استفاده مناسب از نور روز می‌تواند هزینه انرژی ساختمان را تا ۳۰ ٪کاهش دهد.[۳۱] همچنین مقدار مناسب نور روز و کیفیت آن یک رویکرد مهم در جهت ارتقا کیفیت فضا و بهبود رفتار کاربران می‌باشد.[۳۲]روشنایی مفید نور روز یک گونه اصلاح شده روشنایی کافی نور روز می‌باشد که در سال ۲۰۰۵ توسط نبیل و مرداویچ مفهوم پیدا کرده است. در این مدل که از میزان حداقل و حداکثر روشنایی استفاده کرده تا پنج دسته‌بندی روشنایی سالانه را ایجاد کند، میزان ۱۰۰ لوکس و ۳۰۰۰ لوکس همان کمترین و بیشترین میزان روشنایی هستند. میزان بالاتر از ۳۰۰۰ لوکس نشان‌دهنده زمانی است که بیشتر از میزان مورد نیاز روشنایی موجود است و باعث ایجاد خیرگی یا عدم آسایش حرارتی می‌شود. میزان کمتر از ۱۰۰ لوکس روشنایی در فضا نیز ناکافی می‌باشد. محدوده بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ لوکس نور کافی محسوب می‌شود، که می‌تواند به‌تنهایی یا در ترکیب با یک نور مصنوعی عمل کند. روشنایی در محدوده ۳۰۰ تا ۳۰۰۰ لوکس، معمولاً به‌عنوان روشنایی مفید و قابل استفاده برای ساکنان مطرح می‌شود. [۳۳] ونستورم در تحقیقی که در سال ۲۰۱۹ در کشور سوئد و در جهت ارزیابی کیفی نور روز و تأثیر آن بر چگونگی درک فضا انجام داد، در ارتباط با ابعاد پنجره عنوان کرد که هر چه ابعاد پنجره بزرگ‌تر باشد باعث پخش نور یکنواخت‌تری می‌شود، پنجره‌های کوچک‌تر قابلیت این را دارند که با روشن کردن محدوده خاصی از فضا کیفیت‌های خاصی را به فضا بدهد، ابعاد پنجره همچنین در میزان نمایش دید و منظر عامل بسیار مؤثری است. [۳۴] کامور و کرانتی نیز در پژوهش تحلیل محتوایی که در سال ۲۰۱۹ انجام دادند به این نتیجه رسیدند که پارامترهای نوع چیدمان داخلی و ابعاد پنجره دو معیار مهم در طراحی نور روز هستند. همان‌طور که انتظار می‌رود افزایش نسبت پنجره به دیوار باعث افزایش میزان روشنایی فضا می‌شود، در پژوهشی که توسط باردهان و دِبناث در هند پیرامون این موضوع صورت گرفت مشاهده شد که با افزایش «نسبت شیشه به دیوار» از ۲۰ به ۵۰ درصد سطح روشنایی اتاق تا ۶۳ ٪افزایش یافته است. [۳۵] در یک پژوهش دیگر بین متغیرهای شکل ساختمان عوامل طراحی پوسته و نمای ساختمان و تأثیر آن‌ها بر مصرف انرژی برای سرمایش و نور روز یک بهینه‌سازی انجام شده که به عنوان مطالعه موردی بر یک ساختمان اداری در سنگاپور صورت گرفته است.شکل و پوسته نمای ساختمان به صورت یک مدل پارامتریک ارائه‌شده‌اند.نمونه پایه در این تحقیق یک ساختمان مستطیل شکل دارای حیاط مرکزی می‌باشد که در مدل پارامتریک، محل قرارگیری کنج‌های آن و اندازه حیاط مرکزی به عنوان متغیر پژوهش تعیین‌شده‌اند.در نتیجه

تحقیق نمونه بهینه در میان این متغیرها برای مصرف انرژی و میزان دریافت نور روز معرفی شده است.[۳۶]

در مقاله مهدوی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۸) کاربرد هوش مصنوعی و برنامه‌ریزی و برنامه‌دهی الگوریتمیک به منظور تخمین تناسبات و مشخصات فنی لوورهای خارجی و پیشنهاد الگویی جهت طراحی بازشوهای جنوبی فضای اداری در جهت بهره‌وری و مصرف هوشمندانه انرژی و فراهم نمودن سطح نور موردنیاز نیاز فضای داخلی بررسی شد.با توجه به بررسی ۲۰۶۷ حالت شبیه‌سازی شده در موقعیت شهر تهران، نتایج نشان‌دهنده این موضوع است که بهترین میزان انعکاس لوورها بین ۰ الی ۲۰ درصد و بهینه‌ترین فاصله بین لوورها و پنجره در بازه ۰ الی ۲۰ سانتیمتر هستند. نتایج حاکی از آن است که استفاده از لوورهای خارجی جهت کنترل و ارتقاء کیفیت روشنایی بسیار کارآمد است. [۳۷] در تحقیق دیگر با استفاده از مدل‌سازی پارامتریک، شبیه‌سازی عملکرد ساختمان و بهینه‌سازی چند هدفه الگوریتم ژنتیک انجام شده است.با توجه به نتایج بدست آمده از بهینه‌سازی نمای یک ساختمان اداری با توجه به میزان دریافتی تابش خورشیدی و ضریب شکل که از عوامل مؤثر بر مصرف انرژی ساختمان‌ها می‌باشد، بهینه‌سازی مرحله اول بدون در نظر گرفتن اثر بازشوها منجر به بار حرارتی کمتر و افزایش ۵۸ درصدی در فضای داخلی شد.در این مقاله سعی شد از هندسه ساده و رایجی برای ارزیابی نتایج استفاده کنند. با انتخاب یک فرم آزاد با طیف وسیع‌تری از متغیرها، نتایج ملموسی به دست آمد.در مرحله دوم، بهینه‌سازی با ارزیابی نتایج تغییر نرخ بازشوها منجر به کاهش ۸ درصدی بار سرمایشی و ۲۱ درصدی در بار گرمایشی و افزایش ۳۷ درصدی در روشنایی مفید نور روز شد که از ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ لوکس با توجه به نور مناسب در فضا متفاوت است. [۳۸]

مطالعه‌ای برای تعیین پارامترهای طراحی پنجره‌های مناسب برای کلاس مدرسه در آب‌وهوای خنک الجزایر با توجه به حداکثر رساندن آسایش بصری و حرارتی و درعین‌حال به حداقل رساندن مصرف انرژی انجام شد. نسبت پنجره به دیوار بهینه برای یک کلاس درس بدون سایه با جهت شمال ۳۰٪ بود، در حالی که برای جهت‌گیری جنوبی، نسبت پنجره به دیوار ۴۰٪ همراه با شیشه شفاف و سایه‌بان افقی بهترین راه‌حل ارائه شده بود. بسته به نوع سایه‌بان و نوع شیشه مورد استفاده، ممکن است برای جهت‌گیری‌های شرقی و غربی به نسبت پنجره به دیوار ۵۰ تا ۶۰ درصد، بالاتر باشد. [۳۹]

سال ۲۰۱۶ در پژوهشی یک فرایند بهینه‌یابی چندهدفه را برای نوسازی یک مجتمع مسکونی پیشنهاد دادند. اهداف بهینه‌یابی شامل کمترین میزان انتشار کربن و هزینه‌ی چرخه‌ی حیات در طول ۶۰ سال بود. متغیرها شامل مصالح عایق دیوار، عایق پل حرارتی و نسبت پنجره‌ها به دیوار بود. این پژوهش به‌صورت موفقی راه‌حل‌های بهینه را یافت. نتایج همچنین نشان می‌دهد که بهینه‌یابی انرژی مصرفی سالانه که به‌طور معمول بیشتر مورد توجه است،می‌تواند باعث افزایش انتشار گازکربنیک در طول چرخه حیات باشد.[۴۰] با توجه مطالعات انجام گرفته بر روی مقالات با ادبیات پژوهشی مشابه، مشاهده شده که در اکثر مقالات بهینه یابی تک هدفه با تلاش برای رسیدن به یک عامل «نور روز» صورت گرفته که بررسی این موضوع به تنهایی موجب تأثیر منفی روی ابعاد دیگر ساختمان «مباحث انرژی» می‌شود.

برای طراحی هوشمند نماها باید شرایط آب و هوایی محلی، محیط بیرون و فضاهای داخلی با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند عملکرد انرژی، آسایش حرارتی، کیفیت هوای داخل ساختمان، آسایش بصری و غیره در نظر گرفته شود. نماهای هوشمند به طراح کمک می‌کند تا با استفاده از اقلیم و استراتژی‌های آسایش بصری که با شناسه انرژی مطابقت دارد، از ایده به مفهوم معماری منتقل شود. فناوری‌های ساختمان‌های هوشمند کم‌مصرف، به‌ویژه طراحی نما، نقش مهمی در استفاده درست و کم‌مصرف انرژی دارند. مطابق با آخرین پیشرفت‌های فناوری، ساختمان‌های هوشمند سازگار

با محیط‌زیست خود می‌توانند مصرف انرژی بسیارکارآمدی را فراهم کنند.[۴۱] تصمیمی که در مرحله طراحی اولیه ساختمان گرفته می‌شود، برای طراحی ساختمان با مصرف انرژی بسیار مهم است همان‌طور که یک موجود هوشمند از کمترین انرژی ممکن برای زنده ماندن استفاده می‌کند.[۴۲] معماران به‌گونه‌ای از ابزار مدل‌سازی پارامتریک استفاده کردند تا نیازهای فرمی، برنامه‌ریزی و محیطی را در طراحی نما تلفیق کنند و مطمئن شوند که فرم ساختمان به بهینه‌ترین جهت خورشید از طریق طراحی غیرفعال یا منفعل برای روشنایی کف طبقات دست‌یافته است و بیشترین مقدار روشنایی روز را در هرجا که مورد نیاز است تأمین می‌کند. برای مثال فضای پشتیبانی آزمایشگاه در جبهه غربی قرارگرفته تا از آفتاب آزاردهنده بعدازظهر در امان باشد. [۴۳] کلمه پاسخگو می‌تواند به عنوان عکس العمل مثبت و سریع تعریف شود. طراحی پاسخگو یک زمینه گسترده برای پوشش دادن حرکات کاربردی، پاسخگویی به محیط و اهداف زیبایی شناسانه است . این اهداف شامل سودمندتر ساختن ساختمان، کارآیی بهتر انرژی و توزیع بهتر آن، زیبایی بیشتر و لذت‌بخش‌تر است . مزیت‌های معماری پاسخگو همچنین می‌تواند شامل طولانی‌تر شدن عمر ساختمان توسط سازگارشدن و انطباق بیشتر با کاربران باشد. فناوری‌های پیشرفته و متریال جدید پوشش‌های ساختمانی پاسخگو تولید کرده است، و از این طریق به بهره‌وری بهینه ساختمان و تجربه‌ای منحصربه‌فرد برای کاربران دست یافته است . این عوامل معماری را قادر خواهد کرد که جنبه‌های پدیدارشناسانه متفاوتی داشته باشد، که میان مردم و مکان ارتباط ایجاد می‌کند. [۴۴] فرم معماری نما هویت آن و همچنین رابطه آن با نیروهای خرد اقلیم محیطی مانند تابش خورشید را تعیین می‌کند .ماهیت پویای نور روز و موقعیت ساکنین می‌تواند باعث ایجاد برخی مسائل مانند افزایش گرما و ناراحتی بصری شود که باید در زمان واقعی کنترل شوند. [۴۵] یک روش بهینه یابی پوسته ساختمان با توجه به کمترین بار حرارتی، کمترین بار سرمایش و بیشترین نور روز فراهم کردند. متغیرها برای بهینه یابی نسبت پنجره به دیوار و نوع پنجره‌ها بودند.[۴۶] استانداردها و ضوابط کنونی برای روشنایی فضاهای اداری پارامترهایی را در طراحی روشنایی انتخاب کرده‌اند و معیارها و شاخص‌هایی را برای ارزیابی آن‌ها در نظر گرفته‌اند. در اغلب آن‌ها، شدت روشنایی افقی در سطح میز کار و یا فاکتور نور روز، پارامترهای اصلی طراحی روشنایی در فضاهای اداری هستند. سطح روشنایی مورد نیاز در یک فضا به فاکتورهای مختلفی همچون نوع کار، طول مدت انجام کار، سن کارمندان و ... بستگی دارد. [۴۷] یکپارچه‌سازی و ارزیابی فرم‌ها و تزیینات معماری معاصر، اعمال شده بر نما و پوسته ساختمان از لحاظ مصرف انرژی و کارایی و عملکرد نور روز را بررسی می‌کند. [۴۸] سیستم‌های نور روز به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. در یک سیستم روشنایی غیرفعال، طرح‌های ایستا و غیرردیابی برای جمع‌آوری، انعکاس و توزیع تابش خورشید در داخل ساختمان اتخاذ می‌شوند که شامل استفاده از پنجره‌ها، درهای شیشه‌ای کشویی، موجبرهای ساکن و نورگیرها می‌شود. در یک سیستم روشنایی روز فعال، نور خورشید توسط ترکیبی از دستگاه‌های نوری و مکانیکی با مکانیزم ردیابی خورشید جمع‌آوری می‌شود که به‌طور فعال خورشید را ردیابی می‌کند و نور روز را از طریق یک موجبر در داخل ساختمان توزیع می‌کند. تفاوت بین سیستم‌های روشنایی غیرفعال و فعال با نحوه جذب و انتشار نور خورشید به‌خوبی مشخص می‌شود.[۴۹] شاخص روشنایی مفید نور روز که عامل تعیین‌کننده در بحث آنالیز نور روز دریافتی است ارتباط مستقیمی روی میزان دریافت انرژی از تابش خورشید دارد که با توجه به اقلیم گرم و خشک شیراز باید به نحوی این بهینه یابی صورت گیرد که دریافت انرژی خورشیدی موجب افزایش بیش از حد دما در ساختمان نشود که برای محقق ساختن این امر بهینه یابی دو هدفه با شاخص دوم «تابش کل» در دستور کار قرار گرفته تا موجب پوشش این خلأ پژوهشی شود.

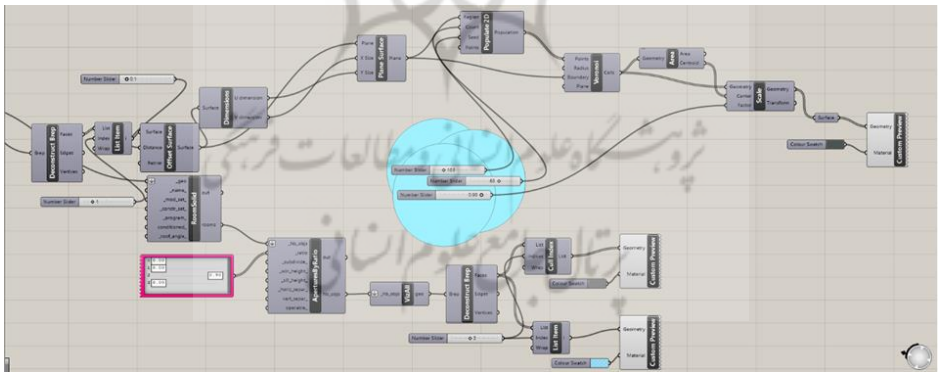
مواد و روش‌ها

در این پژوهش با استفاده از روش طراحی الگوریتمیک، یک پوسته مشبک با هندسه ورونیی به منظور بهبود شرایط روشنایی ساختمان اداری پیشنهاد شده است. در گام اول اتاقی به عنوان اتاق نمونه ساخته شده و پوسته داخلی و بیرونی اضافه شده است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقادیر و مؤلفه‌های اصلی بهینه‌سازی شده‌اند.در ابتدا اتاق نمونه بدون پوسته، در مرحله بعدی با لوورهای روتین افقی و در مرحله آخر با پوسته مشبک طراحی شده با هندسه ورونیی میزان تأثیر پوسته بر میزان روشنایی کنترل شده و نیز میزان دریافت انرژی از تابش خورشید مورد بررسی و بهینه یابی قرار گرفته است.

مدل‌سازی پوسته

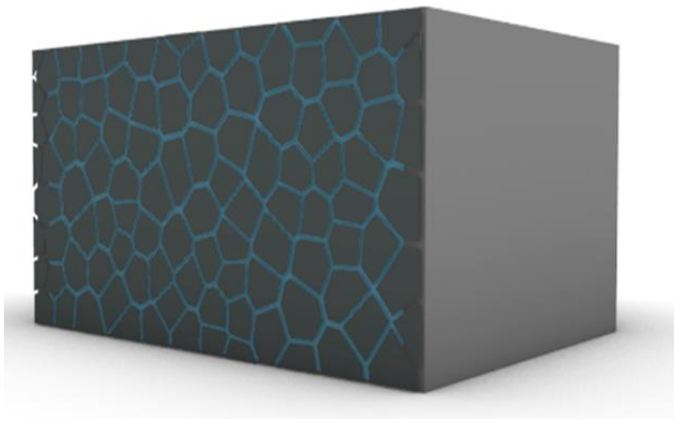
فضای مورد مطالعه اتاقی است با ابعادی به طول ۲۰ متر، عرض ۱۳.۶۰ متر و ارتفاع ۳.۶۰ متر را دارا است که طول ۲۰ متر در جبهه‌های جنوبی و شمالی و عرض ۱۳.۶۰ متر در وجوه شرق و غرب این اتاق است. متغیرهای اصلی در ساخت شامل طول، عرض، ارتفاع فضا و همچنین موقعیت فضا در ساختمان هستند که به عنوان اتاق نمونه معرفی می‌شوند.

با توجه به ایده طراحی و کاربری مورد نظر، دو پوسته برای ساختمان در نظر گرفته شده است که پوسته‌ی بیرونی ساختمان به‌صورت کلی با هندسه‌ی ورنوی مدل‌سازی می‌شود. ساخت این هندسه شامل سه عامل تشکیل دهنده‌ی تعداد، گشودگی و سیدهای تصادفی است که عملکرد این پوسته کنترل مقدار نور روز وارد شده به پنجره ساختمان و کنترل میزان دریافت تابش خورشید است. پوسته داخلی به‌عنوان دیوار اصلی ساختمان، دارای بازشوی مستطیل شکل است که ابعاد نهایی آن به‌صورت پارامتریک مدل‌سازی می‌شود. این مستطیل "بازشو اولیه" نامیده می‌شود. بازشو اولیه، باید به‌گونه‌ای مدل‌سازی شود که محدود به مساحت دیوار اتاق بوده و مساحت آن از ۴۰ درصد مساحت اتاق بیشتر نگردد.



شکل ۱. الگوریتم نویسی ایجاد هندسه ورونی

همان‌طور که در شکل مربوط (شکل ۱) نشان داده شده است فرآیند طراحی پوسته بیرونی ساختمان بر اساس هندسه ورونیی شبیه‌سازی شده است و خروجی این الگوریتم نویسی (در شکل ۲) به صورت پوسته اولیه خام و بدون بهینه یابی قابل مشاهده است.



شکل ۲. پوسته ایجاد شده در حالت اولیه

بهینه‌یابی دو هدفه

در این پژوهش بهینه‌یابی بر اساس دو معیار نور روز و دریافت تابش به عنوان دو هدف اصلی صورت گرفته است. به منظور در نظر گرفتن شرایط مناسب روشنایی از معیار روشنایی مفید نور روز برای سنجش مقدار نور روز بهره گرفته شده است. هر چقدر درصد روشنایی مفید نور روز بیشتر باشد بدین معنی است که احتمال گشودگی بیشتری وجود دارد و به تبع آن نور طبیعی بیشتری وارد فضا می‌شود. به همین دلیل احتمال اینکه عددی که در بخش «تابش کل» بر حسب کیلو وات بر ساعت به دست می‌آید نیز بیشتر و بزرگ‌تر بشود وجود دارد زیرا انرژی جذب شده توسط نور خورشید مقدار بیشتری است و موجب گرم‌تر شدن فضا خواهد شد. این موضوع با توجه به اقلیم گرم و خشک شیراز موجب افزایش مصرف انرژی برای کاهش دما می‌شود. ازاین‌رو در نظر گرفتن دو هدف ذکر شده به لحاظ دستیابی به مقادیر بهینه می‌تواند سودمند باشد. روش مورد استفاده در بهینه یابی به صورت بهینه یابی چند هدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب و مدل‌سازی پارامتریک در پلتفرم راینو و افزونه گرسهاپر با بهره‌گیری از ابزارهای آنالیز محیطی همچون انرژی‌پلاس و رادیانس برای محاسبات عددی بوده است.

جدول ۱. ارتباط متغیرها و روش انجام کار

ردیف	متغیر	شاخص	روش انجام کار
۱	scale	دربرگیرنده تناسبات ابعاد قطعات پوسته	برای ایجاد پوسته بهینه مورد نظر از سه پارامتر تناسبات، تعداد و حالت های قرارگیری قطعات بهره می بریم که با بکار گیری فرآیند های الگوریتم ژنتیک از میان تمام حالت های ممکن ایجاد یک پوسته گزینه های برتر با بهترین مقادیر ممکن در پارامتر های عنوان شده بوجود می آیند.
۲	count	دربرگیرنده تعداد قطعات	
۳	seed	حالت های تصادفی قرارگیری در کنار هم قطعات	

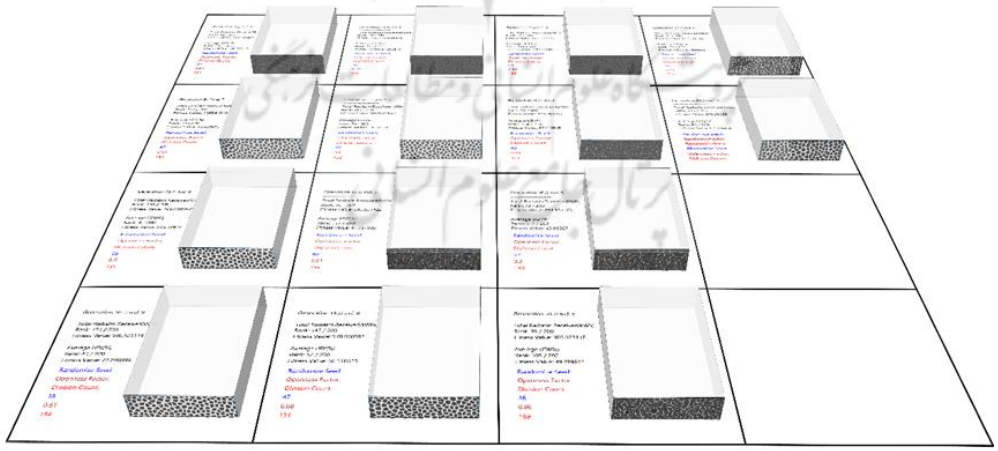
طبق تحلیل عناصر روش‌شناختی پژوهش (جدول ۱) ارتباط متغیرها با شاخص‌های ارزیابی و در نهایت روش انجام کار به صورت اجمالی بیانگر نحوه تأثیرپذیری مؤلفه‌های یاد شده در شکل‌گیری پوسته بیرونی ساختمان بر اساس تناسبات و جبهه مورد نظر است.

یافته‌ها

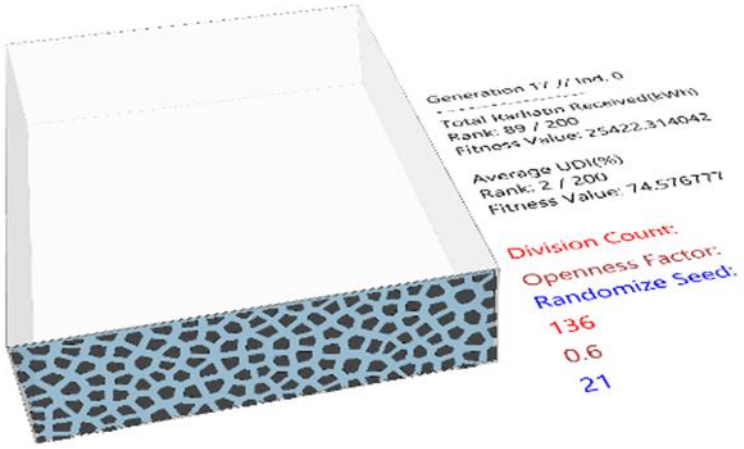
بخش اول: بهینه‌یابی نور روز با شاخص روشنایی مفید نور روز (UDI)

برای ایجاد پوسته‌های جبهه‌های جنوب، شرق و غرب با استفاده از الگوریتم ژنتیک از میان ۲۰۰ حالت برتر بهینه‌یابی صورت گرفته و در نهایت به ۳۰ طرح برای جبهه جنوبی مطابق شکل ۳، ۱۴ حالت برای جبهه شرقی مطابق شکل ۴ و ۱حالت برای جبهه غربی مطابق شکل ۵ رسیده‌ایم که این حالت پوسته‌های به‌دست آمده با توجه به تأثیرپذیری از «تابش کل» در بازه‌ها، درصدی بین ۲۱.۰۹ تا ۸۰.۲۱٪ را ایجاد می‌کند در حالی که اگر به انرژی توجهی نمی‌شد این درصدها به بیش از ۹۰ می‌رسیدند.

شکل ۳. حالت‌های بهینه به‌دست آمده برای جبهه جنوبی.



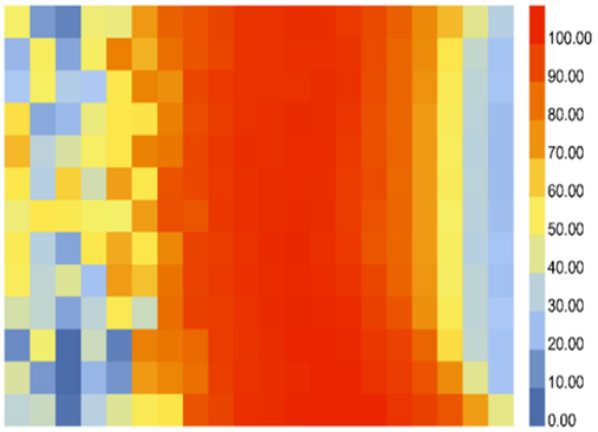
شکل ۴. حالت های به دست آمده برای جبهه شرقی.



شکل ۵. حالت‌های به دست آمده برای جبهه غربی.

طبق آنالیزهای انجام شده (شکل‌های ۶، ۷ و ۸) که به ترتیب نمایانگر نور روز دریافتی برای جبهه‌های جنوبی، شرقی و غربی هستند که بارنگ‌های آبی تا قرمز و از بازه ۰ تا ۱۰۰ برحسب درصد درجه‌بندی شده‌اند که هرچه نور مناسب‌تری یعنی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ لوکس، وارد شده باشد رنگ آن بخش از فضا قرمزتر است و به این معناست که از خیرگی یا تاریکی دور است و در نتیجه محل مناسب‌تری برای استفاده کارکنان است و بخش‌هایی که روشن‌تر و یا آبی رنگ هستند مکان‌هایی هستند که در آن‌ها امکان رخداد خیرگی یا تاریکی ممکن است.

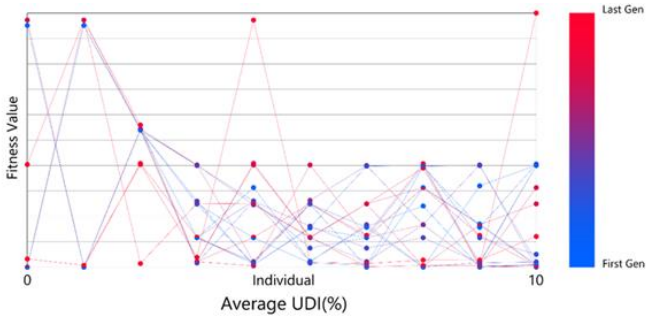
شکل ۶. آنالیز روشنایی مفید نور روز برای جبهه جنوبی



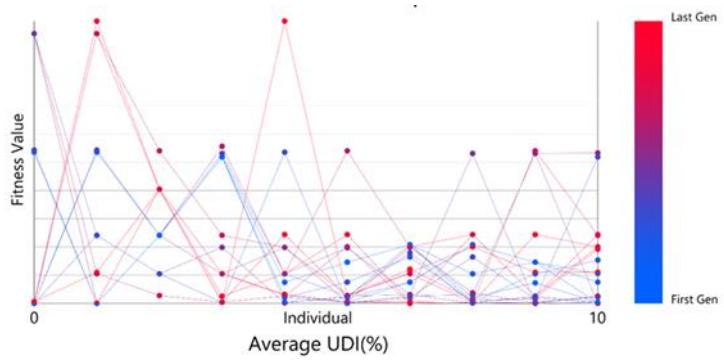
شکل ۷. آنالیز روشنایی مفید نور روز برای جبهه شرقی.

شکل ۸ . آنالیز روشنایی مفید نور روز برای جبهه غربی.

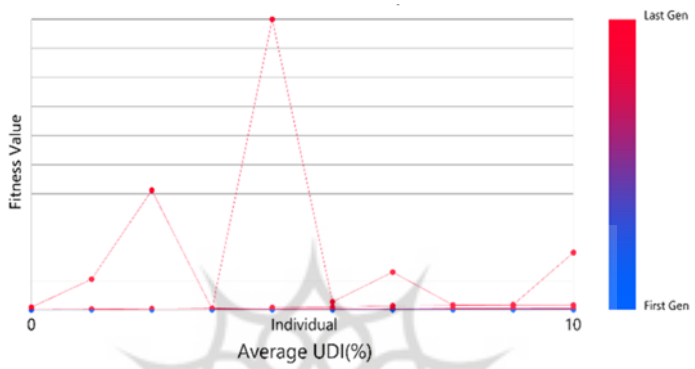
اشکال ۹، ۱۰ و ۱۱ نیز نمایانگر گراف منحصر به فرد جبهه‌های جنوبی، شرقی و غربی در مسیر پروراندن ژنوم‌های ابتدایی به حالت‌های نهایی طبق پروسه الگوریتم ژنتیک هستند که هر یک از این نسل‌ها شامل یک پاره‌خط است که از نقاط با رنگ آبی به عنوان ژنوم‌های ابتدایی شروع و به نقاط قرمز به عنوان ژنوم‌های نهایی تبدیل می‌شوند که با دنبال کردن یک نقطه به چگونگی تکاملی و تصادفی بودن این جواب‌ها در پی جستجوی جواب‌هایی که نسل به نسل در حال بهبود یافتن هستند پی می‌بریم که بازه این نسل‌ها از ۰ تا ۱۰ می‌باشد.



شکل (۹) نمودار عملکرد تکامل ژنوم ها در میانگین روشنایی مفید نور روز برای جبهه جنوبی.



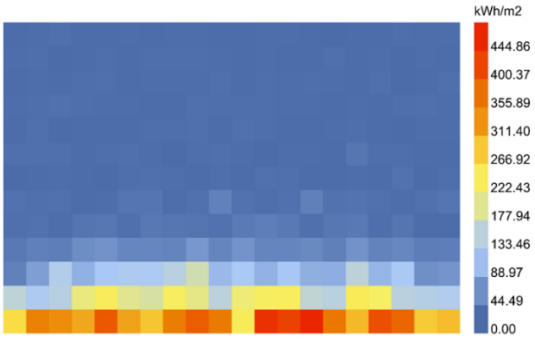
شکل (۱۰) نمودار عملکرد تکامل ژنوم ها در میانگین روشنایی مفید نور روز برای جبهه شرقی.



شکل (۱۱) نمودار عملکرد تکامل ژنوم ها در میانگین روشنایی مفید نور روز برای جبهه غربی.

بخش دوم: بهینه یابی از نظر دریافت تابش

پوسته‌های پدید آمده فوق که برای برگزیده شدن بایستی به نحوی کمترین میزان تابش کلی را داشته باشید که موجب جذب کمتر گرمای حاصل تابش خورشید برحسب کیلووات بر ساعت شود که در فرآیند فوق بهینه‌ترین پوسته‌ها دارای بازه‌ای بین ۸۲۵.۹۶ الی ۲۵۴۴۲ کیلووات ساعت گرما حاصل از تابش خورشید را جذب کرده‌اند که با توجه به اقلیم شیراز هرچه این عدد کمتر باشد مناسب‌تر است. شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ به ترتیب برای جبهه‌های جنوبی، شرقی و غربی نمایانگر آنالیز فضا در بازه زمانی یک‌ساله فضای مذکور بر حسب کیلو وات بر ساعت هستند که بخش‌های آبی‌تر گرمای کمتر و بخش‌های زرد و قرمز قسمت‌هایی هستند که در اثر تابش خورشید گرمای بیشتری را جذب کرده‌اند.

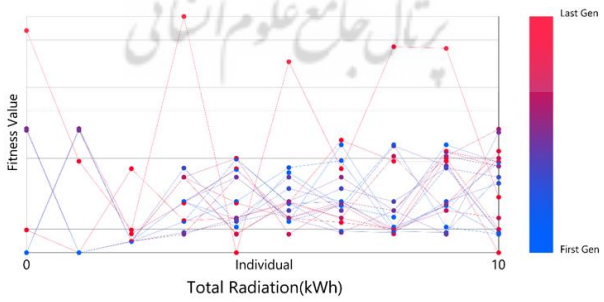


شکل ۱۲. آنالیز دریافت حداکثر تابش خورشید برای جبهه جنوبی.

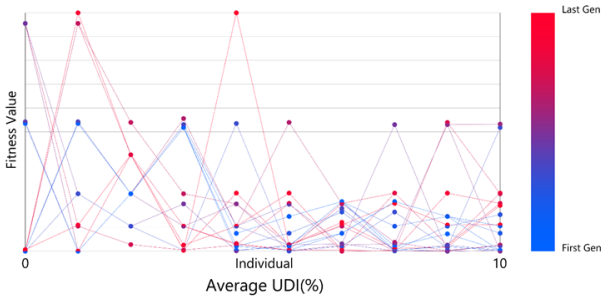
شکل ۱۳. آنالیز دریافت حداکثر تابش خورشید برای جبهه شرقی.

شکل ۱۴. آنالیز TR (kwh) برای جبهه غربی.

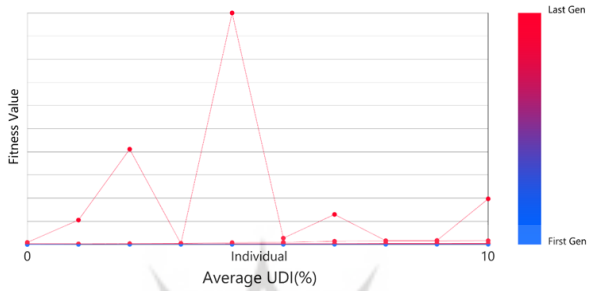
شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ نیز نمایانگر گراف منحصربه‌فرد جبهه‌های جنوبی، شرقی و غربی در مسیر پروراندن ژنوم‌های ابتدایی به حالت‌های نهایی طبق پروسه الگوریتم ژنتیک هستند که هر یک از این نسل‌ها شامل یک پاره‌خط است که از نقاط با رنگ آبی به عنوان ژنوم‌های ابتدایی شروع و به نقاط قرمز به عنوان ژنوم‌های نهایی تبدیل می‌شوند که با دنبال کردن یک نقطه به چگونگی تکاملی و تصادفی بودن این جواب‌ها در پی جستجوی جواب‌هایی که نسل به نسل در حال بهبود یافتن هستند پی می‌بریم که بازه این نسل‌ها از صفر تا ۱۰ می‌باشد.



شکل ۱۵. نمودار عملکرد دریافت حداکثر تابش خورشید برای جبهه جنوبی.



شکل ۱۶. نمودار عملکرد دریافت حداکثر تابش خورشید برای جبهه شرقی.

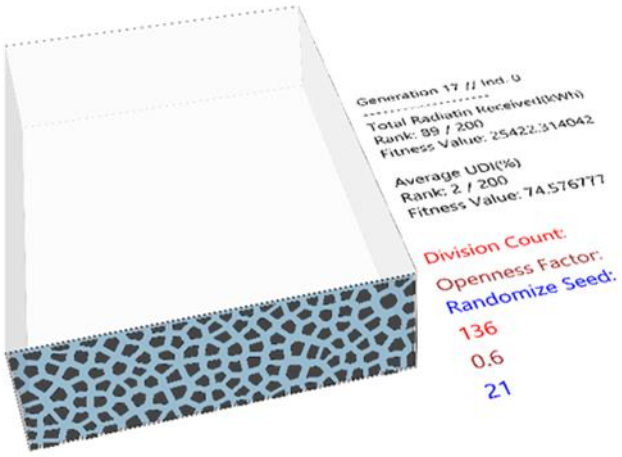


شکل ۱۷. نمودار عملکرد دریافت حداکثر تابش خورشید برای جبهه غربی.

با توجه به تحلیل‌های فوق در خصوص خروجی‌های TR و روشنایی مفید نور روز می‌بایست برای هر جبهه یک پوسته انتخاب شود که با توجه به اهمیت نور دریافتی باید انتخاب نهایی مقدار بیشینه درصد روشنایی مفید نور روز را داشته باشد که پوسته نهایی و مشخصات آن برای جبهه جنوبی در شکل ۱۸، برای جبهه شرقی در شکل ۱۹ و برای جبهه غربی در شکل ۲۰ قابل مشاهده است.

شکل ۱۸. طرح انتخابی برای پوسته جنوبی.

شکل ۱۹. طرح انتخابی برای پوسته شرقی.



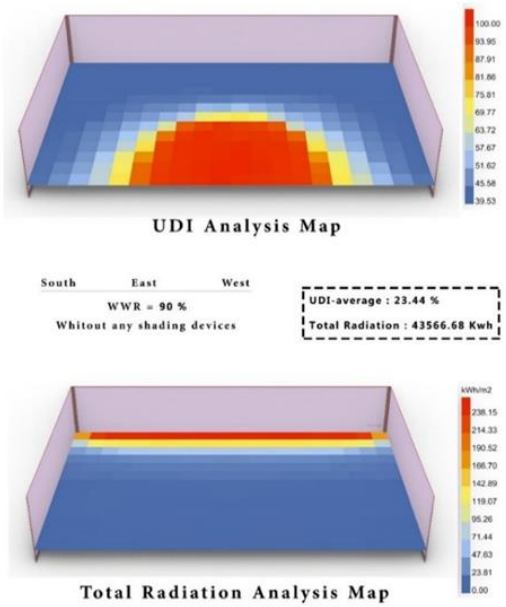
شکل ۲۰. طرح انتخابی برای پوسته غربی.

- جبهه جنوبی پوسته با شاخص روشنایی مفید نور روز ۸۰.۲۱ ٪ و ۱۵۷۴۳ کیلو وات ساعت جذب انرژی از تابش خورشید (تابش کلی)
- جبهه شرقی پوسته با شاخص روشنایی مفید نور روز ۷۳.۶۵ ٪ و ۱۰۶۷ کیلو وات ساعت جذب انرژی از تابش خورشید (تابش کلی)
- جبهه غربی پوسته با شاخص روشنایی مفید نور روز ۷۴.۵۷ ٪ و ۲۵۴۲۲ کیلو وات ساعت جذب انرژی از تابش خورشید (تابش کلی)

بخش سوم: آنالیز پوسته‌های طراحی و انتخاب شده در کنار یکدیگر

حالت اول: شیشه‌های سرتاسری بدون پوسته با ۹۰٪ نسبت پنجره به سطح

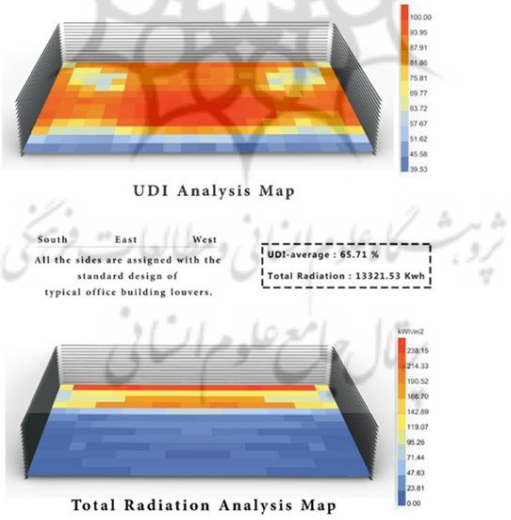
در شکل ۲۱ آنالیز در سه جبهه جنوب، شرق و غرب انجام شده است. WWR برابر با ۹۰٪ است و نما از یک پوسته که ۹۰٪ آن از شیشه است تشکیل شده است. در این حالت متوسط روشنایی مفید نور روز برابر با ۲۳.۴۴٪ و تابش کلی برابر با ۴۳۵۶۶.۶۸ kwh است. با توجه به اینکه ساختمان اداری در شهر شیراز که منطقه گرم و خشک واقع شده است میزان میانگین روشنایی مفید روز خیلی کم، و حداکثر انرژی دریافتی از تابش خورشید بسیار زیاد است. بدین منظور برای بهینه‌یابی دو هدفه حداکثر روشنایی مفید روز و حداقل انرژی دریافتی از تابش خورشید از پوسته دوم استفاده خواهد شد.



شکل ۲۱. نمودار آنالیز مدل‌سازی بدون وجود پوسته دوم.

حالت دوم: نسبت سطح به پنجره ۹۰ ٪ با به‌کارگیری لوورهای افقی متداول برای کاربری اداری

در شکل ۲۲ از لوورهای افقی به عنوان پوسته دوم استفاده شد که میزان متوسط روشنایی مفید نور روز به ۶۵.۷۱٪ افزایش یافت و میزان TR به ۱۳۳۲۱.۵۳ kwh کاهش یافت؛ که نسبت به حالت نمای یک پوسته شکل ۲۱وضعیت بهتری دارد و نشان از بهبود وضعیت ۴۲.۲۷ درصدی دریافت نور روز و کاهش ۳۰۲۴۵ هزار کیلو وات بر ساعتی دریافت گرما از انرژی خورشیدی را دارد.

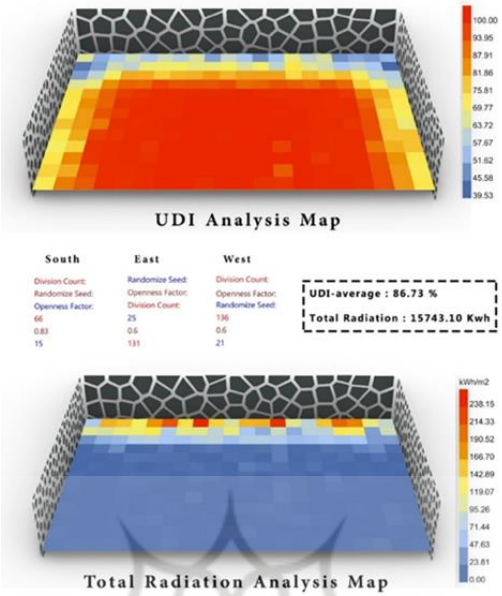


شکل ۲۲. نمودار آنالیز مدل‌سازی با به‌کارگیری لوور های افقی.

حالت سوم: نسبت سطح به پنجره ۹۰ ٪ با طراحی و ایجاد یک پوسته ورنوی با هندسه جدید.

حالت سوم: در شکل ۲۳ از پوسته با الگوریتم ورنوی به‌عنوان پوسته دوم استفاده شده؛ در این حالت میزان متوسط روشنایی مفید نور روز به ۸۶.۷۳٪ رسیده است که نسبت به حالت پوسته دوم با لوورهای افقی بیشتر و بهینه‌تر است و میزان TR به 15743.10 kwh رسید که نسبت به حالت دوم بیشتر شده ولی چون میزان میانگین روشنایی مفید نور روز به حداکثر رسیده، افزایش انرژی دریافتی از تابش خورشید در این حالت قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

میزان افزایش دریافت بهینه برای نور روز نسبت به حالت اول ۶۳.۲۹ درصد و نسبت به حالت دوم ۲۱.۰۲ درصد است و میزان تغییرات TR به نسبت حالت اول ۲۷,۸۲۳.۵۸ کیلو وات بر ساعت و نسبت به حالت دوم ۲,۴۲۱.۵۷ کیلو وات بر ساعت افزایش داشته است.



شکل ۲۳. نمودار آنالیز مدل‌سازی با طراحی پوسته وروننی.

دستاوردهای پژوهش مطالعات قبلی در این حوزه [۵۰-۶۲] را تائید می‌نماید. در شکل‌های مربوط به تحلیل آنالیزهای متوسط روشنایی مفید نور روز، قسمت‌هایی که با رنگ قرمز مشخص شده‌اند، بهترین نقاطی هستند که نور روز را بدون خیرگی دریافت می‌کنند و برای مستقر شدن افراد برای انجام کار اداری مناسب می‌باشد. بخش‌های آبی رنگ اصلاً مکان مناسبی برای کار کردن افراد نمی‌باشد زیرا احتمال خیرگی یا تیرگی در آن وجود دارد. در تصاویر مربوط به تابش کلی، نقاط قرمز رنگ، بخش‌هایی هستند که انرژی دریافتی از تابش خورشید در آن‌ها زیاد است و نسبت به بخش‌های دیگر، گرم‌تر می‌باشند؛ درصورتی‌که بخش‌های آبی رنگ شرایط بهتری را دارند و نسبت به نقاط دیگر خنک‌تر می‌باشند.

بحث و نتیجه‌گیری

ساختمان‌ها با کاربری اداری، از جمله بناهایی هستند که با توجه به ساعات استفاده از آن‌ها حدود ۸ ساعت در طول روز، و همچنین نوع فعالیت کاربران آن، در بازدهی کارایی خود بسیار تحت تأثیر هندسه خورشیدی واقع می‌شوند. تابش خورشید در طول روز یعنی ساعات فعالیت ساختمان، به طور مستقیم تأثیرگذاری قابل‌توجهی بر دو عملکرد کیفیت نور روز که منجر به آسایش یا عدم آسایش بصری کاربران می‌شود، و همچنین نرخ میزان مصرف انرژی دارد. این مطالعه طی یک فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن دو شاخص روشنایی مفید نور روز (UDI) و «دریافت تابش کل» در نظر داشته است تا آن‌ها را بهبود بخشد. در این خصوص، طی این فرآیند بهینه‌سازی، پوسته‌ای منحصر به فرد در هر کدام از جبهه‌های جنوبی، شرقی و غربی طراحی شده است که علاوه بر اینکه

پاسخگوی شرایط اقلیمی باشد پاسخگوی مسائل زیبایی‌شناسی، فرهنگی و هویتی نیز باشد.

برای تحقق این مهم، در لایه اول پوسته، الگوریتم هندسه ورنوی با فرآیند طراحی مولد به صورت دیجیتالی به‌کار گرفته شده است تا با بهره‌گیری از متغیرهای پخشِ تصادفی، شعاع تشکیل سلول‌ها (Openness) که منجر به گشودگی بخش شفاف پنجره می‌شود و همچنین تعداد تقسیمات سلول‌ها، بهینه‌ترین پاسخ‌ها را در عملکردهای نام‌برده در خلال الگوریتم تکاملی ژنتیک برگزیده شود. چنانچه مشخص شد؛ تشکیل هندسه‌های چهار تا شش ضلعی در این فرآیند، توانستند تا پاسخ‌گو و مناسب برای حل این چالش باشند که طی یک فرآیند دیجیتال با در نظرگیری شاخص‌های روشنایی مفید نور روز و دریافت تابش کل، با بهره‌گیری از الگوریتم NSGA-II شروع به ایجاد صدها گزینه طراحی در نوع پوسته با حالت‌های مختلف در یک فضای طراحی چندین بُعدی کند.

جدول ۲. مشخصات پارامترها و متغیر های تشکیل دهنده جبهه های مختلف

ردیف	درصد روشنایی مفید نور روز	میزان دریافت تابش	تعداد تقسیم سلول‌ها	ضریب گشودگی	دانه بندی تصادفی / پخشِ تصادفی
	UDI	(Kwh)	Division Count	Openness Factor	Randomize Seed
جبهه شرقی	٪۷۳.۶۵	۱۰۶۷	۱۳۱	۰.۶	۲۵
جبهه جنوبی	٪۸۰.۲۱	۱۵۷۴۳	۶۶	۰.۸	۱۵
جبهه غربی	٪۷۴.۵۷	۲۵۴۲۲	۱۳۶	۰.۶	۲۱

در هر مرحله، گزینه‌های مناسب‌تر بر اساس شاخص‌های فوق و با بهترین میزان گشودگی و بازشو انتخاب شده و در نهایت به تعداد محدودی گزینه برای هر جبهه رسیده است که همگی بهترین‌های ممکن در آخرین جبهه بهینه‌سازی (Pareto Front)هستند. در این مرحله هیچ کدام از این گزینه‌ها نسبت به دیگری برتری ندارند و همگی به بهترین شکل ممکن نور روز کاربردی را به نحوی بهینه‌یابی کرده‌اند که اتلاف انرژی در ساختمان رخ ندهد و در واقع معیاری فدای معیار دیگر نشود. انتخاب پوسته نهایی از این بهترین پاسخ‌ها در هر وجه از ساختمان بر اساس معیارهای شخصی و سلیقه‌ای معمار انتخاب خواهند شد که در این مقاله از دویست حالت بهینه شده ممکن برای هر جبهه در نهایت حالت‌هایی انتخاب‌شده‌اند که بیشترین مقدار دریافت بهینه نور روز را دارا باشند که همان‌طور که در جدول ۲ به آن اشاره شده است به ترتیب برای جبهه غربی، میزان برازش و فیتنس روشنایی مفید نور روز برابر با ٪۷۴.۵۷ با تعداد تقسیم برابر با ۱۳۶، عامل گشودگی یا ضریب عامل گشودگی، برابر با ۰.۶ و دانه‌بندی تصادفی برابر با ۲۱ و برای جبهه جنوبی، میزان برازش روشنایی مفید نور روز برابر با ٪۸۰.۲۱ با تعداد تقسیم‌بندی برابر با ۶۶، عامل گشودگی برابر با ۰.۸ و دانه‌بندی تصادفی برابر با ۱۵ و برای جبهه شرقی، میزان برازش و فیتنس روشنایی مفید نور روز برابر با ٪۷۳.۶۵ با تعداد تقسیم برابر با ۱۳۱، عامل گشودگی برابر با ۰.۶ و میزان تصادفی کردن اعداد برابر با ۲۵ است و هندسه ورنوی در لایه اول، علاوه بر تحقق اهداف فوق، این پتانسیل را در اختیار معمار قرار داد تا لایه دوم پوسته با یک هویت ایرانی و اسلامی بر پایه هندسه‌های شش و هشت ضلعی، بدون ایجاد خدشه در لایه اول، شکل و فرم خود را در فرآیند طراحی معمار پیدا کند. جمع‌بندی یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد پوسته طراحی شده حاصل فرایند بهینه‌سازی و استفاده از هندسه ورونویی عملکرد مناسبی در بهبود شاخص روشنایی مفید نور روز و کاهش دریافت تابش خورشید دارد .

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه‌های اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان در مقاله و منابع مالی: سهم نویسنده اول شامل انجام جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات و مدل‌سازی و انجام آنالیزهای پروژه و اطلاعات آماری برابر با ۵۰٪ و سهم نویسنده دوم جهت کنترل مراحل ایده پردازی، مدیریت فرآیند و داده‌های فنی برابر با ۵۰٪ بوده است.

حمایت‌ها: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

1.

2. Karakoç E , Çağdaş G. Adaptive Architecture Based on Environmental Performance: An Advanced Intelligent Façade (AIF) Module. Gazi University Journal of Science. 2021, 34.3: 630-650. https://doi.org/10.35378/gujs.725902

3. Yuan Y, et al. Bionic building energy efficiency and bionic green architecture: A review. Renewable and sustainable energy reviews. 2017, 74: 771-787. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.004

4. Oxman R. Digital architecture as a challenge for design pedagogy: theory, knowledge, models and medium. Design studies. 2008, 29.2: 99-120. https://doi.org/10.1016/j.destud.2007.12.003

5. Lynn G, et al. Greg Lynn Form. Rizzoli. 2008. https://doi.org/10.1002/ad.861

6. Zhang B T. Hypernetworks: A molecular evolutionary architecture for cognitive learning and memory. IEEE computational intelligence magazine, 2008, 3.3: 49-63. https://10.1109/MCI.2008.926615

7. Norouzi N, Shabak M, Embi MR, Khan TH. The architect, the client and effective communication in architectural design practice. Procedia-Social and Behavioral Sciences. 2015 Jan 27;172:635-42. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.413

8. Wang J, Xu C, Zhang J, Zhong R. Big data analytics for intelligent manufacturing systems: A review. Journal of Manufacturing Systems. 2022 Jan 1;62:738-52. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.005

9. Mergel I, Edelmann N ,Haug N. Defining digital transformation: Results from expert interviews. Government information quarterly. 2019, 36.4: 101385. https://doi.org/10.1016/j.giq.2019.06.002

10. Rolvink A, Van De Straat R, Coenders J. Parametric structural design and beyond. International Journal of Architectural Computing. 2010, 8.3: 319-336. https://doi.org/10.1260/1478-0771.8.3.3

11. Labib R. Trade-off method to assess the interaction between light shelves and complex ceiling forms for optimized daylighting performance. Advances in Building Energy Research. 2015,9(2), 224-237. https://doi.org/10.1080/17512549.2015.1014838

12. Eltaweel A; Yuehong S U. Parametric design and daylighting: A literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017, 73: 1086-1103. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.011

13. Evins R. A review of computational optimization methods applied to sustainable building design. Renewable and sustainable energy reviews. 2013, 22: 230-245. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.004

14. Kornuta D, Abbud-Madrid A, Atkinson J, Barr J, Barnhard G, Bienhoff D, Blair B, Clark V, Cyrus J, DeWitt B, Dreyer C. Commercial lunar propellant architecture: A collaborative study of lunar propellant production. Reach. 2019 Mar 1;13:100026. https://doi.org/10.1016/j.reach.2019.100026

15. Heydarian A, Carneiro JP, Gerber D, Becerik-Gerber B, Hayes T, Wood W. Immersive virtual environments versus physical built environments: A benchmarking study for building design and user-built environment explorations. Automation in Construction. 2015 Jun 1;54:116-26. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.020

16. Roudsari MS, Pak M. Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. Paper 122 presented at the Proceedings of the 13th International IBPSA Conference Held in Lyon, France Aug.2013 https://doi.org/10.26868/25222708.2013.2499

17. Nguyen A, Reiter S, Rigo P. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. Applied Energy. 2014, 113, 1043-1058. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061

18. Machairas V, Tsangrassoulis A, Axarli K. Algorithms for optimization of building design: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014, 31, 101-112. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.036

19. Arosha G, Richard H.A model based on Biomimicry to enhance the ecologically sustainable design, Architectural Science Review. 2012, 55:3, 224-235. https://doi:10.1080/00038628.2012.709406

20. Amoruso FM, Dietrich U, Schuetze T. Integrated BIM-parametric workflow-based analysis of daylight improvement for sustainable renovation of an exemplary apartment in Seoul, Korea. Sustainability. 2019, 11.9: 2699. https://doi.org/10.3390/su11092699

21. Machairas V, Tsangrassoulis A, Axarli K. Algorithms for optimization of building design: A review. Renewable and sustainable energy reviews. 2014, 31: 101-112. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.036

22. Elbeltagi E, Hegazy T, Grierson D. Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms. Advanced engineering informatics. 2005, 19(1), 43-53. https://doi.org/10.1016/j.aei.2005.01.004

23. Chumachenko D, Meniailov I, Bazilevych K, Kuznetsova Y, Chumachenko T. Development of an intelligent agent-based model of the epidemic process of syphilis. In2019 IEEE 14th international conference on computer sciences and information technologies (CSIT) 2019 Sep 17 (Vol. 1, pp. 42-

45). IEEE. https://10.1109/STC-CSIT.2019.8929749

24. Zhang Z, Zhou H, Ma J, Xiong L, Ren S, Sun M, Wu H, Jiang S. Space deployable bistable composite structures with C-cross section based on machine learning and multi-objective optimization. Composite Structures. 2022 Oct 1;297:115983. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115983

25. Murgul V, Vatin N, Zayats I. The role of the solar light quantity in the architectural forming of buildings. Procedia Engineering. 2015 Jan 1;117:819-24. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.146

26. Moazzeni MH, Ghiabaklou Z. Investigating the influence of light shelf geometry parameters on daylight performance and visual comfort, a case study of educational space in Tehran, Iran. Buildings. 2016 Jul 13;6(3):26. https://doi.org/10.3390/buildings6030026

27. Lami IM, Mecca B. Assessing social sustainability for achieving sustainable architecture. Sustainability. 2020 ,13(1), 142. https://doi.org/10.3390/su13010142

28. Chang MC, Shih SG. A hybrid approach of dynamic programming and genetic algorithm for multi-criteria optimization on sustainable architecture design. Computer-Aided Design and Applications. 2015 May 4;12(3):310-9. https://doi.org/10.1080/16864360.2014.981460

29. Cheng S, Yunsong H, Han F. Multi-objective building form optimization method based on GANN-BIM model. Next Generation Building. 2015, 2.1. https://doi:10.7480/ngb.2.1.1517

30. Jalali Z. Optimization of Office Building Façade Using Genetic Algorithm With sustainability and BIM Integration Approach. Master's thesis in Architectural Technology, Faculty of Architecture, University of Tehran. 2017 [Persian] https://doi.org/10.1080/23744731.2019.1624095

31. Bahdad AAS, Fadzil, S F S, Taib N. Optimization of daylight performance based on controllable light-shelf parameters using genetic algorithms in the tropical climate of Malaysia. Journal of Daylighting. 2020, 7(1), 122-136. https://dx.doi.org/10.15627/jd.2020.10

32. Ziaee N, Vakilinezhad R. Multi-objective optimization of daylight performance and thermal comfort in classrooms with light-shelves: Case studies in Tehran and Sari, Iran. Energy and Buildings. 2022 Jan 1;254:111590. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111590

33. Xue P, Mak CM, Cheung HD. The effects of daylighting and human behavior on luminous comfort in residential buildings: A questionnaire survey. Building and Environment. 2014 Nov 1;81:51-9. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.011

34. Wang S, Yi YK, Liu N. Multi-objective optimization (MOO) for high-rise residential buildings' layout centered on daylight, visual, and outdoor thermal metrics in China. Building and Environment. 2021 Nov 1;205:108263. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108263

35. Yazyeva SB, Mayatskaya IA. Eco-sustainable architecture and comfortable living environment. InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2021 Feb 1

(Vol. 1083, No. 1, p. 012018). IOP Publishing. https://doi:10.1088/1757-899X/1083/1/012018

36. Bardhan R, Debnath R. Daylight Performance of a Naturally Ventilated Building as parameter for Energy Management. Energy Procedia. 2016,90. pp. 382–394 https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.205

37. Chen K W, Janssen P, Schlueter A. Multi-objective optimization of building form, envelope and cooling system for improved building energy performance, Autom. Constr., vol. 2016.94. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.002

38. Kirimtat A, Koyunbaba BK, Chatzikonstantinou I, Sariyildiz S, Suganthan PN. Multi-objective optimization for shading devices in buildings by using evolutionary algorithms. In2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC) 2016 Jul 24 (pp. 3917-3924). IEEE. https://10.1109/CEC.2016.7744286

39. Ahmadi J, Mahdavinejad M, Asadi S. Folded double-skin façade (DSF): in-depth evaluation of fold influence on the thermal and flow performance in naturally ventilated channels. International Journal of Sustainable Energy. 2021 Jun 16:1-30. https://doi.org/10.1080/14786451.2021.1941019

40. Lakhdari K, Sriti L, Painter B. Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions. Building and Environment. 2021, 204, 108173. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108173

41. Schwartz Y, Raslan R, Mumovic D. Implementing multi-objective genetic algorithm for life cycle carbon footprint and life cycle cost minimization: A building refurbishment case study. Energy. 2016, 97, 58-68. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.056

42. Ahmed MM, Abel-Rahman AK, Ali AH. Development of intelligent façade based on outdoor environment and indoor thermal comfort. Procedia technology. 2015 Jan 1;19:742-9. https://doi.org/10.1016/j.protcy.2015.02.105

43. Anton I, Tănase D. Informed geometries. Parametric modelling and energy analysis in early stages of design. Energy Procedia. 2016 Jan 1;85:9-16. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.269

44. Burger S. South Australian Health and Medical Research Institute (Sahmri). https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2014.201

45. Ahmadi J, Mahdavinejad M, Larsen OK, Zhang C, Zarkesh A, Asadi S. Evaluating the different boundary conditions to simulate airflow and heat transfer in Double-Skin Facade. In Building Simulation 2022 May;15(5):799-815. Tsinghua University Press. https://doi.org/10.1007/s12273-021-0824-5

46. Hosseini SM, Mohammadi M, Schröder T, Guerra-Santin O. Bio-inspired interactive kinetic façade: Using dynamic transitory-sensitive area to improve multiple occupants' visual comfort. Frontiers of Architectural Research. 2021 Dec 1;10(4):821-37. https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.07.004

47. Lartigue B, Lasternas B, Loftness V. Multi-objective optimization of

building envelope for energy consumption and daylight. Indoor and built environment. 2014 Feb;23(1):70-80. https://doi.org/10.1177/1420326X13480224

48. Michael A, Heracleous C. Assessment of natural lighting performance and visual comfort of educational architecture in Southern Europe: The case of typical educational school premises in Cyprus. Energy and buildings. 2017 Apr 1;140:443-57. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.087

49. Omidfar A, Torghabehi OO, Buelow PV. Performance-based design of a self-standing building skin; A methodology to integrate structural and daylight performance in a form exploration process. InProceedings of IASS Annual Symposia 2014 Sep 19 (Vol. 2014, No. 16, pp. 1-8). International Association for Shell and Spatial Structures (IASS). https://DOI:10.13140/2.1.1433.2167

50. Onubogu NO, Chong KK, Tan MH. Review of Active and Passive Daylighting Technologies for Sustainable Building. International Journal of Photoenergy. 2021 Oct 26;2021. https://doi:10.1155/2021/8802691

51. Goharian A, Mahdavinejad M. A novel approach to multi-apertures and multi-aspects ratio light pipe. Journal of Daylighting. 2020 Sep 16;7(2):186-200. https://doi.org/10.15627/jd.2020.17

52. Fallahtafti R, Mahdavinejad M. Window geometry impact on a room's wind comfort. Engineering, Construction and Architectural Management. 2021 Mar 24;28(9):2381-2410. https://doi.org/10.1108/ECAM-01-2020-0075

53. Zafarmandi S, Mahdavinejad M, Norford L, Matzarakis A. Analyzing Thermal Comfort Sensations in Semi-Outdoor Space on a University Campus: On-Site Measurements in Tehran's Hot and Cold Seasons. Atmosphere. 2022 June 22;13, 1034. https://doi.org/10.3390/atmos13071034

54. Goharian A, Mahdavinejad M, Bemanian M, Daneshjoo K. Designerly optimization of devices (as reflectors) to improve daylight and scrutiny of the light-well's configuration. Building Simulation. 2021 Oct 9 (pp. 1-24). Tsinghua University Press. https://doi.org/10.1007/s12273-021-0839-y

55. Haghshenas M, Hadianpour M, Matzarakis A, Mahdavinejad M, Ansari M. Improving the suitability of selected thermal indices for predicting outdoor thermal sensation in Tehran. Sustainable Cities and Society. 2021 Jul 27:103205. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103205

56. Javanroodi K, Nik VM, Mahdavinejad M. A novel design-based optimization framework for enhancing the energy efficiency of high-rise office buildings in urban areas. Sustainable Cities and Society. 2019; 49:101597. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101597

57. Saadatjoo P, Mahdavinejad M, Zhang G, Vali K. Influence of permeability ratio on wind-driven ventilation and cooling load of mid-rise buildings. Sustainable Cities and Society. 2021 Jul 1;70:102894. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102894

58. Shaeri J, Mahdavinejad M. Prediction Indoor Thermal Comfort in Traditional Houses of Shiraz with

26;31(2):109-24. https://doi.org/10.5755/j01.sace.31.2.30800

PMV/PPD model. International Journal of Ambient Energy. 2022 Jun 21. https://doi.org/10.1080/01430750.2022.2092774

59. Mahdavinejad M, Javanroodi K. Natural ventilation performance of ancient wind catchers, an experimental and analytical study–case studies: one-sided, two-sided and four-sided wind catchers. International journal of energy technology and policy, 2014 Jan 1;10(1):36-60. https://doi.org/10.1504/IJETP.2014.065036

60. Shaeri J, Mahdavinejad M, Pourghasemian MH. A new design to create natural ventilation in buildings: Wind chimney. Journal of Building Engineering. 2022 Aug 22:105041. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105041

61. Talaei M, Mahdavinejad M, Azari R, Prieto A, Sangin H. Multi-objective optimization of building-integrated microalgae photobioreactors for energy and daylighting performance. Journal of Building Engineering. 2021 Jun 5:102832. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102832

62. Talaei M, Mahdavinejad M, Azari R, Haghighi HM, Atashdast A. Thermal and energy performance of a user-responsive microalgae bioreactive façade for climate adaptability. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022 Aug 1;52:101894. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101894

63. Goharian A, Daneshjoo K, Mahdavinejad M, Yeganeh M. Voronoi geometry for building facade to manage direct sunbeams. Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering. 2022 Oct

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی