Bonyan: Strategic Research in Islamic Architecture and Urbanism
DOI: http://doi.org10879643521/bonyan.2026.15213.1009

Bonyan

OPEN ACCESS Check for updates

Parametric analysis and optimization of the roof skylight of a sports hall in a cold and mountainous climate in Iran based on daylight indicators (Case study: Qazvin city)

Mahdi Akhtarkavan [1], Maryam Ezzatpour [2]

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Engineering and Technology, Qom University, Qom, Iran.
2. Master of Architecture student, Faculty of Technology and Engineering, Qom University, Qom, Iran.

ABSTRACT

Multipurpose sports halls and stadiums are essential for meeting community needs. This research aims to provide optimal daylighting in sports halls by examining the impact of roof skylights in the cold and mountainous climate of Iran, using a parametric analysis based on daylight metrics. Following a review of prior studies, daylight indices were evaluated, and the Useful Daylight Illuminance (UDI 300-3000 Lux) was selected as the key performance metric. Field measurements were taken with a lux meter, and the error between measured and simulated results was assessed using Root Mean Square Error (RMSE) and the coefficient of variation CV(RMSE) to validate the simulation software. A parametric approach was then implemented in Rhino and Grasshopper, where the length, width, and angle of sawtooth roof skylights were defined as variables. Using the Honeybee and Galapagos plugins with a single-objective evolutionary genetic algorithm, the model was optimized. Results indicate that roof skylights significantly enhance daylight provision, ensuring uniform light distribution and improving visual comfort for both spectators and athletes. Optimization via the genetic algorithm yielded ideal skylight dimensions, enabling suitable daylight (based on UDI 300-3000 Lux) across 83.57% of the annual occupied hours, while minimizing glare risk throughout the year.

ARTICLE HISTORY
Received 17 November 2025
Received in revised form 25 January 2026
Accepted 29 January 2026
Available online 21 March 2026

KEYWORDS
Skylight
Gym
Daylight
Visual Comfort
Optimization
Genetic Algorithm

CONTACT Mahdi Akhtarkavan m.akhtarkavan@qom.ac.ir

Akhtarkavan, M. & Ezzatpour, M. (2026). Parametric analysis and optimization of the roof skylight of a sports hall in a cold and mountainous climate in Iran based on daylight indicators (Case study: Qazvin city). *Bonyan: Strategic Research in Islamic Architecture and Urbanism,* 1(1), 17-31. DOI: http://doi.org10879643521/bonyan.2026.15213.1009

© 2026 The Author(s). Published by University of Qom.
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/), which permits non-commercial re-use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited, and is not altered, transformed, or built upon in any way. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent

بنیان: پژوهش‌های راهبردی معماری و شهرسازی اسلامی
DOI: http://doi.org10879643521/bonyan.2026.15213.1009

Check for updates OPEN ACCESS

تحلیل و بهینه‌سازی پارامتریک نورگیر سقفی سالن ورزشی اقلیم سرد و کوهستانی ایران بر اساس شاخص‌های نور روز (نمونه موردی مطالعه: شهر قزوین)

مهدی اخترکاوان [۱] ✉، مریم عزت‌پور [۲]

۱. نویسنده مسئول، استادیار گروه معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

چکیده

ورزشگاه‌ها و سالن‌های ورزشی چندمنظوره برای برآورده‌کردن نیازهای جامعه امری ضروری است. در این پژوهش تلاش شده به‌منظور تأمین روشنایی مطلوب نور روز در سالن‌های ورزشی، ضمن بررسی تأثیر نورگیرهای سقفی سالن ورزشی در اقلیم سرد و کوهستانی ایران به تحلیل پارامتریک آن بر اساس شاخص‌های نور روز نیز پرداخته شود. در پژوهش حاضر، پس از انجام مطالعات پیشین، به بررسی شاخص‌های روشنایی پرداخته شد و شاخص روشنایی مفید نور روز ($UDI_{300\text{-}3000\ Lux}$) به‌عنوان معیار اندازه‌گیری بهره‌مندی نور روز انتخاب گردید. پس از برداشت مقادیر میدانی با استفاده از دستگاه لوکسمتر، بررسی میزان خطای مقادیر برداشت شده با نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک معادله ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تغییرات (CV (RMSE انجام پذیرفت و از این طریق اعتبارسنجی نرم‌افزار شبیه‌ساز مورد سنجش واقع شد. سپس با استفاده از یک رویکرد پارامتریک در نرم‌افزار راینو و افزونه گرس‌هاپر مدل تحقیق طراحی گردید و به کمک افزونه‌های هانی بی و گالاپاگوس و الگوریتم ژنتیک محاسبات تک‌هدفه تکاملی بهینه‌سازی بر روی متغیرهای تحقیق انجام پذیرفت. در این پژوهش، طول، عرض و زاویه نورگیرهای سقفی به‌صورت سقف خرپایی دندانه‌ای به‌عنوان متغیرهای تحقیق در نظر گرفته شد و از انجام شبیه‌سازی مدل تحقیق و بهینه‌سازی محاسبات تک‌هدفه تکاملی این نتایج استخراج گردید که نورگیرهای سقفی نقش بسیار مؤثری در تأمین روشنایی نور روز سالن‌های ورزشی دارند و موجب توزیع نور یکنواخت داخل سالن و افزایش آسایش بصری تماشاگران و بازیکنان می‌شوند. دستیابی به ابعاد بهینه متغیرهای تحقیق به روش الگوریتم ژنتیک از نتایج دیگر این پژوهش است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در شرایط بهره‌مندی از ابعاد بهینه به‌دست‌آمده برای نورگیرهای سقفی در ۸۳.۵۷ درصد مواقع سال سطح سالن از روشنایی نور روز مناسب بر اساس شاخص روشنایی مفید نور روز ($UDI_{300\text{-}3000\ Lux}$) برخوردار خواهد بود و همچنین خطر خیرگی در این مدت برای تماشاگران و ورزشکاران حداقل است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها

نورگیر سقفی
سالن ورزشی
نور روز
آسایش بصری
بهینه‌سازی
الگوریتم ژنتیک

مقاله حاضر مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد با عنوان «طراحی و اصلاح المان‌های ورزشگاه چندمنظوره در شهر قزوین به منظور بهینه‌سازی نور روز» است.

CONTACT Mahdi Akhtarkavan ✉ m.akhtarkavan@qom.ac.ir

اخترکاوان، م. عزت پور، م. (۱۴۰۴). تحلیل و بهینه‌سازی پارامتریک نورگیر سقفی سالن ورزشی اقلیم سرد و کوهستانی ایران بر اساس شاخص‌های نور روز (نمونه موردی مطالعه: شهر قزوین). *بنیان: پژوهش‌های راهبردی معماری و شهرسازی اسلامی*، ۱(۱)، ۱۷-۳۱.

DOI: http://doi.org10879643521/bonyan.2026.15213.1009

© 2026 The Author(s). Published by University of Qom.
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/), which permits non-commercial re-use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited, and is not altered, transformed, or built upon in any way. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent.

۱. مقدمه

نور سرمنشأ تمام موهبت‌ها و برکات مادی و نشانه‌ای از حضور خداوند است، همچنین نشان جداشدن انسان از جهل و نزدیک‌شدن او به حقیقت است. نور نه‌تنها به عالم روشنی می‌بخشد؛ بلکه علم، هنر، فلسفه و مذهب را در پس مرزهای مکانی و زمانی به یکدیگر پیوند می‌زند. آیه نور نه‌تنها موجب نام‌گذاری بیست و چهارمین سوره قرآن کریم شده، بلکه آینه ظهور ذات باری‌تعالی است و نشان از حیانی بودن قرآن دارد.

اگر علمای اسلام مسئله اعجاز را جهت اثبات الهی بودن قرآن ملاک قرار می‌دهند و جنبه‌ها و زوایای اعجاز قرآن را با استشهاد به آیات گوناگون یا به مجموعه آیات قرآن تبین می‌کنند، تفحص و بررسی آیه نور نشان می‌دهد که این آیه به‌تنهایی دلیلی برای اعجاز بودن قرآن است. ضرورت این مسئله موجب شده است که علمای اسلامی تحقیق و شناسایی و همچنین تدبر ویژه‌ای نسبت به نور و به این آیه و به تعبیری به "نگین" قرآن داشته باشند (Ebrahimnejad, 2017). در زندگی معاصر یکی از اساسی‌ترین مسائل زندگی، مصرف بی‌رویه انرژی است و ساختمان‌ها یکی از بیشترین مراکز مصرف انرژی هستند و لذا ساختمان‌ها یکی از بزرگ‌ترین تهدیدات برای منابع انرژی محسوب می‌شوند. یکی از راهکارهای جلوگیری از این هدررفت انرژی، بهره‌گیری از نور روز در طراحی ساختمان‌ها است. توجه به نور روز در تمام فضاها، بر تغییر شکل کالبدی آن فضا مؤثر است. یکی از ویژگی‌های نور طبیعی تغییر کیفیت و کمیت آن در طول روز و فصول مختلف است. همچنین شرایط جوی بر کیفیت نور طبیعی تأثیر دارد. از جمله آثار این تغییرات ایجاد خیرگی در فضا است. بی‌توجهی به طراحی دقیق پنجره، سایبان و متعلقات آن منجر به بروز خیرگی یا افزایش بار سرمایش ساختمان به دلیل ورود تابش مستقیم خورشید یا کاهش نور روز مناسب خواهد شد. هر چند معماران در طراحی فضاهای داخلی بهره‌گیری از نور طبیعی را لحاظ می‌کنند، اما به آسایش بصری فضاهای روشن کمتر توجه کرده‌اند. ازاین‌رو، لازم است طراحان زمان و مکان وقوع عدم آسایش بصری ناشی از نور روز را به‌دقت بررسی کنند؛ زیرا فقدان آسایش مانع بهره‌گیری مناسب از نور روز خواهد شد. برای بهره‌گیری از نور روز طراحان معمولاً فضای زیادی برای پنجره در نظر می‌گیرند که در صورت نبود کنترل سبب دریافت حرارت بیش از حد و افزایش بار سرمایش ساختمان خواهد شد؛ بنابراین لازم است در فرایند طراحی از شاخص‌های ارزیابی معتبر برای اطمینان از کمیت و کیفیت نور روز در فضاها استفاده شود. نورپردازی با نور روز فقط با اضافه‌کردن پنجره یا افزایش ابعاد آنها صورت نمی‌گیرد و بسیار به نحوه قرارگرفتن و شکل آنها بستگی دارد. تمام ویژگی‌های ساختمان از جمله جهت‌گیری، شکل و فرم، جای‌گیری فضاها و پوسته ساختمان از عواملی هستند که بر میزان و کیفیت روشنایی فضاهای داخلی تأثیر می‌گذارند.

ساختمان باید به‌گونه‌ای طراحی شود که خیرگی نور مستقیم خورشید را کاهش دهد و بیشترین استفاده از پراکندگی نور غیرمستقیم شود. از جمله مکان‌هایی که نور در آن از اهمیت بالایی برخوردار است مجموعه‌های ورزشی است که نورپردازی آنها یک کار مهم و دشوار است و به ورزشکاران کمک می‌کند تا به نتایج مطلوب دست یابند. نحوه بهره‌مندی از نور روز و شرایط نورگیری مناسب برای ارتقای فعالیت ورزشی بسیار مهم هستند، یک سالن ورزشی را باید به نحوی طراحی کرد تا نور پراکنده خورشید بهینه شود. نور روز قابل‌دسترس را باید باانرژی گرمایی به‌دست‌آمده و نورهای پراکنده را از میان نورهای خیره‌کننده کنترل کرد تا باعث ایجاد مشکل در دید ورزشکاران نشود. نورپردازی اماکن ورزشی به ورزشکاران کمک می‌کند تا به نتایج مطلوب دست یابند و لذا آسایش و راحتی بصری ورزشکاران، داوران و تماشاگران به نحوه سازماندهی روشنایی مجموعه‌های ورزشی بستگی دارد. ازاین‌جهت، هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر محیط نور بر سلامت بصری ورزشکاران و استفاده‌کنندگان دیگر، در اماکن ورزشی در نظر گرفته شد. به دنبال پژوهش‌هایی که درگذشته انجام شده؛ در این پژوهش به اهمیت استفاده از نور روز و همچنین شبیه‌سازی و بهینه‌سازی نور روز در سالن‌های ورزشی و بررسی تأثیر نور روز بر سلامت بصری ورزشکاران پرداخته شده است. ازاین‌رو، مهم‌ترین سؤال این پژوهش به‌صورت زیر در نظر گرفته شد:

طراحی سقف سالن‌های ورزشی به‌نحوی‌که مناسب‌ترین میزان دریافت نور مفید روز را داشته باشد به چه صورت خواهد بود؟

۲. پیشینه و مبانی نظری تحقیق

یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار بر بهره‌گیری از نور روز، پنجره‌ها و هندسه ساختمان‌ها هستند. ازآنجایی‌که بخش زیادی از مسابقات ورزشی در داخل ساختمان و سالن‌های ورزشی انجام می‌شود، عدم توجه به بهره‌مندی از نور روز و تأمین روشنایی مناسب طبیعی در اغلب موارد منجر به استفاده از روشنایی الکتریکی و به دنبال آن مصرف انرژی در این فضاها می‌گردد؛ لذا به‌راحتی می‌توان فهمید که مهم‌ترین محیط در ارتباط با آسایش و راحتی بصری ورزشکاران، محیط داخل سالن‌های ورزشی است.

در چند سال گذشته، تعداد فزاینده‌ای از شواهد علمی نشان داده‌اند که نحوه بهره‌گیری از نور روز داخل ساختمان‌ها به طور مستقیم در تأمین آسایش و راحتی بصری استفاده‌کنندگان نقش دارند. در جدول ۱ پژوهش‌هایی که در سال‌های اخیر دراین‌خصوص انجام‌یافته آورده شده است:

جدول ۱. پیشیه پژوهش (مأخذ: نگارندگان)

ردیف	نویسنده	موضوع اصلی	پارامترها	شاخص‌ها	روش مطالعه
۱	Marzouk et al., (2022)	برآوردن نیازهای جدید نور روز و تکیه بر نور آرام روز	عمق مولیون و ضخامت مولیون و فناوری شیشه‌های لعاب‌دار	sDA ASE	شبیه‌سازی توسط موتورهای Radiance و Daysim
۲	(جوکار و ملکی، ۱۴۰۱)	طراحی پارامتریک پوسته ورونوی	پوسته و الگوریتم ورونوی	UDI و کاهش دریافت تابش خورشید.	بهینه‌یابی چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، انرژی پلاس و رادیانس
۳	Lakhdari et al., (2021)	بهینه‌سازی چندهدفه نسبت پنجره به دیوار کلاس	ابعاد پنجره و جنس شیشه، نوع لعاب و سایه	نور روز حرارت انرژی	بهینه‌سازی در مقیاس واقعی
۴	(زینال زاده، نیکقدم، و فیاض، ۱۴۰۰)	بهینه‌سازی سطح پنجره شمالی و جنوبی با توجه هم‌زمان به عملکرد روشنایی و حرارتی	آستانه سرمایشی و گرمایشی، مصالح سقف، کف و دیوار و پنجره، نوع فعالیت و زمان حضور افراد و میزان نفوذ هوا.	sDA	بهینه‌سازی حرارتی پنجره با استفاده از موتور انرژی پلاس و روشنایی با موتور ردینس و دیسیم
۵	Fang & Cho, (2019)	پیشنهاد یک فرایند بهینه‌سازی انرژی باقابلیت ارزیابی هم‌زمان نور روز، انرژی و عملکرد انرژی	طول و عرض نورگیر	UDI	طراحی پارامتریک، الگوریتم‌های ژنتیک در نرم‌افزار گرس‌هاپر و پلاگین اختاپوس
۶	(Marzouk et al., 2020)	پیشنهاد افزایش انرژی و نور روز از طریق پیکربندی‌های مختلف نورگیر	رابطه بین دهانه نورگیر و زاویه مستقیم نور خورشید	UDI SFR EED	شبیه‌سازی انرژی با استفاده از پلاگین ARCHSIM
۷	(فدایی اردستانی، ناصری مبارکی، آیت اللهی، و زمردیان، ۱۳۹۷)	بررسی شرایط نور روز و خیرگی و تأثیر طراحی سایبان بر آسایش بصری	خیرگی یکپارچه، احتمال خیرگی نور روز و آسایش بصری	$UDI_{300-3000}$ SVD	شبیه‌سازی با نرم‌افزار رادیانس
۸	(معروفی، مهدوی نژاد، و نسب، ۱۴۰۱)	بررسی عملکرد حرارتی و روشنایی و طراحی نما	ابعاد پنجره‌ها	sDA UDI ASE	گرس‌هاپر، موتور بهینه‌ساز گالاپاگوس، شبیه‌سازی نور روز با استفاده از هانی‌بی، لیدی‌باگ و موتور انرژی پلاس برای تحلیل عملکرد حرارتی

بررسی پژوهش‌های انجام‌یافته نشان می‌دهند که در تحلیل نورگیری و کیفیت نور در مقیاس‌های مختلف، از جمله سالن‌های ورزشی، باید به تحلیل پارامترهایی چون ارتفاع سقف، ابعاد و مکان نورگیرها، زاویه تابش نور، و نوع و جنس مصالح مورداستفاده توجه کرد. نتایج این تحقیقات معمولاً به طراحی بهینه نورگیرها برای تأمین نور مناسب و کاهش مصرف انرژی منجر می‌شود. روش‌های مورداستفاده در این تحقیقات عموماً شامل استفاده از آزمایش‌های میدانی، شبیه‌سازی‌های کامپیوتری (مانند روش‌های شبیه‌سازی نور روز) و ترکیبی از این دو روش بوده است. استفاده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری در این زمینه رایج‌تر است.

در این پژوهش‌ها، تأثیر طراحی نورگیرها و پارامترهای آن بر کیفیت نور در محیط‌های داخلی سالن‌های ورزشی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از تحلیل پژوهش‌های انجام شده در جدول ۱، موارد زیر قابل برداشت است:

۱. بررسی محدود تأثیر طراحی نورگیرها: در تعداد کمی از پژوهش‌ها، تأثیر طراحی نورگیر سقفی بر کیفیت نور روز و تأثیر آن بر مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.
۲. شاخص‌های مهم تأثیرگذار: فرم نورگیرها، ابعاد، موقعیت و جنس مصالح از جمله مهم‌ترین شاخص‌هایی هستند که تأثیر آنها بر میزان و کیفیت نور روز مورد بررسی قرار گرفته است.
۳. میزان و نوع نور مورد بررسی: در بیشتر تحقیقات، شاخص‌های مختلف نور روز مورد تحلیل قرار گرفته که شامل شدت نور، توزیع نور، و میزان تابش مستقیم می‌شود. دراین‌ارتباط، تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان نور در شرایط اقلیمی خاص، نظیر سرد و کوهستانی، کمتر موردتوجه قرار گرفته است.
۴. تحقیقات محدود بر فضای داخلی: در اکثر پژوهش‌ها، تمرکز بر میزان نور در فضای داخلی سالن‌ها بیشتر از فضای خارجی بوده و کمتر تحقیقی بر تأثیر طراحی نورگیر بر کیفیت نور در شرایط خاص اقلیمی تمرکز کرده است.
۵. متغیرهای وابسته: در بیشتر تحقیقات، متغیرهای شدت نور و توزیع نور به‌عنوان متغیرهای وابسته مورد سنجش قرار گرفته‌اند.
۶. روش‌های تحقیق: روش‌های مورداستفاده در بیشتر تحقیقات عموماً شامل آزمایش‌های میدانی، شبیه‌سازی‌های کامپیوتری (مانند شبیه‌سازی نور روز) و ترکیبی از این دو روش بوده است. استفاده از شبیه‌سازی‌های کامپیوتری در این زمینه رایج‌تر است.
۷. در بیشتر پژوهش‌ها، موضوع نور روز در سالن‌های ورزشی را عموماً در پیشنهاد یک فرایند بهینه‌سازی انرژی ساختمان مورد بررسی قرار می‌دهند که می‌تواند به طراحان کمک کند تا به طور هم‌زمان نور روز و انرژی و عملکرد انرژی را ارزیابی کنند و به تحلیل پارامترهایی چون ابعاد پنجره، جنس شیشه، طول و عرض نورگیر، مصالح و... می‌پردازند. نتایج این تحقیقات نیز معمولاً به ارائه استراتژی‌های مختلف طراحی پارامتریک، مدل‌سازی و شبیه‌سازی ساختمان و الگوریتم‌های ژنتیک در نرم‌افزار گرس‌هاپر و افزونه اختاپوس منجر می‌گردد.

۳. موارد و روش ها

۳. ۱. رویکرد بهینه‌سازی

از نظر ریاضی، بهینه‌سازی روشی است برای یافتن حداقل یا حداکثر مقدار یک تابع با انتخاب متغیرهای انتخاب شده تحت وجود محدودیت (Lakhdari et al., 2021). بهینه‌سازی این امکان را فراهم می‌کند که تعداد زیادی از راه‌حل‌های طراحی به طور موثر بررسی شوند. درسال‌های اخیر، پیشرفت‌های عمده‌ای در بهینه‌سازی ساختمان‌ها انجام شده است و اصطلاح "محاسبات تکاملی" برای حل مسائل پیچیده که منجر به اجرای گسترده آن‌ها در حوزه معماری شده است، به خوبی شناخته شده است.

۳. ۱. رویکرد الگوریتمی

ابزارهای معماری پارامتریک مبتنی بر الگوریتم هستند و کنترل محاسباتی بیشتری بر هندسه طراحی در طول فعالیت‌های طراحی ارائه می‌دهند.

سازگاری و پاسخگویی آنها به تغییر معیارها و الزامات طراحی، مدل‌های پارامتریک را به ویژه برای کاوش طراحی در تنظیمات طراحی پیچیده و پویا مفید می‌کند. در طراحی مبتنی بر عملکرد، کنترل پارامتری فرم بسیار ارزشمند است، به طوری که به آنها اجازه می‌دهد تجزیه و تحلیل عملکرد را در ترکیب طراحی ادغام کنند. سیستم‌های پارامتریک اصولاً بر اساس اصول الگوریتمی هستند، بنابراین لازم است ابتدا نقش الگوریتم‌ها و تفکر الگوریتمی در طراحی را استدلال کنیم تا بتوانیم سیستم‌های پارامتریک بیشتری را مورد بحث قرار دهیم.

الگوریتم مجموعه‌ای محدود از دستورالعمل‌هاست که هدف آن انجام یک هدف کاملاً مشخص در تعداد محدودی از مراحل است. یک الگوریتم یک مقدار یا مجموعه‌ای از مقادیر را به عنوان ورودی می‌گیرد، یک سری مراحل محاسباتی را اجرا می‌کند که ورودی را تغییر می‌دهد و در نهایت یک مقدار یا مجموعه‌ای از مقادیر را به عنوان خروجی تولید می‌کند (Chang, 2003). قدرت الگوریتم‌ها در توانایی حل طیف وسیعی از مسائل محاسباتی از جمله مرتب سازی و جست‌وجو، عملیات ساختار داده، مسائل ترکیبی، مسائل عددی (شامل تولید اعداد تصادفی) و هندسه محاسباتی نهفته است (Chang, 2003).

۳.۳. شاخص‌های ارزیابی نور روز

نور در سالن‌های ورزشی به سه روش تأمین می‌شود: نور طبیعی، نور مصنوعی و یا تلفیقی از این دو. نور طبیعی به لحاظ ارزان‌بودن و اقتصادی‌تر بودنش نسبت به نور مصنوعی برتری دارد، نور طبیعی در سالن‌های ورزشی از طریق نورگیرهای سقفی و پنجره در دیوار و یا سقف تأمین می‌شود. موقعیت قرارگیری آفتاب نسبت به‌اندازه و نوع بازشوها، بازشوها، استفاده از سایبان‌ها و یا عایق حرارتی از فاکتورهای تأثیرگذار بر طراحی نور روز در مجموعه ورزشی است. باید خیرگی و انعکاس مستقیم نور آفتاب را در فضا کاهش داد و از نور غیرمستقیم و پراکنده بیشترین بهره را برد. در نتیجه باید سالن‌های ورزشی را طوری طراحی کرد که نور پراکنده حاصل از تابش آفتاب بهینه شود. همچنین باید گرمای حاصل از تابش کنترل شود و نورهای خیره‌کننده را کنترل کرد تا مانع دید ورزشکار نشود (Kashef, 2013). بهترین روش استفاده مطلوب از نور روز، نورگیری از طریق سقف است که مزاحمت کمتری برای ورزشکاران و تماشاچیان دارد.

۴.۳. هدف پژوهش

بررسی عملکرد و میزان تأثیر نورگیرهای سقفی بر مؤلفه روشنایی نور روز، به‌عنوان عامل مؤثر بر کیفیت فضای داخلی در قالب طراحی سقف با سازه خرپایی به‌صورت پارامتریک هدف اصلی پژوهش حاضر در نظر گرفته شد. در این پژوهش، با استفاده از طراحی الگوریتمیک، یک سقف با سازه خرپایی به‌صورت پارامتریک، به‌منظور بهبود شرایط روشنایی سالن چندمنظوره ورزشی پیشنهاد شده است. در گام اول سقف سالن چندمنظوره به‌صورت سازه خرپایی پارامتریک طراحی گردید، سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقادیر و مؤلفه‌های اصلی بهینه‌سازی در نظر گرفته شد و در مرحله آخر به‌وسیله نورگیرهای سقفی میزان تأثیر پنجره‌ها بر میزان دریافت روشنایی کنترل شده از خورشید مورد بررسی و بهینه‌سازی نهایی قرار می‌گیرد.

۵.۳. روش‌شناسی

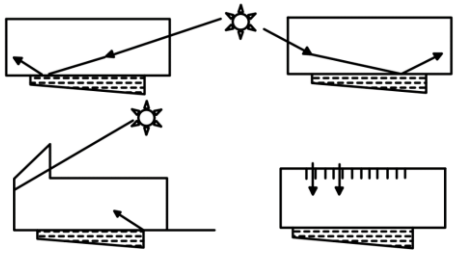
این مطالعه طی پنج مرحله به طراحی بهینه می‌رسد، در بخش اول به بررسی پژوهش‌های پیشین و کتب پرداخته می‌شود و در بخش دوم سالن ورزشی چندمنظوره به‌وسیله نرم‌افزار راینو و افزونه گرس‌هاپر طراحی می‌شود، این سالن ورزشی به‌وسیله سقف خرپایی امکان دریافت نور روز را به‌خوبی فراهم می‌کند. در بخش سوم به اعتبارسنجی نتایج تحقیق پرداخته شده است و در بخش چهارم به شبیه‌سازی نور روز و شناسایی راه‌حل‌های امکان‌پذیر و تجزیه‌وتحلیل عملکرد پرداخته می‌شود که با استفاده از نرم‌افزار راینو به‌صورت پارامتریک با استفاده از پلاگین گرس‌هاپر مدل‌سازی می‌شود و از پلاگین‌های لیدی باگ و هانی‌بی جهت تحلیل محیطی و محاسبه میزان دریافت نور روز استفاده می‌شود تا مشخص شود آیا طراحی سطح قابل‌قبولی از نور روز را ارائه می‌دهد و با چه تکنیک‌هایی می‌توان نور روز را به‌صورت کنترل شده وارد فضا کرد. در نهایت با ادغام و اجرای راهبردهای طراحی مطالعه شده، راه‌حل نهایی ارائه می‌شود. نمای کلی این مراحل در جدول زیر آمده است.

جدول ۲. فرایند انجام تحقیق (مأخذ: نگارندگان)

ردیف	مرحله	جزئیات	ابزار مورداستفاده
۱	گام اول: مرور ادبیات	• بررسی تحقیقات پیشین • بررسی شاخص‌های نور روز • بررسی استانداردهای نور روز برای سالن‌های ورزشی	• بررسی کتب و مقالات
۲	گام دوم: طراحی یک ساختمان (با این ویژگی که نور مناسبی را در طول روزدریافت می‌کند)	• طراحی یک سالن چندمنظوره ورزشی که سقف ویژه‌ای دارد و این سقف امکان دریافت نور روز را فراهم می‌کند	• نرم‌افزار راینو و افزونه گرس‌هاپر
۳	گام سوم: برداشت میدانی و اعتبارسنجی	• بررسی روشنایی فضا بر حسب لوکس	• لوکس متر
۴	گام چهارم: شبیه‌سازی	• شبیه‌سازی نور روز • شاخص اندازه‌گیری شده UDI	• افزونه گرس‌هاپر و هانی‌بی
۵	گام پنجم: بهینه‌سازی	• پیداکردن بهترین مقدار برای متغیرها	• الگوریتم ژنتیک • افزونه گالاپاگوس • افزونه گرس‌هاپر

۶.۳. تأثیر طراحی نورگیر سقفی بر فضا

نور در سالن‌های ورزشی به سه روش تأمین می‌شود: نور طبیعی، نور مصنوعی و یا تلفیقی از این دو. نور طبیعی به لحاظ ارزان بودن و اقتصادی‌تر بودنش نسبت به نور مصنوعی برتری دارد، نور طبیعی در سالن‌های ورزشی از طریق نورگیرهای سقفی و پنجره در دیوار و یا سقف تأمین می‌شود. موقعیت قرارگیری آفتاب نسبت به اندازه و نوع بازشوها، بازشوها، استفاده از سایبان‌ها و یا عایق حرارتی از فاکتورهای تأثیرگذار بر طراحی نور روز در مجموعه ورزشی است. باید خیرگی و انعکاس مستقیم نور آفتاب را در فضا کاهش داد و از نور غیرمستقیم و پراکنده بیشترین بهره را برد. در نتیجه باید سالن‌های ورزشی را طوری طراحی کرد که نور پراکنده حاصل از تابش آفتاب بهینه شود. همچنین باید گرمای حاصل از تابش کنترل شود و نورهای خیره کننده را کنترل کرد تا مانع دید ورزشکار نشود (Kashef, 2013). بهترین روش استفاده مطلوب از نور روز، نورگیری از طریق سقف است که مزاحمت کمتری برای ورزشکاران و تماشاچیان دارد.



شکل ۱. نور در مکان‌های ورزشی

۷.۳. اعتبارسنجی نرم‌افزارهای مورد مطالعه

طیف گسترده‌ای از ابزارهای نرم‌افزارها برای شبیه‌سازی عملکرد ساختمان‌ها وجود دارد که در این پژوهش باتوجه‌به رویکرد تحقیق از افزونه هانی بی[1] در گرس‌هاپر[2] استفاده شده است و لذا یک مدل مشابه از فضای موردمطالعه با استفاده از نرم‌افزار راینو[3] و گرس‌هاپر برای ایجاد شبیه‌سازی نور روز مدل‌سازی گردید. بدین منظور فضایی با ابعاد ۵.۸۳ در ۴.۵۳ متر و ارتفاع ۳.۲۴ متر در

1. HonneyBee
2.Grasshopper
3.Rhino

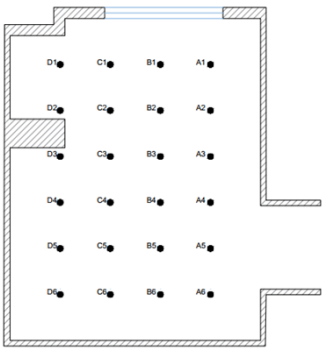
دانشکده امام خامنه‌ای دانشگاه قم در نظر گرفته شد. این کلاس پنجره‌ای به ابعاد ۲۱۴ در ۲۱۰ سانتیمتر دارد که ارتفاع آن از کف ۱۰۲ سانتیمتر است. این فضا به‌وسیله ۳۵ مستطیل شبکه‌بندی شد و نقاط تقاطع شبکه‌ها به‌عنوان محل اندازه‌گیری در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری در یک روز بهاری در تاریخ ۱۱ خرداد سال ۱۴۰۳ (May 31 ,2024)، در سه نوبت، در ساعات ۹:۰۰،۱۱:۰۰،۱۳:۰۰ روی سطحی به ارتفاع ۸۰ سانتیمتر از کف انجام شد که مدت‌زمان هر اندازه‌گیری حدوداً ۵ دقیقه به طول انجامید.

اندازه‌گیری در شرایطی انجام شد که هر دو پنجره بسته و بدون پرده بودند و همچنین فضا فاقد نور مصنوعی بود. لازم به ذکر است که پنجره‌ها به‌صورت دوجداره دارای شیشه شفاف و بدون سایبان بودند.

به‌منظور اعتبارسنجی و اندازه‌گیری خطا بین مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی و مقادیر حاصل از شبیه‌سازی از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تغییرات CV (RMSE) استفاده شده است که با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌شود (Lakhdari et al., 2021):

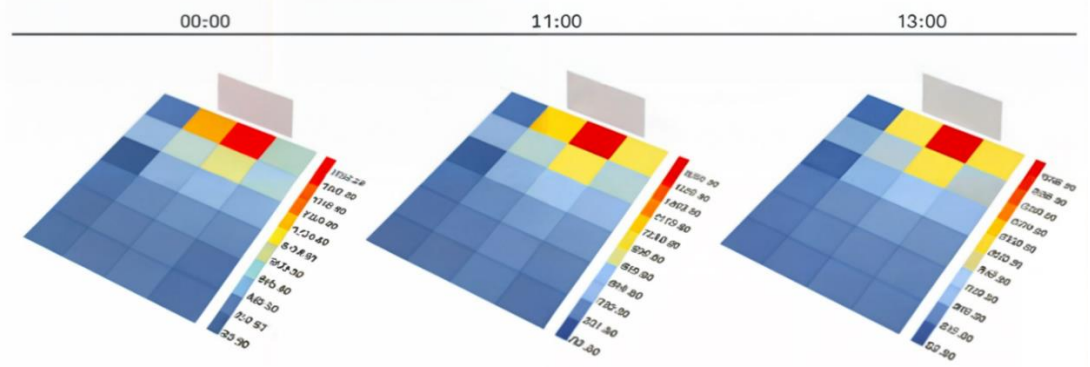
رابطه ۱)
$$CV(RMCE) = \frac{1}{\overline{Y}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(M_i - S_i)^2}{n}}\%$$

Mi و Si داده‌های اندازه‌گیری میدانی و شبیه‌سازی شده در بازه زمانی هستند.
i و n تعداد کل مقادیر داده استفاده شده برای محاسبه است.
$\bar{y}$ مقدار میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده است.



شکل ۳. پلان و نقاط شبکه بندی جهت اندازه گیری

شکل ۲. لوکس متر مدل LX-1128SD لوترون



شکل ٤. میزان روشنایی در مدل اعتبار سنجی در ساعات مختلف روز

جدول ۳. مشخصات ابزار اندازه‌گیری اعتبارسنجی (http://lutron-electronic.ir/LX-1128SD.html)

لوکس متر	محدوده اندازه‌گیری لوکس متر	دقت
لوکس متر مدل LX-1128SD لوترون	دارای ۳ رنج اندازه گیری ۱۰۰,۰۰۰/۲۰,۰۰۰/۲,۰۰۰ لوکس که به صورت خودکار محدوده رنج اندازه گیری لوکس را تنظیم می‌کند	دارای ۳ رنج اندازه گیری ۱۰۰,۰۰۰/۲۰,۰۰۰/۲,۰۰۰ لوکس

جدول ٤. مقادیر و ساعات اندازه‌گیری میدانی و شبیه سازی نور روز (LUX)

سنسورها	ساعات اندازه‌گیری میدانی و شبیه‌سازی نور روز (LUX)					
	۹		۱۱		۱۳	
	SIM	REAL	SIM	REAL	SIM	REAL
A1	۱۶۴۲	۱۲۷۳	۸۰۳	۹۶۷	۱۱۷۸	۱۰۶۱
B1	۲۴۹۵	۲۲۰۰	۱۸۶۲	۱۷۴۸	۱۳۵۹	۱۱۶۰
C1	۲۰۳۱	۲۴۵۰	۱۱۳۲	۱۰۳۵	۸۶۹	۷۹۷
D1	۸۹۲	۱۲۴۰	۱۵۳	۱۶۳	۲۹۹	۴۶۸
A2	۹۹۹	۹۲۵	۶۱۲	۵۵۶	۶۴۷	۷۱۵
B2	۱۱۱۶	۱۰۳۱	۸۸۰	۷۴۶	۶۷۱	۷۳۸
C2	۱۰۷۰	۱۰۹۷	۶۵۰	۵۶۱	۵۲۹	۶۱۵
D2	۷۹۹	۹۹۲	۳۴۵	۴۶۰	۳۶۱	۵۶۲
A3	۶۰۸	۵۵۸	۴۱۸	۳۵۷	۴۰۱	۵۰۱
B3	۶۷۸	۵۹۴	۴۷۷	۳۶۸	۴۲۸	۵۲۴
C3	۶۲۲	۶۰۲	۴۱۹	۳۴۳	۳۵۷	۴۹۴
D3	۲۳۹	۴۲۱	۵۵	۱۰۰	۱۳۴	۳۵۶
A4	۴۳۲	۴۰۶	۲۵۸	۲۲۸	۲۸۰	۳۸۶
B4	۴۳۴	۴۱۴	۳۰۱	۳۰۶	۲۷۵	۳۹۸
C4	۴۲۳	۴۰۸	۲۶۷	۲۳۵	۲۵۰	۴۰۵
D4	۳۰۲	۳۶۱	۱۶۹	۲۰۱	۱۸۱	۳۲۱
A5	۳۰۵	۳۲۱	۱۸۴	۱۸۱	۱۹۲	۳۱۴
B5	۳۳۹	۳۳۶	۲۱۱	۱۹۰	۲۰۲	۳۳۷
C5	۲۸۹	۳۳۲	۲۰۹	۱۸۳	۱۸۶	۳۲۶
D5	۲۴۱	۳۰۷	۱۵۵	۱۶۸	۱۴۷	۲۹۹
A6	۲۵۰	۲۹۸	۱۴۸	۱۶۳	۱۴۶	۲۹۵
B6	۲۶۱	۳۰۷	۱۷۹	۱۶۸	۱۶۹	۲۸۱
C6	۲۳۵	۳۰۷	۱۷۱	۱۶۹	۱۴۳	۳۰۸
D6	۲۱۲	۲۹۰	۱۵۳	۱۶۰	۱۳۸	۳۰۲
RMSE	۲۲		۱۷		۲۷	

مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی و مقادیر حاصل از شبیه‌سازی در ساعات برداشت شده در جدول ۴ آورده شده است و به کمک معادله ۱ خطا بین این مقادیر بدست آمد. ارزیابی نتایج تست روشنایی از فضای مورد نظر نشان می‌دهد که مقادیر روشنایی در مناطق نزدیک پنجره‌ها تا ۲۰۰۰ لوکس و در نقاط دورتر تا کمتر از ۱۰۰۰ لوکس، هم برای داده‌های شبیه‌سازی شده و هم داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی مشاهده می‌شود. بر اساس معادله ۱ میزان CV (RMSE) در ساعت ۹ صبح ۲۲ درصد، در ساعت ۱۱، ۱۷ درصد و در ساعت ۱۳، ۲۷ درصد محاسبه شد و از آنجا که این میزان در هر سه نوبت اندازه گیری کمتر از ۳۰ درصد بدست آمد نشان دهنده آن است که خطای بین مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی و مقادیر حاصل از شبیه سازی در محدوده قابل قبول می‌باشد و مدل قادر به تولید داده‌های واقعی است و لذا اعتبارسنجی نرم افزار تأیید می‌شود.

۷.۳. پارامترهای بهینه‌سازی

ارزیابی نور روز به‌وسیله شاخص‌ها و با اندازه‌گیری میدانی و یا شبیه‌سازی به‌وسیله نرم‌افزارهای شبیه‌سازی نور روز انجام می‌گیرد. باتوجه‌به پیشرفت قابل‌توجه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در طی سال‌های اخیر، ارزیابی عملکرد ساختمان به‌وسیله شبیه‌سازی بسیار افزایش پیدا کرده است. در ارزیابی ساختمان به‌وسیله شبیه‌سازی، هندسه ساختمان و فرم فضا و مصالح ساخت، همچنین ویژگی آنها و منابع نور روز به‌عنوان داده‌های ورودی نرم‌افزار در نظر گرفته می‌شوند. برای محاسبه شاخص‌ها، شبکه‌ای حاصل از حسگرها تعیین می‌شوند، در نهایت با مقایسه اطلاعات به‌دست‌آمده با استانداردهای نوری و آیین‌نامه‌ها نتیجه‌گیری می‌شود و میزان رضایت استفاده‌کنندگان از فضا پیش‌بینی می‌گردد. شدت روشنایی در محاسبه شاخص‌ها کمیتی تأثیرگذار است که شامل شار نوری می‌شود که با واحد لوکس یا لومن بر مترمربع اندازه‌گیری می‌شود و با نماد E نمایش داده می‌شود.

۸.۳. پارامترهای بهینه‌سازی

ارزیابی نور روز به‌وسیله شاخص‌ها و با اندازه‌گیری میدانی و یا شبیه‌سازی به‌وسیله نرم‌افزارهای شبیه‌سازی نور روز انجام می‌گیرد. باتوجه‌به پیشرفت قابل‌توجه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در طی سال‌های اخیر، ارزیابی عملکرد ساختمان به‌وسیله شبیه‌سازی بسیار افزایش پیدا کرده است. در ارزیابی ساختمان به‌وسیله شبیه‌سازی، هندسه ساختمان و فرم فضا و مصالح ساخت، همچنین ویژگی آنها و منابع نور روز به‌عنوان داده‌های ورودی نرم‌افزار در نظر گرفته می‌شوند. برای محاسبه شاخص‌ها، شبکه‌ای حاصل از حسگرها تعیین می‌شوند، در نهایت با مقایسه اطلاعات به‌دست‌آمده با استانداردهای نوری و آیین‌نامه‌ها نتیجه‌گیری می‌شود و میزان رضایت استفاده‌کنندگان از فضا پیش‌بینی می‌گردد. شدت روشنایی در محاسبه شاخص‌ها کمیتی تأثیرگذار است که شامل شار نوری می‌شود که با واحد لوکس یا لومن بر مترمربع اندازه‌گیری می‌شود و با نماد E نمایش داده می‌شود.

جدول ۵: شرایط بهینه‌سازی متغیرها (مأخذ: نگارندگان)

ردیف	متغیر	بازه متغیر	مقدار بهینه
۱	زاویه سقف (نسبت به افق)	۰ الی ۳۰ درجه	۳۰ درجه
۲	طول نورگیرهای سقفی	۱/۶ الی ۱۲/۵	۴/۴
۳	عرض نورگیرهای سقفی	۱/۵ الی ۵/۵	۳/۲

جدول ٦: شرایط بهینه‌سازی ثابت (مأخذ: نگارندگان)

ردیف	شرایط ثابت در بهینه‌سازی	کلیه پنجره‌ها
۱	جهت‌گیری ساختمان	شمالی – جنوبی
۲	جهت‌گیری نورگیرها	شرقی
۳	ابعاد سالن چندمنظوره	۴۰*۵۰
۴	موانع هم‌جوار	ندارد
۵	مدل شیشه	تک‌جداره – بدون رنگ

۶	ضریب عبور نور	۷۶
۷	وضعیت درب‌های خروج	کلیه درب‌ها بسته فرض شده است
۸	موانع عبور نور	فاقد پرده در نظر گرفته شده است
۹	تعداد دندانه‌های سقف	۳
۱۰	ارتفاع سالن	۹ متر
	تعداد نورگیرها در هر دندانه	۳

۹.۳ بهینه‌سازی تک هدفه

در این پژوهش به‌منظور درنظرگرفتن شرایط مناسب روشنایی از معیار روشنایی مفید نور روز برای سنجش مقدار نور روز استفاده شده است و بهینه‌یابی بر اساس به حداکثر رساندن روشنایی مفید نور روز (UDI 300-3000 Lux)، به‌عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده است. هر چقدر درصد روشنایی مفید نور روز در محدوده اعلامی بیشتر باشد بدین معنی است که احتمال گشودگی بیشتری وجود دارد و به‌تبع آن نور طبیعی بیشتری وارد فضا می‌شود و خطر خیرگی حداقل خواهد بود. ازاین‌رو، درنظرگرفتن هدف ذکر شده به لحاظ دستیابی به مقادیر بهینه می‌تواند سودمند باشد (Jokar & Maleki, 2023).

۱۰.۳. بهینه‌سازی نورگیرهای سقفی

طراحی پنجره‌ها به طور خاص یک مشکل چالش برانگیز است، زیرا نه تنها باید تأمین نور و تهویه را تضمین کند، بلکه افزایش گرمای خورشیدی و اتلاف گرما را نیز به حداقل رساند. طبق مطالعات پیشین، نسبت پنجره به دیوار کوچک برای آب‌وهوای گرم و خشک توصیه می‌شود. این موضوع در جایی که نور روز برای فرآیند آموزش و یادگیری اهمیت بیشتری دارد، بسیار مهم است. از سوی دیگر، الگوریتم‌های ژنتیک کارایی خود را در حل چنین مسائل خاص و پیچیده‌ای نشان داده‌اند. بررسی‌ها برای نسبت‌های بهینه پنجره به دیوار نشان می‌دهد که با افزایش نسبت پنجره به دیوار و یا سقف ممکن است میزان استفاده از نور روز افزایش پیدا کند. همچنین نور طبیعی غالباً از طریق پنجره وارد فضا می‌شود، پنجره‌ها انواع مختلفی دارند اما عموماً در انتخاب پنجره بیشتر به زیبایی آن توجه می‌شود تا مسأله نور دهی، برای طراحان زیبایی نمای پنجره اهمیت زیادی دارد. از نظر میزان مصرف انرژی نیز بیشتر به اتلاف حرارت توسط پنجره توجه می‌شود، اما از آنجا که پنجره‌ها نقش دریافت عمدی نور فضا را دارند باید به میزان نوردهی آنها نیز توجه شود (Heidari, 2010). اگر با افزایش اندازه پنجره تراز نوردهی نزدیک به پنجره افزایش یابد، مفید نیست، در صورتی افزایش اندازه پنجره‌ها مفید است که میزان روشنایی در عمق فضا افزایش پیدا کند. میزان نفوذ نور طبیعی در عمق اتاق، با افزایش ارتفاع قسمت بالای پنجره از کف فضا نسبت مستقیم دارد (CIBSE, 2009). این رابطه از طریق معادله زیر قابل اندازه‌گیری است:

$$L/W + L/HW < 2/(1-R)$$ رابطه ۲)

W: عرض اتاق

HW: ارتفاع بالای پنجره از کف طبقه

R: قابلیت انعکاس متوسط در نیمه پشتی اتاق

L: عمق اتاق

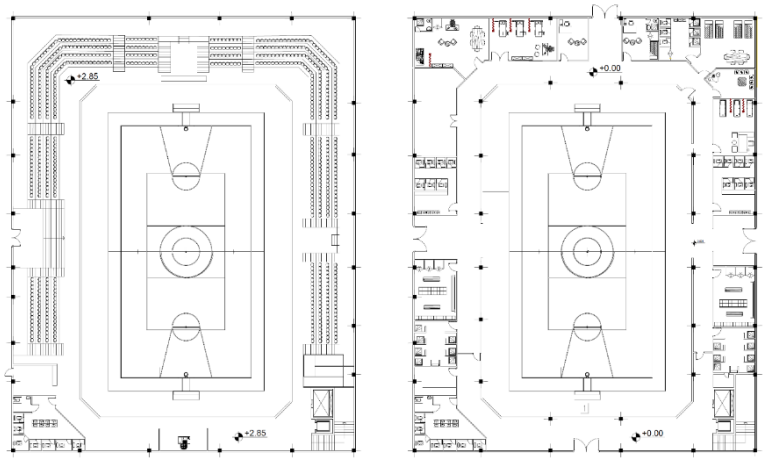
اگر مقدار L از نتیجه حاصل از رابطه بیشتر شود قسمت پشتی فضا تاریک است (CIBSE, 2009). در نتیجه در هر کجا که امکان‌پذیر باشد باید ارتفاع سقف افزایش یابد به‌طوری‌که پنجره‌ها در ارتفاع بالاتر قرار گیرند چرا که پنجره بلندتر نور بیشتری را وارد فضا می‌کند. در نورگیرهای افقی، نورگیرهای نواری بیشتر از نورگیرهای منفک نور را وارد فضا می‌کنند و همچنین نور یکنواخت‌تری دارند (Gorji, 2015).

۱۱.۳. مدل‌سازی سقف و تحلیل راه حل بهینه

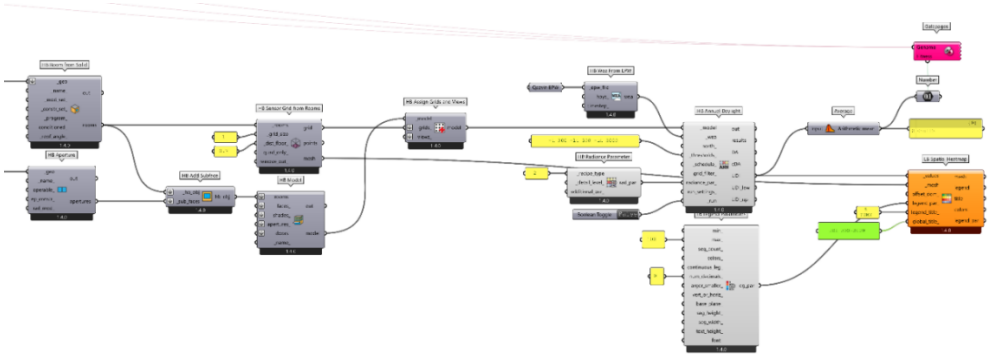
نمونه مورد بررسی در پژوهش حاضر، یک سالن چندمنظوره ورزشی در استان قزوین، جاده بار این و در نزدیکی دانشگاه آزاد اسلامی و در جوار پارک علم‌وفناوری در نظر گرفته شد. بر اساس بررسی مطالعات پیشین، به‌منظور بهره‌مندی فضا از نور یکنواخت (از لحاظ شاخص‌های طراحی نور روز) سقف نمونه موردمطالعه به‌صورت سقف خرپایی شیب‌دار دندانه‌ای (مطابق با شرایط بهینه‌سازی ثابت جدول ۶) به صورت پارامتریک با کمک نرم افزار راینو و افزونه گرسهاپر طراحی و مدل‌سازی شد.

باتوجه‌به محوطه عریضی که برای این ساختمان در نظر گرفته شده است، ساختمان‌های اطراف از لحاظ سایه‌اندازی تأثیری روی این فضا ندارند. فرایند شبیه‌سازی پس از انجام اعتبارسنجی نرم‌افزار شبیه‌ساز نور روز برای مطالعه محدوده بهینه سطح نورگیرهای سقفی مطابق با شرایط جدول ۵ انجام پذیرفت. محدوده بهینه‌یابی برای طول نورگیرهای سقفی بین ۱.۶ الی ۱۲.۵ متر و برای عرض نورگیرهای سقفی بین ۱.۵ الی ۵.۵ متر در نظر گرفته شد. همچنین بررسی زاویه بین ۰ الی ۳۰ درجه برای نورگیرهای سقفی در فرایند شبیه‌سازی موردمطالعه قرار گرفت. در این پژوهش، متغیرهای تحقیق شامل طول و عرض و همچنین زاویه نورگیرهای سقفی در نظر گرفته شد.

به‌منظور تحلیل نور روز مدل تحقیق وارد افزونه هانی بی گردید و برای انجام شبیه‌سازی یک شبکه مش (با ابعاد ۱*۱ برای هر مش) و ارتفاع ۷۰ سانتمتر از کف سالن تعریف شد و تعداد ۱۹۰۰ حسگر سنجش نور روز در مرکز هر شبکه مش در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک در کامپوننت گالاپاگوس (تصویر ۷) تابع هدف تحقیق بهینه سازی ابعاد پنجره بمنظور بهره‌مندی از شرایط مناسب روشنایی بر اساس معیار روشنایی مفید نور روز (UDI 300-3000 Lux) در نظر گرفته شد. دسترسی به این محدوده معیار روشنایی، بهره‌مندی فضا از توزیع روشنایی یکنواخت با کمترین خطر خیرگی را ممکن خواهد ساخت. همچنین، ابعاد نورگیرهای سقفی با فرض اینکه کلیه درب‌ها بسته هستند اندازه‌گیری شد.



شکل ٦. پلان طبقه همکف و اول سالن چند منظوره نمونه مورد مطالعه (مأخذ: نگارندگان)

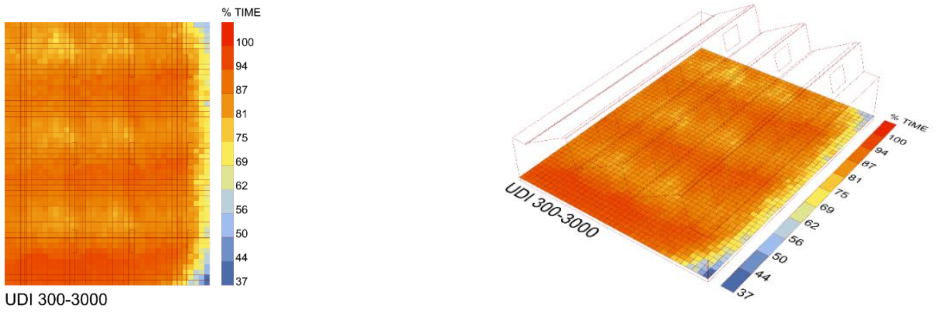


شکل ۷. الگوریتم بهینه‌سازی نور روز بکار گرفته شده در تحقیق (مأخذ: نگارندگان)

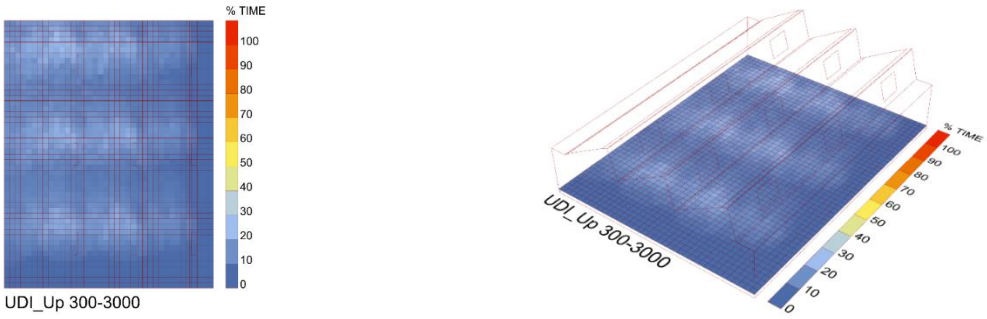
۴. نتایج و بحث

پس از انجام شبیه‌سازی و بهینه‌سازی نور روز بر روی مدل تحقیق ابعاد بهینه ۴/۴*۳/۲ متر برای نورگیرهای سقفی از محدوده تعیین شده (جدول ۵) بدست آمد. همان طور که در تصویر ۸ قابل مشاهده است سالن ورزشی در شرایط برخورداری از ابعاد بهینه برای نورگیرهای سقفی دارای توزیع نور یکنواخت می‌باشد و به طور متوسط در ۸۳.۵۷ درصد مواقع سال سطح سالن از روشنایی نور روز مناسب برخوردار خواهد بود و نیاز به استفاده از روشنایی الکتریکی در این مدت نمی‌باشد.

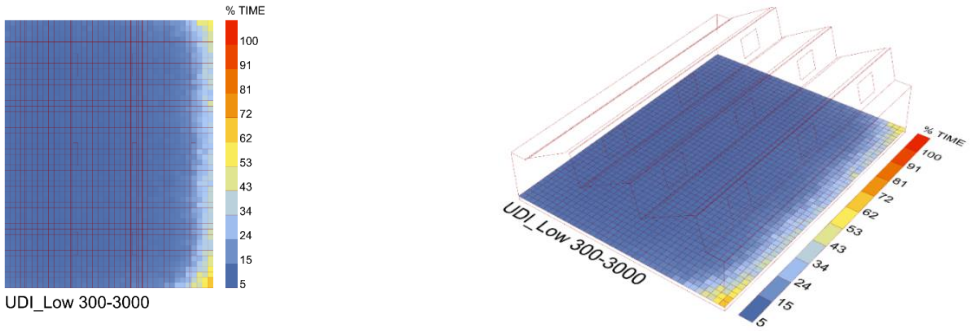
همچنین خطر بروز خیرگی برای تماشاگران و ورزشکاران ۶.۵۸ درصد مواقع سال (تصویر ۹) بدست آمد. همان طور که در تصویر ۱۰ قابل مشاهده است به طور متوسط تنها در ۹.۸۵ درصد مواقع سال خطر کمبود روشنایی طبیعی وجود خواهد داشت و نیاز به استفاده از روشنایی الکتریکی می‌باشد که آن هم عمدتاً محدود به مجاورت ضلع شرقی سالن ورزشی است که با تعبیه پنجره بر روی جداره شرقی قابل کنترل می‌باشد. در تصویر ۱۱ نحوه توزیع نور روز مناسب در نقطه تعیین شده در مرکز سالن ورزشی نشان داده شده است. در این نقطه در۸۴ درصد مواقع سال شرایط روشنایی نور روز مناسب بر اساس معیار روشنایی مفید نور روز (UDI 300-3000 Lux) فراهم شده است و نیاز به استفاده از روشنایی الکتریکی نمی‌باشد. همچنین، در همین نقطه تنها در ۶.۰۵ درصد مواقع سال خطر بروز خیرگی وجود دارد. در تصور ۱۲ زمان‌های بروز خطر خیرگی برای نقطه تعیین شده نشان داده شده است. همان طور که در تصویر ۱۲ قابل مشاهده است تنها در چند ساعت محدود در قبل ظهر تابستان خطر خیرگی برای این نقطه وجود دارد و باقی مواقع سال در اکثر ساعات روز احتمال بروز خیرگی وجود ندارد. همچنین، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد تنها در ۹.۹۵ درصد مواقع سال در نقطه تعیین شده روشنایی طبیعی کمتر از ۳۰۰ لوکس وجود دارد و نیاز به استفاده از روشنایی الکتریکی خواهد بود.



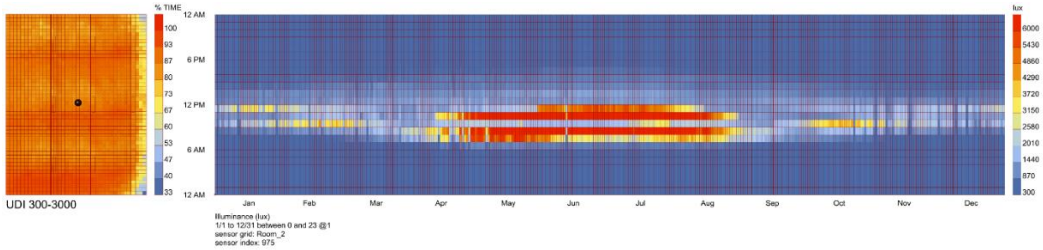
شکل ۹. نحوه توزیع یکنواخت نور روز سالن ورزشی پس از انجام بهینه‌سازی و دریافت میانگین ٪ ۸۳.۵۷ نور بهینه (مأخذ: نگارندگان)



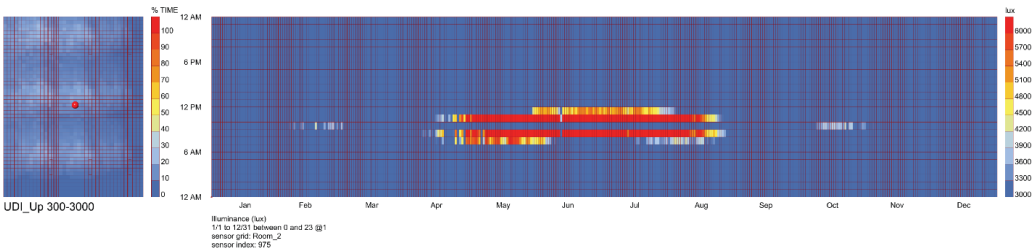
شکل ۱۰. خروجی نرم‌افزار روشنایی مفید نور روز، میانگین خطر احتمال بروز خیرگی در سالن ورزشی٪ ۶.۵۸ است (مأخذ: نگارندگان)



شکل ۱۱. خروجی نرم‌افزار روشنایی مفید نور روز، میانگین کمبود دریافت نور مناسب در سالن ورزشی٪ ۹.۸۵ است (مأخذ: نگارندگان)



شکل ۱۲. نحوه توزیع نور روز مناسب (۸۴ درصد مواقع سال) در نقطه تعیین شده در مرکز سالن ورزشی (مأخذ: نگارندگان)



شکل ۱۳. زمان‌های احتمال بروز خیرگی (۶.۰۵ درصد مواقع سال) در نقطه تعیین شده در مرکز سالن ورزشی (مأخذ: نگارندگان)

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی پارامترهای بهینه‌سازی نورگیرهای سقفی سالن‌های ورزشی در آب‌وهوای سرد و کوهستانی پرداخته شد. بر اساس بررسی مطالعات پیشین از میان شاخص‌های ارزیابی نور روز، شاخص روشنایی مفید نور روز (UDI 300-3000 Lux) به‌عنوان معیار بهینه‌سازی مدل تحقیق انتخاب گردید. دسترسی به این محدوده شاخص روشنایی مفید نور روز، بهره‌مندی فضا از توزیع یکنواخت روشنایی با حداقل احتمال بروز خطر خیرگی را ممکن می‌سازد. در این پژوهش، پس از برداشت مقادیر میدانی با استفاده از دستگاه لوکس‌تر، بررسی میزان خطای مقادیر برداشت شده با نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک معادله ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تغییرات CV (RMSE) انجام پذیرفت و از این طریق اعتبارسنجی نرم‌افزار شبیه‌ساز موردتأیید واقع شد (جدول ۴). نتایج حاصل از مطالعات نشان می‌دهد که نورگیرهای سقفی تأثیر مطلوبی در کیفیت روشنایی این فضاها دارند و نورگیرهای سقفی به دلیل موقعیت استراتژیک خود تأثیر قابل‌توجهی در تأمین نور روز موردنیاز داشته و علاوه بر آن نور مورد نیاز را نیز به طور یکنواخت در سطح سالن پخش می‌کنند. با استفاده از نرم افزار راینو و افزونه گرسهاپر طراحی پارامتریک مدل تحقیق انجام پذیرفت. پارامترهای طول، عرض و زاویه نورگیرهای سقفی بعنوان متغیرهای تحقیق در نظر گرفته شد و به کمک الگوریتم بهینه سازی ژنتیک در افزونه گالاپاگوس بهینه سازی نور روز انجام پذیرفت.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی نشان داد که با دستیابی به ابعاد بهینه نورگیرهای سقفی شرایط تأمین نور یکنواخت برای سالن ورزشی به دست می‌آید و ابعاد بهینه برای نورگیرهای سقفی نمونه موردمطالعه ۴/۴ متر برای طول پنجره و ۳/۲ متر برای عرض پنجره‌های سقفی به دست آمد. همچنین، زاویه ۳۰ درجه به‌عنوان زاویه بهینه برای پنجره‌های سقفی به دست آمد و برای نورگیری یکنواخت‌تر در سطح سالن در هر دندانه از سقف ۳ پنجره در نظر گرفته شد. در این شرایط ابعاد بهینه به‌دست‌آمده برای نورگیرهای سقفی، عدد ۸۳.۵۷ درصد به‌عنوان میانگین دریافت نور بهینه بر اساس شاخص روشنایی مفید نور روز (UDI 300-3000 Lux) در سالن ورزشی به دست آمد. به این معنی که در شرایط بهره‌مندی از ابعاد بهینه به‌دست‌آمده برای نورگیرهای سقفی در نمونه موردمطالعه در ۸۳.۵۷ درصد مواقع سال سطح سالن از روشنایی نور روز مناسب برخوردار خواهد بود و همچنین خطر بروز خیرگی در این مدت برای تماشاگران و ورزشکاران حداقل (۶.۵۸ درصد مواقع سال) خواهد بود. این مطلوبیت در فضاهای سالن ورزشی علاوه بر اینکه در بهبود آسایش بصری بازیکنان و تماشاگران بسیار مؤثر است، به جهت بهره‌مندی از نور روز مناسب موجب کاهش مصرف انرژی نیز خواهد شد. در انتها، فرایند انجام این مطالعه می‌تواند به‌عنوان روشی برای بررسی ترکیب‌ها و مشخصات مختلف طراحی روشنایی مورداستفاده طراحان قرار گیرد.

این نتایج، هنگامی که با شبیه‌سازی‌های دقیق‌تر یا سایر بررسی‌های عملکردی که بخش مهمی از طراحی مناسب اقلیمی هستند ترکیب شوند، می‌توانند ابزارهای مفیدی برای دستیابی به طراحی موفق و بهبود عملکرد اقلیمی و روشنایی ساختمان‌های ورزشی باشند.

منابع

Atzeri, A. M., Cappelletti, F., Tzempelikos, A., & Gasparella, A. (2016). *Comfort metrics for an integrated evaluation of buildings performance*. Energy and Buildings, 127, 411–424.

Chang, S. K. (2003). *Data structures and algorithms* (Vol. 13). World Scientific.

CIBSE, T. (2009*). Chartered Institution of Building Services Engineers*. London, UK.

Daneshi, M., Fard, R. T., Zomorodian, Z. S., & Tahsildoost, M. (2022). *Development of a hybrid machine-learning and optimization tool for performance-based solar shading design.* arXiv preprint arXiv:2201.03028.

Ebrahimnejad, M.-R. (2017*). The status of the Verse of Light in Islamic philosophy*. Ayeneh Marefat: Islamic Philosophy and Theology Quarterly, Shahid Beheshti University.

Fadaei Ardestani, M.-A., Naseri Mobaraki, H., Ayatollahi, M.-R., & Zomorrodian, Z.-S. (2018). *Assessment of daylight and glare in classrooms using dynamic metrics*. Journal of Architectural and Urban Research, (83), 25–40.

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

Gorji, Y. (2015*). Lighting design for educational environments* (M. Meiriniya, Trans.). Tahan Publishing.

Heydari, Sh. (2010). *Architecture and lighting.* Tehran University Press.

Jokar, R., & Maleki, M. (2022). *Investigating the impact of parametric Voronoi shell design on improving daylight performance in an office building in Shiraz.* Naghsh-e-Jahan: Journal of Theoretical Studies and New Technologies in Architecture and Urbanism, 12(4), 116–141.

Kashaf, M.-M. (2013*). Management of sports facilities and spaces.* Bamdad-e-Ketab Publishing.

Lakhdari, K., Sriti, L., & Painter, B. (2021). *Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions.* Building and Environment, 204, 108173.

Maroufi, N., Mahdavi Nejad, M.-J., & Nasab, H. M. (2022). *Daylight-friendliness in educational buildings: A case study on optimizing south-facing classroom envelopes in Semnan.* Shahr va Memari-ye Bomi, 10. (16)

Marzouk, M., ElSharkawy, M., & Eissa, A. (2020). *Optimizing thermal and visual efficiency using parametric configuration of skylights in heritage buildings*. Journal of Building Engineering, 31, 101385.

Marzouk, M., ElSharkawy, M., & Mahmoud, A. (2022). *Optimizing daylight utilization of flat skylights in heritage buildings.* Journal of Advanced Research, 37, 133–145.

Soleimani, K., Abdollahzadeh, N., & Zomorodian, Z. S. (2021*). Improving daylight availability in heritage buildings: A case study of below-grade classrooms in Tehran*. Journal of Daylighting, 8(1), 120–133.

Zeynolzadeh, T., Nikghadam, N., & Fayyaz, R. (2021). *The role of thermal conditions and lighting in optimizing north- and south-facing windows.* Mechanical Engineering Journal, 30. (136)