

Explaining the Functional Logic of Louvered Façades in a Hot-Arid Climate: Investigating the Role of Window-to-Wall Ratio and Louver Angle in Balancing Thermal Loads and Daylighting in Office Buildings in Kerman

1. Parastoo Torkzadeh Mahani[✉]: Department of Architecture, Bam.C., Islamic Azad University, Bam, Iran

2. Mansour Nikpour^{*}: Department of Architecture, Bam.C., Islamic Azad University, Bam, Iran.

3. Mohsen Ghasemi[✉]: Department of Architecture, Bam.C., Islamic Azad University, Bam, Iran

^{*}Corresponding Author's Email Address: mansour.nikpour@iau.ac.ir

How to Cite: Torkzadeh Mahani, P., Nikpour, M., & Ghasemi, M. (2026). Explaining the Functional Logic of Louvered Façades in a Hot-Arid Climate: Investigating the Role of Window-to-Wall Ratio and Louver Angle in Balancing Thermal Loads and Daylighting in Office Buildings in Kerman. *Manifestation of Art in Architecture and Urban Engineering*, 4(4), 1-23.

Abstract:

This study aimed to explain the hierarchy of effects of the window-to-wall ratio (WWR) and horizontal louver blade angle (Alpha) on the balance between annual heating-cooling load intensity and daylight performance in the south façade of a typical office cell in the hot-arid climate of Kerman. A quantitative, simulation-based, parametric, and multi-objective research design was adopted. The design space comprised a full-factorial combination of four variables—WWR, Alpha, Offset, and Spacing—generating 640 scenarios. Geometric modeling was performed in DesignBuilder, thermal calculations were conducted using EnergyPlus, and daylight performance was simulated with Radiance. The resulting database was audited and statistically analyzed in R. Annual heating-cooling load intensity was assessed as the thermal outcome, while spatial Daylight Autonomy (sDA), Useful Daylight Illuminance (UDI), and Annual Sunlight Exposure (ASE) represented daylight performance. Global sensitivity analysis using generalized additive models (GAM) and permutation importance was followed by Pareto-based multi-objective optimization. Global sensitivity analysis identified WWR as the dominant variable for annual heating-cooling load intensity (86.9% relative importance) and sDA (63.2%). Conversely, Alpha was the dominant determinant of ASE (58.4%) and UDI (63.4%), indicating its primary role in limiting direct solar exposure and improving useful daylight. WWR accounted for 39.2% of variation in ASE, while Alpha accounted for 34.6% of variation in sDA. Multi-objective optimization identified 44 non-dominated Pareto scenarios, confirming that no single-variable solution simultaneously optimized thermal and daylight objectives. Optimal louvered-façade performance is not achieved by maximizing transparency or excessively obstructing solar radiation; rather, it depends on coordinated adjustment of façade openness and solar filtration. WWR primarily determines the magnitude of thermal exposure and quantitative daylight availability, whereas Alpha primarily governs solar control and useful daylight quality. Accordingly, these variables should be treated as complementary and sequential design decisions within performance-based façade design.

Keywords: Window-to-Wall Ratio; Horizontal Louver; Daylighting; Heating-Cooling Load; Performance-Based Design.

Received: 17 May 2026

Revised: 26 August 2026

Accepted: 03 September 2026

Initial Publication: 13 September 2026

Final Publication: 22 December 2026



تبیین منطق عملکردی نمای لووردار در اقلیم گرم و خشک؛ واکاوی نقش نسبت پنجره به دیوار و زاویه لوور در موازنه بار حرارتی و روشنایی روز ساختمان‌های اداری کرمان

۱. پرستو ترک‌زاده ماهانی[✉]: گروه معماری، واحد به، دانشگاه آزاد اسلامی، به، ایران

۲. منصور نیک‌پور[✉]: گروه معماری، واحد به، دانشگاه آزاد اسلامی، به، ایران. (نویسنده مسئول)

۳. محسن قاسمی[✉]: گروه معماری، واحد به، دانشگاه آزاد اسلامی، به، ایران

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: mansour.nikpour@iau.ac.ir

نحوه استناددهی: ترک‌زاده ماهانی، پرستو، نیک‌پور، منصور، و قاسمی، محسن. (۱۴۰۵). تبیین منطق عملکردی نمای لووردار در اقلیم گرم و خشک؛ واکاوی نقش نسبت پنجره به دیوار و زاویه لوور در موازنه بار حرارتی و روشنایی روز ساختمان‌های اداری کرمان. تجلی هنر در معماری و شهرسازی، ۴(۴)، ۱-۲۳.

چکیده

پژوهش حاضر با هدف تبیین سلسله‌مراتب اثرگذاری نسبت پنجره به دیوار (WWR) و زاویه تیغه‌های لوور افقی (Alpha) بر موازنه میان شدت سالانه بار گرمایش‌سرمایش و عملکرد روشنایی روز در نمای جنوبی یک سلول اداری در اقلیم گرم و خشک کرمان انجام شد. این پژوهش با رویکردی کمی، شبیه‌سازی‌محور، پارامتریک و چندهدفه انجام شد. فضای طراحی از ترکیب تمام‌فاکتوریل چهار متغیر WWR، Alpha، Spacing و Offset تشکیل شد و در مجموع ۶۴۰ سناریو ایجاد گردید. مدل‌سازی کالبدی در DesignBuilder، محاسبات حرارتی با EnergyPlus و ارزیابی روشنایی روز با Radiance انجام شد و داده‌های حاصل در محیط R ممیزی و تحلیل شدند. شاخص حرارتی شامل شدت سالانه مجموع بار گرمایش‌سرمایش و شاخص‌های روشنایی شامل sDA، UDI و ASE بود. تحلیل حساسیت جهانی بر پایه مدل‌های افزایشی تعمیم‌یافته (GAM) و اهمیت جایگشتی انجام شد و سپس بهینه‌سازی چندهدفه پارتو برای شناسایی پاسخ‌های غیرمغلوب به کار رفت. تحلیل حساسیت نشان داد WWR با اهمیت نسبی ۸۶.۹ درصد برای بار گرمایش‌سرمایش و ۶۳.۲ درصد برای sDA، متغیر غالب در تعیین رفتار حرارتی و کفایت کمی نور روز بود. در مقابل، Alpha با اهمیت نسبی ۵۸.۴ درصد برای ASE و ۶۳.۴ درصد برای UDI، بیشترین نقش را در کاهش مواجهه مستقیم خورشیدی و افزایش سهم روشنایی مفید داشت. در شاخص ASE، سهم WWR برابر ۳۹.۲ درصد و در sDA سهم Alpha برابر ۳۴.۶ درصد بود. بهینه‌سازی چندهدفه نیز ۴۴ سناریوی غیرمغلوب پارتو را شناسایی کرد. یافته‌ها نشان می‌دهد طراحی بهینه نمای لووردار حاصل بیشینه‌سازی سطح شفاف یا انسداد حداکثری تابش نیست، بلکه به هماهنگی سلسله‌مراتبی میان میزان گشودگی پوسته و نحوه پالایش تابش وابسته است. WWR عمدتاً ظرفیت مواجهه حرارتی و نورگیری را تعیین می‌کند، در حالی که Alpha نقش اصلی را در کنترل کیفی تابش و روشنایی مفید بر عهده دارد؛ ازاین‌رو، این دو متغیر باید به‌صورت هم‌زمان و مکمل در طراحی عملکردمحور نما لحاظ شوند.

کلیدواژگان: نسبت پنجره به دیوار؛ لوور افقی؛ روشنایی روز؛ بار گرمایش‌سرمایش؛ طراحی عملکردمحور.

تاریخ دریافت: ۲۷ اردیبهشت ۱۴۰۵

تاریخ بازنگری: ۴ شهریور ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۲ شهریور ۱۴۰۵

اولین انتشار: ۲۲ شهریور ۱۴۰۵

انتشار نهایی: ۱ دی ۱۴۰۵



مقدمه

در معماری معاصر، پوسته ساختمان دیگر صرفاً مرزی کالبدی میان فضای داخلی و محیط بیرون نیست، بلکه یکی از مهم‌ترین واسطه‌های تنظیم تبادل حرارتی، دریافت تابش خورشیدی و دسترسی به نور روز به شمار می‌آید. این تغییر نگرش، هم‌زمان با گسترش رویکردهای عملکردمحور در طراحی و ارزیابی ساختمان، سبب شده است تصمیم‌هایی نظیر میزان شفافیت نما، ابعاد بازشو، جهت‌گیری و هندسه سایه‌انداز از قلمرو صرفاً فرمی خارج شوند و به متغیرهایی سنجش‌پذیر در عملکرد محیطی بنا تبدیل گردند. مرور مطالعات انرژی در حوزه معماری ایران نیز نشان می‌دهد که پژوهش‌های این حوزه به تدریج از بررسی منفرد تجهیزات و مصالح به سمت ارزیابی یکپارچه‌تر مؤلفه‌های معماری و عملکرد ساختمان حرکت کرده‌اند (1). این تحول با جهت‌گیری کلی طراحی عملکردمحور نیز همسو است؛ رویکردی که کیفیت تصمیم معماری را بر مبنای پیامدهای قابل‌اندازه‌گیری آن ارزیابی می‌کند (2) (2). در ایران، ضوابط انرژی و سامانه‌های ارزیابی ساختمان نیز به موازات این تحول، نقش پررنگ‌تری در تبدیل عملکرد محیطی به معیار طراحی یافته‌اند. مقایسه مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان با سامانه ارزیابی ساختمان سبز آلمان نشان داده است که ارزیابی عملکرد ساختمان می‌تواند از انطباق حداقلی با الزامات فنی فراتر رفته و در قالب مجموعه‌ای گسترده‌تر از معیارهای محیطی و عملکردی تعریف شود (3). ارزیابی تطبیقی مبحث ۱۹ و دی‌جی‌ان‌بی (DGNB) در یک مجتمع مسکونی نیز اهمیت حرکت از کنترل منفرد مصرف انرژی به سوی ارزیابی چندمعیاره عملکرد را برجسته ساخته است (4). مطالعات مربوط به برچسب‌گذاری انرژی ساختمان‌های مسکونی نیز نشان می‌دهد که حتی نحوه تعریف شاخص ارزیابی می‌تواند قضاوت درباره عملکرد حرارتی ساختمان را تغییر دهد (5). از این رو، در پژوهش حاضر نیز تمایز روشنی میان «مصرف نهایی انرژی ساختمان» و «شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش» برقرار می‌شود و نتیجه‌گیری‌ها صرفاً در محدوده شاخص‌هایی صورت می‌گیرند که واقعاً اندازه‌گیری شده‌اند.

گسترده‌گی مطالعات ایرانی درباره بهسازی انرژی نیز نشان می‌دهد که پاسخ عملکردی ساختمان حاصل یک عامل منفرد نیست. بررسی بام سبز و الزامات مبحث ۱۹ در اقلیم اصفهان، تأثیر مداخله در اجزای پوسته را بر عملکرد انرژی نشان داده است (6)؛ بهینه‌سازی ضخامت عایق دیوار خارجی در اقلیم‌های مختلف ایران نیز بر وابستگی پاسخ پوسته به شرایط اقلیمی تأکید کرده است (7). در سوی دیگر، پژوهش‌هایی درباره سامانه‌های کنترل هوشمند در بیمارستان‌ها (8)، ذخیره‌سازی یخ و مدیریت انرژی (9) و سامانه‌های ترکیبی خورشیدی برای گرمایش ساختمان (10) نشان می‌دهند که عملکرد نهایی بنا برآیند تصمیم‌هایی در مقیاس‌های مختلف معماری و تأسیسات است. حتی نقد مبحث ۱۹ از طریق مدل اس‌دبلیو‌اوتی (SWOT) نیز بر این نکته دلالت دارد که صرف وجود یک ضابطه، بدون پیوند مؤثر میان معیارهای فنی و فرآیند طراحی، الزاماً به پاسخ بهینه منجر نمی‌شود (11). از این رو، مقاله حاضر آگاهانه مسئله خود را به یک زیرسامانه مشخص، یعنی پوسته شفاف و سایه‌انداز نمای جنوبی محدود می‌کند تا نقش متغیرهای معماری آن در شرایط کنترل‌شده قابل تفکیک باشد. ضرورت چنین رویکردی زمانی بیشتر آشکار می‌شود که تفاوت‌های اقلیمی ایران در نظر گرفته شود. منطقه‌بندی اقلیمی کشور بر مبنای سامانه کوپن-گایگر نشان می‌دهد که ایران از تنوع اقلیمی قابل‌توجهی برخوردار است و مرزهای اقلیمی نیز در طول زمان ثابت نیستند (12). بنابراین، انتقال یک نسبت پنجره، زاویه سایه‌انداز یا راهبرد پوسته از یک اقلیم به اقلیم دیگر بدون بازسنجی شرایط محیطی، از نظر روش‌شناختی قابل دفاع نیست. پژوهش مربوط به زاویه استقرار سطوح قائم در شهرهای گرم و مرطوب ایران نیز نشان داده است که جهت‌گیری و هندسه دریافت تابش خورشیدی به‌شدت زمینه‌مند است (13). به همین ترتیب، نتایج بهینه‌سازی عایق

در اقلیم‌های مختلف کشور بر ضرورت تعریف تصمیم پسته در نسبت با بستر اقلیمی تأکید دارند (7). بنابراین، مقادیر بهینه استخراج شده از سایر اقلیم‌ها نمی‌توانند مستقیماً به کرمان تعمیم یابند؛ آنچه قابل انتقال است، منطق تحلیل و نه لزوماً عدد نهایی طراحی است. در این میان، بازشو یکی از حساس‌ترین مؤلفه‌های پسته است؛ زیرا به‌طور هم‌زمان بر نور روز، تبادل حرارتی و دریافت خورشیدی اثر می‌گذارد. پژوهش درباره نسبت بهینه پنجره به دیوار در بیمارستان‌های مشهد نشان داده است که نسبت پنجره به دیوار (WWR) می‌تواند به‌عنوان متغیری کلیدی در بهره‌وری انرژی ساختمان مطرح شود (14). مطالعه ابعاد و میزان بازشوی پنجره در ساختمان‌های مسکونی عسلویه نیز بر ضرورت تعریف مقادیر بهینه متناسب با اقلیم و شرایط عملکردی تأکید کرده است (15). حتی در مقیاس فضاهای داخلی، پژوهش درباره تعیین ابعاد پاسیوهای نورگیر بر اساس الزامات مقررات ملی نشان می‌دهد که مقدار و هندسه گشودگی، مسئله‌ای مستقیماً مرتبط با تأمین نور طبیعی است (16). این مجموعه مطالعات مؤید آن است که «مقدار گشودگی» را نمی‌توان صرفاً یک نسبت هندسی در ترکیب نما دانست؛ بلکه این متغیر مستقیماً ظرفیت پسته برای دریافت نور و مواجهه با محیط خارج را تنظیم می‌کند. مطالعات تخصصی‌تر نیز همین مسئله را در بستر اقلیم‌های ایران تأیید کرده‌اند. شاعر و همکاران (17) نشان داده‌اند که نسبت مناسب پنجره به دیوار در ساختمان‌های اداری، تابع اقلیم است و نمی‌توان یک نسبت پنجره به دیوار (WWR) ثابت را برای شرایط گرم و خشک، گرم و مرطوب و سرد تجویز کرد. دهقان و مالکی (18) نیز در اقلیم گرم و خشک ایران نشان داده‌اند که طراحی پنجره زمانی قابل دفاع است که عملکرد انرژی و روشنایی روز به‌صورت هم‌زمان ارزیابی شوند. بنابراین، افزایش سطح شفاف اگرچه ظرفیت ورود نور طبیعی را افزایش می‌دهد، ممکن است هم‌زمان دریافت خورشیدی و بار حرارتی را نیز تشدید کند. این تعارض، نسبت پنجره به دیوار (WWR) را از یک پارامتر صرفاً کمی به یک اهرم چندعملکردی در طراحی پسته تبدیل می‌کند. باین‌حال، مسئله‌ی نما تنها با تعیین مقدار شیشه حل نمی‌شود. سطح شفاف در اقلیم‌های پرتابش نیازمند سازوکاری برای کنترل نحوه ورود تابش است. مطالعات مربوط به سایه‌اندازی ساختمان‌های اداری نشان داده‌اند که کاهش دریافت خورشیدی زمانی مطلوب است که هزینه آن در کاهش نور روز نیز به‌طور هم‌زمان سنجیده شود (19). بررسی سایه‌اندازهای افقی و عمودی نیز نشان داده است که عملکرد آن‌ها تابع جهت‌گیری نما و هندسه خورشید است (20). در اقلیم گرم و خشک تهران، (21) با تحلیل پارامتریک لوورها نشان دادند که هندسه سایه‌انداز را باید در نسبت توأمان با عملکرد حرارتی و روشنایی روز ارزیابی کرد. مطالعات انجام‌شده درباره ساختمان‌های اداری ایران نیز نقش لوورها را در کاهش تقاضای سرمایشی برجسته ساخته‌اند (22)، در حالی که شاعر و همکاران (23) وابستگی عملکرد لوور خارجی به شرایط اقلیمی را مورد تأکید قرار داده‌اند. پژوهش‌های جدیدتر نیز ظرفیت لوورها را در تعدیل رفتار انرژی ساختمان‌های اداری تأیید می‌کنند (24) (24). در اینجا تمایزی اساسی میان «تأمین نور» و «عملکرد مطلوب روشنایی روز» شکل می‌گیرد. افزایش سطح شفاف ممکن است مقدار بیشتری نور وارد فضا کند، اما این افزایش الزاماً به معنای ارتقای کیفیت استفاده‌پذیر روشنایی نیست. مطالعات مربوط به ارسی‌های ایرانی نیز نشان داده‌اند که عملکرد نوری یک بازشو تنها تابع مساحت آن نیست و هندسه عنصر واسط می‌تواند کیفیت توزیع نور را تغییر دهد (25). ارزیابی هم‌زمان حرارت و روشنایی ارسی‌های سنتی نیز بر همین ضرورت تأکید دارد (26). این اصل، از منظر تاریخ معماری ایران نیز قابل توجه است: در معماری مناطق گرم و خشک، بازشو معمولاً به‌صورت عنصری بی‌واسطه در برابر تابش قرار نمی‌گرفت، بلکه با سایه، عمق، ایوان، شبکه یا دیگر واسطه‌های کالبدی کنترل می‌شد. مطالعات معماری بومی ایران نشان می‌دهد که عملکرد اقلیمی حاصل هماهنگی بازشو، سایه، جرم و سازمان فضایی بوده است (27، 28). بنابراین، ارزش این پیشینه برای پژوهش حاضر در بازتولید شکل تاریخی نیست، بلکه در تداوم یک اصل عملکردی است: گشودگی باید همراه با سازوکار کنترل خود طراحی شود. اهمیت این موضوع در کرمان تشدید می‌شود. مطالعات کالبدی-اقلیمی این شهر نشان داده‌اند که تناسبات معماری و هندسه

فضا با عملکرد انرژی مرتبطاند (29). از سوی دیگر، ارزیابی‌های مرتبط با کیفیت محیط داخلی ساختمان‌های سبز نیز یادآور می‌شوند که عملکرد مطلوب ساختمان مفهومی تک‌بعدی نیست و ارتقای یک شاخص نباید به‌جای ارزیابی مجموعه شرایط محیطی قرار گیرد (30). از این منظر، مسئله نمای اداری در کرمان را نمی‌توان صرفاً به کاهش بار حرارتی یا افزایش نور روز فروکاست؛ بلکه باید مشخص شود که پوسته چگونه می‌تواند میان این اهداف متعارض رابطه‌ای قابل سنجش برقرار کند. مرور مجموعه مطالعات داخلی و بین‌المللی نشان می‌دهد که سه اصل تا حد زیادی تثبیت شده‌اند: نخست، میزان شفافیت بر رفتار حرارتی و نور روز اثر دارد؛ دوم، هندسه سایه‌انداز می‌تواند مسیر ورود تابش را تغییر دهد؛ و سوم، پاسخ مناسب به اقلیم و جهت‌گیری وابسته است. با این حال، همچنان یک مسئله طراحی مهم باقی می‌ماند: در یک فضای اداری جنوبی در اقلیم گرم و خشک کرمان، نسبت پنجره به دیوار (WWR) و زاویه لوور (Alpha) هر یک دقیقاً بر کدام بخش از عملکرد پوسته نقش غالب‌تری دارند و این دو نقش چگونه در یک تصمیم چندهدفه با یکدیگر موازنه می‌شوند؟ اهمیت این پرسش در آن است که بخش عمده مطالعات موجود یا به بهینه‌سازی یک مؤلفه خاص، مانند نسبت پنجره به دیوار (WWR)، ابعاد بازشو، عایق، تجهیزات یا سامانه‌های انرژی پرداخته‌اند، یا اثر سایه‌اندازی را در چارچوبی مستقل بررسی کرده‌اند. در حالی که طراحی معماری نیازمند دانستن صرف «اثرگذاری» نیست؛ بلکه باید بداند کدام تصمیم در چه مرحله‌ای و برای کدام پیامد عملکردی اولویت دارد. رویکردهای چندهدفه نیز نشان داده‌اند که پاسخ قابل دفاع طراحی معمولاً نه در بیشینه‌سازی یک هدف منفرد، بلکه در مجموعه‌ای از مصالحه‌ها میان اهداف متعارض شکل می‌گیرد (31) (31). بر همین اساس، مطالعه‌ی حاضر رابطه عملکردی دو متغیر محوری نسبت پنجره به دیوار (WWR) و زاویه لوور افقی (Alpha) را در نمای جنوبی یک سلول اداری در اقلیم گرم و خشک کرمان بررسی می‌کند. تمرکز مقاله نه بر اثبات مجدد اهمیت پنجره یا لوور و نه بر ارائه یک عدد جهان‌شمول، بلکه بر تبیین سلسله‌مراتب نقش این دو متغیر در شکل‌دهی به موازنه میان شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش و عملکرد روشنایی روز است. از این رو، پرسش اصلی پژوهش چنین صورت‌بندی می‌شود: در یک سلول اداری تیپ با نمای جنوبی در اقلیم گرم و خشک کرمان، تغییر نسبت پنجره به دیوار (WWR) و زاویه تیغه‌های لوور افقی (Alpha) چگونه و با چه سلسله‌مراتب اثرگذاری، موازنه میان شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش و عملکرد روشنایی روز را شکل می‌دهد؟

مبانی نظری و پیشینه‌ی پژوهش

در سنت معماری بومی مناطق گرم و خشک ایران که در ادوار اسلامی (از سده‌های نخستین هجری تا عصر حاضر) شکل گرفته است، ساماندهی رابطه‌ی فضای درون و بیرون بر منطقی کالبدی-اقلیمی استوار بوده است؛ منطقی که به‌جای انسداد مطلق پرتوها و نور روز، مواجهه بنا با جریان‌ات محیطی را از مسیر سازماندهی درون‌گرا، جرم حرارتی، صحن مرکزی، ایوان، بازشوهای کنترل‌شده و لایه‌های سایه‌افکن تنظیم می‌کرد. واکاوی راهبردهای بومی آشکار می‌سازد که تحقق کیفیات محیطی محصول عملکرد عنصری منفرد نبوده، بلکه از هماهنگی نظام‌مند میان فرم، مساحت بازشو، هندسه سایه‌اندازی و سازماندهی فضایی نشأت می‌گرفته است (27). مطالعات ساختار خانه‌های حیاط‌دار بیابانی نیز بر ماهیت سامانه‌ای این عناصر تأکید ورزیده و نشان می‌دهند که چگونه حیاط، جرم کالبدی و الگوی گشودگی جدارها در پیوندی متقابل به تعدیل متغیرهای محیطی می‌انجامند (28). ارزش علمی این پیشینه در تحلیل سامانه‌های لوور معاصر، نه در شباهت‌های صوری با تیغه‌های امروزی، بلکه در تداوم همان اصل اقلیمی بنیادین نهفته است: لزوم پالایش و تنظیم شار تابشی و نوری پیش از ورود به فضای زیست. در همین راستا، خلیلی و امین‌دلاری (32) در تحلیل راهکارهای سنتی ساختمان‌های کم‌انرژی در اقلیم گرم و خشک، مهار تابش، جرم حرارتی و موازنه

بازشوها را ارکان اصلی پاسخ‌دهی اقلیمی برمی‌شمارند. این منطق در عناصر نوررسانی سنتی نیز بازتاب یافته است؛ چنان‌که ارزیابی کارکرد روشنایی ارسی‌ها بر پایه شاخص‌های نوین نشان می‌دهد بهره‌وری بازشو صرفاً تابعی از مساحت آن نیست، بلکه هندسه و ساختار میانجی واسطه، نحوه ورود و توزیع نور را دگرگون می‌سازد (25). سنجش هم‌زمان رفتار حرارتی و روشنایی ارسی در خانه کازرونی شیراز نیز ضرورت ارزیابی توأمان حوزه‌های حرارت و نور را متذکر می‌شود (26). بدین ترتیب، آموزه کلیدی سنت معماری برای پژوهش حاضر آن است که شفافیت بدون سازوکار کنترلی اقلیم‌مدار، متغیری ناقص در تحلیل‌های عملکردی به شمار می‌رود. این ضرورت در بستر اقلیمی کرمان به دلیل شدت تابش، خشکی هوا و دامنه وسیع نوسانات دمایی دوچندان می‌شود و ابعاد گشودگی پوسته را به مسئله‌ای حیاتی در عملکرد بنا بدل می‌سازد. تحقیقات متمرکز بر معماری کرمان مؤید آن است که تناسبات کالبدی مستقیماً رفتار انرژی ساختمان را متأثر می‌کنند؛ چنان‌که طیاری و نیک‌پور (29) با تحلیل هندسه حیاط در خانه‌های سنتی کرمان، پیوند میان تغییرات هندسی فضا و دگرگونی در عملکرد انرژی را به اثبات رساندند. از سوی دیگر، چارچوب‌های طراحی اقلیمی در این منطقه بر لزوم انطباق دقیق فرم و جهت‌گیری با مؤلفه‌های محیطی تأکید دارند (33). ازاین‌رو، کرمان صرفاً یک موضع جغرافیایی برای مطالعه نیست، بلکه متغیرهای اقلیمی آن، بخشی از منطق تکوین متغیرهای پژوهش محسوب می‌شوند؛ امری که با تکیه بر شدت تابش، خشکی اتمسفر و دوره طولانی نیاز به سرمایش، مبنای تحلیل رساله قرار گرفته است. در معماری اداری معاصر، نسبت پنجره به دیوار (WWR) از متغیرهای کلیدی در تنظیم این روابط به شمار می‌رود؛ متغیری که سهم سطح شفاف پوسته را در میزان شار نوری و دریافت‌های تابشی تعیین می‌کند. اگرچه افزایش WWR ظرفیت نورگیری فضای داخلی را ارتقا می‌دهد، اما پیامدهای حرارتی و تابشی سنگینی به همراه دارد. شاعری و همکاران (17) در بررسی ابنیه اداری اقلیم‌های گوناگون ایران نشان دادند که بازه بهینه WWR کاملاً زمینه‌مند بوده و اتخاذ نسبتی یکسان برای تمامی بسترهای اقلیمی فاقد وجاهت علمی است. دهقان و مالکی (18) نیز در ارزیابی اقلیم گرم و خشک ایران اثبات کردند که طراحی بازشو مستلزم ارزیابی هم‌زمان متغیرهای انرژی و روشنایی روز است، چراکه بهبود یکی از این دو بعد لزوماً به ارتقای دیگری نمی‌انجامد. در نقطه‌ی مقابل، لوور افقی به‌عنوان سازوکاری برای مهار شار تابشی ورودی از جداره شفاف عمل می‌کند. نقش لوور فراتر از سایه‌اندازی ساده است؛ زاویه و نحوه چیدمان تیغه‌ها، خط سیر تابش مستقیم و نور روز را تغییر داده و در نتیجه پاسخ حرارتی و نوری فضای داخلی را دگرگون می‌سازد. مهدوی‌نژاد و محمدی (21) در مطالعه پارامتریک لوورها در اقلیم گرم و خشک تهران نشان دادند که پیکره‌بندی هندسی سایه‌انداز باید بر اساس خروجی‌های حرارتی و روشنایی سنجیده شود. شکوهمان و همکاران (22) نیز تأثیر لوور بر کاهش تقاضای سرمایشی فضاهای اداری در ایران را تحلیل نمودند، در حالی که شاعری و همکاران (23) وابستگی عملکرد لوورهای خارجی به مؤلفه‌های اقلیمی را تبیین ساختند. در مقیاس منطقه‌ای نیز موسوی و همکاران (34) بر ضرورت واسنجی دقیق سایه‌اندازها در ساختار اداری اقلیم گرم و خشک کرمان تأکید کرده‌اند.

بنابراین، پیشینه پژوهشی موجود در ایران تأثیر WWR، هندسه سایه‌انداز و زمینه اقلیمی را بر کارکرد بنا محرز می‌داند؛ با این حال، ادبیات موجود غالباً این مسئله را به‌صورت گسسته بررسی کرده است. در پژوهش‌های معطوف به WWR، تمرکز اصلی بر میزان سطح شفاف بوده، در مطالعات لوور، متغیرهای هندسی سایه‌انداز محوریت یافته و در بخشی دیگر، غلبه ارزیابی‌های حرارتی موجب غفلت از کیفیات روشنایی روز شده است. ازاین‌رو، هدف پژوهش حاضر اثبات مجدد کارایی لوور یا اثرگذاری WWR به‌تنهایی نیست، بلکه تبیین موقعیت و وزن نسبی این دو متغیر در یک چارچوب یکپارچه عملکردی است. این تفکیک مفهومی در تحلیل روشنایی روز نیز الزامی است. افزایش کمی نور ورودی لزوماً به معنای ارتقای عملکرد نوری نیست؛ چراکه کفایت نور، سودمندی آن و مواجهه بیش از حد با تابش مستقیم، ابعاد متفاوتی از رفتار فضای داخلی را بازنمایی می‌کنند. ازاین‌رو، در پژوهش حاضر تمایزی شفاف میان «عملکرد روشنایی روز» و

مفهوم عام «آسایش بصری» برقرار شده است. شاخص‌های UDI ، SDA و ASE به ترتیب امکان سنجش دقیق کفایت نور روز، بازه روشنایی مفید و میزان مواجهه ناخواسته با تابش مستقیم را فراهم می‌سازند، اما به تنهایی ارزیابی کامل ادراکی از پدیده خیرگی محسوب نمی‌شوند. این تمایز ساختاری، مانع از تعمیم‌دهی فراتر از داده‌های واقعی پژوهش می‌گردد. در سطح نظری، برآیند مبانی موجود ضرورت بررسی توأمان WWR و زاویه لوور را در یک ساختار تحلیلی واحد اثبات می‌کند؛ اما نباید پیش‌فرض گرفت که وزن عملکردی آن‌ها یکسان بوده یا رابطه‌شان الزاماً از نوع برهم‌کنش آماری معنی‌دار است. مسئله‌ی بنیادین، تعیین میزان اثرگذاری هر یک از این دو متغیر بر خروجی‌های عملکردی در محدوده فضای طراحی مورد مطالعه است. بر این مبنا، خلأ دانشی موجود در غیاب تبیینی زمینه‌مند از سلسله‌مراتب اثرگذاری WWR و زاویه لوور بر موازنه بار حرارتی و روشنایی روز در نمای جنوبی ساختمان‌های اداری کرمان خلاصه می‌شود.

روش‌شناسی پژوهش

این مطالعه با رویکردی کمی، شبیه‌سازی‌محور، پارامتریک و چندهدفه تدوین شده است تا رابطه میان متغیرهای هندسی پوسته و پاسخ‌های حرارتی و روشنایی روز را در شرایط مرزی کنترل‌شده و بازتولیدپذیر ارزیابی کند. واحد تحلیل، یک سلول اداری پیرامونی تک‌زون با جبهه جنوبی در شهر کرمان است. انتخاب این مقیاس، امکان مقایسه نظام‌مند اثر تغییرات هندسی نما را بدون مداخله پیچیدگی‌های مربوط به زون‌های داخلی، تنوع کاربری و جهت‌گیری‌های متکثر فراهم می‌سازد. قلمرو اعتبارسنجی پژوهش به کاربری اداری، نمای جنوبی، اقلیم گرم و خشک کرمان، سامانه سایه‌انداز افقی ثابت و تحلیل سالانه محدود است؛ از این‌رو، داده‌های عددی حاصل مستقیماً به سایر جهت‌گیری‌ها، کاربری‌های متفاوت یا سامانه‌های سایه‌اندازی پویا تعمیم‌پذیر نیستند. داده‌های ارزیابی‌شده در این مقاله نه بر پایه اندازه‌گیری‌های میدانی یک بنای موجود، بلکه برخاسته از پایگاه داده حاصل از شبیه‌سازی پارامتریک ۶۴۰ سناریوی مختلف است. مدل پایه در محیط $DesignBuilder$ ساخته شده و محاسبات حرارتی و روشنایی روز به ترتیب توسط موتورهای $EnergyPlus$ و $Radiance$ صورت گرفته است. در نهایت، داده‌های خروجی جهت ممیزی، سازمان‌دهی و تحلیل‌های آماری به محیط نرم‌افزاری R منتقل شده‌اند. مدل شبیه‌سازی‌شده یک ساختار کالیبره‌شده میدانی نیست، بلکه یک سلول آزمون کنترل‌شده است که با هدف مقایسه سنجش‌پذیر اثر تغییرات پوسته در شرایط مرزی همگن طراحی شده است. مشخصات اقلیمی مدل از فایل آب‌وهوایی EPW بر پایه سال هواشناسی نمونه (TMY) شهر کرمان در موقعیت جغرافیایی $30^{\circ}25'$ درجه شمالی و $56^{\circ}97'$ درجه شرقی استخراج گردید. الگوی کاربری به صورت یک فضای عمومی اداری با تراکم اشغال 0.10 نفر بر مترمربع مدلسازی شد و ارزیابی روشنایی روز نیز بر روی صفحه کار در ارتفاع 0.8 متری از کف صورت گرفت. این فرضیات در تمام سناریوهای آزمون ثابت نگه داشته شده‌اند. پوسته‌ی شفاف بر پایه‌ی پنجره‌ی دوجداره با مشخصات نوری و حرارتی ثابت مدلسازی شد. در هندسه مبنا، نسبت پنجره به دیوار (WWR) برابر با 30% درصد و ارتفاع بازشوی جنوبی حدود 1.5 متر بازنمایی گردید؛ با این حال، در فرایند تولید سناریوهای پارامتریک، ابعاد هندسی بازشو متناسب با تغییرات WWR بازتعریف شد و از این‌رو، هندسه مبنا قابل تعمیم به تمام حالات نیست.

جدول ۱. مشخصات مدل شبیه سازی، فضای پارامتریک، شاخص های عملکردی و روش های تحلیل

مؤلفه روش شناختی	تعریف در پژوهش
رویکرد	کمی، شبیه سازی محور، پارامتریک، تمام فاکتوریل و چند هدفه
واحد تحلیل	سلول اداری پیرامونی تک زون با جبهه جنوبی
بستر	کرمان؛ اقلیم گرم و خشک
داده اقلیمی	فایل EPW مبتنی بر سال هواشناسی نمونه (TMY)
مختصات مدل	۳۰/۲۵° شمالی، ۵۶/۹۷° شرقی
کاربری	فضای عمومی اداری؛ تراکم اشغال ۰/۱۰ نفر، m ²
دوره محاسباتی	شبیه سازی سالانه
مدل سازی کالبدی	DesignBuilder
محاسبات حرارتی	EnergyPlus
محاسبات روشنایی روز	Radiance
پردازش و تحلیل داده	R
سایه انداز	لوور افقی خارجی ثابت در نمای جنوبی
WWR	۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰٪
Alpha	۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰°
Offset	۰/۱۰، ۰/۱۵، ۰/۲۰ و ۰/۲۵ متر
Spacing	۰/۱۰، ۰/۱۵، ۰/۲۰ و ۰/۲۵ متر
فضای طراحی	۶۴۰ = ۴×۴×۵×۸ سناریو
شرایط کنترل	اقلیم، جهت نما، کاربری، مشخصات شیشه، برنامه اشغال، روشنایی مصنوعی و مشخصات پایه سامانه مکانیکی
صفحه ارزیابی نور روز	حدود ۰/۸ متر از کف
خروجی حرارتی	شدت سالانه بار گرمایش سرمایش زون (kWh)، m ² .year
خروجی های اصلی روشنایی	sDA، ASE و UDI
خروجی تکمیلی	DGP؛ ثبت شد اما وارد بهینه سازی و تحلیل اصلی مقاله نشد
تحلیل حساسیت	GAM همراه با اهمیت جایگشتی برای تعیین اهمیت نسبی متغیرها
اهداف چند هدفه	کمینه سازی بار گرمایش سرمایش و ASE؛ بیشینه سازی sDA و UDI
قیود غربالگری	sDA ≥ ۶۰٪، UDI ≥ ۸۰٪ و ASE ≤ ۱۰٪
کنترل پایگاه داده	کنترل تعداد سناریوها، داده های مفقود، شناسه های تکراری و سازگاری بار کل با مجموع سرمایش و گرمایش

فضای طراحی مطالعه از ترکیب چهار متغیر مستقل تشکیل شده است: WWR در ۸ سطح، زاویه تیغه ها (Alpha) در ۵ سطح، و فاصله سایه انداز از نما (Offset) به همراه فاصله میان تیغه ها (Spacing) هر یک در ۴ سطح. ترکیب تمام فاکتوریل این متغیرها، ۶۴۰ سناریوی مجزا را شکل داد که همگی بدون اعمال گزینش سلیقه ای وارد چرخه شبیه سازی شدند. سایر متغیرهای کالبدی و بهره برداری ثابت فرض شدند تا امکان مقایسه دقیق سناریوها بر پایه شرایط مرزی یکسان فراهم گردد. برای هر سناریو، بارهای سالانه گرمایش و سرمایش و شاخص های روشنایی روز محاسبه گردید. متغیر حرارتی مورد بررسی، شدت سالانه مجموع بار گرمایش و سرمایش زون بر واحد سطح است؛ بنابراین، این شاخص نباید با مصرف نهایی انرژی ساختمان یا EUI اشتباه گرفته شود. در بخش روشنایی، شاخص sDA برای ارزیابی کفایت نور روز، UDI برای سنجش سهم روشنایی در محدوده مفید، و ASE برای پایش میزان مواجهه بیش از حد با تابش مستقیم

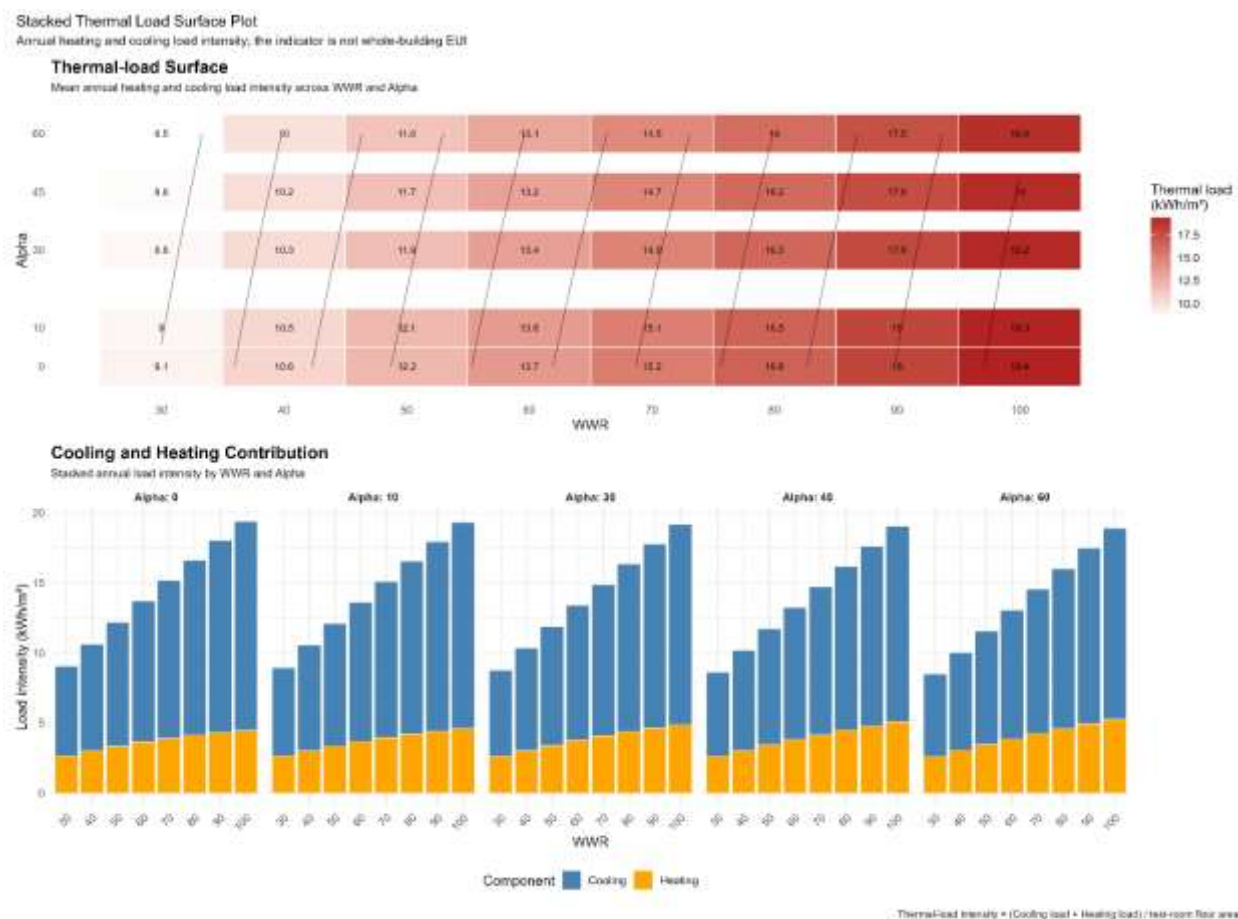
خورشید به کار گرفته شدند. شاخص DGP نیز صرفاً ثبت گردید و در تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی چندهدفه دخالت داده نشد. پس از اتمام شبیه‌سازی، پایگاه داده حاصل در محیط R ممیزی شد. تطابق تعداد سناریوها با ۶۴۰ حالت نظری، عدم وجود داده‌های مفقود یا شناسه تکراری، و انطباق بار کل با مجموع مؤلفه‌های گرمایش و سرمایش ارزیابی گردید. سپس، فرایند تحلیل در سه لایه مکمل دنبال شد: نخست، تحلیل توصیفی روندهای حرارتی و روشنایی؛ دوم، تحلیل حساسیت جهانی مبتنی بر الگوریتم GAM و اهمیت جایگشتی جهت تعیین سهم نسبی متغیرهای مستقل بر هر خروجی؛ و سوم، بهینه‌سازی چندهدفه پارتو برای شناسایی پاسخ‌های غیرمغلوب. در مرحله پایانی، پیش از استخراج جبهه پارتو، قیود عملکردی $SDA \geq 60\%$ ، $UDI \geq 80\%$ و $ASE \leq 10\%$ بر فضای پاسخ اعمال شدند. بدین ترتیب، چارچوب روش‌شناختی این تحقیق هدف خود را نه دستیابی به مقادیر مطلق و تعمیم‌پذیر برای WWR یا زاویه لوور، بلکه تبیین منطق عملکردی و سلسله‌مراتب اثرگذاری متغیرهای پوسته قرار داده است؛ چارچوبی که امکان تحلیل سنجش‌پذیر، بازتولیدپذیر و معماری‌محور موازنه میان بار حرارتی و کیفیت روشنایی روز را در نمای جنوبی فضاهای اداری اقلیم کرمان فراهم می‌سازد.

نتایج

تأثیر نسبت پنجره به دیوار و زاویه لوور بر شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش

شکل ۲ رفتار حرارتی نمای جنوبی را در دو لایه مکمل تحلیل می‌کند: در لایه نخست، میانگین شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش برای ترکیب‌های گوناگون نسبت پنجره به دیوار (WWR) و زاویه تیغه لوور (alpha) سنجیده شده و در لایه دوم، سهم مجزای مؤلفه‌های سرمایشی و گرمایشی در این فضای طراحی تفکیک گردیده است. متغیر ارزیابی‌شده در این تحلیل، نه مصرف نهایی انرژی ساختمان (EUI)، بلکه شدت سالانه مجموع بارهای گرمایشی و سرمایشی زون مبنا بر واحد سطح زیربنا است؛ از این رو، مقادیر مندرج در شکل، معیاری مقایسه‌ای برای واکاوی رفتار حرارتی پیکربندی‌های مختلف پوسته به شمار می‌روند. خوانش ماتریس حرارتی در شکل ۲ نشان می‌دهد که در تمامی زوایای بررسی‌شده، افزایش WWR به جهش پیوسته شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش می‌انجامد. در زاویه صفر درجه ($\alpha=0^\circ$)، ارتقای WWR از ۳۰ به ۱۰۰ درصد، شدت بار را از حدود ۹،۱ به ۱۹،۴ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال می‌رساند؛ روندی که در زاویه ۶۰ درجه ($\alpha=60^\circ$) نیز تکرار شده و بار حرارتی از ۸،۵ به ۱۸،۹ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال افزایش می‌یابد. استمرار این الگو در تمامی زوایا گواهی می‌دهد که در قلمرو پارامتریک مورد مطالعه، توسعه سطح شفاف نما متغیر اصلی و تعیین‌کننده دامنه تغییرات حرارتی است و زاویه لوور بیشتر نقش یک اهرم تعدیل‌کننده را ایفا می‌کند. اگرچه اثر زاویه α نیز در داده‌ها کاملاً مشهود است، اما دامنه تأثیر آن به مراتب محدودتر می‌نماید. با چرخش و بسته‌تر شدن تیغه‌ها از صفر به ۶۰ درجه، میانگین شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش از ۱۴،۳۶ به ۱۳،۷۶ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهشی در حدود ۴،۲ درصد است. بنابراین، اگرچه بسته‌تر شدن زاویه تیغه‌ها بخشی از دریافت‌های تابشی ناخواسته را مهار کرده و فشار حرارتی را فرو می‌نشاند، اما شدت این بازتعدیل در مقایسه با جهش‌های ناشی از WWR به مراتب فرعی‌تر است. تفکیک داده‌ها در بخش پایینی شکل ۲ نیز بر غلبه بار سرمایشی بر بار گرمایشی در تمامی ترکیب‌ها صحنه می‌گذارد. با افزایش WWR، اگرچه هر دو مؤلفه صعودی می‌شوند، اما نرخ رشد بار سرمایشی شتاب بیشتری دارد؛ به گونه‌ای که سهم سرمایش از کل بار سالانه از حدود ۷۰ درصد در WWR سی درصد، به نزدیک ۷۵ درصد در WWR صد درصد می‌رسد. این الگو تبیین می‌کند که گسترش سطح شفاف در اقلیم گرم و خشک کرمان، علاوه بر افزایش حجم کل بار، موازنه حرارتی زون را بیش از پیش به سمت تسلط نیازهای سرمایشی سوق

می‌دهد. از منظر تصمیم‌گیری در طراحی معماری، یافته‌های حاصل از شکل ۲ اثبات می‌کنند که پیامدهای حرارتی ناشی از افزایش سطح شفافیت را نمی‌توان صرفاً با افزودن یا بسته‌تر کردن لوور جبران ساخت. در محدوده این بررسی، متغیر WWR تعیین‌کننده دامنه اولیه مواجهه حرارتی پوسته است و زاویه لوور در مرتبه بعدی به‌عنوان ابزار تنظیم دریافت خورشیدی عمل می‌کند. بدین ترتیب، دستاورد تحلیلی این بخش نه انتخاب یک زاویه یا نسبت ثابت، بلکه کشف یک سلسله‌مراتب عملکردی در فرایند طراحی پوسته است: در گام نخست، کنترل و بهینه‌سازی میزان شفافیت نما، و سپس، تنظیم هندسه سایه‌انداز. میزان دقیق برتری نسبی و وزن عملکردی هر متغیر، در بخش تحلیل حساسیت جهانی به‌صورت کمی اثبات خواهد شد.



شکل ۱. الگوی تغییر شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش در ترکیب سطوح WWR و زاویه لوور و تفکیک مؤلفه‌های سرمایشی و گرمایشی

تأثیر نسبت پنجره به دیوار و زاویه لوور بر عملکرد روشنایی روز

جدول ۲ رفتار روشنایی روز را در دو سطح مرزی از متغیرهای اصلی پژوهش، یعنی نسبت پنجره به دیوار (WWR) و زاویه تیغه‌های لوور (α), مقایسه می‌کند. مقادیر گزارش‌شده، میانگین سناریوهای متناظر با هر سطح هستند؛ از این‌رو، در ردیف‌های مربوط به WWR اثر تغییرات زاویه، فاصله از نما و فاصله تیغه‌ها در میانگین داده‌ها ادغام شده و در ردیف‌های مربوط به زاویه نیز اثر سایر متغیرها به همین ترتیب منعکس گردیده است. بنابراین، داده‌های جدول ۲ مبنایی تحلیلی برای سنجش جهت و دامنه تغییرات شاخص‌های روشنایی روز در دو انتهای قلمرو پارامتریک به دست می‌دهند و نباید به‌تنهایی به‌عنوان اثبات روابط تعاملی یا رتبه‌بندی نهایی اهمیت متغیرها تعبیر شوند. مقایسه‌ی دو سطح مرزی WWR نشان می‌دهد که ارتقای نسبت پنجره به دیوار از ۳۰ به ۱۰۰ درصد،

میانگین شاخص SDA را از ۶۲٫۴ به ۹۶٫۹ درصد می‌رساند که گواهی بر افزایش چشمگیر ظرفیت کمی فضا در جذب نور روز است. با این حال، در همین بازه، شاخص UDI از ۸۸٫۸ به ۷۳٫۴ درصد افت کرده و شاخص ASE از ۱۰٫۶ به ۳۵٫۰ درصد جهش می‌یابد. این گسست عملکردی تبیین می‌کند که توسعه سطح شفاف، اگرچه دسترسی به نور روز را تقویت می‌سازد، اما لزوماً به ارتقای تمام ابعاد کیفیت روشنایی نمی‌انجامد؛ چراکه بخش عمده‌ای از نور افزوده از محدوده سودمند خارج شده و هم‌زمان خطر مواجهه با تابش مستقیم و خیره‌کننده به شدت بالا می‌رود. چنین واگرایی آشکاری میان SDA، UDI و ASE اثبات می‌کند که اتکای یک‌جانبه به شاخص کفایت نور روز، تصویری ناقص و حتی گمراه‌کننده از عملکرد نوری پوسته ارائه می‌دهد. در سوی مقابل، مقایسه دو سطح مرزی زاویه لوور الگویی متفاوت را آشکار می‌سازد. با بسته‌تر شدن زاویه تیغه‌ها از صفر به ۶۰ درجه، شاخص ASE از ۳۸٫۰ به ۶٫۰ درصد سقوط کرده و شاخص UDI از ۶۹٫۳ به ۹۳٫۹ درصد ارتقا می‌یابد، در حالی که SDA از ۸۸٫۹ به ۷۱٫۴ درصد کاهش نشان می‌دهد. این رفتار هم‌زمان اثبات می‌کند که چرخیدن و بسته‌تر شدن تیغه‌ها صرفاً شدت نور ورودی را تضعیف نمی‌کند، بلکه ساختار مواجهه فضا با تابش خورشید را دگرگون می‌سازد: سهم تابش مستقیم ناخواسته به شدت افت کرده و بخش اعظمی از نور روز در بازه مفید و مطبوع قرار می‌گیرد، هرچند این تسلط کیفی با تعدیل ناگزیر کفایت کمی نور همراه است. از منظر طراحی معماری، مهم‌ترین دستاورد جدول ۲ تمایز ساختاری میان «افزایش دسترسی کمی به نور» و «کنترل کیفی عملکرد آن» است. افزایش WWR ظرفیت نورگیری پوسته را بالا می‌برد اما در سطوح بالا پیامدهایی چون افت UDI و جهش ASE را به همراه دارد؛ در مقابل، بسته‌تر شدن زاویه لوور با تعدیل SDA، به جهش UDI و مهار کامل ASE می‌انجامد. از این‌رو، پاسخ بهینه نه در بیشینه‌سازی شفافیت نهفته است و نه در انسداد حداکثری، بلکه در موازنه هوشمندانه این دو تصمیم کالبدی شکل می‌گیرد. وزن دقیق و نقش غالب هر یک از این دو متغیر در هر یک از شاخص‌ها، در بخش بعدی و بر پایه تحلیل حساسیت جهانی به صورت کمی تبیین خواهد شد.

جدول ۲. میانگین شاخص‌های عملکرد روشنایی روز در سطوح مرزی متغیرهای WWR و Alpha

متغیر طراحی پوسته	سطح متغیر	میانگین شاخص SDA (%)	میانگین شاخص UDI (%)	میانگین شاخص ASE (%)
WWR	۳۰٪	۶۲/۴	۸۸/۸	۱۰/۶
WWR	۱۰۰٪	۹۶/۹	۷۳/۴	۳۵/۰
Alpha	۰°	۸۸/۹	۶۹/۳	۳۸/۰
Alpha	۶۰°	۷۱/۴	۹۳/۹	۶/۰

سلسله‌مراتب اثرگذاری متغیرهای کالبدی پوسته بر پاسخ حرارتی و روشنایی روز

برای فرارفتن از توصیف صرف روندهای مشاهده‌شده در بخش‌های پیشین و دستیابی به تبیینی کمی از نقش دقیق متغیرهای طراحی، در این گام سهم نسبی چهار متغیر کالبدی پوسته شامل نسبت پنجره به دیوار (WWR)، زاویه تیغه‌های لوور (alpha)، فاصله آرایه سایه‌انداز از نما (Offset) و فاصله میان تیغه‌ها (Spacing) در دگرگونی خروجی‌های اصلی سنجیده شد. تحلیل حساسیت جهانی بر پایه مدل‌های افزایشی تعمیم‌یافته (GAM) و روش اهمیت جایگشتی انجام گرفته است. مقادیر مندرج در جدول ۳ درون هر خروجی نرمال‌سازی شده‌اند؛ از این‌رو، مجموع سهم چهار متغیر برای هر شاخص دقیقاً برابر با ۱۰۰ درصد است. بنابراین، این ارقام باید به عنوان اهمیت نسبی متغیرها در تبیین پراکندگی و تغییرات همان خروجی در قلمرو شبیه‌سازی‌شده پژوهش تعبیر شوند، نه سهم

علی مطلق آن‌ها در رفتار واقعی بنا. همچنین، علامت‌های مثبت و منفی صرفاً جهت‌گیری کلی اثر را نشان می‌دهند و به هیچ وجه بیانگر روابط خطی یا قابل تعمیم به خارج از دامنه مطالعه نیستند.

جدول ۳. سهم اهمیت نسبی و جهت کلی اثر متغیرهای کالبدی پوسته بر شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش و شاخص‌های روشنایی روز

خروجی عملکردی	WWR	Alpha	Offset	Spacing	متغیر غالب و خوانش عملکردی
شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش	(+) ۸۶/۹٪	(-) ۵۱/۱٪	(+) ۳۱/۶٪	(+) ۴/۴٪	WWR؛ عامل غالب در تغییرات بار حرارتی
ASE	(+) ۳۹/۲٪	(-) ۵۸/۴٪	(+) ۱۰٪	(+) ۱/۴٪	Alpha؛ عامل اصلی در مهار مواجهه‌ی مستقیم خورشیدی
sDA	(+) ۶۳/۲٪	(-) ۳۴/۶٪	(-) ۱/۶٪	(+) ۰/۵٪	WWR؛ عامل اصلی در تغییر کفایت کمی نور روز
UDI	(-) ۳۳/۳٪	(+) ۶۳/۴٪	(-) ۲/۶٪	(-) ۰/۷٪	Alpha؛ عامل اصلی در افزایش سهم نور مفید

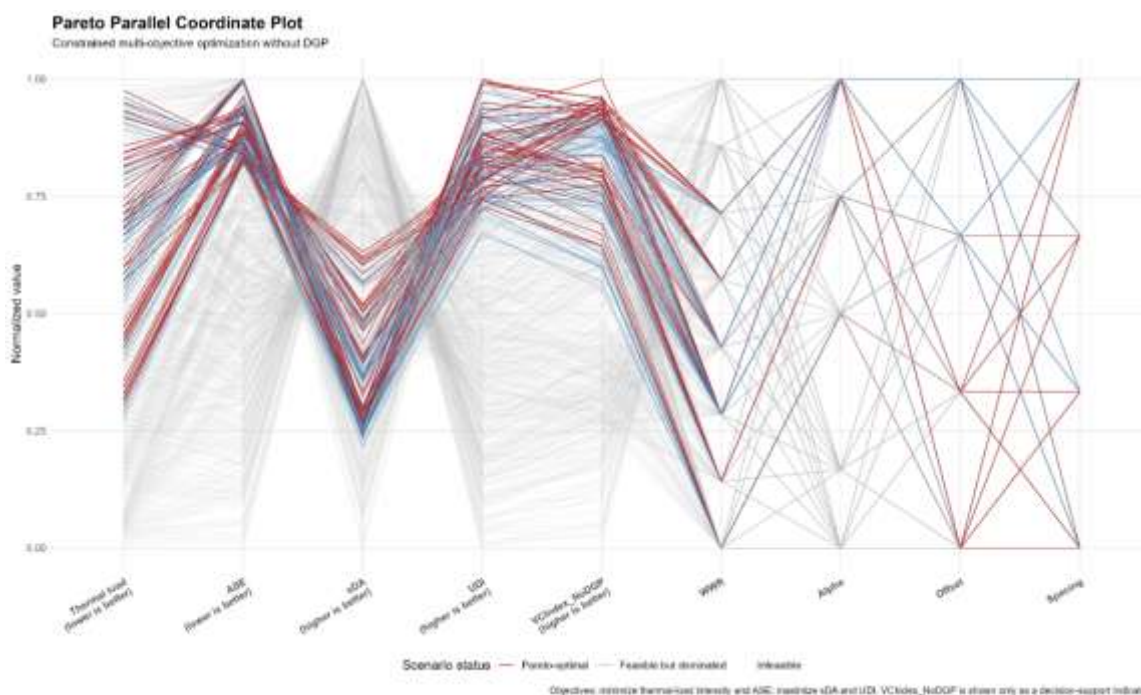
مطابق داده‌های جدول ۳، مشخص‌ترین سلسله‌مراتب اثرگذاری در پاسخ حرارتی به چشم می‌خورد. متغیر WWR با سهم ۸۶،۹ درصدی و جهت‌گیری مثبت، بیشترین اهمیت نسبی را در تبیین نوسانات شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش به خود اختصاص داده است. در سوی مقابل، سهم زاویه لوور تنها ۵،۱ درصد با جهت منفی بوده و متغیرهای Offset و Spacing نیز به ترتیب سهم‌های بسیار محدود ۳،۶ و ۴،۴ درصدی دارند. این دستاورد، یافته‌های بخش ۱-۴ را از منظر تحلیل حساسیت مهر تأیید می‌زند: در محدوده مورد آزمون، دگرگونی سطح شفافیت بیش از هر متغیر دیگری بر نوسانات بار حرارتی سایه می‌افکند، در حالی که بسته‌تر شدن زاویه لوور عمده‌تأثیری تعدیل‌کننده و فرعی ایفا می‌کند. از منظر فرایند طراحی، این الگو متغیر WWR را به یک تصمیم راهبردی و بنیادین در مهار رفتار حرارتی نما تبدیل ساخته و زاویه لوور را در این حوزه در مرتبه‌ای ثانویه قرار می‌دهد. در شاخص ASE، ساختار اثرگذاری متغیرها کاملاً دستخوش دگرگونی می‌شود. زاویه لوور با سهم ۵۸،۴ درصدی و جهت منفی، اصلی‌ترین متغیر در مهار مواجهه مستقیم خورشیدی است؛ در حالی که WWR با سهم ۳۹،۲ درصدی و جهت مثبت در جایگاه دوم جای می‌گیرد. این تقابل مفهومی از دیدگاه معماری بسیار حائز اهمیت است: گسترش سطح شفاف امکان ورود تابش مستقیم را بالا می‌برد، اما بسته‌تر شدن تیغه‌ها این مواجهه ناخواسته را فرو می‌نشانند. از این‌رو، رفتار شاخص ASE را می‌توان برآیند نسبت میان سطح شفاف دریافت‌کننده تابش و هندسه سایه‌انداز مهارکننده آن دانست. سهم ناچیز Offset و Spacing نیز اثبات می‌کند که در این قلمرو پارامتریک، این دو متغیر نقش کلیدی در کنترل تابش مستقیم ایفا نمی‌کنند. در بررسی شاخص sDA، بار دیگر متغیر WWR نقش مسلط خود را باز می‌یابد. سهم ۶۳،۲ درصدی این متغیر با جهت‌گیری مثبت تبیین می‌کند که تغییر سطح شفاف، بالاترین اهمیت نسبی را در نوسانات کفایت کمی نور روز دارد. زاویه لوور با سهم ۳۴،۶ درصدی و جهت منفی در رتبه بعدی می‌نشیند؛ بدان معنا که بسته‌تر شدن تیغه‌ها با افت بخشی از دسترسی کمی به نور روز همراه است. این نتیجه با یافته‌های جدول ۲ کاملاً هم‌خوان بوده و نشان می‌دهد که sDA بیش از آنکه منعکس‌کننده کیفیت کاربردی روشنایی باشد، به میزان ظرفیت جذب نور وابسته است. بدین ترتیب، WWR در این بخش متغیر اصلی تنظیم ظرفیت نورگیری پوسته تلقی می‌شود. در نقطه‌ی مقابل، در شاخص UDI سلسله‌مراتب اهمیت متغیرها معکوس می‌گردد. زاویه لوور با سهم ۶۳،۴ درصدی و جهت مثبت، تعیین‌کننده‌ترین متغیر در ارتقای سهم نور مفید است، در حالی که WWR با سهم ۳۳،۳ درصدی و جهت منفی در مرتبه دوم قرار می‌گیرد. این رفتار تحلیلی اثبات می‌کند که افزایش سطح پنجره الزاماً به معنای بهبود روشنایی مفید نیست؛ بلکه تنظیم دقیق زاویه تیغه‌ها نقش به‌مراتب برجسته‌تری در نگهداری روشنایی در بازه مطبوع و قابل استفاده ایفا می‌کند. از این‌رو، زاویه لوور را نباید صرفاً عنصری برای کاهش یا انسداد نور پنداشت، بلکه در منطق

عملکردی پوسته، این متغیر اهرم اصلی تنظیم نحوه ورود و ارتقای استفاده‌پذیری نور روز است. برآیند یافته‌های جدول ۳ یک سلسله‌مراتب روشن اما دوگانه را آشکار می‌سازد: WWR بیشترین نقش را در تغییر بار حرارتی و کفایت کمی نور روز ایفا می‌کند، در حالی که زاویه لوور در مهار مواجهه مستقیم خورشیدی و افزایش سهم نور مفید نقش مسلط را بر عهده دارد. متغیرهای Offset و Spacing نیز در این قلمرو پژوهش، سهم محدودتری داشته و بیشتر به عنوان ابزارهای تنظیمی مکمل شناخته می‌شوند. از این منظر، شفافیت نما و هندسه سایه‌انداز نه دو تصمیم جداگانه، بلکه دو لایه متوالی و مکمل از تصمیم‌گیری پوسته هستند: نخست، تعیین میزان گشودگی و ظرفیت مواجهه؛ و سپس، تنظیم نحوه کنترل و پالایش این مواجهه محیطی. این تفکیک عملکردی، بستر لازم را برای ورود به مرحله بعد و تبیین موازنه چندهدفه میان بار حرارتی و روشنایی روز فراهم می‌سازد.

موازنه چندهدفه و صورت‌بندی منطق عملکردی نمای لووردار

پس از تبیین نقش مجزای متغیرهای پوسته در پاسخ حرارتی و روشنایی روز، تحلیل چندهدفه به کار گرفته شد تا مشخص گردد این اهداف متعارض در چه بخش‌هایی از فضای طراحی می‌توانند به هم‌پوشانی و موازنه قابل‌قبولی دست یابند. شکل ۳، ۶۴۰ سناریوی شبیه‌سازی‌شده را در قالب نمودار مختصات موازی بازنمایی می‌کند. در این الگوریتم تحلیلی، کمینه‌سازی شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش و شاخص ASE، و بیشینه‌سازی شاخص‌های SDA و UDI به عنوان اهداف اصلی بهینه‌سازی تعریف شده‌اند. شاخص VCIndex_NoDGP نیز صرفاً نقش متغیر پشتیبان را برای تسهیل در خوانش سناریوها ایفا می‌کند و در شکل‌گیری جبهه پارتو دخالتی نداشته است. در این نمودار، خطوط خاکستری نشان‌دهنده سناریوهای خارج از قیود اولیه، خطوط آبی معرف گزینه‌های پذیرفتنی اما مغلوب، و خطوط قرمز نمایانگر سناریوهای غیرمغلوب پارتو در محدوده طراحی پژوهش هستند. پراکندگی خطوط در شکل ۳ اثبات می‌کند که اهداف حرارتی و نوری هم‌جهت نیستند؛ زیرا گزینه‌ای که صرفاً از منظر کاهش بار حرارتی بهینه‌سازی شده، لزوماً در شاخص‌های روشنایی روز برتری ندارد؛ همان‌گونه که ارتقای کمی SDA نیز می‌تواند به قیمت جهش مواجهه مستقیم تابش ناخواسته یا افت سهم نور مفید تمام شود. از این رو، پیش از استخراج جبهه پارتو، سه قید کارکردی $SDA \geq 60\%$ ، $UDI \geq 80\%$ و $ASE \leq 10\%$ بر فضای پاسخ اعمال شد تا سناریوهای فاقد حداقل‌های عملکرد روشنایی کنار گذاشته شوند. از مجموع ۶۴۰ سناریوی اولیه، تنها ۱۱۱ گزینه از این فیلتر عبور کردند که پس از ارزیابی چندهدفه، ۶۷ سناریو مغلوب شده و در نهایت ۴۴ سناریو (معادل ۶٫۹ درصد کل فضای طراحی) به عنوان اعضای جبهه پارتو برگزیده شدند. این ریزش شدید گزینه‌ها گواهی می‌دهد که برخورداری از عملکرد مطلوب در یک شاخص منفرد، هرگز به معنای شکل‌گیری پاسخی متوازن در پوسته نیست. مفهوم پارتو در این واکاوی، دستیابی به یک «گزینه بهینه مطلق» نیست، بلکه تعیین مجموعه‌ای از پیکربندی‌های کالبدی است که در آنها ارتقای بیشتر هر یک از اهداف، بدون افت کارایی دست‌کم یکی دیگر از شاخص‌ها امکان‌پذیر نخواهد بود. بدین ترتیب، خطوط قرمز در شکل ۳ مرز پاسخ‌های غیرمغلوب را در شرایط اقلیمی و قیود این پژوهش ترسیم می‌کنند؛ الگویی که تصمیم‌گیری درباره نما را از انتخاب تک‌معیاره سطح شفافیت یا زاویه سایه‌انداز فراتر برده و آن را به موازنه‌ای میان گشودگی، جذب نور، مهار تابش مستقیم و پیامدهای حرارتی بدل می‌سازد. الگوی توزیع WWR در اعضای جبهه پارتو شاهدهی بر این مدعاست. سناریوهای غیرمغلوب تماماً در بازه ۳۰ تا ۸۰ درصد WWR قرار گرفته‌اند و هیچ‌یک از سطوح ۹۰ و ۱۰۰ درصد نتوانسته‌اند به این جبهه راه یابند. این دستاورد به معنای رد مطلق نماهای شیشه‌ای نیست، بلکه صریحاً اثبات می‌کند در نمای جنوبی سلول اداری مورد مطالعه در کرمان، سطوح بسیار بالای شفافیت قادر به ایجاد ترکیبی متوازن و غیرمغلوب میان بار حرارتی، SDA، UDI و ASE نیستند؛ چراکه در این

محدوده، افزایش ظرفیت نورگیری ناشی از شفافیت مفرط، با جهش بار حرارتی و ریسک خیرگی همراه شده و مزیت رقابتی آن را در ارزیابی چندهدفه از بین می‌برد. توزیع زاویه‌ی لوور نیز در جبهه پارتو الگویی کاملاً هدفمند دارد. از ۴۴ سناریوی غیرمغلوب، ۲۵ سناریو در زاویه ۶۰ درجه ($\text{Alpha}=60^\circ$)، ۱۵ سناریو در زاویه ۴۵ درجه ($\text{Alpha}=45^\circ$) و ۴ سناریو در زاویه ۳۰ درجه ($\text{Alpha}=30^\circ$) جانمایی شده‌اند، در حالی که هیچ گزینه‌ای با زاویه کمتر از ۳۰ درجه در مجموعه پارتو باقی نمانده است. تمرکز جبهه در این دامنه زاویه‌ای با یافته‌های بخش‌های پیشین کاملاً هم‌خوان است: بسته‌تر شدن تیغه‌ها اگرچه اندکی از SDA می‌کاهد، اما با مهار ASE و جهش UDI همراه است. اهمیت این دستاورد در آن است که لوور در پاسخ‌های موفق چندهدفه، صرفاً یک مانع فیزیکی نیست، بلکه ابزاری هوشمند برای تنظیم نحوه مواجهه سطح شفاف با تابش مستقیم و سامان‌دهی کیفیت روشنایی روز محسوب می‌شود. نکته‌ی تحلیلی مهم دیگر این است که سناریوهای جبهه پارتو الزاماً بر کمینه مطلق بار حرارتی منطبق نیستند. اگر تنها کاهش بار حرارتی ملاک تصمیم‌گیری قرار می‌گرفت، گزینه‌های با شفافیت بسیار پایین برتری می‌یافتند؛ اما چنین انتخابی الزاماً ترکیب مطبوعی از شاخص‌های SDA، UDI و ASE فراهم نمی‌سازد. بنابراین، حضور یک سناریو در جبهه پارتو حاصل برتری یک‌جانبه حرارتی یا بیشینه‌سازی محض نور روز نیست، بلکه نشان‌دهنده توانایی آن پیکربندی در حفظ مصالحه‌ای غیرمغلوب میان اهداف متعارض است. برآیند یافته‌های شکل ۳ مکمل سلسله‌مراتب شناسایی شده در بخش ۳-۴ است. در این فضای طراحی، WWR بیشترین سهم را در سازماندهی بار حرارتی و ظرفیت کمی نورگیری ایفا می‌کند و زاویه لوور نقش مسلط را در کنترل ASE و ارتقای UDI بر عهده دارد. تحلیل پارتو اثبات می‌کند پاسخ‌های قابل دفاع تنها زمانی شکل می‌گیرند که این دو منطق در قالبی هماهنگ میان درجه شفافیت و هندسه سایه‌انداز تلفیق شوند. از این‌رو، دستاورد این تحلیل ارائه یک فرمول یا زاویه جهان‌شمول نیست، بلکه اثبات این اصل معماری است که در نمای جنوبی ساختمان‌های اداری کرمان، تعیین میزان گشودگی پوسته و هندسه کنترل تابش نمی‌تواند به صورت مستقل انجام پذیرد؛ چراکه موازنه عملکردی، برآیند تنظیم هم‌زمان این دو لایه تصمیم‌گیری در بستر اقلیمی، جهت‌گیری و شرایط کاربری پژوهش است.

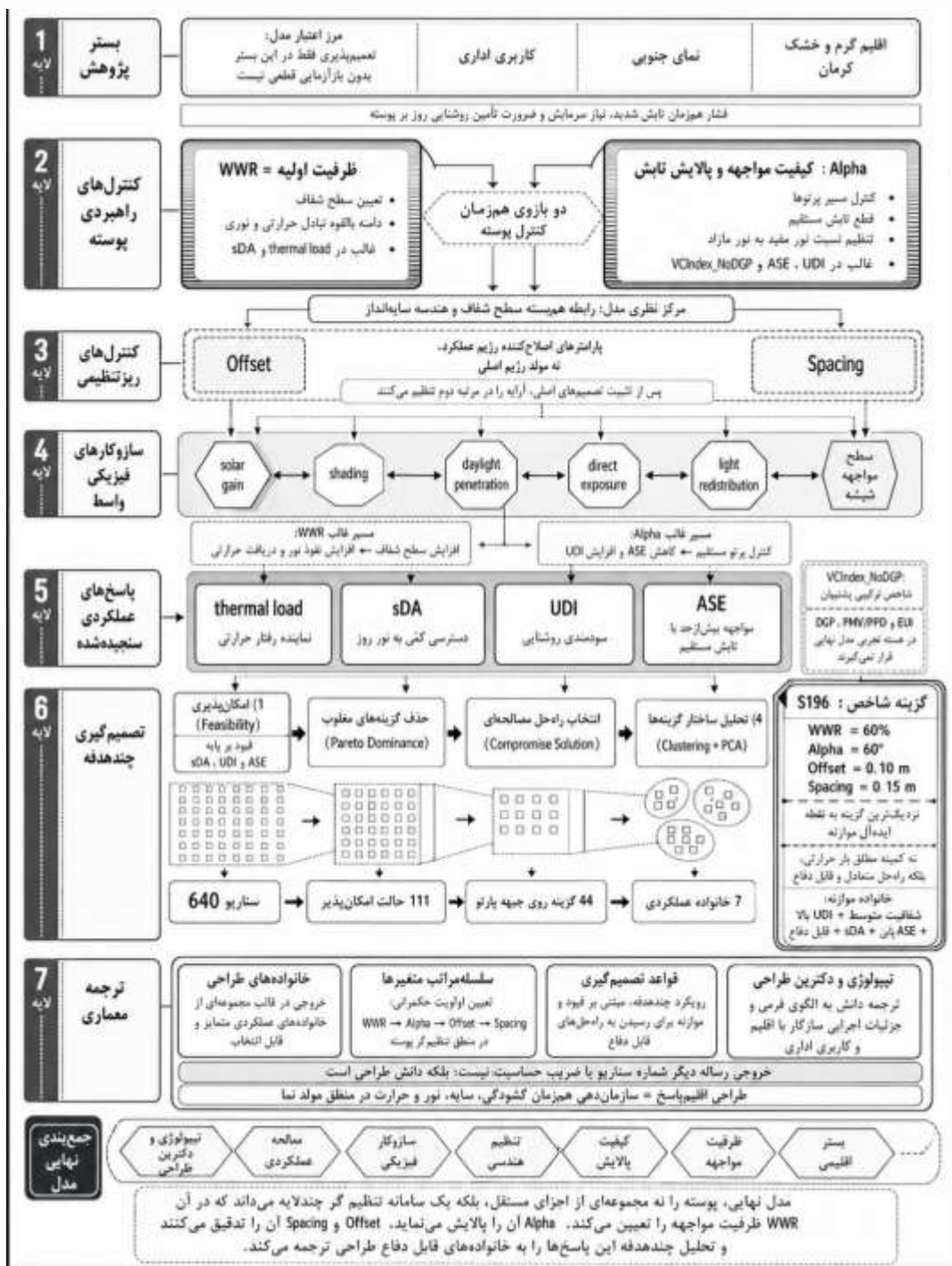


شکل ۲. ساختار موازنه چندهدفه میان شدت سالانه بار گرمایش سرمایش و شاخص‌های روشنایی روز در فضای طراحی نمای لووردار

بحث

یافته‌های این مطالعه، چارچوب مفهومی اولیه مقاله را از الگویی فرضی به مدلی مبتنی بر شواهد عینی ارتقا می‌دهند. در مدل نظری نخستین، مسیر تصمیم‌گیری از «اقلیم و جهت‌گیری نما» به «درجه شفافیت پوسته»، «هندسه کنترل خورشیدی»، «پاسخ حرارتی و روشنایی روز»، «موازنه عملکردی» و در نهایت «تصمیم معماری» ترسیم شده بود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این توالی در کلیت خود معتبر است، اما رفتار واقعی متغیرها ساده یا هم‌وزن نیست؛ چراکه نسبت پنجره به دیوار (WWR) و زاویه تیغه‌ها (Alpha) اگرچه درون سامانه‌ای واحد عمل می‌کنند، اما نقش غالب آن‌ها در خروجی‌های مختلف تفکیک‌پذیر است. از این‌رو، دستاورد اصلی پژوهش حاضر نه کشف یک فرم ثابت یا بهینه مطلق، بلکه تفکیک نقش این دو اهرم اصلی پوسته و تبیین نحوه هم‌نشینی آن‌ها در فرایند تصمیم‌گیری عملکردی است. در لایه‌ی نخست، متغیر WWR با اهمیت نسبی ۸۶٫۹ درصد در شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش و ۶۳٫۲ درصد در شاخص SDA، قوی‌ترین عامل تبیین‌کننده نوسانات این دو خروجی محسوب می‌شود. این یافته با پژوهش‌های شاعر و همکاران (۲۰۱۹) درباره بوم‌مندی نسبت شفافیت در اقلیم‌های ایران و دهقان و ملکی (۲۰۲۰) در خصوص ضرورت ارزیابی هم‌زمان پاسخ‌های حرارتی و نوری هم‌سوست. با این حال، تحلیل حاضر این سازوکار را شفاف‌تر می‌سازد: در فضای پارامتریک نمای جنوبی، WWR را باید اهرم اصلی تنظیم «میزان مواجهه» سطح شفاف و تعیین «ظرفیت کمی نورگیری» قلمداد کرد. این برداشت به معنای نادیده‌گرفتن سایر عوامل در رفتار حرارتی نیست، بلکه اثبات می‌کند که در میان متغیرهای مستقل این تحقیق، نوسانات بار حرارتی و SDA بیش از هر عامل دیگری وابسته به تغییرات سطح شفاف پوسته است. در مقابل، زاویه‌ی تیغه‌ها منطقی متفاوت را آشکار می‌سازد. متغیر Alpha با اهمیت نسبی ۵۸٫۴ درصد در شاخص ASE و ۶۳٫۴ درصد در شاخص UDI، عامل غالب در پایش این دو خروجی است. بنابراین، نقش زاویه لوور را نباید به یک «عامل کاهنده نور» تقلیل داد. در قلمرو شبیه‌سازی‌شده، کارکرد اصلی Alpha در نحوه عبور تابش از سطح شفاف، مهار مواجهه مفرط با نور مستقیم خورشید و ارتقای سهم روشنایی در بازه مفید تجلی می‌یابد. این خوانش تحلیلی با نتایج مهدوی‌نژاد و محمدی (۲۰۱۶) پیرامون لزوم تنظیم عملکردمحور هندسه سایه‌انداز و شاعر و همکاران (۲۰۲۲) در زمینه وابستگی رفتار سایه‌انداز به متغیرهای اقلیمی قرابت دارد. از این منظر، دو مفهوم کلیدی در مدل شکل ۴، یعنی «ظرفیت مواجهه» و «پالایش مواجهه» باید به عنوان دو نقش غالب و نه حوزه‌هایی کاملاً منفک از یکدیگر درک شوند. WWR افزون بر بار حرارتی و SDA، بر شاخص‌های ASE و UDI نیز اثرگذار است؛ همان‌گونه که Alpha می‌تواند SDA و بار حرارتی را تحت تأثیر قرار دهد. اهمیت مفهومی مدل در ترسیم مرزهای مطلق میان متغیرها نیست، بلکه در اثبات وزن ناهمگون آن‌ها در خروجی‌های گوناگون نهفته است. از این‌رو، تعیین میزان شفافیت و سایه‌اندازی دو تصمیم هم‌زمان اما ناهم‌ارز از نظر کارکردی هستند. این تمایز ساختاری در داده‌های روشنایی روز به روشنی نمایان است. افزایش WWR از ۳۰ به ۱۰۰ درصد، شاخص SDA را از ۶۲٫۴ به ۹۶٫۹ درصد ارتقا می‌دهد، اما هم‌زمان شاخص UDI را از ۸۸٫۸ به ۷۳٫۴ درصد کاهش داده و شاخص ASE را از ۱۰٫۶ به ۳۵ درصد می‌رساند. در نقطه مقابل، تغییر زاویه Alpha از صفر به ۶۰ درجه، شاخص ASE را از ۳۸ به ۶ درصد تنزل داده و UDI را از ۶۹٫۳ به ۹۳٫۹ درصد می‌رساند، در حالی که SDA تا ۷۱٫۴ درصد افت می‌کند. بنابراین، گزاره دقیق برای تبیین این رفتار نوری این است که ارتقای کمی نور روز الزاماً به معنای بهبود کیفی تمام ابعاد عملکرد روشنایی نیست. این نتیجه با یافته‌های ترمپلیکوس و آتینیتیس (۲۰۰۷) در زمینه ارزیابی هم‌زمان سایه‌اندازی و روشنایی، و نیز پژوهش‌های گلچین و همکاران (۲۰۲۲) و وکیلی‌نژاد و همکاران (۲۰۲۴) درباره اهمیت توزیع و کنترل نور هم‌خوانی کامل دارد. جایگاه دو متغیر Offset و Spacing نیز در مدل نهایی نیازمند خوانی دقیق

است. سهم محدود این دو متغیر در خروجی‌های چهارگانه نشان می‌دهد که در دامنه‌های هندسی تعریف‌شده، نقش آن‌ها نسبت به WWR و Alpha در مرتبه‌ای ثانویه و تنظیمی قرار می‌گیرد. این امر به معنای بی‌اهمیتی ذاتی فاصله تیغه‌ها از یکدیگر یا از سطح شیشه در تمامی سامانه‌ها نیست، بلکه بیانگر آن است که در فضای طراحی این پژوهش، تغییرات آن‌ها نوسانات کمتری در پاسخ‌های نهایی ایجاد کرده است. از منظر فرایند طراحی، این دستاورد یک تقدم منطقی را پیشنهاد می‌کند: نخست تعیین محدوده بهینه شفافیت و هندسه اصلی سایه‌انداز، و سپس بهره‌گیری از Offset و Spacing برای ریزتنظیم و تدقیق عملکرد. تحلیل چندهدفه پارتو نیز این ساختار تصمیم‌گیری را تکمیل می‌کند. از مجموع ۶۴۰ سناریوی اولیه، ۱۱۱ حالت از قیود اولیه عبور کرده و در نهایت ۴۴ گزینه غیرمغلوب بر جبهه پارتو تثبیت شدند. حذف کامل مقادیر ۹۰ و ۱۰۰ درصد WWR و تراکم گزینه‌های غیرمغلوب در بازه ۳۰ تا ۸۰ درصد نشان می‌دهد که در شرایط مورد آزمون، شفافیت مفرط قادر به ایجاد موازنه‌ای متوازن میان بار حرارتی، sDA، UDI و ASE نیست. در سوی دیگر، تمرکز سناریوهای پارتو در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه Alpha و به‌ویژه غلبه‌ی زاویه‌ی ۶۰ درجه با نقش برجسته این متغیر در کنترلی‌کردن ASE و بهینه‌سازی UDI منطبق است. این الگو کاملاً با منطق تحلیلی مورد تأکید عابدینی و همکاران (۲۰۲۵) هم‌راستا است؛ بر این مبنا که پاسخ قابل دفاع در طراحی چندهدفه، لزوماً دستیابی به نقطه بهینه در یک شاخص منفرد نیست، بلکه دستیابی به موقعیتی است که در برابر اهداف متعارض مغلوب گزینه دیگری نشود. از دیدگاه نظریه‌پردازی در معماری، مدل نهایی ارائه شده بدون برقراری تشابهات ظاهری با عناصر بومی، با اصول دیرپای معماری اقلیم‌پاسخ ایران پیوند می‌خورد. مطالعات سلجوقی‌نژاد و شریف‌آباد (۲۰۱۵) و نیک‌پور و همکاران (۲۰۱۲) اثبات کرده‌اند که پاسخ‌های محیطی در معماری گذشته حاصل عملکرد مجزای یک عنصر نبوده، بلکه از انتظام هم‌زمان گشودگی، سایه، جرم حرارتی و سازماندهی فضایی نشأت می‌گرفته است. مدل شکل ۴ همین الگوی سامانه‌ای را به زبان عملکردی معاصر بازتعریف می‌کند: گشودگی نما باید هم‌زمان و توانمند با سازوکار مهار و کنترل خود طراحی شود. بر این اساس، هفت لایه ساختاری در شکل ۴ یک زنجیره تحلیل منسجم را تشکیل می‌دهند که از بستر اقلیمی و کاربری آغاز شده، با کنترل‌های راهبردی WWR و Alpha و ریزتنظیمات Offset و Spacing ادامه می‌یابد و از طریق سازوکارهای فیزیکی واسطه به پاسخ‌های سنجش‌پذیر، تصمیم‌گیری چندهدفه و در نهایت دانش کاربردی طراحی منتج می‌شود. ارزش ارتقاافته این مدل در پیوند دادن مستدل این سطوح و جلوگیری از جهش مستقیم از هندسه به توصیه‌های پیش‌فرض طراحی است. مدل نهایی این مقاله مؤید آن است که در نمای جنوبی سلول اداری مورد ارزیابی در اقلیم گرم و خشک کرمان، WWR عمدتاً عهده‌دار سازماندهی دامنه مواجهه و ظرفیت کمی نورگیری است؛ Alpha وظیفه پالایش تابش، مهار ASE و ارتقای UDI را بر عهده دارد؛ و متغیرهای Offset و Spacing نقش‌های مکمل و ریزتنظیمی ایفا می‌کنند. بنابراین، طراحی نمای لووردار فرآیندی مجزا از انتخاب سطح شیشه یا زاویه سایه‌انداز نیست، بلکه حاصل هماهنگ‌سازی دو تصمیم به‌هم‌پیوسته با وزن‌های عملکردی متفاوت است.



شکل ۳. مدل نهایی منطق عملکردی و سلسله‌مراتب تصمیم‌گیری در نمای لووردار جنوبی: از ظرفیت مواجهه تا پالایش تابش و موازنه چندهدفه

نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی حاضر با تمرکز بر نمای جنوبی یک سلول اداری در بستر اقلیمی گرم و خشک کرمان، به تبیین منطق عملکردی و رابطه میان نسبت پنجره به دیوار (WWR) و زاویه تیغه‌های لوور افقی (Alpha) در ایجاد موازنه میان شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش و شاخص‌های کیفی و کمی روشنایی روز پرداخت. برآیند یافته‌ها اثبات می‌کند که فرایند طراحی نمای لووردار را نمی‌توان به انتخابی گسسته میان یک نسبت شفافیت مشخص یا یک زاویه سایه‌انداز محدود ساخت؛

چراکه این دو متغیر، اگرچه در قالبی یکپارچه درون سامانه پوسته عمل می‌کنند، دارای وزن‌ها و نقش‌های عملکردی کاملاً متفاوتی هستند. مهم‌ترین دستاورد تحلیلی این تحقیق، کشف و اثبات یک سلسله‌مراتب عملکردی دوگانه است. متغیر WWR با سهم اهمیت نسبی ۸۶٫۹ درصد در شدت سالانه بار گرمایش-سرمایش و ۶۳٫۲ درصد در شاخص SDA ، تعیین‌کننده‌ترین متغیر در سازماندهی رفتار حرارتی و ظرفیت کمی نورگیری پوسته شناخته شد. در مقابل، متغیر $Alpha$ با سهم ۵۸٫۴ درصد در شاخص ASE و ۶۳٫۴ درصد در شاخص UDI ، نقش مسلط را در مهار مواجهه مستقیم تابش خورشید و ارتقای سهم روشنایی مطبوع و مفید بر عهده دارد. بدین ترتیب، در محدوده فضای طراحی پژوهش، WWR اهرم اصلی تنظیم «میزان مواجهه» سطح شفاف، و $Alpha$ اهرم اصلی «پالایش و کنترل کیفی» این مواجهه محیطی تلقی می‌شود. یافته‌های حوزه‌ی روشنایی روز نیز مؤید آن است که افزایش گشودگی و شفافیت نما الزاماً به معنای ارتقای کیفیت عملکرد نوری نیست. گسترش WWR اگرچه شاخص SDA را افزایش می‌دهد، اما به طور هم‌زمان با تنزل UDI و جهش ناخواسته ASE همراه است. در نقطه مقابل، بسته‌تر شدن زاویه لوور اگرچه تا حدی از میزان SDA می‌کاهد، اما سبب ارتقای محسوس UDI و افت شدید ASE می‌شود. از این‌رو، یکی از احکام بنیادین این پژوهش آن است که کفایت کمی نور روز هرگز معادل عملکرد بهینه روشنایی نیست و تصمیم‌گیری در خصوص پوسته باید بر پایه مجموعه‌ای از شاخص‌های مکمل و متوازن، و نه معیاری تک‌بعدی، صورت پذیرد. تحلیل چندهدفه‌ی پارتو نیز این منطق ساختاری را صحت‌گذاری کرد. از مجموع ۶۴۰ سناریوی اولیه، تنها ۱۱۱ گزینه موفق به احراز قیود عملکردی اولیه شدند و در نهایت ۴۴ سناریو بر جبهه غیرمغلوب پارتو قرار گرفتند. حذف کامل نسبت‌های شفافیت ۹۰ و ۱۰۰ درصد و تمرکز پاسخ‌های غیرمغلوب در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نشان داد که پاسخ‌های قابل دفاع معماری نه در بیشینه‌سازی یک‌جانبه شفافیت و نه در انسداد مفرط سایه‌اندازی، بلکه در تنظیم هماهنگ و هم‌زمان این دو متغیر شکل می‌گیرند. در آخر، مدل برآمده از این پژوهش پیشنهاد می‌کند که طراحی نمای لووردار در سه لایه متوالی صورت پذیرد: نخست، تعیین محدوده بهینه شفافیت؛ دوم، تنظیم زاویه تیغه‌ها جهت پالایش کیفیت تابش و نور واردشده؛ و سوم، ریزتنظیم هندسه پوسته از طریق متغیرهای $Offset$ و $Spacing$. بدین ترتیب، دستاورد اصلی این تحقیق نه ارائه‌ی عددی ثابت یا فرمولی جهان‌شمول، بلکه تبدیل خروجی‌های شبیه‌سازی به یک منطق تصمیم‌گیری زمینه‌مند، سلسله‌مراتبی و عملکردمحور در معماری است؛ منطقی که قلمرو اعتبارسنجی آن متکی بر اقلیم کرمان، جبهه جنوبی و کاربری اداری در فضای پارامتریک مفروض است، اما چارچوب روش‌شناختی آن می‌تواند الگویی بازتولیدپذیر برای پژوهش‌های آتی در سایر بسترهای اقلیمی و ساختاری فراهم سازد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

تشکر و قدردانی

از تمامی کسانی که در طی مراحل این پژوهش به ما یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ گونه تضاد منافی وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

موازن اخلاقی

در انجام این پژوهش تمامی موازن و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

خلاصه مبسوط

Extended Abstract

In contemporary architecture, the building envelope is no longer understood merely as a physical boundary separating interior space from the external environment; rather, it operates as a critical interface regulating heat transfer, solar gains, and access to daylight. The growing adoption of performance-oriented architectural design has consequently transformed façade transparency, opening dimensions, orientation, and shading geometry from predominantly formal decisions into measurable environmental-performance variables (2). Research on energy-related architectural design in Iran likewise indicates a gradual transition from isolated investigation of materials and technical systems toward more integrated assessments of architectural components and building performance (1). Within this framework, the window-to-wall ratio (WWR) is particularly consequential because it simultaneously affects daylight availability, conductive and radiative heat exchange, and solar exposure. Previous Iranian studies have demonstrated that optimum WWR values vary according to climatic context and cannot be generalized uniformly across hot-dry, hot-humid, and cold regions (17), while simultaneous consideration of energy and daylight performance is necessary when optimizing window design in hot-arid environments (18). In parallel, horizontal louvers constitute a second major layer of environmental control because their geometric configuration affects both incident solar radiation and the quantity and distribution of daylight within interior spaces (21, 22). The climatic dependence of external louver performance has also been emphasized in studies of Iranian office buildings (23), including research specifically addressing shading devices in the hot-arid context of Kerman (34). Although these studies establish the importance of both transparency and shading, an unresolved question concerns the relative functional weight of WWR and louver angle and the manner in which their effects should be coordinated when thermal and daylight objectives conflict. Accordingly, the present study aimed to explain the functional logic and hierarchy of influence of WWR and horizontal louver blade angle (Alpha) in balancing annual heating-cooling load intensity and daylight performance in the south façade of a typical office cell located in the hot-arid climate of Kerman.

Theoretical Framework and Research Gap. The conceptual basis of the study is rooted in the proposition that environmental performance emerges not from isolated architectural elements but from coordinated interactions among façade openness, shading, solar exposure, and spatial organization. This principle is also evident in Iranian vernacular architecture, where climatic performance was historically produced through the systematic integration of controlled openings, shading layers, courtyards, thermal mass, and spatial organization rather than through a single passive device (27, 28). Investigations

of low-energy buildings in hot-arid regions similarly identify solar control, thermal mass, and calibrated openings as essential components of climate-responsive design (32). Studies of traditional Orosi windows further show that daylight performance depends not only on opening area but also on the geometry of mediating elements that modify the distribution and usefulness of incoming light (25, 26). These principles are especially relevant to Kerman, where climatic and geometric characteristics materially affect building energy performance (29, 33). From a contemporary performance perspective, WWR may therefore be interpreted as a variable primarily governing the magnitude of environmental exposure, whereas louver geometry governs how that exposure is filtered and controlled. However, these functions are not absolutely independent. Increasing WWR can improve quantitative daylight availability while simultaneously increasing thermal loads and excessive solar exposure, whereas closing louver blades may suppress unwanted direct radiation but can also reduce daylight autonomy. Prior research on shading confirms that effective solar protection should be evaluated concurrently against potential reductions in daylight availability (19), and studies of horizontal and vertical shading devices demonstrate that their performance depends on façade orientation and solar geometry (20). Multi-objective studies similarly suggest that defensible architectural solutions typically emerge as trade-offs among conflicting performance goals rather than through maximization of a single objective (31). The research gap addressed in this study therefore concerns the absence of a context-specific and quantitatively supported hierarchy explaining how WWR and Alpha differently contribute to thermal-load variation, daylight sufficiency, useful daylight availability, and excessive solar exposure in south-facing office façades in Kerman.

The study adopted a quantitative, simulation-based, parametric, full-factorial, and multi-objective research design. The unit of analysis was a single-zone perimeter office cell with a south-facing façade in Kerman. Climatic inputs were derived from an EPW weather file based on the Typical Meteorological Year for Kerman, geographically represented at approximately 30.25° N latitude and 56.97° E longitude. The office space was modeled with an occupancy density of 0.10 persons/m², while daylight calculations were conducted on a work plane approximately 0.8 m above floor level. The transparent envelope was modeled using double glazing with constant optical and thermal properties, and the south façade incorporated a fixed external horizontal louver system. Four independent geometric variables defined the parametric design space: WWR at eight levels from 30% to 100%, Alpha at five levels from 0° to 60°, Offset at four levels from 0.10 to 0.25 m, and Spacing at four levels from 0.10 to 0.25 m. Their full-factorial combination generated 640 independent simulation scenarios. Geometric modeling was performed in DesignBuilder, thermal calculations were conducted using EnergyPlus, daylight performance was evaluated using Radiance, and the resulting database was audited, organized, and statistically analyzed in R. The thermal outcome was annual heating–cooling load intensity per unit floor area rather than final building energy use or EUI. Daylight outcomes comprised spatial Daylight Autonomy (sDA), Useful Daylight Illuminance (UDI), and Annual Sunlight Exposure (ASE); DGP was recorded as a supplementary indicator but was not included in the principal sensitivity analysis or optimization procedure. After verifying scenario completeness, absence of missing values and duplicate identifiers, and consistency between total load and its heating and cooling components, analysis proceeded in three stages: descriptive evaluation of thermal and daylight trends, global sensitivity analysis based on generalized additive models (GAM) and permutation importance, and Pareto-based multi-objective optimization. The optimization objectives were to minimize annual heating–cooling load intensity and ASE while maximizing sDA and UDI. Before extraction of the Pareto front, minimum performance constraints were imposed on the response space to eliminate scenarios that failed to achieve acceptable daylight performance.

The thermal results demonstrated a clear and systematic dominance of WWR over Alpha in determining annual heating–cooling load intensity. Across all louver angles, increasing WWR produced a continuous rise in annual thermal load. At Alpha = 0°, increasing WWR from 30% to 100% raised annual heating–cooling load intensity from approximately 9.1 to 19.4

kWh/m²·year, while at Alpha = 60° the corresponding increase was from approximately 8.5 to 18.9 kWh/m²·year. By contrast, changing the louver angle from 0° to 60° reduced the mean annual heating–cooling load from approximately 14.36 to 13.76 kWh/m²·year, equivalent to only about a 4.2% reduction. Cooling dominated the annual thermal balance throughout the design space, and its relative contribution increased as WWR increased. Global sensitivity analysis quantitatively confirmed this hierarchy: WWR accounted for 86.9% of the relative importance associated with variation in annual heating–cooling load intensity, whereas Alpha accounted for only 5.1%, with Offset and Spacing contributing 3.6% and 4.4%, respectively. Daylight performance, however, revealed a more differentiated functional hierarchy. Increasing WWR from 30% to 100% increased mean sDA from 62.4% to 96.9%, but simultaneously reduced UDI from 88.8% to 73.4% and increased ASE from 10.6% to 35.0%. Conversely, increasing Alpha from 0° to 60° reduced ASE from 38.0% to 6.0% and increased UDI from 69.3% to 93.9%, although sDA declined from 88.9% to 71.4%. Sensitivity analysis showed that WWR was the principal determinant of sDA, with a relative importance of 63.2%, followed by Alpha at 34.6%. In contrast, Alpha dominated ASE with 58.4% relative importance compared with 39.2% for WWR, and likewise dominated UDI with 63.4% relative importance compared with 33.3% for WWR. These inferential patterns established a dual functional hierarchy: WWR primarily controlled thermal exposure and quantitative daylight capacity, whereas Alpha primarily controlled excessive direct solar exposure and the proportion of daylight retained within a useful range.

The Pareto analysis reinforced the sensitivity results by demonstrating that thermally and visually preferable configurations could not be identified through isolated optimization of either transparency or shading. Of the original 640 scenarios, only 111 satisfied the initial performance constraints, and subsequent multi-objective assessment identified 44 non-dominated solutions, corresponding to approximately 6.9% of the entire design space. The Pareto-optimal configurations were confined to WWR values between 30% and 80%; no scenario with 90% or 100% WWR remained on the non-dominated front. This finding is consistent with previous evidence that optimum WWR values are climate-dependent and that excessive transparent area may undermine overall environmental performance despite increasing daylight availability (17, 18). The distribution of louver angles within the Pareto set was also highly structured: 25 non-dominated scenarios employed Alpha = 60°, 15 employed Alpha = 45°, and four employed Alpha = 30°, whereas no solution with an angle below 30° survived the optimization process. This pattern supports earlier findings emphasizing the importance of calibrated external louvers in limiting solar gains and cooling demand in office buildings (22–24). More importantly, the results clarify that daylight sufficiency and daylight quality should not be treated as synonymous. A large WWR strongly improved sDA, yet simultaneously increased ASE and reduced UDI, demonstrating that a façade admitting more daylight is not necessarily a better-performing daylight façade. In contrast, increasing Alpha moderated quantitative daylight access but substantially improved the quality of the daylight regime by reducing excessive solar exposure and increasing useful illuminance. This interpretation is compatible with research showing that the geometry of shading and mediating façade elements can change not only the amount but also the distribution and usability of daylight (25, 26). The integrated findings therefore support a hierarchical design logic in which WWR first establishes the magnitude of façade exposure, Alpha subsequently filters and regulates that exposure, and Offset and Spacing provide secondary fine-tuning. The resulting model reframes façade design as a coordinated sequence of decisions rather than as the independent selection of glass area and shading angle.

The study demonstrates that the performance of a south-facing louvered office façade in the hot-arid climate of Kerman is governed by a differentiated but interdependent hierarchy of envelope variables. WWR is the dominant variable in determining annual heating–cooling load intensity and quantitative daylight availability, while louver angle is the dominant variable in controlling excessive solar exposure and improving the proportion of useful daylight. These roles should not be interpreted as

mutually exclusive, because each variable also affects secondary performance indicators; rather, their importance lies in the unequal weight they exert on different outputs. The Pareto analysis further confirms that no single configuration can simultaneously maximize daylight access, minimize direct solar exposure, minimize thermal load, and maximize useful daylight without trade-offs. Highly transparent façades were excluded from the non-dominated solution set, while moderate WWR values combined with relatively closed louver angles were more capable of maintaining balanced performance. On this basis, the functional logic of louvered façade design can be organized into three successive decision layers: first, defining an appropriate range of façade transparency to regulate the overall magnitude of thermal and luminous exposure; second, adjusting louver angle to filter direct radiation and improve daylight usability; and third, refining the system through secondary geometric parameters such as Offset and Spacing. The findings therefore shift the design question from identifying a universally optimal WWR or louver angle toward establishing a context-specific coordination between façade openness and radiation control. Within the defined scope of a south-facing, fixed-louver office cell in Kerman, the study provides a performance-based framework for balancing thermal and daylight objectives and offers a reproducible basis for architectural decision-making under conflicting environmental criteria.

References

1. Fayyaz R, Abolhasani N, Fakhari M. A Review of Energy Research in the Field of Architecture in Iran. *Architectural Thought*. 2021;12(3):33-52.
2. Li S, Liu L, Peng C. A Review of Performance-Oriented Architectural Design and Optimization in the Context of Sustainability: Dividends and Challenges. *Sustainability*. 2020;12(4):1427.
3. Ahmadnejad Y, Yekta Hashkovaie M. A Comparative Study of Topic 19 of the Iranian National Building Regulations and the Criteria of the German Sustainable Building Assessment System (DGNB). *Civil Engineering Journal*. 2021;12(3):77-88.
4. Ahmadnejad Y. Compliance of the Criteria of Topic 19 of the Iranian National Building Regulations and the DGNB Assessment System in Evaluating the Aseman Residential Complex in Tabriz. *Armanshahr Architecture & Urban Development*. 2024;16(1):89-104.
5. Kordjamshidi M. Comparison of Energy Labeling of Residential Buildings Based on Two Different Methods of Thermal Performance Assessment. *Sustainable Architecture*. 2020;9(1):121-35.
6. Arabi MS, Dehghan M, Mehdizadeh K. Improving the Energy Performance of an Existing Building and the Effects of a Green Roof on Energy Consumption in the Isfahan Climate: A Comparative Study of Topic 19 and ASHRAE 90.2. *Journal of Mechanical Engineering, University of Tabriz*. 2022;52(4):211-23.
7. Karami M, Anbarzadeh A. Optimization of Thermal Insulation Thickness of External Walls in Residential Buildings under Different Climatic Conditions of Iran with an Environmental Approach. *Building Engineering and Housing Science*. 2020;8(2):97-110.
8. Rashidi-Aghdam H, Yarmohammadi S, Malekouti S. Review of Different Smart Hospital Control Methods for Optimizing Energy Consumption Based on Topic 19 of the Iranian National Building Regulations. *Building Engineering and Housing Science*. 2017;7(1):35-49.
9. Rahgozar S, Dehghan M, Pourrajabian A. Techno-Economic Evaluation of Ice Storage Systems Based on the New Requirements of the Draft Fourth Revision of Topic 19 of the Iranian National Building Regulations. *Energy Systems*. 2021;13(2):101-14.
10. Khalaji Asadi M, Abedi Z, Shar'i N. Hybrid Solar Systems as an Innovative Solution for Building Heating in Compliance with Topic 19 of the Iranian National Building Regulations. *Renewable Energies*. 2009;8(4):21-34.
11. Sarvarrahim R, Khalaji R, Rajabi A. Evaluation of Topic 19 of the Iranian National Building Regulations Using the SWOT Model. *Architecture and Urbanism*. 2010;9(1):1-15.
12. Raziei T. Climate Zoning of Iran Using the Köppen-Geiger Method and Investigation of Shifts in the Country's Climate Zones during the Twentieth Century. *Earth and Space Physics*. 2017;43(2):419-39.
13. Akbari H, Hosseini-Nejad S. Determining the Optimal Orientation Angle of Vertical Building Surfaces Based on Solar Energy Gain in Hot-Humid Climates: Case Studies of Bandar Abbas, Bushehr, and Ahvaz. *Iranian Journal of Architecture and Urbanism*. 2020;11(2):45-60.
14. Hosseini SM, Mofidi SM. Determining the Optimal Window-to-Wall Ratio in Hospitals in Mashhad to Improve Building Energy Efficiency. *Armanshahr Architecture & Urban Development*. 2023;15(2):44-60.
15. Mohammadi M, Ghiabaklou Z, Moztarzadeh A. Optimal Values of Window Dimensions and Openings in Residential Buildings in the Hot-Humid Climate of Asaluyeh. *Honar-Ha-Ye-Ziba: Architecture and Urban Planning*. 2023;28(1):55-73.
16. Adelnasab S, Teymourtash M. Determining the Required Size of Light-Well Patios in Residential Buildings Based on the Requirements of Topic 4 of the Iranian National Building Regulations. *Renewable and New Energies*. 2024;6(3):112-27.
17. Shaeri J, Habibi A, Yaghoubi M, Chokhachian A. The Optimum Window-to-Wall Ratio in Office Buildings for Hot-Humid, Hot-Dry, and Cold Climates in Iran. *Environments*. 2019;6(4):45.
18. Dehghan N, Maleki A. Optimization of Energy Consumption and Daylight Performance in Residential Building Regarding Windows Design in Hot and Dry Climate of Iran. *Science and Technology for the Built Environment*. 2020;26(9):1263-78.

19. Tzempelikos A, Athienitis AK. The Impact of Shading Design and Control on Daylighting and Cooling Load of Office Buildings. *Solar Energy*. 2007;81(3):369-82.
20. Alzoubi HH, Al-Zoubi AH. Assessment of Building Façade Performance in Terms of Daylighting and the Associated Energy Consumption: Vertical and Horizontal Shading Devices. *Energy Conversion and Management*. 2010;51(8):1592-9.
21. Mahdavinejad M, Mohammadi S. Parametric Optimization of Daylight and Thermal Performance through Louvers in Hot and Dry Climate of Tehran. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2016;8(2):321-38.
22. Shokouhian M, Soflaei F, Abraveshdar H, Alipour A. The Role of Louvers in Reducing Cooling Energy Demand in Office Buildings: Case of Iran. *Energy and Buildings*. 2020;223:110127.
23. Shaeri J, Yaghoubi M, Habibi A. Effects of External Louvers on Solar Heat Gain and Energy Consumption of an Office Building in Different Climates of Iran. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2022;46(2):311-26.
24. Kieu NM, Ullah I, Park J, Bae H, Cho M, Lee K, et al. The Energy Saving Potential in an Office Building Using Louvers in Mid-Latitude Climate Conditions. *Buildings*. 2024;14(2):512.
25. Golchin N, Omid A, Masoud SE. Evaluating the Visual Comfort of Orosi Windows in Hot and Semi-Arid Climates through Climate-Based Daylight Metrics: A Quantitative Study. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2022;21(6):1782-94.
26. Vakilinezhad R, Raisi R, Manesh MK. Daylight and Thermal Performance Evaluation of Orosi; Traditional Colored Window: Case Study of Kazeruni House in Shiraz. *International Journal of Architectural Heritage*. 2024;18(7):1342-61.
27. Saljoughinejad S, Sharifabad SR. Classification of Climatic Strategies Used in Iranian Vernacular Residences Based on Spatial Constituent Elements. *Building and Environment*. 2015;92:52-70.
28. Nikpour M, Shamsolmaali S, Dehghani H. Creating Sustainability in Central Courtyard Houses in Desert Regions of Iran. *International Journal of Architecture and Environment*. 2012;1(1):33-47.
29. Tayari N, Nikpour M. Effect of Different Proportions of Courtyard Buildings in Hot-Dry Climate on Energy Consumption: Case Study of Traditional Courtyard Houses of Kerman, Iran. *Iranica Journal of Energy & Environment*. 2022;13(1):39-45.
30. Rajabi A. Explaining the Theoretical Challenges of Indoor Air Quality in Green Buildings and Opportunities for Improvement. *Modern Architectural Research*. 2025;14(1):65-80.
31. Abedini MH, Gholami H, Sangin H. Multi-Objective Optimization of Window and Shading Systems for Enhanced Office Building Performance: A Case Study in Qom, Iran. *Journal of Daylighting*. 2025;12(91):1-15.
32. Khalili M, Amindeldar S. Traditional Solutions in Low Energy Buildings of Hot-Arid Regions of Iran. *Sustainable Cities and Society*. 2014;13:171-9.
33. Doostmohamadi S. Climate Design and Its Role in Reducing Energy Consumption Management: A Case Study of Kerman City of Iran. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2018;8(4):137-42.
34. Mousavi SMR, Mohammadi SMH, Jahanshahi Javaran E. Effect of Shading Devices on an Office Building Energy Consumption in Hot Arid Climate: A Case Study for Kerman. *Iranica Journal of Energy & Environment*. 2025;16(1):90-101.