

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شهید بهشتی

دانشکده معماری و شهرسازی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی معماری

گرایش علوم ساختمان

عنوان

طراحی الگوی پایدار برای توسعه شهری در اقلیم گرم و خشک

با تأکید بر مدیریت منابع و کاهش مصرف انرژی

نگارش

امیرحسین بهرامی

استادان راهنما

دکتر محمدرضا حافظی

دکتر منصوره طاهباز

شهریور ۱۴۰۵

تأییدیه هیئت داوران جلسه دفاع از پایان نامه

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امیرحسین بهرامی با عنوان «طراحی الگوی پایدار برای توسعه شهری در اقلیم گرم و خشک با تأکید بر مدیریت منابع و کاهش مصرف انرژی» در تاریخ با حضور هیئت داوران در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی دفاع شد و با درجه و نمره به تصویب رسید.

سمت	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمدرضا حافظی		
استاد راهنما	دکتر منصوره طاهباز		
داور داخلی			
داور خارجی			
نماینده تحصیلات تکمیلی			

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب امیرحسین بهرامی، دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی معماری گرایش علوم ساختمان دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی، نویسنده پایان نامه «طراحی الگوی پایدار برای توسعه شهری در اقلیم گرم و خشک با تأکید بر مدیریت منابع و کاهش مصرف انرژی» تحت راهنمایی دکتر محمدرضا حافظی و دکتر منصوره طاهباز، متعهد می‌شوم:

- تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های دیگران، به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب این پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی ارائه نشده است.
- کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شهید بهشتی است.

نام و نام خانوادگی: امیرحسین بهرامی

تاریخ و امضا:

تقدیم به

خانواده‌ام، برای همراهی، صبوری و پشتیبانی در مسیر این پژوهش،

و مردم عزیز ایران.

سپاسگزاری

از استادان راهنمای گرامی، جناب آقای دکتر محمدرضا حافظی و سرکار خانم دکتر منصوره طاهباز، برای راهنمایی‌های علمی، دقت نظر و همراهی ارزشمندشان در فرایند شکل‌گیری این پایان‌نامه صمیمانه سپاسگزارم. همچنین از استادان داور محترم برای وقت و نکته‌سنجی‌هایشان، و از خانواده‌ام برای پشتیبانی بی‌دریغشان قدردانی می‌کنم.

چکیده

در معماری مناطق گرم‌وخشک، دستیابی به شرایط مناسب محیطی تنها از طریق بهبود پوسته ساختمان یا افزودن فناوری‌های صرفه‌جویی در انرژی حاصل نمی‌شود، بلکه نیازمند هماهنگی میان شکل و سازمان فضایی بنا، جهت‌گیری، کنترل تابش، نور روز، رفتار حرارتی اجزای ساختمان و نحوه بهره‌گیری از امکانات طبیعی محیط است. معماری بومی یزد نیز نشان می‌دهد که پاسخ به نیازهای اقلیمی این منطقه بر پایه مجموعه‌ای از راهکارهای هماهنگ فضایی و کالبدی شکل گرفته است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از این نگرش، می‌کوشد شناخت اقلیمی و برخی آموزه‌های حاصل از معماری بومی را به اصول و راهکارهایی قابل‌بررسی در فرایند طراحی تبدیل کرده و تأثیر آن‌ها را با استفاده از شبیه‌سازی و مقایسه سناریوهای مختلف ارزیابی کند.

این بررسی در دو بخش اصلی انجام شد: بلوک مسکونی و گلخانه شفاف نیمه‌مدفون از نوع والپینی. در بخش مسکن، ۹۳ سناریوی کامل و هم‌سنخ مورد تحلیل قرار گرفت و بررسی گزینه‌ها با یک مرحله محدود جست‌وجوی پارامتریک و تحلیل‌های تکمیلی ادامه یافت. گزینه R3 نه به‌عنوان پاسخ بهینه مطلق، بلکه به‌عنوان نمونه‌ای مناسب برای ادامه بررسی تفصیلی انتخاب شد. در بخش والپینی نیز ۱۶ شبیه‌سازی اصلی سالانه، همراه با آزمون‌های حساسیت، برای شناخت اثر نیمه‌مدفون بودن، تهویه، نوع پوشش، سایه و شرایط حرارتی خاک بر رفتار حرارتی فضا و میزان دریافت نسبی انرژی خورشیدی انجام گرفت.

نتایج بخش مسکونی نشان داد که از حالت اولیه تا پیکربندی نهایی، بار سرمایش $43/92$ درصد و مجموع بار حرارتی $23/48$ درصد کاهش یافت؛ در مقابل، بار گرمایش $61/09$ درصد افزایش پیدا کرد و افزایش کنترل تابش با کاهش برخی شاخص‌های دسترسی به نور روز همراه شد. این نتایج نشان می‌دهد که بهبود شرایط اقلیمی ساختمان حاصل بیشینه‌کردن یک عامل منفرد نیست، بلکه نیازمند ایجاد تعادل میان نیازهای حرارتی و نوری است. در بررسی امکان بهره‌گیری از انرژی خورشیدی نیز حدود 140 مترمربع سطح فعال فتوولتائیک در تراز سالانه انرژی‌ای نزدیک به مصرف عملیاتی بلوک تولید کرد. با در نظر گرفتن عدم قطعیت، سطح مورد نیاز برای دستیابی به اطمینان 80 و 95 درصد به ترتیب به حدود 155 و 161 مترمربع افزایش یافت.

در گلخانه والپینی، تهویه طبیعی در دو مقایسه هم‌سنخ بیش از 3100 ساعت از زمان قرارگیری دمای داخل در بالاتر از 35 درجه سلسیوس کاست. نیمه‌مدفون کردن بنا موجب کاهش نیاز به گرمایش و ساعات سرد شد، اما هم‌زمان بار سرمایش و مجموع بار حرارتی را افزایش داد. همچنین کاهش عبور تابش خورشیدی، ضمن کاهش ساعات گرم، مقدار شاخص نسبی انرژی خورشیدی عبوری (DLI_{eq}) را نیز کاهش داد. این نتایج نشان می‌دهد که کنترل شرایط حرارتی و تأمین تابش مورد نیاز الزاماً در یک جهت عمل نمی‌کنند و لازم است تأثیر آن‌ها به‌صورت هم‌زمان در فرایند طراحی بررسی شود.

مقادیر انرژی و بارهای حرارتی حاصل شبیه‌سازی‌اند و بیانگر مصرف واقعی تجهیزات یا خودکفایی ساعتی ساختمان نیستند. همچنین DLI_{eq} در این پژوهش تنها به‌عنوان شاخصی نسبی برای مقایسه سناریوهای معماری به کار رفته است. ارتباط پژوهش با مقیاس فراتر از ساختمان نیز به بررسی دسترسی‌های روزمره و روابط فضایی میان ساختمان، حرکت و منابع محدود شده و طراحی سامانه‌های شهری در محدوده اعتبارسنجی این پژوهش قرار ندارد.

دست‌آورد اصلی پژوهش، ارائه روشی برای پیوند میان شناخت نیازهای اقلیمی، آموزه‌های معماری بومی و ارزیابی کمی راهکارهای طراحی است. این روش امکان مقایسه تأثیر عوامل کالبدی و شناخت تعارض میان نیازهای حرارتی، نوری و انرژی را فراهم می‌کند و می‌تواند مبنایی برای انتخاب آگاهانه‌تر راهکارهای معماری همساز با اقلیم گرم‌وخشک باشد. هدف پژوهش، دستیابی به یک فرم یا طرح شهری بهینه نیست، بلکه روشن کردن فرایندی است که از طریق آن می‌توان تصمیم‌های معماری را بر پایه شناخت اقلیم و شواهد حاصل از ارزیابی اتخاذ کرد.

واژگان کلیدی: اقلیم گرم‌وخشک؛ یزد؛ معماری همساز با اقلیم؛ طراحی اقلیم‌پاسخ؛ تصمیم‌گیری معماری؛ شبیه‌سازی انرژی؛ نور روز؛ فتوولتاییک؛ گلخانه نیمه‌مدفون.

فهرست مطالب

ت	چکیده
ج	فهرست مطالب
ر	فهرست جدول‌ها
س	فهرست شکل‌ها و نمودارها
ض	فهرست پیوست‌ها
ط	فهرست کوته‌نوشت‌ها
۱۷	فصل اول: کلیات پژوهش و طرح مسئله
۱۷	۱-۱. مقدمه
۱۹	۱-۲. بیان مسئله
۲۰	۱-۳. جایگاه پژوهش و شکاف موجود
۲۳	۱-۴. هدف پژوهش
۲۴	۱-۵. پرسش‌های پژوهش
۲۴	۱-۶. نوآوری و سهم پژوهش
۲۶	۱-۷. دامنه و تعریف عملیاتی پژوهش
۲۷	۱-۷-۱. سطوح کاربرد و توسعه پژوهش
۲۸	۱-۷-۲. مفاهیم کلیدی پژوهش
۲۹	۱-۸. ساختار کلی پژوهش
۳۱	فصل دوم: مبانی نظری و مرور ادبیات با تمرکز بر تصمیم طراحی
۳۱	۲-۱. نقش فصل و ساختار مرور ادبیات
۳۲	۲-۱-۱. منطق گزینش و سلسله‌مراتب شواهد
۳۳	۲-۲. یزد به عنوان زمینه مسئله اقلیمی
۳۸	۲-۲-۱. اقلیم آینده و پیام آن برای معماری
۳۹	۲-۳. عملکرد مسکن معاصر در یزد و اقلیم گرم‌وخشک
۴۱	۲-۳-۱. متغیرهای معماری دارای پشتوانه
۴۱	۲-۳-۲. جایگاه اعتبارسنجی و کنترل معقولیت نتایج
۴۲	۲-۴. ترجمه منطق بومی: از عنصر تاریخی به متغیر آزمون‌پذیر
۴۶	۲-۴-۱. جهت، حیاط و پیوستگی سایه
۴۷	۲-۴-۲. جرم، عایق، هوا و زمین
۴۷	۲-۴-۳. خرائق: فشردگی، همجواری و سازمان اجتماعی فضا
۴۹	۲-۵. مرز سیستم و سطح شواهد

۵۰	۲-۶. درس نمونه‌های معاصر و شرط انتقال
۵۱	۲-۶-۱. پردیس مؤسسه مصدر: بازخوانی سنت به‌عنوان سازوکار
۵۱	۲-۶-۲. شهر پایدار دی: خوشه مسکونی و پایداری قابل استفاده در زندگی روزمره
۵۲	۲-۶-۳. BedZED: وقتی روایت طراحی باید در بهره‌برداری دوباره آزموده شود
۵۳	۲-۶-۴. گلخانه بام یکپارچه ICTA-ICP: شرط انتقال به مازول محفظه
۵۴	۲-۶-۵. جمع‌بندی تطبیقی: چهار نمونه، چهار نوع درس
۵۵	۲-۷. جایگاه محفظه کشت در مسئله معماری
۵۶	۲-۸. دما و دسترسی نسبی به انرژی خورشیدی عبوری در ارزیابی معماری
۵۸	۲-۸-۱. پیوند حرارت و نور
۵۹	۲-۹. راهبردهای غیرفعال گلخانه و منطق والپینی
۶۱	۲-۹-۱. تماس با زمین، جرم و پوشش
۶۲	۲-۹-۲. پوشش شفاف؛ مرزی که هم گرما را کنترل می‌کند و هم نور را
۶۲	۲-۹-۳. تهویه و سایه؛ ضرورت امکان تخلیه و کنترل زمانی
۶۳	۲-۹-۴. راهبردهای مکمل و مرز ادعای پژوهش
۶۴	۲-۱۰. سنتز دو مازول؛ یک منطق اقلیمی، دو نوع فضای معماری
۶۵	۲-۱۱. از مرور ادبیات تا جایگاه پژوهش
۶۶	۲-۱۲. ماتریس تصمیم حاصل از مرور ادبیات
۶۷	۲-۱۳. جمع‌بندی فصل
۶۹	فصل سوم: روش پژوهش و چارچوب ارزیابی اقلیم‌پاسخ
۶۹	۳-۱. مقدمه
۷۰	۳-۲. طرح کلی پژوهش
۷۱	۳-۳. زنجیره مشترک تبدیل منطق اقلیمی به تصمیم معماری
۷۲	۳-۴. منشأ داده‌ها و حدود شواهد پژوهش
۷۴	۳-۵. داده اقلیمی و محیط محاسباتی
۷۶	۳-۶. مازول مسکن
۷۶	۳-۶-۱. تعریف مدل و منطق غربالگری
۷۷	۳-۶-۲. ورودی‌های تثبیت‌شده مدل
۷۸	۳-۶-۳. ارزیابی هم‌زمان انرژی و نور روز
۸۱	۳-۷. مازول گلخانه نیمه‌مدفون والپینی
۸۱	۳-۷-۱. تعریف مدل و مسئله معماری
۸۲	۳-۷-۲. هندسه و ارتباط با زمین
۸۳	۳-۷-۳. مصالح پوشش

۸۴	۳-۷-۴. سازمان سناریوهای طراحی
۸۴	۳-۷-۵. تهویه طبیعی و سایه فصلی
۸۵	۳-۷-۶. حالت آزاد و بار حرارتی نظری
۸۶	۳-۷-۷. شاخص‌های حرارتی و DLI_{eq}
۸۷	۳-۷-۸. پردازش زمانی نتایج
۸۷	۳-۸. لایه تحلیل مشترک دو ماژول
۸۸	۳-۹. کنترل کیفیت، پیگیری و دامنه بازتولید
۸۹	۳-۱۰. تبدیل نتایج به قاعده طراحی
۹۰	۳-۱۰-۱. جست‌وجوی پارامتریک تکمیلی در مدل مسکن
۹۱	۳-۱۱. جمع‌بندی فصل
۹۳	فصل چهارم: نتایج طراحی اقلیم‌پاسخ در ماژول مسکن
۹۳	۴-۱. پرسش و منطق تفسیر نتایج
۹۴	۴-۲. ترتیب بررسی نتایج
۹۵	۴-۳. غربال فرم و جهت‌گیری
۹۵	۴-۳-۱. مقایسه تیپ‌های $R1$ ، $R2$ و $R3$
۹۷	۴-۳-۲. پاسخ تیپ $R3$ به جهت‌گیری
۹۸	۴-۳-۳. پیکربندی‌های جایگزین L و U
۹۹	۴-۴. توسعه مرحله‌ای راهکارهای طراحی
۱۰۱	۴-۵. خواندن هم‌زمان حرارت و نور روز
۱۰۲	۴-۵-۱. نقش سایه به‌عنوان تصمیم‌چندفصلی
۱۰۳	۴-۶. نقش ترکیب مصالح و پوسته
۱۰۴	۴-۷. بررسی نور روز در شبکه حسگرها
۱۰۵	۴-۸. پیکربندی نهایی آزموده‌شده و بازتاب معماری نتایج
۱۱۱	۴-۹. نسبت نتایج با شواهد محلی و معماری یزد
۱۱۲	۴-۹-۱. تیپ مکمل حیاط مرکزی-ساباط
۱۱۵	۴-۹-۲. تیپ کمی مستقل حیاط خصوصی طبقه‌ای
۱۱۷	۴-۹-۳. قابلیت انتقال قواعد $R3$ به شرایط استقرار متفاوت
۱۱۸	۴-۱۰. جمع‌بندی فصل
۱۲۰	فصل پنجم: نتایج عملکرد حرارتی محفظه نیمه‌مدفون والپینی و شاخص نسبی انرژی خورشیدی عبوری
۱۲۰	۵-۱. مسئله و منطق تفسیر نتایج
۱۲۱	۵-۲. ساختار سناریوها و شاخص‌های ارزیابی

۱۲۲	۵-۲-۱. شاخص‌های حرارتی
۱۲۲	۵-۲-۲. شاخص نسبی انرژی خورشیدی عبوری DLI_{eq}
۱۲۳	۵-۳. تهویه طبیعی و نقش آن در دفع گرمای انباشته‌شده
۱۲۵	۵-۴. اثر هر راهبرد و پیامدهای همراه آن
۱۲۸	۵-۵. رابطه بیش‌گرمایش و دریافت خورشیدی
۱۲۹	۵-۶. ساختار زمانی دما
۱۳۱	۵-۷. تغییرات فصلی دریافت خورشیدی
۱۳۳	۵-۸. سایه فصلی؛ تنظیم دریافت خورشیدی در دوره گرم
۱۳۴	۵-۹. نیاز نظری باقی‌مانده برای کنترل دما
۱۳۶	۵-۱۰. آزمون حساسیت و پایداری جهت پاسخ
۱۳۷	۵-۱۰-۲. حساسیت سطح بازشو
۱۳۷	۵-۱۰-۳. حساسیت شرط مرزی خاک و رفتار فصلی نیمه‌مدفون
۱۳۹	۵-۱۱. قواعد حاصل برای ادامه طراحی معماری
۱۴۰	۵-۱۱-۱. پیکربندی معماری برای ادامه توسعه
۱۴۰	۵-۱۱-۲. کنترل مرتبه بزرگی و حدود استفاده از نتایج
۱۴۱	۵-۱۲. جمع‌بندی فصل
۱۴۳	فصل ششم: تفسیر نتایج و اصول حاصل برای طراحی
۱۴۳	۶-۱. منطق مشترک یافته‌های پژوهش
۱۴۴	۶-۲. مسیر مشترک از مسئله اقلیمی تا تصمیم معماری
۱۴۶	۶-۳. سازوکارهای مشترک و پاسخ‌های متفاوت
۱۴۷	۶-۴. چهار یافته مشترک دو بخش
۱۴۷	۶-۴-۱. کنترل خورشیدی، مسئله‌ای چندهدفه است
۱۴۷	۶-۴-۲. ذخیره گرما بدون امکان دفع آن راهبرد کاملی نیست
۱۴۸	۶-۴-۳. تهویه راهکاری عمومی برای همه شرایط نیست
۱۴۸	۶-۴-۴. عملکرد مجموعه راهکارها از نام یک راهبرد مهم‌تر است
۱۴۹	۶-۵. وحدت منطق اقلیمی و تفاوت معیارهای ارزیابی
۱۵۰	۶-۶. از نتیجه محاسباتی تا تصمیم معماری
۱۵۱	۶-۷. جایگاه معماری در زنجیره پایداری
۱۵۲	۶-۸. اصول حاصل برای تصمیم معماری
۱۵۴	۶-۹. سهم پژوهش
۱۵۵	۶-۱۰. حدود کاربرد و انتقال نتایج
۱۵۶	۶-۱۱. پاسخ به پرسش پژوهش و جمع‌بندی

۱۵۶	۱-۱۱-۶. نتیجه معماری
۱۵۷	۲-۱۱-۶. نتیجه در مقیاس پایداری
۱۵۹	منابع
۱۶۴	پیوست الف: داده‌ها و کنترل‌های محاسباتی
۱۶۴	الف-۱. دامنه داده‌ها و کنترل‌های محاسباتی
۱۶۵	الف-۲. روند تبدیل واحدها در محاسبه DLI_eq
۱۶۶	الف-۳. کامل بودن داده ساعتی و بازتولید ماهانه
۱۶۶	الف-۴. حساسیت تهویه و معنای شاخص‌های دمایی
۱۶۷	الف-۵. حساسیت شرط مرزی خاک
۱۶۸	الف-۶. کنترل هشدار سایکرومتریک فایل اقلیمی
۱۶۸	الف-۷. الگوهای ۲۴ ساعته بارهای داخلی و حضور مسکن
۱۷۱	الف-۸. تنظیمات فنی شبیه‌سازی نور روز مسکن

فهرست جدول‌ها

۲۸	جدول ۱-۱. سطوح کاربرد چارچوب و محصول هر سطح
۲۸	جدول ۲-۱. تعریف عملیاتی مفاهیم کلیدی پژوهش
۲۹	جدول ۳-۱. مسیر عملیاتی پژوهش از مرور شواهد تا سنتز تصمیم‌های طراحی
۳۲	جدول ۱-۲. ساختار مرور ادبیات و نقش هر بلوک در تصمیم طراحی
۳۸	جدول ۲-۲. شواهد اقلیمی منتخب و نقش آن‌ها در تصمیم طراحی
۴۰	جدول ۳-۲. شواهد عملکرد مسکن یزد و حد تعمیم هر مطالعه
۴۲	جدول ۴-۲. تمایز راستی‌آزمایی، اعتبارسنجی و کنترل مرتبه بزرگی
۴۵	جدول ۵-۲. ترجمه منطق بومی یزد به متغیر و نوع شاهد
۴۹	جدول ۶-۲. ترجمه منطق فضایی خرائق و یزد به معیار ارزیابی
۴۹	جدول ۷-۲. سطوح شواهد و کاربرد آن‌ها در رساله
۵۵	جدول ۸-۲. تجربه نمونه‌های معاصر و شرط انتقال به پژوهش
۵۸	جدول ۹-۲. شاخص‌های حرارتی و DLI_{eq} و مرز تفسیر آن‌ها
۶۳	جدول ۱۰-۲. راهبردهای معماری والپینی، اثر مورد انتظار و پیامد احتمالی
۶۶	جدول ۱۱-۲. ارتباط شواهد مرور ادبیات با تصمیم‌های پژوهش
۷۰	جدول ۱-۳. مشخصات کلی طرح پژوهش
۷۵	جدول ۲-۳. داده اقلیمی و محیط محاسباتی
۷۷	جدول ۳-۳. متغیرهای اصلی و شاخص‌های پاسخ در ماژول مسکن
۷۷	جدول ۴-۳. ورودی‌های پایه تثبیت‌شده در ماژول مسکن
۷۹	جدول ۵-۳. تنظیمات ثبت‌شده شبیه‌سازی سالانه نور روز مسکن
۸۲	جدول ۶-۳. هندسه و شرایط مرزی دو خانواده محفظه
۸۳	جدول ۷-۳. مشخصات پوشش‌های شفاف در مدل نهایی
۸۴	جدول ۸-۳. سناریوهای اصلی بخش والپینی
۸۶	جدول ۹-۳. شاخص‌های ارزیابی ماژول والپینی
۸۷	جدول ۱۰-۳. سازوکارهای مشترک و نحوه ارزیابی آن‌ها در دو بخش پژوهش
۸۹	جدول ۱۱-۳. ساختار راهنمای تصمیم‌گیری در طراحی
۹۴	جدول ۱-۴. سازمان خانواده‌های سناریو و نقش هر خانواده در استدلال فصل
۹۵	جدول ۲-۴. مقایسه عملکرد سه پیکربندی اولیه
۱۰۰	جدول ۳-۴. تغییرات مرحله‌ای در عملکرد حرارتی و نور روز
۱۰۲	جدول ۴-۴. مقایسه‌ی سایه و تنظیم نهایی در بسته‌ی پوسته $M3$
۱۱۰	جدول ۵-۴. تراز سالانه فتوولتاییک با در نظر گرفتن عدم قطعیت

۱۱۲	جدول ۴-۶. نسبت یافته‌های این فصل با شواهد محلی
۱۱۵	جدول ۴-۷. نسبت تیپ «R۳» با تیپ مکمل حیاط مرکزی-ساباط
۱۱۶	جدول ۴-۸. نتایج تیپ حیاط خصوصی طبقه‌ای
۱۲۱	جدول ۵-۱. سازمان سناریوهای پذیرفته‌شده و نقش هر گروه در تحلیل
۱۲۳	جدول ۵-۲. رفتار حرارتی دو هندسه در حالت بسته و دارای تهویه
۱۲۵	جدول ۵-۳. تغییر یک‌مرحله‌ای راهکارها نسبت به سناریوی مرجع مستقیم
۱۳۰	جدول ۵-۴. نوسان حرارتی و دریافت خورشیدی فصلی در سناریوهای شیشه‌ای منتخب
۱۳۱	جدول ۵-۵. تغییرات ماهانه DLI_{eq} در سناریوهای منتخب
۱۳۳	جدول ۵-۶. اثر برنامه سایه بر دریافت نسبی انرژی خورشیدی
۱۳۴	جدول ۵-۷. بار حرارتی نظری و DLI_{eq} در چهار حالت منتخب
۱۳۹	جدول ۵-۸. اصول طراحی حاصل از بررسی حرارتی و دریافت خورشیدی
۱۴۵	جدول ۶-۱. منطق مشترک بررسی در دو بخش پژوهش
۱۵۳	جدول ۶-۲. اصول حاصل برای تصمیم معماری
۱۶۴	جدول الف-۱. خلاصه داده‌ها و کنترل‌های محاسباتی درج‌شده در پیوست
۱۶۵	جدول الف-۲. تعریف متغیرها و کنترل واحد در محاسبه DLI_{eq}
۱۶۶	جدول الف-۳. بازحساب ردیابی‌شده یک روز از سناریوی F_{S3}
۱۶۶	جدول الف-۴. کنترل کامل‌بودن و بازتولید مستقل DLI_{eq}
۱۶۶	جدول الف-۵. کنترل حساسیت سطح بازشو در دو هندسه
۱۶۷	جدول الف-۶. نقش شاخص‌های دمایی در پژوهش
۱۶۷	جدول الف-۷. پایداری جهت اثر بسته نیمه‌مدفون در چهار شرط مرزی خاک
۱۶۸	جدول الف-۸. بازتولید آزمون حساسیت هشدار سایکرومتریک
۱۶۸	جدول الف-۹. ضرایب ساعتی روشنایی، تجهیزات و آب گرم خانگی
۱۶۹	جدول الف-۱۰. ضرایب ساعتی حضور ساکن در روزهای کاری و پایان هفته/تعطیل
۱۷۱	جدول الف-۱۱. تنظیمات فنی شبیه‌سازی نور روز مسکن

فهرست شکل ها و نمودارها

- شکل ۱-۱. خوانش سازوکارهای اقلیمی معماری بومی یزد: کنترل تابش، جرم حرارتی، تهویه و بهره‌گیری از نوسان دمای شبانه‌روزی. ۱۷
- شکل ۲-۱. مسیر تبدیل آموزه‌های بومی و شناخت اقلیمی به عوامل قابل‌آزمون، سناریوهای طراحی و قواعد تصمیم. ۱۸
- شکل ۳-۱. جایگاه معماری و عملکرد ساختمان در زنجیره یکپارچه پایداری و مرز آن با حوزه‌های نیازمند ارزیابی تخصصی مستقل. ۲۲
- شکل ۴-۱. فرایند کلی پژوهش از شناخت اقلیم و استخراج عوامل تا شبیه‌سازی، تحلیل بده‌بستان‌ها و تصمیم‌گیری معماری. ۳۰
- شکل ۱-۲. ساختار مرور ادبیات و پیوند شواهد با تصمیم‌های طراحی. ۳۲
- شکل ۲-۲. اقلیم یزد و چارچوب نیازهای طراحی: زاویه تابش خورشید در تابستان و زمستان، نوسان دمای روز و شب، و نیازهای طراحی برخاسته از آن‌ها. ۳۵
- شکل ۳-۲. تفکیک نقش بارش بلندمدت یزد از بارش سال هواشناسی نمونه TMYx. منابع: (Mesbahzadeh et al., ۲۰۲۰; Mansourmoghaddam et al., ۲۰۲۴) و فایل EPW پژوهش. ۳۶
- شکل ۴-۲. گلباد یزد بر پایه داده‌های اقلیمی نمونه TMY محلی؛ نمایش سرعت و جهت غالب باد. ۳۶
- شکل ۵-۲. نیم‌رخ دمای زمین یزد به تفکیک عمق و فصل. ۳۷
- شکل ۶-۲. نقشه حرارتی دمای هوای خشک یزد در طول سال (ساعتی/ماهانه). ۳۷
- شکل ۷-۲. گلبیگ تابش یزد: تابش کل، پخشی و مستقیم. ۳۷
- شکل ۸-۲. روند نقد عملکردی مسکن معاصر؛ از نشانه‌های اقلیمی تا شاهد قابل اندازه‌گیری. ۳۹
- شکل ۹-۲. روند تبدیل منطق بومی به متغیر و شاخص قابل‌آزمون. ۴۴
- شکل ۱۰-۲. ترجمه منطق بومی یزد (۱): فشردگی بافت، ساباط سایه‌دار، حیاط درون‌گرا—هرکدام همراه با متغیر آزمون‌پذیر. ۴۴
- شکل ۱۱-۲. ترجمه منطق بومی یزد (۲): جرم حرارتی، بادگیر، کنترل بازشو—هرکدام همراه با متغیر آزمون‌پذیر. ۴۵
- شکل ۱۲-۲. مرز تفسیر شاخص DLI_{eq} و تمایز آن از ارزیابی نوری در سطح تاج‌پوشش گیاهی. ترسیم نگارنده. ۵۸
- شکل ۱۳-۲. منطق طراحی والپینی و بده‌بستان نور-حرارت: مقایسه گلخانه ساده روی زمین و والپینی نیمه‌مدفون، همراه با راهبردهای طراحی کلیدی (تماس با خاک، تهویه طبیعی، سایه فصلی، پوشش شفاف مناسب). ۶۰
- شکل ۱۴-۲. والپینی به‌عنوان بسته راهبردهای حرارتی و دریافت خورشیدی، نه فرمی که ذاتاً برتر باشد. ۶۱
- شکل ۱-۳. زنجیره مشترک تبدیل منطق اقلیمی به تصمیم طراحی در دو بخش پژوهش ۷۲
- شکل ۲-۳. منطق دسترسی روزمره در سناریوی فضایی پروژه؛ نمودار دسترسی، نه شعاع فرم شهری. منبع: ترسیم نگارنده بر اساس آرشیو پروژه. ۷۴
- شکل ۳-۳. هندسه ثبت‌شده دو خانواده پایه و والپینی و سطوح مؤثر پوشش ۸۲

- شکل ۳-۴. جست‌وجوی پارامتریک تکمیلی در محدوده مدل منتخب مسکن؛ نمایش فضای گزینه‌ها و روابط پارتو، نه اثبات یک بهینه جهانی. ۹۱
- شکل ۴-۱. سه پیکربندی اولیه $R1$ ، $R2$ و $R3$ و تفاوت آن‌ها از نظر فشردگی، جهت استقرار و نحوه شکل‌گیری جبهه‌های اصلی؛ شکل، مبنای خوانش معماری گزینه‌هاست و نه شاهد مستقل عملکرد کمی ۹۶
- شکل ۴-۲. سهم بار سرمایش و گرمایش در سه پیکربندی اولیه، تحت شرایط مرزی یکسان ۹۶
- شکل ۴-۳. روند شکل‌گیری تیپ مسکونی مورد بررسی ۹۷
- شکل ۴-۴. تغییر مجموع بار حرارتی تیپ $R3$ با تغییر جهت استقرار؛ کمینه بار در حالت پایه و افزایش تدریجی آن با انحراف از محور شرقی-غربی ۹۸
- شکل ۴-۵. تغییر هم‌زمان بارهای حرارتی و شاخص‌های نور روز در مسیر توسعه تیپ مسکونی ۱۰۱
- شکل ۴-۶. رابطه میان مجموع بار حرارتی و سهم ساعات با نور بیش از اندازه در گزینه‌های بررسی‌شده ۱۰۲
- شکل ۴-۷. مقایسه سهم بار سرمایش و گرمایش در سه ترکیب پوسته مورد بررسی ۱۰۳
- شکل ۴-۸. توزیع UDI در شبکه حسگرها برای $R3$ پایه، $M3$ و $N21/S11$ ۱۰۴
- شکل ۴-۹. بازتاب نتایج در پلان تیپ $R3$: الف) سازمان فضایی مبله؛ ب) پلان اندازه‌گذاری‌شده و هسته میانی. ترسیم نگارنده. ۱۰۷
- شکل ۴-۱۰. مقطع سه‌طبقه تیپ مسکونی از میان واحدها؛ جانمایی اتاق‌ها، سرویس، بازشوها و پوسته. ترسیم نگارنده. ۱۰۸
- شکل ۴-۱۱. توسعه نمای معماری تیپ نماینده: الف) نمای جنوبی؛ ب) نمای شمالی. ترسیم نگارنده. ۱۰۹
- شکل ۴-۱۲. سطح فعال فتوولتاییک موردنیاز با در نظر گرفتن عدم قطعیت؛ خطوط $P80$ و $P95$ تفاوت میان تراز اسمی و سطح دارای حاشیه بیشتر را نشان می‌دهند ۱۱۱
- شکل ۴-۱۳. فرایند شکل‌گیری و سازمان فضایی تیپ حیاط مرکزی-ساباط؛ نمایش استقرار واحدهای حیاط‌دار در دو تراز، شکل‌گیری ساباط، هم‌نشینی واحدها، مسیر نیمه‌خصوصی و مقطع اقلیمی. ۱۱۴
- شکل ۴-۱۴. سلسله‌مراتب حرکت و دسترسی در تیپ حیاط مرکزی-ساباط؛ ارتباط واحدها، میدانچه‌های محلی و مسیرهای سایه‌دار ۱۱۴
- شکل ۴-۱۵. مقایسه کیفی روشنایی طبقات در آرایش حیاط‌دار؛ ردیف پایین طبقه همکف، ردیف میانی طبقه اول و ردیف بالا طبقه دوم ۱۱۵
- شکل ۵-۱. مقایسه هندسه مرجع روی‌زمین و نمونه نیمه‌مدفون والپینی و نحوه ارتباط آن‌ها با زمین و پوسته شفاف ۱۲۱
- شکل ۵-۲. مقایسه ساعات دمای بالاتر از 35 درجه و ساعات حضور در بازه 16 تا 27 درجه در سناریوهای آزاد ۱۲۵
- شکل ۵-۳. مسیر و مستندات شبیه‌سازی محفظه گلخانه در Honeybee ۱۲۵
- شکل ۵-۴. اثر جداگانه تهویه، سایه و تغییر پوشش بر ساعات بیش‌گرمایش، دمای کمینه و دریافت نسبی انرژی خورشیدی ۱۲۸
- شکل ۵-۵. رابطه میان ساعات دمای بالاتر از 35 درجه و شاخص نسبی DLI_{eq} در سناریوهای آزاد ۱۲۹
- شکل ۵-۶. نقشه ماه-ساعت دمای متوسط داخل در چهار سناریوی شیشه‌ای منتخب؛ نمایش زمان و شدت دوره‌های گرم در طول سال. ۱۳۱

- شکل ۵-۷. تغییرات ماهانه شاخص نسبی DLI_eq در سناریوهای منتخب و اثر سایه و پوشش بر توزیع فصلی دریافت خورشیدی. ۱۳۲
- شکل ۵-۸. اثر تغییر ضریب عبور سایه بر ساعات دمای بالاتر از ۳۵ درجه و شاخص نسبی DLI_eq در بازه ۰/۶۵ تا ۰/۸۵. ۱۳۴
- شکل ۵-۹. مقایسه بار حرارتی نظری گرمایش و سرمایش با شاخص نسبی DLI_eq در چهار سناریوی فعال منتخب. ۱۳۶
- شکل ۵-۱۰. تغییر بارهای حرارتی و شاخص نسبی DLI_eq در آزمون کاهش فرضی SHGC از ۰/۸۴ به ۰/۵۰. ۱۳۷
- شکل ۵-۱۱. پایداری جهت پاسخ نمونه نیمه‌مدفون در شرایط مرزی مختلف خاک؛ مقایسه رفتار دوره سرد و گرم. ۱۳۸
- شکل ۶-۱. زنجیره‌ی روش مشترک برای دو مازول ۱۴۵
- شکل ۶-۲. یافته‌های مشترک حاصل از تحلیل دو مجموعه سناریو ۱۴۷
- شکل ۶-۳. تفاوت معیارهای ارزیابی در دو بخش پژوهش در چارچوب یک منطق مشترک اقلیمی ۱۵۰
- شکل ۶-۴. مسیر تبدیل نتایج ارزیابی به اصول تصمیم معماری ۱۵۳

فهرست پیوست‌ها

۱۶۴

پیوست الف: داده‌ها و کنترل‌های محاسباتی

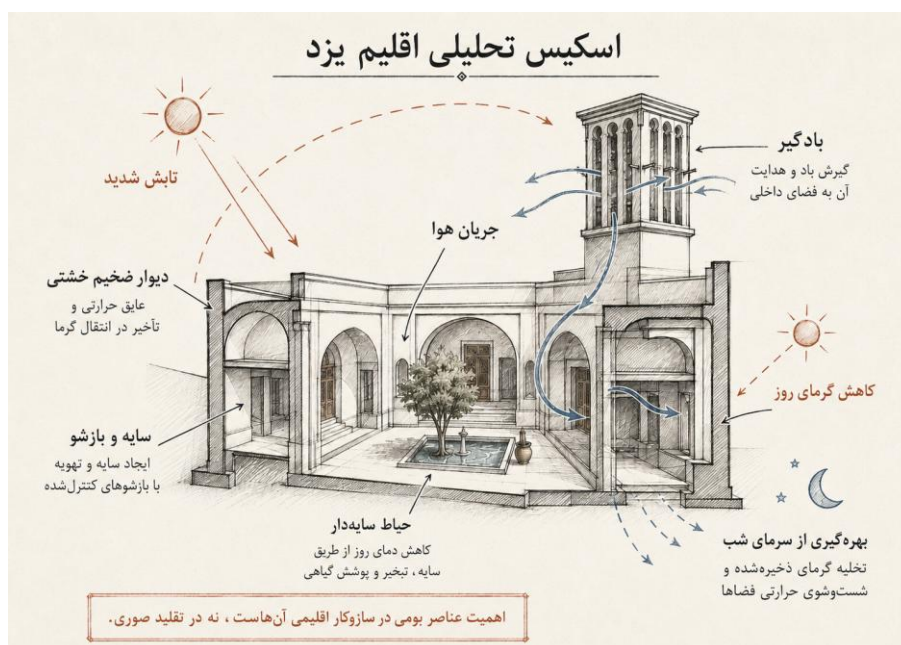
فهرست کوتاه‌نوشت‌ها

EPW/TMYx	فایل آب‌وهوایی شبیه‌سازی و سال هواشناسی نمونه
EnergyPlus	موتور شبیه‌سازی انرژی و انتقال حرارت ساختمان
Ladybug/Honeybee	ابزارهای تحلیل اقلیمی و رابط مدل‌سازی EnergyPlus
HVAC	گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع
Ideal Loads	بار حرارتی نظری لازم برای نگهداشت بازه کنترلی
NV	تهویه طبیعی (Natural Ventilation)
WWR	نسبت سطح پنجره به دیوار
U-value	ضریب انتقال حرارت
SHGC	ضریب کسب حرارت خورشیدی شیشه
UDI	روشنایی روز مفید
UDI-low / UDI-up	سهم روشنایی کمتر/بیشتر از بازه UDI
DA / cDA	خودبسنده‌گی نور روز / خودبسنده‌گی پیوسته نور روز
PAR	تابش فعال فتوسنتزی
PPFD	چگالی شار فوتون فتوسنتزی
DLI_eq	شاخص نسبی انرژی خورشیدی عبوری روزانه
VPD	کمبود فشار بخار؛ ورودی لازم برای توسعه تخصصی محیط کشت

فصل اول: کلیات پژوهش و طرح مسئله

۱-۱. مقدمه

معماری بومی یزد در پاسخ به شرایط گرم و خشک، بر مجموعه‌ای از تدابیر به هم پیوسته فضایی و کالبدی شکل گرفته است. حیاط‌های سایه‌دار، دیوارهای ضخیم خشتی، بادگیر، جهت‌گیری فضاها و بهره‌گیری از نوسان دمای شبانه‌روزی، هر یک بخشی از نظامی بوده‌اند که دریافت گرمای ناخواسته را کاهش داده و امکان بهره‌گیری از ظرفیت‌های طبیعی محیط را فراهم می‌کرده است. اهمیت این تدابیر نه در تکرار شکل آن‌ها، بلکه در شناخت اصولی است که از طریق آن‌ها میان شرایط اقلیمی، نیازهای انسان و سازمان فضایی بنا ارتباط برقرار می‌شده است. شکل ۱-۱ این سازوکارهای به هم پیوسته را به صورت تحلیلی خلاصه می‌کند.



شکل ۱-۱. خوانش سازوکارهای اقلیمی معماری بومی یزد: کنترل تابش، جرم حرارتی، تهویه و بهره‌گیری از نوسان دمای شبانه‌روزی.

پژوهش حاضر با چنین نگرشی، معماری بومی یزد را منبعی برای شناخت اصول و شگردهای اقلیمی می‌داند، نه مجموعه‌ای از الگوهای صوری برای بازتولید. از میان این آموزه‌ها، تنها مواردی وارد فرایند آزمون می‌شوند که سازوکار فیزیکی آن‌ها قابل تعریف و اثرشان قابل ارزیابی باشد. هدف آن است که روشن شود چگونه می‌توان شناخت اقلیمی و فضایی را به پرسش‌های طراحی، عوامل قابل بررسی و معیارهای ارزیابی تبدیل کرد و سپس نتیجه سنجش را دوباره به تصمیم معماری بازگرداند. مسیر این تبدیل از آموزه بومی تا تصمیم معماری نیز در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲. مسیر تبدیل آموزه‌های بومی و شناخت اقلیمی به عوامل قابل آزمون، سناریوهای طراحی و قواعد تصمیم. با این حال، پایداری در محیط ساخته‌شده نیز تنها از عملکرد مناسب یک جزء حاصل نمی‌شود. ساختمان، انرژی، آب، حمل و نقل، تولید غذا، مواد، پسماند و شیوه بهره‌برداری در عمل از یکدیگر مستقل نیستند و تصمیم در هر بخش می‌تواند آثار سایر بخش‌ها را تقویت یا تضعیف کند. از این رو، کاهش مصرف انرژی یک ساختمان به تنهایی نمی‌تواند نشان‌دهنده پایداری مجموعه‌ای باشد که در آن مصرف آب، نوع کشت، شیوه جابه‌جایی یا مدیریت پسماند با ظرفیت‌های محیطی سازگار نیست. برای نمونه، جمع‌آوری آب باران زمانی می‌تواند بخشی از یک راهبرد پایدار تلقی شود که نحوه مصرف آن نیز با محدودیت منابع آب در اقلیم گرم‌و‌خشک هماهنگ باشد؛ در غیر این صورت، استفاده از همان آب برای پوشش گیاهی یا کشت پرآبر می‌تواند بخشی از فایده حاصل از راهکار اولیه را از میان ببرد.

بر این اساس، پژوهش حاضر پایداری را نه حاصل جمع تعدادی راه‌حل منفرد، بلکه نتیجه هماهنگی میان اجزای یک سامانه سکونت می‌داند. عملکرد نامناسب یک بخش می‌تواند دستاوردهای به‌دست‌آمده در بخش‌های دیگر را محدود کند. با این حال، پذیرش این پیوستگی به معنای ورود معماری به حوزه تخصصی سایر رشته‌ها نیست. سهم این پژوهش در این مجموعه، در محدوده طراحی معماری و عملکرد محیطی ساختمان تعریف می‌شود: کاهش نیازهای حرارتی، بهره‌گیری مناسب از نور و انرژی خورشیدی، سازمان فضایی و فراهم کردن شرایط کالبدی لازم برای ارتباط ساختمان با سامانه‌های مکمل. طراحی و ارزیابی تفصیلی آب، کشاورزی، پسماند، حمل‌ونقل و مدیریت بهره‌برداری نیازمند دانش و روش تخصصی هر یک از این حوزه‌هاست.

بخش اصلی آزمون‌های کمی پژوهش در دو محیط معماری انجام می‌شود. نخست، بلوک مسکونی که در آن رابطه میان هندسه، جهت‌گیری، پوسته، بازشو و سایه با بارهای حرارتی و نور روز بررسی می‌شود؛ و دوم، محفظه کشت شفاف نیمه‌مدفون از نوع والپینی که در آن اثر هندسه، تهویه، پوشش، سایه و تماس با زمین بر شرایط حرارتی و میزان نسبی انرژی خورشیدی عبوری ارزیابی می‌شود.

تراز سالانه فتوولتاییک در مقیاس بلوک و بررسی فضایی دسترسی‌های روزمره نیز به‌عنوان شواهد پشتیبان این دو بخش مورد استفاده قرار می‌گیرند. موضوعاتی مانند آب، مواد، پسماند، کشاورزی و حمل‌ونقل تنها تا جایی وارد مطالعه می‌شوند که برای تصمیم معماری محدودیت، نیاز فضایی یا نقطه اتصال ایجاد کنند. بنابراین، پژوهش حاضر در پی ارائه طرح جامع یک شهر یا اثبات عملکرد یک سامانه شهری نیست؛ بلکه می‌کوشد جایگاه تصمیم معماری را در زنجیره بزرگ‌تر پایداری روشن کند و حدودی را مشخص سازد که در آن معماری می‌تواند به‌صورت مستقیم و مستند مداخله کند.

۲-۱. بیان مسئله

شرایط اقلیمی یزد چند نیاز هم‌زمان و گاه متعارض را در برابر طراحی معماری قرار می‌دهد. تابش شدید باید در زمان و جهت نامطلوب کنترل شود، گرمای ذخیره‌شده در بنا باید امکان دفع پیدا کند و درعین‌حال، تأمین نور روز نباید قربانی کنترل حرارتی شود. شواهد اقلیمی و مطالعات انجام‌شده در ساختمان‌های مناطق گرم‌وخشک اهمیت این رابطه چندفصلی را تأیید می‌کنند (Roshan et al., ۲۰۱۹; Najafi et al., ۲۰۲۵; Ghazi et al., ۲۰۲۵). پژوهش‌های انجام‌شده در یزد نیز نشان می‌دهند که عواملی مانند جهت‌گیری، حیاط، بازشو، سایه و ویژگی‌های پوسته تنها در ارتباط با هندسه بنا، نحوه بهره‌برداری و معیار عملکرد قابل ارزیابی‌اند (Akbari et al., ۲۰۲۱; Ramezani et al., ۲۰۲۶).

ازاین‌رو، مسئله اصلی پژوهش یافتن یک «فرم بومی» آماده برای معماری معاصر نیست. مسئله آن است که چگونه می‌توان از شناخت اقلیم و آموزه‌های معماری بومی، اصولی قابل‌بررسی استخراج کرد، اثر آن‌ها را در گزینه‌های مختلف طراحی سنجید و نتایج حاصل را به راهنمایی قابل‌استفاده برای تصمیم معماری تبدیل کرد. اهمیت این مسئله زمانی آشکارتر می‌شود که بهبود یک عامل الزاماً به بهبود سایر عوامل منجر نشود. افزایش سایه می‌تواند بار سرمایش را کاهش دهد، اما ممکن است دسترسی به نور روز را محدود کند. کاهش عبور تابش در یک محفظه شفاف می‌تواند شرایط حرارتی را بهبود بخشد، اما هم‌زمان میزان انرژی خورشیدی در دسترس

را کاهش دهد. بنابراین، مسئله پژوهش نه بیشینه یا کمینه کردن یک شاخص منفرد، بلکه شناخت روابط میان عوامل و یافتن دامنه‌ای از تصمیم‌هاست که در آن نیازهای مختلف معماری به صورت هم‌زمان سنجیده شوند.

همین منطق در مقیاس بزرگ‌تر نیز برقرار است. عملکرد مناسب انرژی ساختمان، اگر با مصرف نامتناسب آب، الگوی کشت ناسازگار با اقلیم، وابستگی شدید به جابه‌جایی پرمصرف یا مدیریت نامناسب مواد و پسماند همراه باشد، نمی‌تواند به تنهایی پایداری کل مجموعه را تضمین کند. پایداری یک سامانه سکونت‌ی به هماهنگی اجزای آن وابسته است و ضعف جدی در یک بخش می‌تواند بخشی از دستاوردهای حاصل در بخش‌های دیگر را خنثی کند.

پژوهش حاضر این نگاه یکپارچه را به عنوان مبنای نظری می‌پذیرد، اما دامنه آزمون خود را آگاهانه محدود نگه می‌دارد. حوزه‌ای که مستقیماً مورد سنجش قرار می‌گیرد، طراحی معماری و عملکرد محیطی ساختمان است. سایر بخش‌ها تنها در جایی وارد پژوهش می‌شوند که برای معماری محدودیت، الزام فضایی یا نقطه ارتباط ایجاد کنند. به این ترتیب، یکپارچگی نه از طریق ادعای حل همه زیرسامانه‌ها، بلکه از طریق شناخت پیوند میان آن‌ها و تعیین دقیق حدود مسئولیت معماری دنبال می‌شود.

دو بخش اصلی پژوهش نیز از یک منطق مشترک پیروی می‌کنند. در بخش مسکن، تأثیر کنترل تابش، ویژگی‌های پوسته، سایه و بازشو بر بار حرارتی و نور روز بررسی می‌شود. در والپینی، همان اصول کلی در محیطی شفاف و با نیازهایی متفاوت آزموده می‌شوند؛ محیطی که در آن کاهش گرمای ناخواسته نباید به حذف انرژی خورشیدی موردنیاز بینجامد. شاخص‌های ارزیابی و نوع استفاده در این دو محیط متفاوت‌اند و نتایج آن‌ها قابل جمع کردن نیست، اما منطق بررسی در هر دو یکسان است: شناخت نیاز اقلیمی، تعریف عامل مؤثر، مقایسه گزینه‌ها و بازگرداندن نتیجه به تصمیم طراحی.

در مقیاس فراتر از ساختمان نیز پژوهش تنها به روابطی می‌پردازد که مستقیماً بر سازمان فضایی و تصمیم معماری اثر می‌گذارند؛ از جمله دسترسی روزمره و محل ارتباط ساختمان با منابع و سامانه‌های مکمل. طراحی و اعتبارسنجی کامل شبکه‌های شهری، نظام حمل‌ونقل یا تعیین جمعیت بهینه خارج از دامنه این پژوهش قرار دارد.

۳-۱. جایگاه پژوهش و شکاف موجود

مطالعات معماری اقلیمی ایران و یزد را می‌توان در چند مسیر مرتبط دنبال کرد. بخشی از این پژوهش‌ها، اصول و شگردهای معماری بومی مناطق گرم‌وخشک را از طریق مطالعه عناصر و سازمان فضایی بناها شناسایی

کرده‌اند. در مطالعات یزد، نقش عواملی مانند بافت متراکم، حیاط، جرم حرارتی، فضاهای زیرزمین و بادگیر در تعدیل شرایط نامطلوب اقلیمی مورد توجه قرار گرفته است (Keshtkaran, ۲۰۱۱). پژوهش‌های میدانی و شبیه‌سازی نیز از توصیف این عناصر فراتر رفته و عملکرد برخی از آن‌ها را به‌صورت کمی بررسی کرده‌اند؛ از جمله ارزیابی آسایش حرارتی در فضاهای بومی گرم‌وخشک، نقش حیاط در تعدیل خرداقلیم و تأثیر هندسه بادگیر بر جریان هوا و آسایش حرارتی (Tahbaz et al., ۲۰۱۴; Soflaei et al., ۲۰۱۶; Hosseini et al., ۲۰۱۶). بنابراین، شکاف پژوهش حاضر در نبود شناخت یا سنجش عملکرد معماری بومی تعریف نمی‌شود.

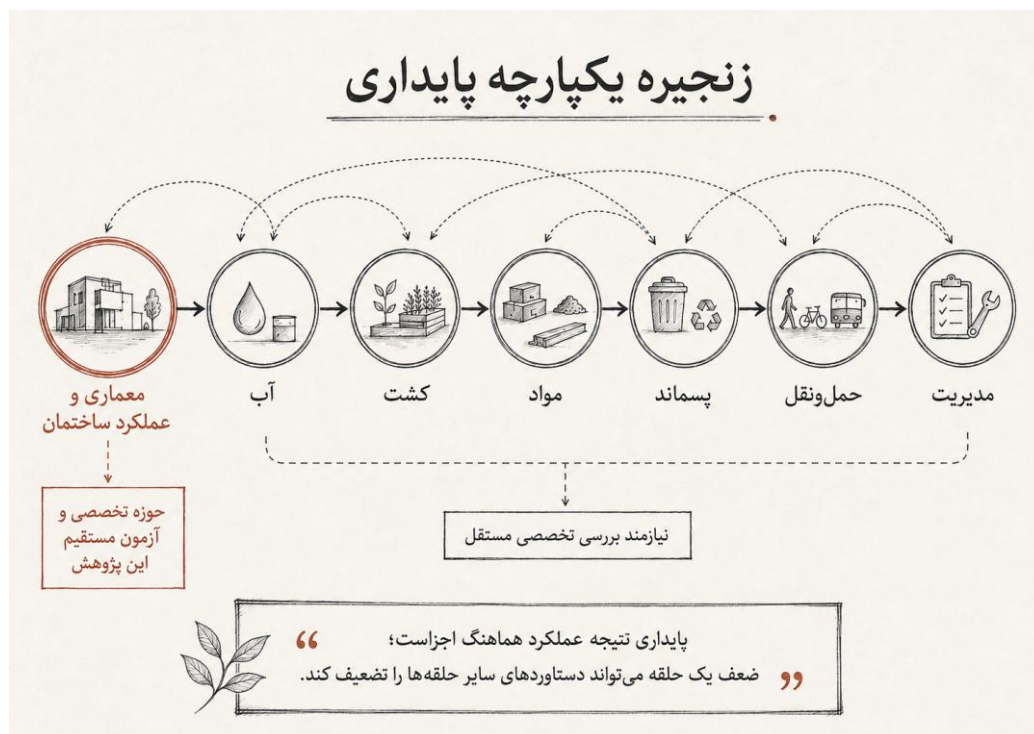
در سوی دیگر، مطالعات معاصر عملکرد ساختمان نیز رابطه میان عوامل طراحی و شاخص‌هایی مانند مصرف انرژی، نور روز و آسایش را بررسی کرده‌اند و در سال‌های اخیر روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای شناخت تعارض میان این شاخص‌ها توسعه یافته است. برای نمونه، تأثیر طراحی پنجره بر انرژی و نور روز در اقلیم گرم‌وخشک و نیز تعادل هم‌زمان میان انرژی، نور روز، آسایش حرارتی و آسایش بصری در اقلیم‌های مختلف ایران مورد بررسی قرار گرفته است (Maleki & Dehghan, ۲۰۲۱; Kangazian & Pourghanbari, ۲۰۲۴). از این‌رو، صرف استفاده هم‌زمان از چند شاخص عملکردی نیز به‌تنهایی شکاف یا نوآوری این پژوهش محسوب نمی‌شود.

آنچه همچنان نیازمند روشن‌شدن است، زنجیره تصمیم‌معماری میان این دو حوزه است: اینکه یک آموزه اقلیمی یا فضایی با چه استدلالی به عاملی قابل‌تغییر در طراحی تبدیل می‌شود؛ تغییر آن عامل در مقایسه با گزینه‌های دیگر چه اثر اصلی و چه پیامد جانبی ایجاد می‌کند؛ و نتیجه تا چه حد می‌تواند دوباره به یک اصل یا راهنمای طراحی تبدیل شود. برخی پژوهش‌ها این انتقال را برای یک عنصر یا گروه محدودی از راهکارها انجام داده‌اند؛ برای مثال، مطالعات مربوط به حیاط یا راهکارهای اقلیمی خانه‌های بومی کوشیده‌اند ویژگی‌های کالبدی مؤثر را به توصیه‌هایی برای معماری معاصر تبدیل کنند (Soflaei et al., ۲۰۱۶; Mohammadi et al., ۲۰۱۸). با این حال، همچنان نیاز به روشی وجود دارد که منشأ هر تصمیم، عامل مورد آزمون، شاخص ارزیابی، بده‌بستان حاصل و حدود اعتبار نتیجه را در یک مسیر واحد و قابل‌پیگیری ثبت کند.

شکاف موردنظر پژوهش در همین نقطه قرار دارد. پژوهش حاضر قصد ندارد کارایی معماری بومی را دوباره اثبات کند یا روش جدیدی برای بهینه‌سازی عددی ارائه دهد؛ بلکه می‌کوشد میان شناخت نیازهای اقلیمی، استخراج راهکار معماری، آزمون کمی و بازگشت نتیجه به تصمیم طراحی ارتباطی روشن برقرار کند. در این مسیر، بهبود یک شاخص به‌تنهایی مبنای انتخاب قرار نمی‌گیرد و اثرات جانبی هر تصمیم در کنار اثر اصلی آن خوانده می‌شوند.

از سوی دیگر، مسئله پایداری در مقیاس سکونتگاه با مجموعه‌ای از حوزه‌های مرتبط با انرژی، آب، حمل‌ونقل، مواد، پسماند، غذا و مدیریت مواجه است. مسئله تنها عملکرد هر جزء نیست، بلکه نحوه هماهنگی میان اجزاست. بهبود یک بخش الزاماً به معنای بهبود کل نیست و تصمیم‌های ناسازگار در یک حوزه می‌توانند دستاوردهای حاصل در حوزه‌ای دیگر را کاهش دهند.

بر همین اساس، پژوهش حاضر میان «نگاه یکپارچه به پایداری» و «دامنه تخصصی ارزیابی» تمایز قائل می‌شود. کل زنجیره پایداری به عنوان زمینه تصمیم شناخته می‌شود، اما تنها بخشی که در حوزه معماری و عملکرد ساختمان قرار دارد به صورت تفصیلی و کمی مورد آزمون قرار می‌گیرد. سایر حوزه‌ها تا جایی وارد مطالعه می‌شوند که برای معماری پیش شرط فضایی، محدودیت یا نقطه ارتباط ایجاد کنند و طراحی و اعتبارسنجی تخصصی آن‌ها به دانش و روش متخصصان همان حوزه نیاز دارد. شکل ۱-۳ جایگاه حوزه معماری و مرز بررسی تخصصی سایر حلقه‌های پایداری را روشن می‌کند.



شکل ۱-۳. جایگاه معماری و عملکرد ساختمان در زنجیره یکپارچه پایداری و مرز آن با حوزه‌های نیازمند ارزیابی تخصصی مستقل.

۴-۱. هدف پژوهش

هدف اصلی پژوهش، تدوین و آزمون روشی برای تبدیل شناخت اقلیمی و برخی آموزه‌های معماری بومی یزد به راهکارهای قابل بررسی در فرایند طراحی و ارزیابی تأثیر آن‌ها بر عملکرد حرارتی، نور روز و بهره‌گیری از انرژی خورشیدی است.

این روش می‌کوشد ارتباط میان نیاز اقلیمی، عامل کالبدی، پیامد عملکردی و تصمیم معماری را به گونه‌ای روشن کند که نتایج حاصل از شبیه‌سازی بتوانند به انتخاب آگاهانه‌تر میان گزینه‌های طراحی منجر شوند.

در سطحی گسترده‌تر، پژوهش جایگاه ساختمان را در زنجیره‌ای از تصمیم‌های مرتبط با پایداری بررسی می‌کند و تلاش دارد روابطی را مشخص کند که از طریق آن‌ها معماری بتواند، بدون ورود به طراحی تخصصی سایر حوزه‌ها، امکان ارتباط آینده با سامانه‌های آب، انرژی، حرکت، مواد، کشت و پسماند را فراهم سازد.

اهداف فرعی پژوهش عبارت‌اند از:

- استخراج اصول و شگردهای قابل انتقال از معماری بومی و مطالعات معاصر یزد، بدون تقلید صوری از فرم‌های تاریخی؛
- بررسی تأثیر هندسه، جهت‌گیری، پوسته، بازشو و سایه بر رابطه میان بارهای حرارتی و نور روز در بلوک مسکونی؛
- بررسی تأثیر نیمه‌مدفون بودن، تهویه، پوشش و سایه بر شرایط حرارتی و انرژی خورشیدی عبوری در محفظه گلخانه؛
- شناسایی بده‌بستان میان معیارهای عملکردی و پرهیز از انتخاب گزینه‌ها بر پایه یک شاخص منفرد؛
- تبدیل نتایج کمی به قواعد طراحی که علاوه بر اثر اصلی، پیامد جانبی، شرایط کاربرد و حدود اعتبار آن‌ها را نیز مشخص کنند؛
- تبیین جایگاه ساختمان و تصمیم معماری در زنجیره بزرگ‌تر پایداری، به گونه‌ای که ارتباط آن با انرژی، آب، حرکت، مواد، کشت و پسماند شناخته شود؛
- تعیین الزامات فضایی و نقاط ارتباطی لازم برای توسعه هماهنگ سامانه‌های تخصصی در مراحل بعدی؛
- تعیین حدودی که در آن معماری می‌تواند پیش‌شرط‌های فضایی این سامانه‌ها را تعریف کند، بدون آنکه جایگزین طراحی تخصصی آن‌ها شود.

۱-۵. پرسش‌های پژوهش

پرسش اصلی

چگونه می‌توان شناخت اقلیمی و آموزه‌های فضایی معماری یزد را به راهکارهای قابل‌آزمون در طراحی معماری تبدیل کرد و بر پایه ارزیابی کمی، قواعدی برای انتخاب آگاهانه میان گزینه‌های طراحی به دست آورد؟

پرسش‌های فرعی

- کدام سازوکارهای اقلیمی و فضایی معماری بومی و معاصر یزد را می‌توان به عوامل قابل‌بررسی در هندسه، پوسته، بازشو، سایه و ارتباط بنا با زمین تبدیل کرد؟
- تغییر این عوامل در بخش مسکن چه تأثیری بر بار سرمایش، بار گرمایش و شاخص‌های نور روز شامل روشنایی مفید نور روز (UDI)، خودمختاری نور روز (DA) و خودمختاری پیوسته نور روز (CDA) دارد؟
- نیمه‌مدفون بودن، تهویه طبیعی، نوع پوشش و سایه چه اثری بر دمای ساعتی، نوسان حرارتی، بار نظری و شاخص نسبی انرژی خورشیدی عبوری (DLI_{eq}) در والپینی دارند؟
- چگونه می‌توان اثرات مطلوب و پیامدهای جانبی تصمیم‌های طراحی را به‌صورت هم‌زمان ارزیابی کرد و از انتخاب تک‌معیاره پرهیز نمود؟
- چگونه می‌توان نتایج دو بخش پژوهش را در سطح اصول اقلیمی و تصمیم معماری با یکدیگر مرتبط کرد، بدون آنکه شاخص‌های متفاوت آن‌ها با یکدیگر خلط شوند؟
- چگونه می‌توان تصمیم معماری را به‌عنوان بخشی از یک نظام به‌هم‌پیوسته پایداری تعریف کرد، به‌گونه‌ای که ارتباط آن با آب، انرژی، حرکت، مواد، کشت و پسماند حفظ شود، بدون آنکه عملکرد تخصصی این سامانه‌ها در حوزه معماری ادعا شود؟
- تا چه حد می‌توان روابط دسترسی و نقاط اتصال منابع را به‌عنوان پیش‌شرط فضایی معماری تعریف کرد، بدون آنکه عملکرد یک شبکه شهری یا جمعیت بهینه ادعا شود؟

۱-۶. نوآوری و سهم پژوهش

سهم اصلی پژوهش در ارائه یک فرم جدید، تعداد زیاد شبیه‌سازی‌ها یا به‌کارگیری یک الگوریتم بهینه‌سازی خلاصه نمی‌شود؛ بلکه در نحوه تبدیل شناخت اقلیمی به تصمیم معماری قابل‌آزمون و سپس بازگرداندن نتایج ارزیابی به قواعد طراحی قرار دارد.

نخست، پژوهش میان «عنصر بومی» و «اصل قابل انتقال» تمایز قائل می‌شود. حیاط، سایه، جرم حرارتی، بازشو یا ارتباط با زمین به سبب شکل تاریخی خود وارد طراحی نمی‌شوند؛ بلکه ابتدا نقش اقلیمی و فضایی آن‌ها شناخته می‌شود و سپس تنها سازوکارهایی که دارای تعریف روشن و امکان آزمون هستند به پرسش و عامل طراحی تبدیل می‌شوند. به این ترتیب، ارتباط با معماری بومی بر پایه شناخت و بازخوانی عملکرد آن شکل می‌گیرد، نه تقلید صوری.

دوم، هر تصمیم نه فقط بر اساس اثر مطلوب، بلکه همراه با پیامدهای جانبی آن ارزیابی می‌شود. در بخش مسکن، کاهش نیاز به سرمایش در کنار تغییر بار گرمایش و دسترسی به نور روز خوانده می‌شود؛ در محفظه والپینی نیز کاهش دمای نامطلوب در کنار تغییر انرژی خورشیدی عبوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. بنابراین، خروجی پژوهش «بهترین گزینه» بر اساس یک معیار منفرد نیست، بلکه شناخت شرایطی است که در آن یک راهکار سودمند، نامطلوب یا وابسته به مصالحه میان چند نیاز می‌شود.

سوم، نتایج کمی به گزارش شبیه‌سازی محدود نمی‌شوند. برای هر نتیجه تلاش می‌شود رابطه میان نیاز اقلیمی، عامل معماری، اثر مشاهده‌شده، پیامد جانبی و شرایط کاربرد مشخص شود. حاصل این فرایند مجموعه‌ای از قواعد طراحی است که علاوه بر جهت اثر، حدود اعتبار و شرایط استفاده از آن را نیز بیان می‌کند.

چهارم، پژوهش پایداری را حاصل جمع تعدادی راهکار منفرد نمی‌داند، بلکه آن را وابسته به هماهنگی میان تصمیم‌های مختلف محیط ساخته‌شده می‌خواند. بر این اساس، عملکرد انرژی ساختمان در جدایی از الگوی مصرف آب، شیوه حرکت، تولید و مصرف مواد، کشت و مدیریت پسماند تصویری کامل از پایداری ارائه نمی‌کند. سهم پژوهش در این مجموعه، شناخت و آزمون بخش معماری این زنجیره و روشن کردن نقاط ارتباط آن با سایر حوزه‌هاست.

در این نگاه، یکپارچگی به معنای انجام تحلیل تخصصی همه سامانه‌ها نیست، بلکه به معنای پرهیز از تصمیم‌گیری جزیره‌ای و فراهم کردن زمینه‌ای است که تصمیم‌های معماری بتوانند با تحلیل‌های تخصصی بعدی هماهنگ شوند. طراحی سامانه آب، حرکت و حمل‌ونقل، نظام کشت، پسماند و مدیریت بهره‌برداری نیز باید بر پایه دانش تخصصی همان حوزه‌ها انجام شود.

پنجم، پژوهش میان سطوح مختلف شواهد تمایز برقرار می‌کند. عملکرد حرارتی و نور روز در بلوک مسکونی و شرایط حرارتی و دریافت نسبی انرژی خورشیدی در والپینی، هسته اصلی آزمون‌اند. تراز سالانه فتوولتاییک و دسترسی‌های روزمره نقش پشتیبان دارند و موضوعاتی مانند آب، مواد، کشت و حمل‌ونقل تنها تا سطح الزامات

فضایی و ارتباط آن‌ها با معماری وارد مطالعه می‌شوند. این تفکیک امکان می‌دهد هر نتیجه تنها در محدوده‌ای که واقعاً بررسی شده است تفسیر و تعمیم داده شود.

دامنه آزمون این روش در بخش مسکن شامل ۹۳ سناریوی کامل، همراه با یک مرحله محدود جست‌وجوی پارامتریک تکمیلی است. علاوه بر مسیر اصلی تیپ R۳، یعنی گزینه نماینده منتخب برای ادامه تحلیل تفصیلی، یک تیپ مستقل با حیاط خصوصی طبقه‌ای نیز برای بررسی محدودیت‌های جهت‌گیری و حریم مطالعه شده است. در بخش والپینی، ۱۶ اجرای اصلی سالانه و آزمون‌های حساسیت برای بررسی اثر نیمه‌مدفون بودن، تهویه، پوشش، سایه و شرایط حرارتی خاک انجام شده‌اند. این تعداد، دامنه بررسی و امکان بازآزمایی نتایج را نشان می‌دهد، اما به‌خودی‌خود نوآوری پژوهش محسوب نمی‌شود.

در مجموع، سهم پژوهش را می‌توان در ایجاد مسیری قابل‌پیگیری از شناخت اقلیم و معماری بومی تا سنجش، مقایسه و انتخاب آگاهانه راهکارهای معماری دانست؛ مسیری که در آن اثر مطلوب، پیامد جانبی و حدود کاربرد هر تصمیم در کنار یکدیگر دیده می‌شوند، ارتباط ساختمان با زنجیره بزرگ‌تر پایداری فراموش نمی‌شود و مرز میان نتیجه معماری و حوزه‌های نیازمند بررسی تخصصی دیگر نیز حفظ می‌گردد.

۷-۱. دامنه و تعریف عملیاتی پژوهش

در این رساله، «الگو» به معنای یک فرم ثابت یا نمونه قابل تکرار نیست، بلکه به فرایندی برای تصمیم‌گیری معماری همساز با اقلیم اشاره دارد. در این فرایند، نیازهای اقلیمی و سازوکارهای مؤثر بر تابش، انتقال و ذخیره حرارت، تبادل هوا و روابط فضایی شناسایی و سپس به عوامل قابل آزمون در طراحی تبدیل می‌شوند.

پژوهش از نظر مفهومی، محیط سکونت را سامانه‌ای متشکل از اجزای به‌هم‌پیوسته می‌داند. انرژی، آب، مواد، حرکت، تولید غذا، پسماند و مدیریت بهره‌برداری در عمل بر یکدیگر اثر می‌گذارند و بهبود یک جزء، در صورت ناسازگاری اجزای دیگر، الزاماً به بهبود عملکرد کل منجر نمی‌شود. این اصل، مبنای نگاه یکپارچه پژوهش به پایداری است.

با این حال، دامنه اعتبارسنجی رساله محدود به حوزه‌هایی است که مستقیماً در قلمرو طراحی معماری و عملکرد ساختمان قرار دارند. بخش اصلی آزمون‌های کمی به دو محیط معماری اختصاص دارد: بلوک مسکونی و محفظه کشت نیمه‌مدفون. در بخش مسکن، بارهای حرارتی و نور روز معیارهای اصلی ارزیابی‌اند. در بخش والپینی، شرایط حرارتی، بار نظری و شاخص نسبی انرژی خورشیدی عبوری بررسی می‌شوند. تراز سالانه فتوولتاییک در مرز بلوک نیز به‌عنوان شاهد کمی پشتیبان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ارتباط پژوهش با مقیاس فراتر از ساختمان در سطح پیش‌شرط‌های فضایی تعریف می‌شود. دسترسی روزمره، سازمان حرکت کم‌خودرو و امکان ارتباط ساختمان با سامانه‌های مکمل باید از نظر فضایی امکان‌پذیر باشند؛ باین‌حال، عملکرد کامل محله یا شهر و طراحی تخصصی شبکه‌های حمل‌ونقل، آب، پسماند و کشاورزی در این پژوهش شبیه‌سازی یا اعتبارسنجی نمی‌شوند.

موضوعات آب، کشاورزی، مواد، پسماند، حمل‌ونقل و مدیریت در این پژوهش به‌عنوان اجزای ضروری یک سامانه پایدار شناخته می‌شوند، اما طراحی و ارزیابی تخصصی آن‌ها در دامنه پژوهش حاضر قرار ندارد. نقش معماری در این سطح، پیش‌بینی نیازهای فضایی، روابط کالبدی، مسیرهای ارتباط و داده‌هایی است که امکان ورود متخصصان هر حوزه و توسعه هماهنگ این سامانه‌ها را فراهم می‌کند.

بنابراین، محدودکردن آزمون کمی به ساختمان به معنای مستقل دانستن آن از سایر اجزای پایداری نیست، بلکه بیانگر مرز تخصص و سطح شواهد این رساله است. همچنین، اعداد وابسته به یک فرض خاص جمعیتی یا یک سناریوی شهری مشخص، یافته قابل‌تعمیم پژوهش محسوب نمی‌شوند و مبنای انتخاب فرم معماری قرار نمی‌گیرند.

۱-۷-۱. سطوح کاربرد و توسعه پژوهش

برای روشن‌شدن حدود کاربرد نتایج، پژوهش در سه سطح سازمان می‌یابد.

در سطح نخست، شرایط و نیازهای اقلیمی و سازوکارهای فیزیکی مؤثر بر طراحی شناسایی می‌شوند. محصول این سطح، مجموعه‌ای از معیارها و اصولی است که مبنای شکل‌گیری پرسش‌های طراحی قرار می‌گیرند. در سطح دوم، این اصول در دو مؤلفه معماری پژوهش با شاخص‌های متناسب آزموده می‌شوند. محصول این سطح، شناخت اثر عوامل کالبدی و روابط میان معیارهای حرارتی، نوری و انرژی است.

در سطح سوم، الزامات و محدودیت‌هایی مشخص می‌شوند که برای ادامه تحلیل در مقیاس بلوک یا در سامانه‌های تخصصی موردنیازند. این سطح نتیجه‌ای درباره عملکرد کامل محله یا شهر ارائه نمی‌کند، بلکه حدود مداخله معماری و مسیر لازم برای توسعه بعدی پژوهش را مشخص می‌سازد. این سطوح و محصولات آن‌ها در جدول ۱-۱ جمع‌بندی شده‌اند.

جدول ۱-۱. سطوح کاربرد چارچوب و محصول هر سطح

سطح	نقش در الگو	محصول پژوهش
راهبرد اقلیمی	تعریف تنش‌های گرما، تابش و نوسان و زبان مشترک سازوکارها	معیار و قاعده تصمیم‌گیری قابل تکرار
مؤلفه معماری	آزمون کمی بلوک مسکونی و محفظه کشت نیمه‌مدفون	بسته‌های پارامتریک انرژی-نور روز و حرارت-
لایه پشتیبان فضایی و منابع	کنترل محدود دسترسی در مرز PV روزمره، تراز بلوک و تعریف نقاط اتصال معماری با آب، مواد، کشت و بهره‌برداری	شواهد پشتیبان و الزامات فضایی با حد اعتبار مشخص؛ بدون ادعای عملکرد کامل شهر یا طراحی تخصصی زیرسامانه‌ها

۲-۷-۱. مفاهیم کلیدی پژوهش

برای جلوگیری از ابهام در فصل‌های بعد، اصطلاحات اصلی پژوهش بر اساس نحوه استفاده آن‌ها در این رساله تعریف می‌شوند. این تعاریف جایگزین تعاریف‌های عمومی یا تخصصی مفاهیم نیستند، بلکه حدود کاربرد آن‌ها را در پژوهش حاضر مشخص می‌کنند. تعاریف عملیاتی مورد استفاده در این رساله در جدول ۲-۱ آمده است.

جدول ۲-۱. تعریف عملیاتی مفاهیم کلیدی پژوهش

اصطلاح	تعریف عملیاتی
یزد / اقلیم گرم‌وخشک	شهری در پهنه گرم‌وخشک مرکزی ایران با بارش اندک، تابش شدید و نوسان دمای شبانه‌روزی بالا؛ زمینه اقلیمی اصلی برای آزمون الگوی این رساله (بخش ۲-۲).
خرانق	روستایی تاریخی در نزدیکی یزد با بافتی متراکم، خشتی و درون‌گرا؛ در این رساله مرجعی برای فهم رابطه فشردگی، همجواری و سازمان فضایی در شرایط اقلیم سخت است (بخش ۲-۴-۳).
والپینی (Walipini)	گلخانه‌ای نیمه‌مدفون که بخشی از پوسته آن با خاک تماس دارد؛ در این رساله واحد مکمل مسکن برای آزمون راهبردهای غیرفعال گرمایش و سرمایش است (بخش ۲-۹ و فصل پنجم).
DLI_eq	شاخص نسبی انرژی خورشیدی عبوری روزانه
الگوی اقلیم‌پاسخ	چارچوبی برای تصمیم‌گیری معماری که سازوکارهای تابش، هدایت، ذخیره حرارت و تبادل هوا را به متغیر، سناریو و قاعده طراحی تبدیل می‌کند (بخش ۱-۷).

اصطلاح	تعریف عملیاتی
بار حرارتی نظری (Ideal Loads)	برآورد بار گرمایش/سرمایش بر پایه شرایط آسایش فرضی؛ معادل مصرف واقعی نهایی تجهیزات یا سامانه مکانیکی نیست (بخش ۱-۷).
سناریوی فضایی آزمون	آرایش فضایی پروژه برای کنترل روابط دسترسی و اتصال اجزای معماری؛ نه مسترپلان اجرایی، نه جمعیت بهینه و نه مدل اعتبارسنجی شده عملکرد شهری

۸-۱. ساختار کلی پژوهش

پژوهش از شناخت زمینه اقلیمی و معماری بومی آغاز می‌شود و سپس به استخراج اصول و عوامل قابل آزمون می‌رسد. در ادامه، این عوامل در دو بخش اصلی مسکن و والپینی با استفاده از شبیه‌سازی و مقایسه سناریوها ارزیابی می‌شوند. نتایج هر بخش نه تنها بر اساس مقدار تغییر شاخص‌ها، بلکه از نظر پیامدهای جانبی و تعارض میان معیارها نیز تحلیل می‌شوند. مسیر عملیاتی این مراحل و خروجی هرکدام در جدول ۱-۳ جمع‌بندی شده است.

جدول ۱-۳. مسیر عملیاتی پژوهش از مرور شواهد تا سنتز تصمیم‌های طراحی

مرحله	عمل اصلی	خروجی
مرور تصمیم‌محور	اقلیم، شواهد یزد، منطق بومی و معیارهای دو مازول	ماتریس تصمیم
روش و منشأ	ثبت ورودی، سناریو، فایل و شاخص	جدول ثبت ورودی‌ها و نتایج همگام
مسکن	غربال فرم تا تنظیم بازشو	بده‌بستان انرژی-نور
محفظه	هندسه، تهویه، پوشش، سایه و بار نظری	بده‌بستان حرارت-DLI_eq
سنتز	مقایسه جهت اثر سازوکارها	قواعد طراحی و شرایط کاربرد

در مرحله بعد، نتایج کمی به قواعد طراحی بازخوانی می‌شوند و حدود کاربرد و تعمیم آن‌ها مشخص می‌گردد. شواهد پشتیبان در زمینه فتوولتاییک، دسترسی و ارتباط با منابع نیز در سطحی متناسب با دامنه پژوهش به این نتایج افزوده می‌شوند. فرایند کلی این زنجیره در شکل ۱-۴ خلاصه شده است.



شکل ۱-۴. فرایند کلی پژوهش از شناخت اقلیم و استخراج عوامل تا شبیه سازی، تحلیل بدهستان ها و تصمیم گیری معماری.

در نهایت، پژوهش معماری را یکی از حلقه های زنجیره بزرگ تر تصمیم های مرتبط با پایداری می داند. کیفیت عملکرد کل مجموعه تنها با بهینه سازی یک ساختمان یا افزودن یک فناوری تضمین نمی شود و لازم است تصمیم های مربوط به انرژی، آب، حرکت، مواد، کشت، پسماند و بهره برداری در ادامه، با مشارکت حوزه های تخصصی مربوط، با یکدیگر هماهنگ شوند.

نقش این پژوهش، شناخت و تقویت حلقه معماری این زنجیره و روشن کردن نحوه ارتباط آن با حلقه های دیگر است. از این رو، حاصل رساله نه طرحی جامع برای یک سکونتگاه پایدار و نه مجموعه ای از راه حل های مستقل، بلکه روشی برای تصمیم گیری معماری است که ساختمان را در ارتباط با اقلیم و سامانه بزرگ تر محیط ساخته شده می بیند و درعین حال، حدود دانش و مسئولیت معماری را از حوزه هایی که نیازمند ارزیابی تخصصی مستقل اند، جدا نگه می دارد.

فصل دوم: مبانی نظری و مرور ادبیات با تمرکز بر تصمیم طراحی

از مسئله اقلیمی یزد تا معیارهای ارزیابی مسکن و والپینی

این فصل منابع را در سه مسیر دنبال می‌کند: تعریف مسئله اقلیمی، خوانش منطق معماری و ساخت معیار ارزیابی. جایگاه هر منبع بر اساس نقشی تعیین می‌شود که در تعریف یک پرسش طراحی، متغیر، سناریو یا شاخص دارد.

دستآورد فصل

یک ماتریس ردیابی‌پذیر که نشان می‌دهد هر بخش از ادبیات کدام تصمیم فصل روش، مسکن یا والپینی را پشتیبانی می‌کند.

مرور از یزد و معماری بومی آن آغاز می‌شود، اما هدف بازسازی صوری عناصر تاریخی نیست. ابتدا کیفیت‌های فضایی و اقلیمی مرتبط با حیاط، سایه، جرم، بازشو و تبادل هوا خوانده می‌شوند؛ سپس فقط بخش‌هایی که تعریف فیزیکی و شاهد کافی دارند به متغیر قابل‌آزمون ترجمه می‌شوند. به این ترتیب، روایت معماری پیش از عدد قرار می‌گیرد و شبیه‌سازی نقش آزمون فرض‌های طراحی را بر عهده می‌گیرد.

۲-۱. نقش فصل و ساختار مرور ادبیات

پژوهش حاضر دو محیط معماری با نیازهای متفاوت را بررسی می‌کند: سکونت، با تمرکز بر پاسخ‌گویی بنا به شرایط اقلیمی؛ و گلخانه نیمه‌مدفون، با تمرکز بر تعادل میان شرایط حرارتی و دریافت نور. از این رو، مرور منابع نیز به جای گردآوری موضوعات پراکنده، بر اساس مسیری تنظیم شده است که مستقیماً به تصمیم‌های طراحی و ارزیابی آن‌ها در پژوهش منتهی می‌شود. ابتدا ویژگی‌های اقلیمی یزد و شواهد مربوط به عملکرد ساختمان در این شرایط بررسی می‌شوند تا نیازهای اصلی طراحی روشن شوند. سپس معماری بومی و نمونه‌های معاصر با هدف شناخت اصول و شگردهایی مطالعه می‌شوند که امکان بازخوانی و آزمون در طراحی امروز را دارند. در ادامه، این اصول به عوامل قابل‌بررسی و شاخص‌های متناسب با دو بخش مسکن و محفظه کشت پیوند می‌یابند.

در این ساختار، نوع و اعتبار شواهد نیز از یکدیگر تفکیک می‌شود؛ زیرا داده‌های اقلیمی، اندازه‌گیری میدانی، شبیه‌سازی، استانداردها، مطالعات مروری و نمونه‌های موردی نقش یکسانی در استدلال پژوهش ندارند. اهمیت هر منبع به این بستگی دارد که چه بخشی از مسیر شناخت تا تصمیم معماری را پشتیبانی می‌کند. برای مثال، مطالعه حیاط مرکزی زمانی مستقیماً با مسئله پژوهش ارتباط پیدا می‌کند که بتوان رابطه هندسه آن را با سایه،

دریافت تابش یا رفتار حرارتی ساختمان توضیح داد. به همین ترتیب، مطالعات مربوط به گلخانه زمانی برای این پژوهش اهمیت می‌یابند که نشان دهند تغییر پوشش، تهویه یا سایه چگونه بر شرایط حرارتی و میزان نور در دسترس اثر می‌گذارد. این منطق سازمان‌دهی منابع در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲. ساختار مرور ادبیات و پیوند شواهد با تصمیم‌های طراحی.

جدول ۱-۲. ساختار مرور ادبیات و نقش هر بلوک در تصمیم طراحی

بلوک	پرسش راهنما	خروجی برای پژوهش
تعریف مسئله	چرا یزد و چرا دو ماژول مسکن و گلخانه؟	اولویت‌های اقلیمی و معیارهای خطر
منطق طراحی	کدام سازوکارها قابلیت ترجمه و آزمون دارند؟	متغیرهای هندسه، پوسته، جرم، هوا و زمین
معیار ارزیابی	عملکرد هر ماژول با چه شاخصی ارزیابی می‌شود؟	انرژی-نور روز برای مسکن؛ حرارت-DLI_eq برای والپینی
اتصال	دو ماژول چگونه بدون اتصال تصنعی کنار هم قرار می‌گیرند؟	روش مشترک و شاخص‌های متفاوت

۱-۲. منطق گزینش و سلسله‌مراتب شواهد

جست‌وجوی هر محور با منابع فارسی، مطالعات یزد و پژوهش‌های اقلیم گرم‌وخشک ایران آغاز شد. منابع بین‌المللی نیز برای تکمیل خلأهای روش یا سازوکار بررسی شدند. این اولویت جغرافیایی فقط به ترتیب جست‌وجو مربوط بود و در گزینش نهایی، کیفیت روش بر زبان منبع تقدم داشت. منابع اصلی باید روش

اندازه‌گیری یا مدل‌سازی را روشن بیان می‌کردند، مقیاس مکانی و زمانی مشخصی داشتند و در مجله نمایه‌شده یا نشریه علمی معتبر منتشر شده بودند. منابع ضعیف‌تر فقط برای زمینه تاریخی، تعریف اصطلاح یا طرح پرسش به کار رفتند.

مرور ادبیات به صورت روایتی و با تمرکز بر تصمیم‌های طراحی انجام شد. کشف اولیه منابع با Google Scholar و Crossref و کنترل نهایی با صفحه ناشر، DOI و، در موارد دارای دسترسی، متن کامل انجام گرفت؛ آخرین کنترل منابع در آگوست ۲۰۲۶ بود. رشته‌های جست‌وجو واژه فارسی «یزد» و ترکیب‌های انگلیسی Yazd, hot-arid, climate-responsive housing, courtyard, sabat, windcatcher, semi-buried greenhouse, Walipini, greenhouse cooling, natural ventilation, shading, DLI و building-integrated agriculture را پوشش دادند. رکوردهای تکراری با DOI یا عنوان حذف شدند و منابع بر اساس ارتباط مستقیم با مسئله، متغیر، سناریو یا شاخص پژوهش غربال شدند. این فرایند برای ساخت یک مرور نظام‌مند آماری طراحی نشده است؛ هدف آن گردآوری شواهدی است که بتوان نقش و دامنه کاربردهای پژوهش‌های طراحی روشن کرد.

- شاهد مستقیم: داده یا مدل متعلق به یزد یا نمونه بسیار نزدیک، با روش روشن؛ مبنای اصلی صورت‌بندی و مقایسه.
- شاهد هم‌اقلیم: مطالعه معتبر در اقلیم گرم‌وخشک که جهت سازوکار را پشتیبانی می‌کند، بدون انتقال خودکار مقدار عددی.
- شاهد روش‌شناختی: منبعی که کیفیت مدل‌سازی، اعتبارسنجی یا تعریف شاخص را تقویت می‌کند.
- شاهد زمینه‌ای: نمونه یا استاندارد که مرز سیستم، نقش بازیگران یا پیامد اجرایی را آشکار می‌کند.

قاعده حل اختلاف

در اختلاف میان منابع معتبر، ابتدا نزدیکی مکانی و اقلیمی، سپس کیفیت و گستره داده و بعد تازگی منبع ملاک قرار گرفت. اگر اختلاف ناشی از تعریف یا دوره متفاوت بود، هر مقدار در نقش درست خود نگه داشته شد؛ همانند جداسازی بارش بلندمدت یزد از مجموع بارش فایل TMYx.

۲-۲. یزد به عنوان زمینه مسئله اقلیمی

یزد برای این پژوهش فقط یک مکان جغرافیایی نیست؛ زمینه‌ای است که در آن شدت تابش، دامنه دمای شبانه‌روزی و محدودیت آب مستقیماً بر شکل‌گیری فضا و پوسته اثر می‌گذارند. در بافت تاریخی، حیاط، فضاهای نیمه‌باز، گذرهای سایه‌دار، جرم دیوار و فضاهای زیرسطحی در کنار یکدیگر رابطه ساختمان با خورشید، سایه و

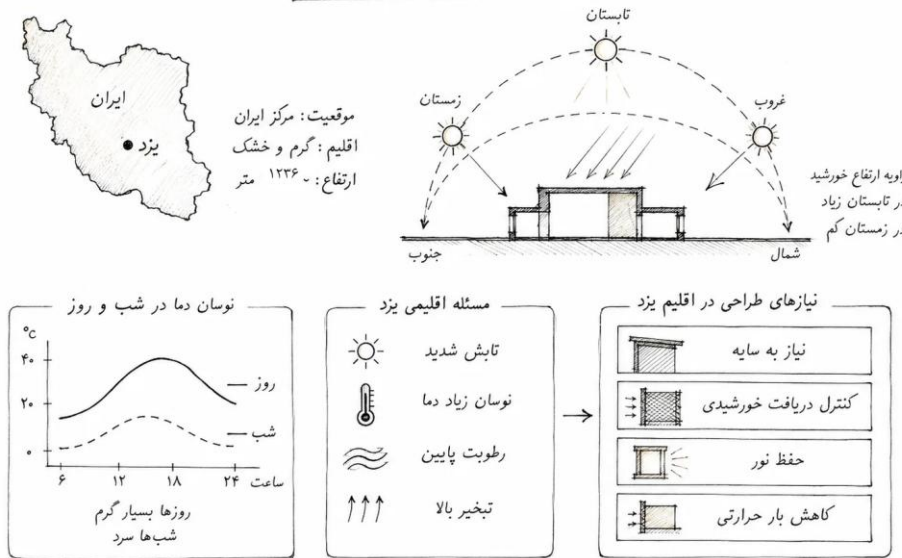
تبادل حرارت را سازمان می‌دهند. این فصل ابتدا این روابط را در سطح معماری می‌خواند و سپس بخش قابل‌اندازه‌گیری آن‌ها را با شواهد اقلیمی و عملکردی بررسی می‌کند.

برای خواندن اقلیم یزد، تجربه فضایی و داده عددی باید کنار هم قرار گیرند. پیوستگی سایه در مسیر حرکت، کنترل سطح در معرض تابش و استفاده از جرم و فضاها میانی، پرسش‌هایی معماری درباره دریافت و دفع گرما ایجاد می‌کنند؛ داده‌های اقلیمی و مطالعات عملکردی مشخص می‌کنند کدام‌یک از این پرسش‌ها در مدل حاضر قابلیت آزمون دارند. از این‌رو، توصیف فضایی در این بخش جایگزین شاهد کمی نیست، بلکه مقدمه‌ای برای تعریف متغیرهای فصل‌های بعد است.

یزد در پهنه گرم‌وخشک مرکزی ایران قرار دارد؛ بارش اندک، تبخیر بسیار بالا، تابش شدید و دامنه محسوس دمای شبانه‌روزی، محیطی می‌سازند که در آن دریافت خورشیدی، ذخیره حرارت و دفع گرمای انباشته هم‌زمان اهمیت دارند. یک مطالعه اقلیمی در استان یزد (Mesbahzadeh et al., 2020) برای ایستگاه سینوپتیک منتخب استان در دوره توصیفی ۱۹۵۴-۲۰۱۶ میانگین دمای سالانه ۱۹/۵۸ درجه سلسیوس و بارش ۵۷ میلی‌متر را گزارش کرده است؛ تحلیل روزانه همان مطالعه دوره ۱۹۶۱-۲۰۱۶ را پوشش می‌دهد. مطالعه‌ای درباره زمینه شهری یزد (Mansourmoghaddam et al., 2024) نیز مقادیر حدود ۲۲ درجه و ۵۷/۸ میلی‌متر را آورده است. تفاوت این مقادیر به دوره، مقیاس و نقش داده مربوط است؛ از این‌رو در این پژوهش برای شبیه‌سازی از فایل ساعتی TMYx واحد استفاده می‌شود و آمار بلندمدت فقط زمینه اقلیمی را توصیف می‌کند، نه تراز آب یا سطح گلخانه.

فایل هواشناسی مورد استفاده در شبیه‌سازی پژوهش، TMYx ایستگاه فرودگاه بین‌المللی شهید صدوقی یزد با شناسه سازمان جهانی هواشناسی (WMO)=۴۰۸۲۱۰ است که از پایگاه Climate.OneBuilding تهیه شده و از ماه‌های نمونه دوره ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳ تشکیل شده است. سربرگ فایل، منبع داده را NCEI ISD/ERA5 و مجموع بارش سال ترکیبی را ۶۱/۶ میلی‌متر ثبت می‌کند. اختلاف این مقدار با دامنه بلندمدت خطا محسوب نمی‌شود؛ زیرا TMYx میانگین ساده چندساله نیست و برای نمایندگی شرایط معمول در شبیه‌سازی انرژی ساخته می‌شود. بنابراین عدد ۶۱/۶ میلی‌متر فقط مشخصه ورودی شبیه‌سازی است و توصیف اقلیم بلندمدت همچنان بر دامنه مطالعات آماری تکیه دارد. (بخش (شکل ۲-۳؛ جدول ۲-۲

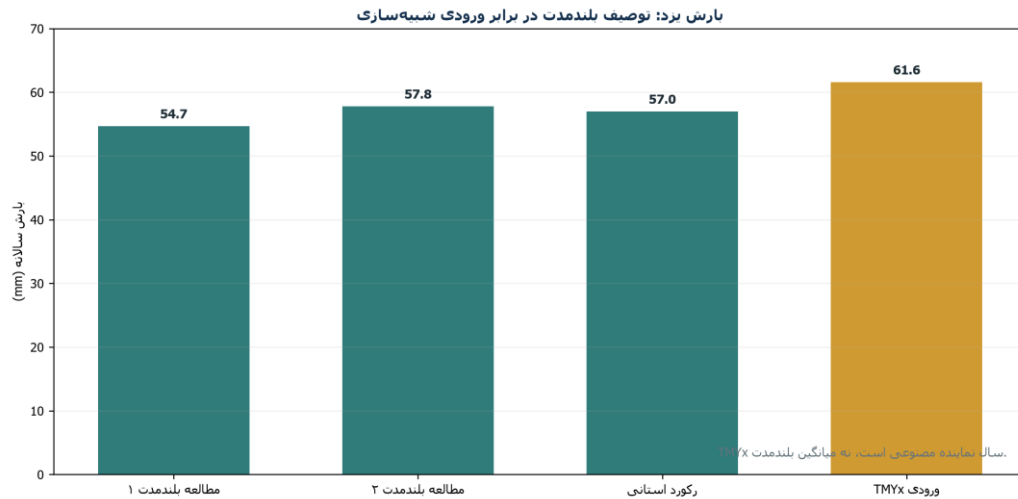
اقلیم یزد و مسئله طراحی



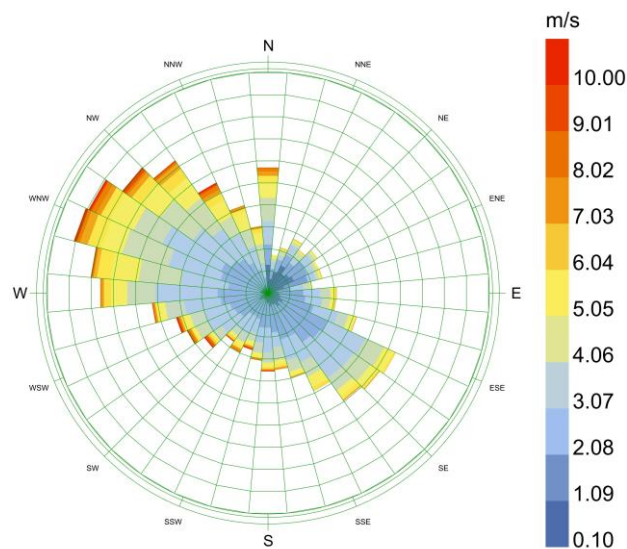
← شرایط اقلیمی یزد (تابش شدید، نوسان زیاد دما، رطوبت پایین و تبخیر بالا) مستقیماً بر تصمیم‌های طراحی اثر می‌گذارد.

شکل ۲-۲. اقلیم یزد و چارچوب نیازهای طراحی: زاویه تابش خورشید در تابستان و زمستان، نوسان دمای روز و شب، و نیازهای طراحی برخاسته از آنها

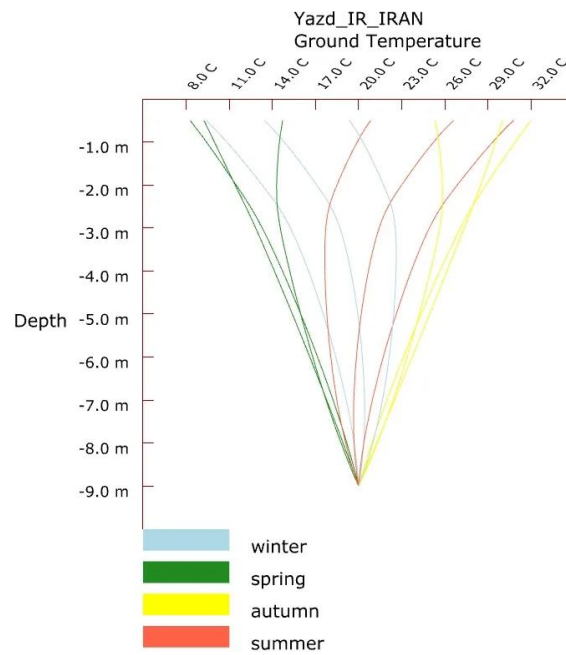
این نمودار پیش از ورود به داده‌های کمی، چارچوب کلی مسئله را نشان می‌دهد. زاویه بالای تابش تابستانه و نوسان شدید دمای شبانه‌روزی یزد چهار نیاز طراحی را پیش می‌نهد—سایه، کنترل دریافت خورشیدی، حفظ نور و کاهش بار حرارتی—که مبنای بخش‌های بعدی این فصل قرار می‌گیرند.



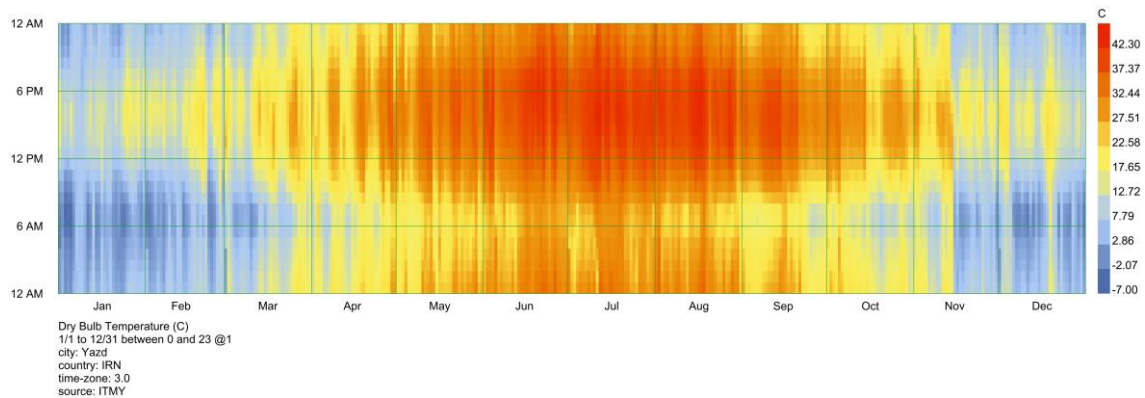
شکل ۲-۳. تفکیک نقش بارش بلندمدت یزد از بارش سال هواشناسی نمونه TMYx. منابع: (Mesbahzadeh et al., 2020; Mansourmoghaddam et al., 2024) و فایل EPW پژوهش.



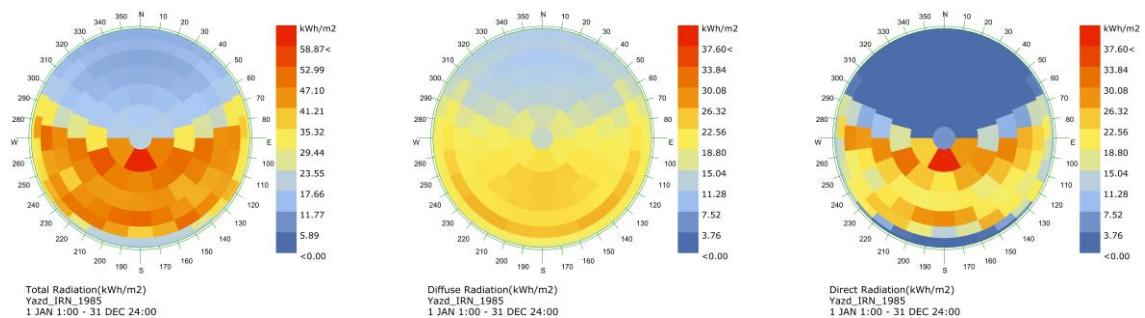
شکل ۲-۴. گلباد یزد بر پایه داده‌های اقلیمی نمونه TMY محلی؛ نمایش سرعت و جهت غالب باد.



شکل ۵-۲. نیمرخ دمای زمین یزد به تفکیک عمق و فصل.



شکل ۶-۲. نقشه حرارتی دمای هوای خشک یزد در طول سال (ساعتی/ماهانه)



شکل ۷-۲. گلبُرج تابش یزد: تابش کل، پخش و مستقیم

این چهار خروجی تحلیل اقلیمی یزد (بر پایه داده‌های اقلیمی نمونه TMY محلی، مستقل از فایل EPW اختصاصی شبیه‌سازی‌های اصلی پژوهش)، شواهد کمی مکمل شکل ۲-۳ را فراهم می‌کنند. غلبه باد از جهت شمال غربی (شکل ۲-۴) مبنای جهت‌گیری بادگیر در ترجمه منطق بومی است. ثبات نسبی دمای زمین در عمق (شکل ۵-۲) استدلال بهره‌گیری از ظرفیت حرارتی خاک در والپینی را با داده مستقیم پشتیبانی می‌کند. دامنه

نوسان دمای هوا (شکل ۲-۶) دامنه کمی همان نوسان روز/شبیه است که در شکل ۲-۲ به صورت کیفی نشان داده شد. توزیع جهتی تابش (شکل ۲-۷) نیز مبنای کمی نیاز به کنترل دریافت خورشیدی است.

جدول ۲-۲. شواهد اقلیمی منتخب و نقش آن‌ها در تصمیم طراحی

نقش در طراحی	یافته قابل استفاده	مقیاس/دوره	شاهد
حساسیت به آب و پرهیز از فرض وفور منابع	خشکی پایه و افزایش شدت/دوام خشکسالی	استان یزد؛ ۱۹۵۴-۲۰۱۶ توصیف اقلیم، ۱۹۶۱-۲۰۱۶ تحلیل روزانه و سناریوهای آینده	Mesbahzadeh et al. (2020)
کنترل سطح و سایه؛ بدون خلط LST با دمای هوا	پیوند LST با آلودگی و پوشش گیاهی	شهر/شهرستان یزد؛ سنجش از دور	Mansourmoghad-dam et al. (2024)
اولویت کنترل تابش و دفع گرما	افزایش اهمیت راهبردهای سرمایشی	ایران؛ ۱۹۸۶-۲۰۱۵ و ۲۰۲۰-۲۰۵۰	Roshan et al. (2019)
آزمون تاب‌آوری در برابر بیش‌گرمایش	تشدید حدهای گرم و دوره‌های گرم	شبکه ملی ایران؛ CMIP۶	Najafi et al. (2025)
پایه مقایسه سناریوها	ورودی ۸۷۶۰ ساعته واحد برای دو ماژول	ایستگاه فرودگاه یزد؛ سال ترکیبی	فایل TMYx پژوهش

۲-۲-۱. اقلیم آینده و پیام آن برای معماری

مطالعه زارعیان (۱۴۰۱) برای چهار ایستگاه استان یزد، در سناریوهای بررسی شده افزایش دمای سالانه و کاهش بارش سالانه را گزارش می‌کند. در پژوهش حاضر از این منبع برای تعیین جهت تغییر اقلیمی استفاده شده و هیچ مقدار منفردی از آن وارد محاسبات شبیه‌سازی نشده است.

این شواهد اقلیمی فرم معینی را تجویز نمی‌کنند، اما بر اهمیت چند معیار می‌افزایند: کاهش بار سرمایش، کنترل تابش مستقیم، امکان تهویه و تخلیه گرمای شبانه، حفظ عملکرد پوسته در دوره‌های گرم‌تر و پرهیز از طراحی‌های آب‌بر. مقدار مناسب جهت، نسبت بازشو، جرم یا سایه‌بان باید در مدل معماری آزموده شود. تمایز میان جهت کلی یک معیار و مقدار مناسب طراحی مانع از آن می‌شود که سناریوی اقلیمی به عددی فضایی و بی‌پشتوانه تبدیل شود.

نتیجه محور اقلیم

یزد در این پژوهش یک سایت فرضی با جمعیت و ابعاد دلخواه نیست؛ یک زمینه اقلیمی واقعی برای آزمون تصمیم‌های معماری است. مسئله اصلی، مدیریت هم‌زمان تابش شدید، نوسان حرارتی و محدودیت منابع در دو تپ سکونت و گلخانه است.

۳-۲. عملکرد مسکن معاصر در یزد و اقلیم گرم و خشک

نقد مسکن معاصر زمانی پشتوانه علمی دارد که به جای داوری سبکی، عملکرد بنا را بررسی کند. هیچ فرم جدیدی صرفاً به سبب «وارداتی» بودن نامناسب نیست و بنای سنتی نیز ذاتاً برتر نیست. مسئله اصلی، رابطه قابل اندازه‌گیری هندسه، پوسته، بازشو، سایه و الگوی بهره‌برداری با شرایط اقلیمی است. بسته به نوع داده، این رابطه را می‌توان در مطالعات تجربی و شبیه‌سازی با بار سرمایش و گرمایش، دمای داخل، مصرف واقعی و نور روز سنجید. چنین رویکردی امکان می‌دهد ساختمان معاصر اقلیم‌پاسخ و خانه تاریخی نامتناسب با بهره‌برداری امروز، هر دو با معیارهای یکسان ارزیابی شوند. (بخش شکل ۸-۲)



شکل ۸-۲. روند نقد عملکردی مسکن معاصر؛ از نشانه‌های اقلیمی تا شاهد قابل اندازه‌گیری.

پژوهش مسکن یزد (Ramezani et al., 2026) از نظر روش و ابزار، نزدیک‌ترین مطالعه به بخش مسکن این پژوهش است. در آن، هشت پیکربندی رایج اتاق بر پایه بررسی ۸۵ واحد مسکونی در یزد استخراج و عملکرد انرژی و نور روز آن‌ها با استفاده از مجموعه ابزارهای Rhino-Grasshopper-Ladybug/Honeybee و فایل اقلیمی TMYx شبیه‌سازی شده است. برای کنترل بخش انرژی، نتایج مدل با قبوض ماهانه برق و گاز ده واحد مسکونی مقایسه شد و اختلاف متوسط کمتر از ۱۰ درصد، ضریب همبستگی ۰٫۸۶، NMSE کمتر از ۵ درصد و CVRMSE کمتر از ۱۵ درصد گزارش شد.

این شاخص‌های اعتبارسنجی به بخش انرژی مطالعه مربوطاند و نمی‌توان آن‌ها را به ارزیابی نور روز تعمیم داد. همچنین، مدل اصلی پژوهش در مقیاس یک اتاق تعریف شده است و تحلیل ده واحد مسکونی، مبنایی برای بررسی امکان تعمیم نتایج به مقیاس ساختمان فراهم می‌کند. از این‌رو، اهمیت این مطالعه برای پژوهش حاضر بیش از آنکه در اعتبارسنجی مستقیم مدل کل ساختمان باشد، در فراهم کردن یک مرجع روش‌شناختی نزدیک برای انتخاب ابزارها، نحوه کنترل مدل انرژی و سنجش معقول بودن مرتبه نتایج است.

در مقیاس شهری، مطالعه مصرف برق یزد (Sarsangi et al., 2024) با بررسی داده‌های ۳۵٬۲۹۹ ساختمان در فاصله سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹، تصویری گسترده از الگوی مصرف انرژی و ارتباط آن با ویژگی‌های

محیطی شهر ارائه می‌کند. اهمیت این مطالعه برای پژوهش حاضر، بیش از آنکه در فراهم کردن یک مقدار مرجع برای مقایسه مستقیم باشد، در نشان دادن رفتار انرژی ساختمان‌ها در مقیاس وسیع و تحت شرایط واقعی یزد است. با این حال، داده مصرف برق شهری را نمی‌توان مستقیماً با بار حرارتی یک مدل معماری مقایسه کرد؛ زیرا تفاوت در مساحت، نوع سوخت، الگوی بهره‌برداری و مرز محاسباتی می‌تواند نتیجه این مقایسه را تغییر دهد.

در مقیاس بنا، مطالعه خانه رسولیان (Asadi et al., 2016) از طریق مقایسه اندازه‌گیری دمای داخل با نتایج مدل EnergyPlus، شواهد محلی ارزشمندی از رفتار حرارتی یک نمونه بومی یزد فراهم می‌کند. این مطالعه به‌ویژه برای شناخت نقش جرم حرارتی، سایه و فضاهای زمین‌پناه اهمیت دارد. با این حال، تفاوت در نوع ساختمان، شیوه بهره‌برداری و شرایط اندازه‌گیری سبب می‌شود نتایج آن به‌عنوان معیار عددی مستقیم برای یک بلوک مسکونی معاصر به کار نرود. از این رو، این دو مطالعه در پژوهش حاضر بیش از آنکه نقش «معیار تطبیق عددی» داشته باشند، برای شناخت بستر واقعی انرژی و سازوکارهای حرارتی مؤثر در یزد مورد استفاده قرار می‌گیرند (جدول ۳-۲).

جدول ۳-۲. شواهد عملکرد مسکن یزد و حد تعمیم هر مطالعه

نوع شاهد	حد تعمیم	کاربرد در این پژوهش	منبع
اعتبارسنجی انرژی با قبوض ۱۰ واحد؛ شبیه‌سازی نور روز	نه اعتبارسنجی نور روز یا مدل کل‌ساختمان حاضر	معیار روش انرژی؛ استفاده از ابزار هم‌خانواده برای تحلیل نور روز	Ramezani et al. (2026)
مصرف واقعی ۳۵'۲۹۹ ساختمان	نه مقایسه مستقیم بار مدل	زمینه تجربی مقیاس شهری	Sarsangi et al. (2024)
پایش کوتاه‌مدت + EnergyPlus	نه بار سالانه آپارتمان	سازوکار حرارتی بنای سنتی یزد	Asadi et al. (2016)
۱۰ خانه حیاط‌مرکزی یزد + Ecotect	نه برتری مطلق همه حیاط‌ها	اثر هندسه بر سایه/آفتاب	Akbari et al. (2021)
ساختمان سه‌طبقه یزد + DesignBuilder	وابسته به ساخت و سناریو	اثر سناریوی PCM؛ کاهش گزارش شده ۱۵/۵٪	Roostaei Firouza-bad & Pourfayaz (2024)
شبیه‌سازی ایوان و WWR در یزد	منبع پشتیبان، نه شاهد اصلی	شاهد جهت‌دار محلی	Kamyab et al. (2023)

۱-۳-۲. متغیرهای معماری دارای پشتوانه

شواهد محلی و مطالعات انجام شده در اقلیم‌های مشابه نشان می‌دهند که عملکرد ساختمان حاصل تأثیر هم‌زمان چند گروه از عوامل طراحی است. جهت‌گیری و نسبت بازشوها، میزان دریافت تابش خورشیدی و دسترسی به نور روز را تغییر می‌دهند؛ هندسه حیاط و ایوان بر عمق و تداوم سایه و میزان گشودگی فضا به آسمان اثر می‌گذارد؛ جرم حرارتی و عایق، مقدار و زمان انتقال گرما را تعدیل می‌کنند؛ و تهویه، به‌ویژه در ساعات مناسب شبانه، می‌تواند به دفع گرمای ذخیره شده در ساختمان کمک کند.

این عوامل مستقل از یکدیگر عمل نمی‌کنند و تغییر هر یک ممکن است هم‌زمان پیامدهای مطلوب و نامطلوبی به همراه داشته باشد. کاهش سطح شیشه می‌تواند دریافت گرمای خورشیدی را محدود کند، اما درعین حال دسترسی به نور روز را نیز کاهش دهد. جرم حرارتی زیاد، اگر با امکان تخلیه گرمای ذخیره شده در ساعات خنک همراه نباشد، می‌تواند به ماندگاری گرمای ناخواسته منجر شود. به همین ترتیب، سایه عمیق اگر بدون توجه به تغییرات فصلی طراحی شود، ممکن است در زمستان دریافت مفید تابش و نور روز را کاهش داده و نیاز به گرمایش یا روشنایی مصنوعی را افزایش دهد.

از این رو، ارزیابی بخش مسکن نمی‌تواند بر یک معیار منفرد استوار باشد. کاهش بار انرژی، بدون توجه به پیامد آن بر کیفیت نور روز، به تنهایی نشان‌دهنده مناسب بودن یک تصمیم معماری نیست؛ همان‌گونه که بهبود دسترسی به نور روز نیز بدون بررسی اثر آن بر بارهای حرارتی نمی‌تواند مبنای کافی برای انتخاب باشد. مطالعات انجام شده در مناطق گرم‌وخشک، از جمله نمونه‌های بررسی شده در یزد و کرمان، نیز نشان می‌دهند که اثر هندسه ساختمان به شرایط اقلیمی، جهت‌گیری و نحوه بهره‌برداری وابسته است (Ramezani et al., 2026; Akbari et al., 2021; Soflaei et al., 2017). بر همین اساس، در فصل نتایج مسکن، بارهای سالانه حرارتی در کنار شاخص‌های نور روز، از جمله UDI، بررسی می‌شوند تا اثر هر تصمیم در نسبت میان نیازهای حرارتی و نوری ساختمان سنجیده شود.

۲-۳-۲. جایگاه اعتبارسنجی و کنترل معقولیت نتایج

در ارزیابی مدل‌های شبیه‌سازی، سه مفهوم باید از یکدیگر تفکیک شوند. **راستی‌آزمایی (Verification)** به این می‌پردازد که مدل و محاسبات مطابق با تعریف اولیه و بدون خطای اجرایی پیاده شده باشند. **اعتبارسنجی (Validation)** میزان نزدیکی خروجی مدل به رفتار اندازه‌گیری شده یک نمونه واقعی را بررسی می‌کند. در مقابل، **مقایسه با مرجع (Benchmarking)** یا **کنترل معقول بودن نتایج (Sanity Check)** برای سنجش قرارگرفتن نتایج در دامنه‌ای قابل قبول نسبت به نمونه‌های هم‌سرخ به کار می‌رود.

در مدل مسکن این پژوهش، ورودی‌ها، فایل‌های اصلی و محاسبات مورد ممیزی قرار گرفته‌اند و جهت تغییرات و مرتبه نتایج با مطالعات مشابه در یزد مقایسه می‌شود. باین حال، از آنجا که داده قبض یا پایش میدانی مربوط به همین نمونه هندسی در دسترس نیست، مدل حاضر کالیبره یا اعتبارسنجی شده با داده واقعی همان ساختمان تلقی نمی‌شود. بنابراین، نتایج بیش از آنکه بیانگر مقدار قطعی عملکرد یک ساختمان واقعی باشند، برای مقایسه تفاوت میان سناریوها در شرایط ثابت مدل به کار می‌روند.

مقایسه بیرونی نیز تنها زمانی معنا دارد که داده‌ها تا حد امکان هم‌سنگ باشند. در مقایسه بار سالانه، عواملی مانند مساحت مرجع، نوع سوخت، ساعات بهره‌برداری، نقطه تنظیم دما (Setpoint) و مرز سیستم باید تا حد ممکن مشابه باشند. در ارزیابی نور روز نیز شاخص UDI تنها در چارچوب روش محاسبه، شبکه سنجش و حدود تعریف شده خود قابل تفسیر است و نمی‌توان آن را با یک درصد عمومی روشنایی جایگزین کرد.

بر این اساس، ادبیات این محور در پژوهش حاضر برای سنجش معقول بودن مرتبه نتایج و جهت اثر متغیرها به کار می‌رود، نه برای ادعای کالیبراسیون مستقیم مدل. ثبت منظم ورودی‌ها و خروجی‌ها نیز امکان پیگیری ارتباط هر نتیجه با شرایط مدل را فراهم می‌کند (جدول ۴-۲).

جدول ۴-۲. تمایز راستی‌آزمایی، اعتبارسنجی و کنترل مرتبه بزرگی

نوع کنترل	پرسش	شاهد لازم	کاربرد در پژوهش
راستی‌آزمایی اجرایی	آیا مدل همان چیزی را که تعریف شده اجرا کرده است؟	فایل خام، فایل گزارش خطای EnergyPlus (ERR)، ورودی و بازتولید محاسبه	کنترل انطباق مدل و محاسبه
اعتبارسنجی تجربی	آیا خروجی با نمونه واقعی همان مدل نزدیک است؟	اندازه‌گیری یا قبض همان نمونه	در دسترس نیست
سنجش با مرجع	آیا جهت و مرتبه نتیجه با نمونه معتبر سازگار است؟	مطالعه هم‌اقلیم و هم‌سنگ	Ramezani و مطالعات یزد
تحلیل حساسیت	کدام ورودی بیشترین اثر را دارد؟	اجرای کنترل شده یک متغیر	سناریوهای پوسته، جهت و پنجره

۴-۲. ترجمه منطق بومی: از عنصر تاریخی به متغیر آزمون‌پذیر

معماری بومی یزد در این پژوهش نه به عنوان مجموعه‌ای از عناصر قابل تکرار، بلکه به صورت نظامی از روابط فضایی و اقلیمی خوانده می‌شود. حیاط مرکزی، ساباط، جرم حرارتی جداره‌ها، بادگیر و فضاهای زیرسطحی هر یک در شکل‌گیری رابطه میان سایه، حریم، دریافت تابش خورشیدی، ذخیره و تأخیر حرارت و تبادل هوا نقش

دارند. اهمیت این عناصر برای پژوهش حاضر در خودِ شکل تاریخی آن‌ها نیست، بلکه در شناخت سازوکاری است که از طریق آن به شرایط اقلیمی و نیازهای فضایی پاسخ داده‌اند. این شناخت زمانی قابلیت انتقال به طراحی معاصر پیدا می‌کند که بتوان آن را بدون فرض برتری ذاتی فرم تاریخی، به یک اصل، پرسش یا عامل قابل‌آزمون تبدیل کرد.

با این حال، پیش از جداکردن هر عنصر برای سنجش، منطق فضایی خانه یزدی باید به صورت یک کل به هم پیوسته دیده شود. حیاط تنها فضای باز میانی نیست، بلکه رابطه میان اتاق‌ها، نور، سایه و حریم را سازمان می‌دهد؛ سابات با ایجاد تداوم سایه، شرایط مسیر حرکت را تعدیل می‌کند؛ جرم جداره‌ها و فضاهای زیرسطحی زمان و دامنه انتقال حرارت را تغییر می‌دهند؛ و بازشوها و عناصر هدایت هوا امکان تبادل کنترل‌شده با محیط را فراهم می‌کنند. از این رو، پژوهش حاضر درباره کارایی کمی هر عنصر تاریخی به صورت منفرد داوری نمی‌کند. تنها آن دسته از ویژگی‌ها وارد مدل می‌شوند که سازوکار آن‌ها روشن، قابل‌اندازه‌گیری و دارای شواهد کافی برای آزمون در شرایط معاصر باشد.

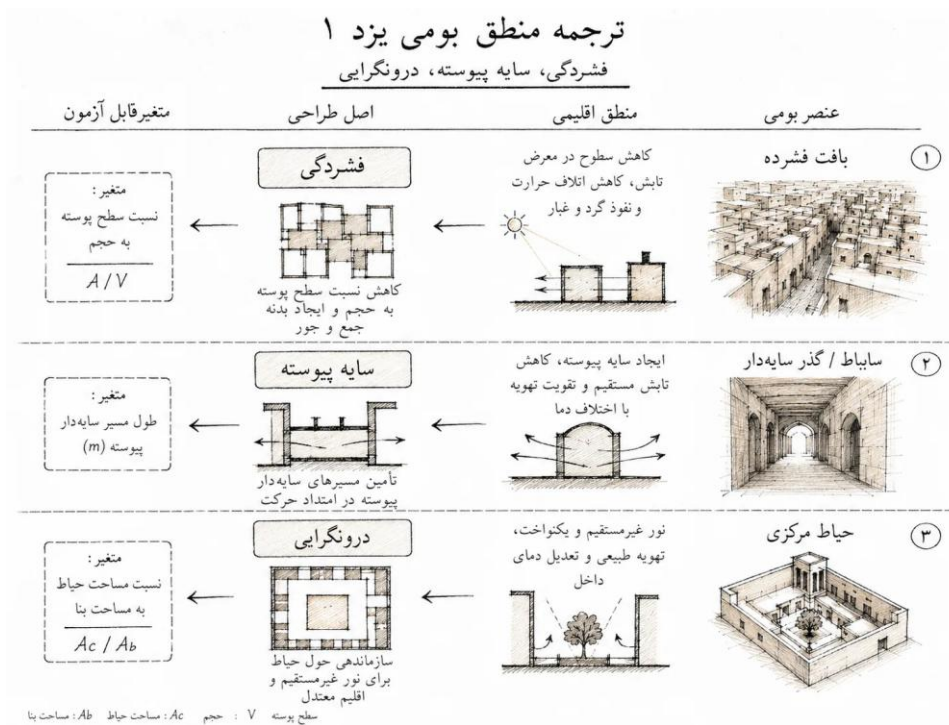
معماری بومی یزد حاصل پاسخ هم‌زمان به اقلیم، مصالح، شیوه زندگی، امنیت و ساختار اجتماعی بوده است؛ بنابراین، بازتولید فرم بدون شناخت منطق شکل‌گیری و عملکرد آن، بیش از آنکه ادامه یک سنت معماری باشد، به تکرار تصویر آن می‌انجامد. برای جلوگیری از چنین برداشت صوری، هر عنصر در این پژوهش در یک مسیر پنج‌مرحله‌ای بازخوانی می‌شود: نخست، عنصر یا الگوی فضایی شناسایی می‌شود؛ سپس مسئله‌ای که به آن پاسخ داده است مشخص می‌گردد؛ سازوکار فیزیکی یا فضایی آن توضیح داده می‌شود؛ امکان بازخوانی آن در طراحی معاصر بررسی می‌گردد؛ و در نهایت، در صورت امکان، به عامل قابل‌سنجش تبدیل می‌شود.

برای مثال، «حیاط مرکزی» به‌خودی‌خود یک متغیر انرژی نیست؛ آنچه قابلیت ارزیابی دارد نسبت ارتفاع به عرض، جهت‌گیری، سطح جداره‌های پیرامونی، میزان گشودگی به آسمان و سهم سایه در زمان‌های مختلف است. به همین ترتیب، «دیوار خشتی» نه به‌عنوان یک نشانه تاریخی، بلکه از طریق ویژگی‌هایی مانند ضخامت، رسانایی حرارتی، چگالی، گرمای ویژه و نحوه قرارگیری لایه‌های عایق در مدل بازخوانی می‌شود. به این ترتیب، آنچه از معماری بومی به پژوهش منتقل می‌شود، شکل نیست؛ منطق عملکردی و فضایی‌ای است که بتوان

آن را در شرایط امروز دوباره آزمود و ارزیابی کرد (شکل ۹-۲؛ جدول ۵-۲).



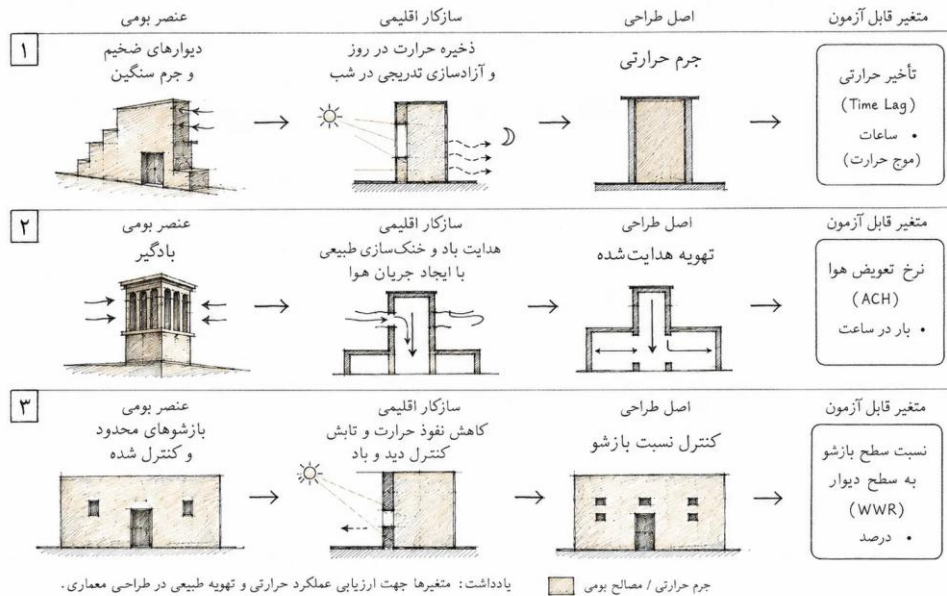
شکل ۲-۹. روند تبدیل منطق بومی به متغیر و شاخص قابل آزمون.



شکل ۲-۱۰. ترجمه منطق بومی یزد ۱: (فشردگی بافت، ساباط سایه‌دار، حیاط درون‌گرا) — هر کدام همراه با متغیر آزمون‌پذیر.

ترجمه منطق بومی یزد ۲

جرم حرارتی، تهویه هدایت شده، کنترل بازشو



شکل ۲-۱۱. ترجمه منطق بومی یزد ۲: (جرم حرارتی، بادگیر، کنترل بازشو) — هر کدام همراه با متغیر آزمون‌پذیر.

جدول ۲-۵. ترجمه منطق بومی یزد به متغیر و نوع شاهد

الگو	مسئله	سازوکار	ترجمه/متغیر	نوع شاهد
جهت‌گیری و رون	کنترل تابش	تغییر تابش بر حسب آزمون و فصل	چرخش بنا، جهت بازشو، WWR	آزمون کمی در مدل
حیات مرکزی	سایه و سازمان فضایی	نسبت H/W و محصوریت	ابعاد، جهت، سطح نما و سایه	کمی + نظری محدود
ساباط	تابش و دمای متوسط تابشی (MRT) فضای باز	قطع تابش مستقیم و کاهش دید آسمان	پیوستگی سایه و ضریب دید آسمان (SVF)	راهنمای طراحی
جرم حرارتی	دامنه دمای شبانه‌روزی	ذخیره و تأخیر گرما	k, ρ, C_p ، ضخامت و عایق	آزمون کمی
بادگیر	تهویه و دفع گرما	فشار باد و شناوری	سطح بازشو، C_p ، ارتفاع و مسیر	نیازمند مدل جریان مستقل
زیرزمین/تماس خاک	پایداری دما	میرایی و تأخیر زمین	عمق، سطح تماس و مرز خاک	راهنمای طراحی/آزمون جدا
فشرده‌گی خراش	کاهش سطح و سایه متقابل	S/V و دیوار مشترک	فشرده‌گی، فاصله و همجواری	مرجع تیپولوژیک + مدل

الگو	مسئله	سازوکار	ترجمه/متغیر	نوع شاهد
درون گرایی	حریم و سلسله مراتب	کنترل دید و عمق دسترسی	عمق فضایی و محل بازشو	معیار کیفی

۱-۴-۲. جهت، حیاط و پیوستگی سایه

مطالعه تاریخی جهت گیری خانه های قاجاری یزد (Jafari Sharami, 2023) نشان می دهد که نمی توان جهت استقرار این خانه ها را به سادگی حاصل یک قاعده اقلیمی واحد دانست و در تفسیر آن باید عوامل تاریخی و زمینه ای را نیز در نظر گرفت. این نتیجه از اهمیت جهت گیری در طراحی اقلیمی نمی کاهد؛ بلکه نشان می دهد که نمی توان یک جهت تاریخی را به عنوان نسخه ای ثابت برای معماری امروز تکرار کرد. در پژوهش حاضر، جهت گیری به عنوان عاملی قابل آزمون در نظر گرفته می شود و اثر آن بر دریافت تابش، بارهای حرارتی و نور روز سنجیده می شود. این موضوع در بخش ۲-۳-۴، از طریق چرخش تیپ R3 در بازه ۴۵- تا ۴۵+ درجه، مورد بررسی قرار می گیرد.

در مورد حیاط مرکزی نیز مطالعات انجام شده در یزد و اقلیم های مشابه نشان می دهند که عملکرد آن بیش از آنکه صرفاً به «وجود حیاط» وابسته باشد، تحت تأثیر نسبت های هندسی، جهت گیری و نحوه شکل گیری سایه قرار دارد. (Akbari et al., 2021) از این رو، حیاط مرکزی در این پژوهش به عنوان یک فرم ذاتاً کم مصرف یا اقلیم پاسخ تلقی نمی شود؛ آنچه قابلیت انتقال و آزمون دارد، روابطی مانند نسبت ارتفاع به عرض، جهت گیری، میزان گشودگی و سهم سایه در زمان های مختلف است.

پژوهش انجام شده درباره سوابط های یزد (Yardımlı et al., 2020) نیز در ۱۵ مشاهده میدانی، دمای هوای سابات را حدود ۱ تا ۳ درجه سلسیوس کمتر از نقاط مقایسه گزارش کرده است. بازنگری و محاسبه مجدد داده های جدول مقاله نیز اختلاف های میانگین حدود ۱،۱۲، ۱،۷۷ و ۱،۸۲ درجه سلسیوس را نسبت به سه نقطه مقایسه نشان می دهد. این نتایج، هرچند حاصل یک پایش کوتاه مدت اند، شواهدی محلی از نقش تداوم سایه در تعدیل شرایط حرارتی فضای باز فراهم می کنند؛ اما نمی توان آن ها را به کاهش بار سرمایش سالانه ساختمان تعمیم داد.

بر همین اساس، سابات در پژوهش حاضر نه به عنوان یک عنصر تاریخی برای بازتولید و نه به عنوان متغیری مستقل در شبیه سازی ساختمان وارد می شود. اهمیت آن در نشان دادن یک اصل فضایی-اقلیمی است: پیوستگی سایه می تواند میزان مواجهه انسان با تابش مستقیم را در مسیر حرکت کاهش دهد و کیفیت حرارتی فضای باز را بهبود بخشد. این اصل در خوانش فضایی پروژه مورد استفاده قرار می گیرد، در حالی که ارزیابی کمی هسته پژوهش به متغیرهایی محدود می شود که مستقیماً در مدل ساختمان تعریف و آزمون شده اند.

۲-۴-۲. جرم، عایق، هوا و زمین

منطق دیوارهای سنگین در اقلیم گرم و خشک بر اختلاف فاز میان هوای بیرون و داخل تکیه دارد. مطالعات جدید نشان می‌دهند سود جرم حرارتی مشروط به اقلیم، عایق، جایگاه جرم، برنامه تهویه و آینده گرم‌تر است (Solgi et al., 2017; Alayed et al., 2022; Rodrigues et al., 2024). بنابراین در ترجمه این منطق برای کاربرد در طراحی معاصر، می‌توان ترکیب جرم داخلی و عایق را جایگزین تکرار عینی مصالح سنتی کرد. معیار تصمیم «سنگینی بیشتر» نیست، بلکه کاهش بار و دامنه دما بدون حبس گرمای ناخواسته است.

بادگیر و فضاهای زیرزمین دو سازوکار متفاوت‌اند. بادگیر با فشار باد و شناوری کار می‌کند و برای ادعای کمی به ضریب فشار، سطح بازشو، ارتفاع و مسیر جریان نیاز دارد (Hosseini et al., 2016). زمین‌پناهی با ظرفیت و میرایی حرارتی خاک عمل می‌کند و به عمق، خواص خاک، رطوبت و شرایط مرزی وابسته است. این تفکیک در مازول والپینی اهمیت ویژه دارد: مدفون کردن فرم به‌تنهایی تضمین عملکرد نیست؛ تماس خاک باید همراه با پوشش، تهویه و امکان تخلیه گرما تحلیل شود. این مسئله در بخش ۵-۴ از طریق بررسی سناریوهای مختلف والپینی و تفکیک اثر راهبردها دنبال می‌شود.

۲-۴-۳. خرائق: فشردگی، همجواری و سازمان اجتماعی فضا

خرائق برای این پژوهش تنها یک نمونه از بافت متراکم خشتی نیست. این روستا-قلعه تاریخی، در لبه کویر مرکزی ایران، حاصل بیش از هزار سال سکونت و دگرگونی تدریجی است و لایه‌های مختلف زندگی در ساختار فضایی آن باقی مانده‌اند. اهمیت خرائق در همین استمرار نهفته است؛ جایی که معماری نه در پاسخ به یک عامل منفرد، بلکه در مواجهه هم‌زمان با اقلیم خشک، محدودیت منابع، امنیت، روابط اجتماعی و شیوه زندگی شکل گرفته است (Aghaeimeybodi & Andaroodi, 2021). از این‌رو، خرائق در این پژوهش پیش از آنکه به مجموعه‌ای از متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری فروکاسته شود، به‌عنوان نمونه‌ای از پیوستگی میان محیط، کالبد و زندگی خوانده می‌شود.

فشردگی بافت یکی از نخستین ویژگی‌هایی است که در این سکونتگاه دیده می‌شود، اما معنای آن تنها کاهش سطح خارجی ساختمان نیست. نزدیک شدن توده‌ها به یکدیگر، دیوارهای مشترک، گذرهای باریک و گاه پوشیده و استقرار فضاهای مسکونی بر فراز برخی مسیرها، هم‌زمان سطح مواجهه با تابش را محدود می‌کنند، سایه را در امتداد حرکت ادامه می‌دهند و مرز میان خانه، همسایگی و فضای جمعی را شکل می‌دهند. بنابراین، آنچه امروز می‌توان به زبان نسبت سطح به حجم یا درصد دیوار مشترک بیان کرد، در معماری خرائق بخشی از

یک سازمان فضایی گسترده‌تر بوده است؛ سازمانی که مسائل حرارتی، امنیتی و اجتماعی را از یکدیگر جدا نمی‌کرد.

مطالعات جدیدتر درباره ساختار اجتماعی-فضایی قلعه نیز نشان می‌دهند که مسیرها، فضاهای عمومی و واحدهای سکونتی در ارتباطی نزدیک با ساختار اجتماعی ساکنان شکل گرفته‌اند. فضاهای عمومی در هسته‌ای نسبتاً متمرکز قرار می‌گرفتند و گذرهای چندسطحی، فضاهای مسکونی و بخش‌های جمعی را به یکدیگر متصل می‌کردند. در چنین ساختاری، مفهوم خانه و محله با تعریف امروزی آن یکسان نبوده و بخش‌هایی از زندگی روزمره در شبکه‌ای پیوسته از فضاهای خصوصی، نیمه‌خصوصی و جمعی جریان داشته است (Hosseininiasab et al., 2024). این ویژگی یادآور می‌شود که «درون‌گرایی» یا «فشرده‌گی» را نمی‌توان صرفاً به یک راهبرد انرژی تقلیل داد.

حیات نیز در این مجموعه فقط سطحی باز در میان جرم ساختمان نیست. مطالعات نحو فضا در خانه‌های یزد نشان می‌دهند که حیات در سازمان دسترسی، عمق فضایی و رابطه میان عرصه‌های مختلف خانه نقش دارد (Zolfagharkhani & Ostwald, 2021). از دید اقلیمی، نسبت جداره به فضای باز، جهت‌گیری و سایه متقابل می‌توانند بر دریافت تابش و شرایط حرارتی اثر بگذارند؛ اما همین فضای میانی هم‌زمان بخشی از نظام حریم و سازمان زندگی است. بنابراین، اگر حیات تنها از طریق بار سرمایش ارزیابی شود، بخشی از معماری آن از دست می‌رود؛ همان‌طور که اگر تنها به دلیل حضور آن در معماری تاریخی، عملکرد حرارتی مطلوب برایش فرض شود، نتیجه از شواهد فراتر رفته است.

خرانق از سوی دیگر نمونه‌ای ثابت و بدون تغییر نیز نبوده است. با دگرگونی شرایط امنیتی و شیوه زندگی، بخشی از سکونت از درون قلعه به بیرون منتقل شد و توسعه‌های بعدی الزاماً همان انسجام کالبدی و اجتماعی ساختار پیشین را ادامه ندادند (Hosseininiasab et al., 2024). این تحول خود درس مهمی برای خوانش معماری بومی دارد: دوام یک فرم در یک دوره تاریخی به معنای امکان انتقال مستقیم آن به شرایط امروز نیست. هنگامی که نیازهای زندگی، فناوری، آسایش و الگوی حرکت تغییر می‌کنند، تکرار کالبد بدون بازخوانی منطق شکل‌گیری آن می‌تواند تنها تصویری از گذشته تولید کند.

بنابراین، اهمیت خرانق برای پژوهش حاضر نه در پیشنهاد بازسازی یک روستا-قلعه معاصر، بلکه در طرح چند پرسش معماری است: تا چه اندازه می‌توان با کاهش سطح خارجی و افزایش همجواری، تبادل حرارتی ناخواسته را محدود کرد، بدون آنکه کیفیت نور، تهویه و فضای سکونت آسیب ببیند؟ چگونه می‌توان سایه را از

یک سایه‌بان منفرد فراتر برد و به کیفیتی پیوسته در مسیر حرکت تبدیل کرد؟ و چگونه می‌توان درون‌گرایی و فشردگی را در کنار نیازهای امروز به نور، دسترسی و حریم دوباره تعریف کرد؟

در مدل کمی پژوهش تنها بخش‌هایی از این منطق وارد می‌شوند که قابلیت تعریف و آزمون دارند؛ از جمله سطح نمای خارجی، میزان دیوار مشترک، فاصله و ارتفاع توده‌ها، جهت‌گیری و الگوی سایه. در مقابل، حریم، سلسله‌مراتب و کیفیت روابط فضایی به‌عنوان معیارهای معماری و کیفی حفظ می‌شوند. به این ترتیب، قرار نیست همه ارزش‌های خرائق به انرژی ترجمه شوند؛ انرژی تنها یکی از ابعاد خوانش معماری آن است.

جدول ۲-۶. ترجمه منطق فضایی خرائق و یزد به معیار ارزیابی

آموزه خرائق	معنای معماری	آنچه قابلیت انتقال دارد	نحوه ورود به پژوهش
فشردگی و همجواری	کاهش گسست میان توده‌ها و شکل‌گیری شبکه پیوسته سکونت	سطح خارجی، دیوار مشترک، فاصله توده‌ها	ارزیابی کمی هندسه و بار
پیوستگی سایه	تعدیل مواجهه با تابش در حرکت و فضای میانی	فاصله، ارتفاع، جهت و مدت سایه	تحلیل هندسی و تابش
حیات و درون‌گرایی	پیوند نور، سایه، حریم و سازمان فضایی	نسبت‌های هندسی، گشودگی، جهت و محل بازشو	کمی در بخش اقلیمی؛ کیفی در بخش فضایی
سلسله‌مرات ب فضایی	سازمان رابطه خصوصی، نیمه‌خصوصی و جمعی	عمق دسترسی، وضوح مسیر و حریم	ارزیابی کیفی

اصل ترجمه

منطق بومی زمانی به پژوهش وارد می‌شود که بتوان مسیر «مسئله → سازوکار → متغیر → شاخص» را نشان داد. ارزش بومی بودن در اینجا توان تولید فرضیه قابل آزمون است، نه مصونیت از آزمون.

۲-۵. مرز سیستم و سطح شواهد

پایداری در این پژوهش کیفیتی چندبخشی تلقی می‌شود، اما سنجش کمی به دو ماژول معماری محدود است. این مرزبندی مفهوم پایداری را تقلیل نمی‌دهد، بلکه مشخص می‌کند کدام رابطه در مدل اندازه‌گیری شده و کدام رابطه برای توسعه بعدی به داده و تخصص مستقل نیاز دارد (International Organization for Standardization [ISO], 2019). (بخش (جدول ۲-۷)

جدول ۲-۷. سطوح شواهد و کاربرد آن‌ها در رساله

کاربرد در رساله	نوع شاهد	سطح
مسکن و محفظه کشت	فایل خام، سناریو و شاخص	بخش کمی
انتخاب سازوکار و معیار	ادبیات اقلیم، بوم و نمونه معاصر	زمینه علمی
توسعه کشاورزی، تأسیسات و اجرا	ورودی لازم برای تخصص بعدی	پیوند با حوزه‌های تخصصی

۶-۲. درس نمونه‌های معاصر و شرط انتقال

نمونه‌های معاصر این بخش نه برای انتقال مستقیم فرم و نه برای وام‌گرفتن اعداد عملکردی انتخاب شده‌اند. اهمیت آن‌ها در فاصله‌ای است که میان ایده، طراحی، اجرا و زندگی واقعی آشکار می‌کنند. هر یک در مقطعی به‌عنوان نمونه‌ای پیشرو از معماری یا سکونت پایدار مطرح شده‌اند، اما تجربه بهره‌برداری نشان می‌دهد که پایداری تنها به کیفیت یک ایده اولیه وابسته نیست. فرم، فناوری، رفتار کاربر، نگهداری، مدیریت، موقعیت شهری و نحوه ارتباط زیرسامانه‌ها همگی در نتیجه نهایی سهم دارند.

از این‌رو، در این پژوهش موفقیت‌ها و محدودیت‌های این نمونه‌ها در کنار یکدیگر خوانده می‌شوند. هدف یافتن یک «پروژه موفق» برای تقلید نیست؛ هدف شناخت تصمیم‌هایی است که قابلیت انتقال دارند و همچنین شرایطی که می‌توانند همان تصمیم‌ها را در عمل تضعیف کنند.

۱-۶-۲. پردیس مؤسسه مصدر: بازخوانی سنت به عنوان سازوکار

پردیس مؤسسه مصدر یکی از نمونه‌های شناخته‌شده تلاش برای بازخوانی منطق معماری مناطق گرم‌وخشک در قالب معماری معاصر است. توده‌گذاری نسبتاً فشرده، مسیرهای باریک و سایه‌دار، پوسته‌های خودسایه‌انداز و صفحات مشبک مقابل بازشوها سبب می‌شوند کنترل تابش نه به عنوان عنصری افزوده، بلکه به عنوان بخشی از سازمان فضایی و پوسته ساختمان عمل کند (Foster + Partners, n.d.). اهمیت پروژه برای پژوهش حاضر در همین نقطه است: مسئله اقلیمی ابتدا از طریق فرم، فاصله توده‌ها، پوسته و سایه پاسخ می‌گیرد و فناوری پس از آن وارد ساختمان می‌شود.

اما تجربه مصدر تنها داستان موفقیت راهکارهای اقلیمی نیست. طرح اولیه شهر مصدر با اهداف بسیار بلندپروازانه صفرکربن و صفرپسماند شکل گرفت. در ادامه، بخشی از این اهداف و همچنین برنامه توسعه و زمان‌بندی پروژه تعدیل شد. بررسی تاریخ توسعه مصدر نشان می‌دهد این تغییرات هم تحت تأثیر بحران اقتصادی ۲۰۰۸ و هم حاصل بازنگری در امکان تحقق برخی فرض‌های اولیه بوده‌اند (Griffiths & Sovacool, 2020). بنابراین، یکی از مهم‌ترین درس‌های مصدر شاید نه در فرم نهایی آن، بلکه در همین فاصله میان آرمان اولیه و ظرفیت واقعی اجرا باشد.

حتی در ساختمان‌های کم‌انرژی پردیس نیز مسئله با پایان طراحی تمام نمی‌شود. ارزیابی پس از بهره‌برداری در مؤسسه مصدر، نقش رفتار، رضایت و نحوه استفاده کاربران از سامانه‌های ساختمان را به عنوان بخشی از عملکرد انرژی مطرح کرده است؛ تا جایی که نحوه معرفی، تحویل و فهم سامانه‌های کم‌انرژی توسط ساکنان خود به موضوع ارزیابی تبدیل می‌شود (Kansara & Ridley, 2012). این موضوع یادآور می‌شود که یک ساختمان ممکن است از نظر فرم و فناوری پیشرفته باشد، اما عملکرد واقعی آن همچنان به نحوه استفاده و مدیریت وابسته بماند.

در نتیجه، مصدر برای این پژوهش دو درس هم‌زمان دارد. نخست، کنترل اقلیم باید پیش از افزودن فناوری در خود فرم و پوسته حضور داشته باشد. دوم، نتیجه طراحی در مرحله بهره‌برداری دوباره آزموده می‌شود و نمی‌توان عملکرد پیش‌بینی‌شده را بدون توجه به کاربر، مدیریت و شرایط واقعی، نتیجه قطعی ساختمان دانست. به همین دلیل هیچ مقدار عملکردی مصدر مستقیماً به مدل یزد منتقل نمی‌شود؛ آنچه منتقل می‌شود پرسش طراحی درباره فشرده‌گی، سایه، کنترل بازشو و نسبت میان راهکار غیرفعال و سامانه فعال است.

۲-۶-۲. شهر پایدار دبی: خوشه مسکونی و پایداری قابل استفاده در زندگی روزمره

شهر پایدار دبی نمونه‌ای است که پایداری را از پوسته ساختمان فراتر برده و آن را در مقیاس زندگی روزمره دنبال می‌کند. خوشه‌های مسکونی، مسیرهای داخلی کم‌خودرو، حرکت پیاده، تولید خورشیدی، فضای سبز و برخی زیرساخت‌های مدیریت منابع در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند تا سکونت روزمره با مصرف کمتر منابع همراه شود (The Sustainable City, n.d.). ارزش این نمونه برای پژوهش حاضر در همین نگاه پیوسته است: کیفیت عملکرد ساختمان، فضای میانی، حرکت و شیوه بهره‌برداری از یکدیگر جدا نیستند.

باین حال، تجربه بهره‌برداری نشان می‌دهد که ایجاد یک کالبد پایدار الزاماً به شکل‌گیری خودکار همه ابعاد پایداری منجر نمی‌شود. مطالعه جامعه ساکن در پروژه نشان داده است که مدیریت توسعه‌دهنده نقش پررنگی در ایجاد فعالیت‌های اجتماعی و فرهنگ پایداری داشته و مشارکت فعال و مداوم ساکنان در اداره امور در همه زمینه‌ها به یک اندازه شکل نگرفته است. همین وابستگی به مدیریت، پرسش‌هایی درباره دوام اقتصادی و اجتماعی چنین الگویی در بلندمدت ایجاد کرده است. (Sanguinetti et al., 2019)

مسئله مهم‌تر در مقیاس شهر آشکار می‌شود. درون محدوده پروژه، امکان پیاده‌روی و شیوه‌های کم‌کربن حرکت تقویت شده است؛ اما مطالعه رفتار سفر ساکنان نشان می‌دهد که برای رفت‌وآمدهای خارج از مجموعه، وابستگی به خودرو و سفرهای طولانی همچنان سهم مهمی در انتشار حمل‌ونقل دارد. موقعیت حومه‌ای پروژه، محدودیت اتصال به سایر بخش‌های دبی و فرهنگ غالب استفاده از خودرو از موانع اصلی حرکت پایدار خارج از مرز مجموعه معرفی شده‌اند. (Kothawala et al., 2025)

این تجربه برای نگاه یکپارچه این رساله اهمیت ویژه‌ای دارد. می‌توان فضای داخلی یک مجموعه را برای پیاده‌روی مناسب کرد، اما اگر ارتباط آن با شهر تنها با خودرو ممکن باشد، بخشی از مسئله فقط به بیرون مرز پروژه منتقل شده است. همان‌گونه که کاهش مصرف انرژی ساختمان نمی‌تواند به‌تنهایی پایداری کل را تضمین کند، طراحی یک جزیره کم‌خودرو نیز بدون توجه به شبکه بزرگ‌تر حرکت، لزوماً به حمل‌ونقل پایدار منجر نمی‌شود.

بنابراین، آنچه از شهر پایدار دبی به پژوهش حاضر منتقل می‌شود نه الگوی کالبدی یا میزان فضای سبز آن، بلکه یک اصل است: هر تصمیم باید در نسبت با شبکه‌ای که به آن متصل است خوانده شود. در محدوده این رساله، این اصل در پیوستگی سایه، کیفیت حرکت روزمره، سازمان فضای باز و محل اتصال بلوک با زیرساخت‌های دیگر دنبال می‌شود؛ اما ارزیابی عملکرد شبکه حمل‌ونقل یا مدیریت اجتماعی خارج از حوزه اعتبارسنجی پژوهش باقی می‌ماند.

۳-۶-۲. BedZED: وقتی روایت طراحی باید در بهره‌برداری دوباره آزموده شود

BedZED یکی از نمونه‌های مهم مسکن کم‌انرژی است، اما ارزش آن برای این پژوهش بیش از آنکه در شباهت اقلیمی باشد، در امکان مقایسه میان پیش‌بینی طراحی و عملکرد واقعی پس از سکونت قرار دارد. راهکارهایی مانند پوسته با عملکرد حرارتی بالا، استفاده از خورشید، تهویه و کاهش تقاضای انرژی سبب شدند

مصرف انرژی واحدهای مطالعه‌شده نسبت به سکونت قبلی کاربران و نمونه‌های متعارف پایین‌تر باشد و آسایش زمستانی نیز در مجموع مطلوب گزارش شود. (Young, 2015)

اما همین ارزیابی پس از بهره‌برداری نشان داد که تصویر کامل‌تر از یک «پروژه کم‌انرژی موفق» پیچیده‌تر است. در دوره‌های گرم، برخی واحدها استعداد بیش‌گرمایش داشتند و رضایت کاربران از آسایش تابستانی کمتر بود. مواردی از میعان نیز گزارش شد و بخشی از مسئله آسایش تابستانی به ناآشنایی کاربران با نحوه مناسب تهویه و خنک‌کردن خانه نسبت داده شد. (Young, 2015) علاوه بر این، تجربه بلندمدت پروژه نشان داد برخی زیرساخت‌های فنی اولیه نیز به نگهداری و عملکردی متفاوت از تصور اولیه نیاز پیدا کردند (Bioregional, 2019).

درس BedZED در این نیست که راهکارهای کم‌انرژی شکست خورده‌اند؛ برعکس، عملکرد انرژی ساختمان‌ها نسبت به نمونه‌های متعارف همچنان مزایای مشخصی نشان داده است. درس مهم‌تر آن است که یک راهکار می‌تواند از یک جنبه موفق و از جنبه‌ای دیگر مسئله‌ساز باشد. دریافت خورشیدی که در زمستان مفید است می‌تواند در تابستان به گرمای ناخواسته تبدیل شود؛ پوسته‌ای که اتلاف حرارت را محدود می‌کند، اگر تخلیه گرما و رفتار کاربر به‌درستی در نظر گرفته نشود، ممکن است مسئله دیگری ایجاد کند.

این تجربه مستقیماً به منطق ارزیابی مسکن در پژوهش حاضر مربوط می‌شود. کاهش بار سالانه به‌تنهایی برای انتخاب یک گزینه کافی نیست؛ اثر همان تصمیم بر بار فصلی، نور روز و شرایط استفاده نیز باید دیده شود. همچنین، خروجی شبیه‌سازی تنها عملکرد سناریوی تعریف‌شده در مدل را بیان می‌کند و تضمینی برای عملکرد ساختمان ساخته‌شده تحت رفتار و نگهداری واقعی نیست.

۴-۶-۲. گلخانه بام یکپارچه ICTA-ICP: شرط انتقال به ماژول محفظه

گلخانه یکپارچه بام ساختمان ICTA-ICP نمونه‌ای متفاوت از سه پروژه پیشین است. اهمیت آن نه در فرم گلخانه، بلکه در نحوه تعریف رابطه میان محفظه کشت و ساختمان میزبان قرار دارد. در این پروژه، ارتباط میان دو بخش صرفاً مجاورت فضایی نیست؛ تبادل حرارت، آب و CO₂ به‌عنوان جریان‌های مشخص میان ساختمان و گلخانه تعریف و مطالعه شده‌اند. (Nadal et al., 2017)

پایش و مدل‌سازی این نمونه نشان داده است که تبادل حرارتی با ساختمان می‌تواند نوسان دمای گلخانه را تعدیل کند و بخشی از گرمای کم‌درجه ساختمان دوباره در محیط کشت مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات

بعدی نیز با استفاده از داده‌های واقعی چندساله و مدل کالیبره‌شده، وجود منافع دوطرفه انرژی میان گلخانه و ساختمان را بررسی کرده‌اند. (Muñoz-Liesa et al., 2020, 2022)

اما همین نمونه یک شرط مهم را نیز آشکار می‌کند: «همزیستی» را نمی‌توان تنها از روی کنار هم قرار گرفتن دو عملکرد ادعا کرد. منفعت حاصل به مسیر جریان، دبی، شرایط مرزی، کنترل و نحوه بهره‌برداری وابسته است. حتی مطالعه اولیه ICTA-ICP نیز بر ضرورت بررسی بیشتر برای انتقال مفهوم به اقلیم‌ها و سامانه‌های بهره‌برداری متفاوت تأکید دارد. (Nadal et al., 2017)

این نکته مستقیماً مرز ادعای پژوهش حاضر را تعیین می‌کند. والپینی این رساله به ساختمان میزبان یا شبکه‌ای از جریان‌های بازیافتی انرژی متصل نشده است؛ بنابراین، هیچ منفعتی از «همزیستی انرژی» برای آن فرض نمی‌شود. آنچه بررسی می‌شود عملکرد خود محفظه در برابر هندسه، تماس با زمین، تهویه، پوشش و سایه است. اگر در توسعه بعدی پژوهش قرار باشد میان ساختمان و محفظه تبادل گرما، آب یا ماده برقرار شود، این ارتباط باید با مسیر جریان، تراز و منطق کنترل مشخص دوباره مدل و ارزیابی شود.

۵-۶-۲. جمع‌بندی تطبیقی: چهار نمونه، چهار نوع درس

چهار نمونه معاصر تصویری یکسان از پایداری ارائه نمی‌کنند و همین تفاوت، ارزش مقایسه آن‌هاست. مصدر نشان می‌دهد که حتی در پروژه‌ای با طراحی اقلیمی و فناوری پیشرفته، آرمان اولیه در برخورد با اقتصاد، اجرا و بهره‌برداری ممکن است نیازمند بازنگری شود. شهر پایدار دبی نشان می‌دهد که ایجاد کیفیت پایدار درون مرز پروژه کافی نیست اگر اتصال آن به شبکه بزرگ‌تر حرکت یا ساختار مدیریت همچنان مسئله داشته باشد. BedZED فاصله میان عملکرد پیش‌بینی‌شده و تجربه واقعی ساکن را آشکار می‌کند و ICTA-ICP نشان می‌دهد که پیوند میان زیرسامانه‌ها فقط زمانی معتبر است که جریان میان آن‌ها واقعاً تعریف، اندازه‌گیری و کنترل شود.

این نمونه‌ها در کنار یکدیگر همان اصلی را تقویت می‌کنند که در این پژوهش مبنای نگاه یکپارچه به پایداری است: **بهبود یک جزء، جای هماهنگی کل را نمی‌گیرد**. ساختمان کم‌مصرف، حمل‌ونقل کم‌کربن، بازیافت آب، تولید غذا یا فناوری انرژی هر یک می‌توانند ضروری باشند، اما اگر ارتباط میان آن‌ها نادیده گرفته شود، یک بخش ضعیف می‌تواند بخشی از دستاوردهای سایر بخش‌ها را کاهش دهد.

بالین حال، نتیجه این نگاه آن نیست که معماری باید همه این حوزه‌ها را طراحی کند. وظیفه این پژوهش، شناخت و آزمون حلقه‌ای است که در حوزه معماری و عملکرد ساختمان قرار دارد و در عین حال، نقاط اتصال آن با حوزه‌های دیگر را نادیده نمی‌گیرد. به همین دلیل، درس نمونه‌های معاصر نه مجموعه‌ای از فرم‌ها و

فناوری‌های قابل تکرار، بلکه مجموعه‌ای از **شرط‌های تصمیم‌گیری** است: راهکار اقلیمی باید در کالبد حضور داشته باشد؛ نتیجه باید در بهره‌برداری دوباره سنجیده شود؛ عملکرد یک جزء باید در نسبت با شبکه بزرگ‌تر دیده شود؛ و هیچ تبدالی بدون تعریف مسیر و تراز آن ادعا نشود.

جدول ۲-۸. تجربه نمونه‌های معاصر و شرط انتقال به پژوهش

نمونه	دست‌آورد اصلی	مسئله یا محدودیت آشکار شده	درس قابل انتقال به پژوهش
پردیس مؤسسه مصدر	ادغام سایه، فشردگی و کنترل پوسته با سازمان معماری	تعدیل بخشی از اهداف اولیه و وابستگی عملکرد به بهره‌برداری و رفتار کاربر	ابتدا مسئله اقلیمی در فرم و پوسته حل شود؛ عملکرد پیش‌بینی شده قطعی تلقی نشود
شهر پایدار دبی	پیوند ساختمان، فضای میانی، حرکت داخلی و زیرساخت‌های پایداری	وابستگی بخشی از زندگی اجتماعی به مدیریت و تداوم انتشار حمل‌ونقل در سفرهای خارج از پروژه	پایداری داخل مرز پروژه بدون بررسی اتصال به شبکه بزرگ‌تر کافی نیست
BedZED	کاهش مصرف انرژی و تجربه عملی مسکن کم‌انرژی	بیش‌گرمایش تابستانی، مسائل بهره‌برداری و فاصله برخی سامانه‌ها با عملکرد اولیه	اثر مطلوب و پیامد جانبی هر تصمیم هم‌زمان ارزیابی شود
ICTA-ICP	اثبات امکان تبادل واقعی منابع میان ساختمان و گلخانه	وابستگی منفعت به جریان، کنترل، اقلیم و شرایط بهره‌برداری	بدون تعریف دبی، تراز و کنترل، «همزیستی» یا منفعت تبادل ادعا نشود

۲-۷. جایگاه محفظه کشت در مسئله معماری

محفظه کشت در اقلیم گرم‌وخشک را نمی‌توان صرفاً فضایی شفاف برای دریافت بیشترین تابش خورشیدی دانست. در چنین اقلیمی، همان تابشی که برای رشد گیاه ضروری است می‌تواند در بخش قابل توجهی از سال به افزایش بیش از حد دمای داخل منجر شود؛ درحالی‌که افت دمای شبانه و نوسان زیاد دمای شب و روز مسئله‌ای متفاوت ایجاد می‌کند. بنابراین، مسئله معماری در طراحی این محفظه دستیابی به «حداکثر نور» یا «حداقل گرما» نیست، بلکه یافتن تعادلی میان دریافت خورشیدی، کنترل گرمای ناخواسته و تعدیل نوسان حرارتی است.

این مسئله سبب می‌شود هندسه، میزان تماس با زمین، نوع و سطح پوشش شفاف، سایه و امکان تهویه مستقیماً در عملکرد محفظه نقش پیدا کنند. برای مثال، افزایش دریافت تابش می‌تواند در دوره‌های سرد مفید باشد، اما همان تصمیم ممکن است در ساعات گرم موجب افزایش دمای داخل شود. کاهش عبور تابش نیز می‌تواند شرایط حرارتی را بهبود دهد، اما هم‌زمان انرژی خورشیدی در دسترس برای گیاه را محدود کند. از این رو، همانند بخش

مسکن، در اینجا نیز یک تصمیم معماری ممکن است بیش از یک پیامد داشته باشد و ارزیابی آن باید این بده‌بستان را آشکار کند.

مطالعات مربوط به کشت حفاظت‌شده نیز نشان می‌دهند که مصرف آب و انرژی و میزان تولید به شرایط اقلیمی، نوع فناوری، محصول و نحوه مدیریت وابسته است و نمی‌توان برای همه گلخانه‌ها یا در مقایسه با همه انواع کشت باز، یک برتری عمومی در نظر گرفت (Zarei et al., 2019; Tsafaras et al., 2022; Behroozeh et al., 2024). هدف پژوهش حاضر ارزیابی کامل سامانه تولید کشاورزی نیست. این ادبیات برای شناخت شرایط مؤثر بر محفظه و تعیین متغیرهایی به کار می‌رود که معماری می‌تواند مستقیماً بر آن‌ها اثر بگذارد.

بر همین اساس، تراز آب، عملکرد محصول و ارزیابی چرخه عمر در دامنه محاسبات این رساله قرار ندارند. تمرکز بر رفتار حرارتی محفظه، میزان دسترسی نسبی به تابش خورشیدی عبوری و بار نظری لازم برای حفظ محدوده دمایی تعریف‌شده است. این خروجی‌ها می‌توانند بخشی از اطلاعات پایه برای ارزیابی‌های تخصصی‌تر کشاورزی، آب و انرژی باشند، اما جایگزین آن‌ها نیستند. در این معنا، نقش معماری فراهم کردن شرایط فضایی و محیطی مناسب‌تر برای کشت است، نه پیش‌بینی مستقیم عملکرد زیستی محصول.

۸-۲. دما و دسترسی نسبی به انرژی خورشیدی عبوری در ارزیابی معماری

از دید معماری، دو پرسش اصلی درباره محفظه مطرح است: فضای ایجادشده از نظر حرارتی چگونه رفتار می‌کند و تصمیم‌های مربوط به پوسته، سایه و تهویه چه اثری بر میزان تابش خورشیدی واردشده به آن دارند؟ به همین دلیل، ارزیابی محفظه در این پژوهش بر دو خانواده شاخص استوار است: شاخص‌های حرارتی و یک شاخص نسبی برای مقایسه انرژی خورشیدی عبوری میان سناریوها.

شرایط حرارتی مناسب برای کشت را نمی‌توان با یک دمای ثابت برای همه محصولات تعریف کرد. دمای مطلوب به گونه و رقم گیاه، مرحله رشد، شدت تابش، رطوبت و شیوه مدیریت وابسته است. راهنمای سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 2013) و مرور انجام‌شده درباره گوجه‌فرنگی (Shamshiri et al., 2018) نیز دامنه‌های متفاوتی را برحسب محصول و مرحله رشد گزارش می‌کنند و مبنایی برای تعیین یک نقطه تنظیم قطعی و مشترک برای گوجه‌فرنگی، خیار و فلفل فراهم نمی‌کنند.

از این رو، حدود دمایی مورد استفاده در این پژوهش باید به‌عنوان حدود تحلیلی مدل خوانده شوند، نه آستانه‌های قطعی زیستی محصول. دماهای کمتر از ۱۰ و بیشتر از ۳۵ درجه سلسیوس برای شناسایی و شمارش شرایط حرارتی شدید به کار می‌روند؛ بازه ۱۶ تا ۲۷ درجه برای مقایسه مدت قرارگیری سناریوهای غیرفعال در شرایط حرارتی میانی استفاده می‌شود؛ و محدوده کنترل ۱۷ تا ۲۷ درجه مبنای محاسبه بار نظری قرار می‌گیرد. این

حدود امکان مقایسه یکسان سناریوها را فراهم می‌کنند، اما به معنای تعریف شرایط بهینه رشد برای یک محصول مشخص نیستند.

بخش دوم ارزیابی به نور و تابش مورد استفاده گیاه مربوط می‌شود. در مطالعات تخصصی گیاه، ارزیابی واقعی نور بر پایه تابش فعال فتوسنتزی (PAR)، چگالی شار فوتون فتوسنتزی (PPFD) و در مقیاس روزانه، انتگرال نور روزانه یا DLI انجام می‌شود. DLI واقعی بیانگر مجموع روزانه فوتون‌های فعال فتوسنتزی دریافت‌شده در سطح تاج‌پوشش گیاه است و مقدار مطلوب آن با گونه، مرحله رشد، آرایش کشت و سامانه تولید تغییر می‌کند (Ciolkosz, 2008; Verheul et al., 2022; Wang et al., 2021; Garcia & Lopez, 2020). مدل این پژوهش چنین جزئیاتی از توزیع PPFD در سطح تاج‌پوشش گیاه را محاسبه نمی‌کند. در عوض، انرژی خورشیدی عبوری از سطوح شفاف محفظه محاسبه، بر مساحت کف نرمال و با ضرایب ثابت به شاخص DLI_{eq} تبدیل می‌شود. بنابراین، DLI_{eq} در این رساله معیار زیستی رشد گیاه نیست؛ بلکه شاخصی هم‌مبنا برای مقایسه این است که تغییر هندسه، پوشش یا سایه چگونه دسترسی نسبی سناریوها به انرژی خورشیدی عبوری را تغییر می‌دهد.

این تفکیک برای تفسیر نتایج اهمیت دارد. ممکن است یک سناریو با کاهش انتقال تابش، ساعات بسیار گرم را کم کند، اما هم‌زمان مقدار DLI_{eq} آن نیز کاهش یابد. چنین نتیجه‌ای نه به‌تنهایی موفقیت حرارتی است و نه شکست نوری؛ بلکه نشان‌دهنده یک بده‌بستان واقعی میان دو نیاز محفظه است که باید در تصمیم معماری دیده شود. از این رو، شرایط حرارتی و DLI_{eq} در فصل نتایج در کنار یکدیگر بررسی می‌شوند، بدون آنکه از شاخص نسبی DLI_{eq} نتیجه‌ای درباره عملکرد زیستی یا میزان تولید محصول استنباط شود (شکل ۹-۲؛ جدول ۹-۲).

روند ساده‌شده ساخت شاخص نور مفید برای گیاه

• برای مقایسه سناریوهای معماری •



شکل ۲-۱۲. مرز تفسیر شاخص DLI_{eq} و تمایز آن از ارزیابی نوری در سطح تاج‌پوشش گیاهی. ترسیم نگارنده.

جدول ۲-۹. شاخص‌های حرارتی و DLI_{eq} و مرز تفسیر آنها

شاخص	بازه/آستانه	کاربرد	تفسیر
شرایط سرد شدید	کمتر از $10^{\circ}C$	شمارش ساعت	مرز مرگ نیست
شرایط گرم شدید	بالاتر از $35^{\circ}C$	شمارش ساعت	رطوبت و مرحله رشد مهم‌اند
DLI گونه‌محور	جدول گونه-مرحله	مقایسه DLI_{eq} سناریوها	بازه زیستی عمومی تعریف نمی‌شود
بازه $17-27^{\circ}C$	کنترل فعال نهایی پژوهش	مقایسه بار نظری سناریوهای منتخب	بازه قراردادی مستند برای مقایسه

۲-۸-۱. پیوند حرارت و نور

در محفظه کشت، کنترل گرما و تأمین نور دو مسئله جدا از یکدیگر نیستند. همان تابش خورشیدی که می‌تواند دمای داخل را افزایش دهد، بخشی از انرژی موردنیاز برای رشد گیاه را نیز فراهم می‌کند. از این‌رو، هر تصمیمی که ورود تابش را محدود کند، ممکن است هم‌زمان یک پیامد حرارتی مطلوب و یک پیامد نوری نامطلوب ایجاد کند.

برای مثال، کاهش ضریب کسب حرارت خورشیدی ($SHGC$)، استفاده از پوشش‌های چندجداره یا افزایش سایه می‌تواند دمای اوج و بار حرارتی محفظه را کاهش دهد، اما در همان حال میزان انرژی خورشیدی عبوری و در نتیجه مقدار DLI_{eq} را نیز کم کند. بنابراین، مناسب‌بودن یک راهکار را نمی‌توان تنها بر اساس کاهش دما یا بار حرارتی داوری کرد.

بر همین اساس، ارزیابی سناریوها در این پژوهش بر رابطه میان دو پیامد انجام می‌شود: از یک سو کاهش گرمای ناخواسته، و از سوی دیگر حفظ دسترسی نسبی به تابش خورشیدی. مقدار DLI_{eq} و تغییرات ماهانه آن در کنار شاخص‌های حرارتی بررسی می‌شود تا مشخص شود هر راهکار در چه دوره‌ای سود حرارتی ایجاد می‌کند و این سود با چه میزان کاهش در دریافت خورشیدی همراه است.

تحلیل حساسیت نوع پوشش و زمان‌بندی سایه در فصل نتایج نیز بر همین منطق استوار است. هدف یافتن گزینه‌ای نیست که صرفاً کمترین دما را ایجاد کند، بلکه شناخت محدوده‌ای از تصمیم‌های معماری است که بتوانند میان کنترل گرمای اضافی و حفظ دریافت خورشیدی تعادل مناسب‌تری برقرار کنند.

معیار انتخاب

در این پژوهش، سناریوی مناسب والپینی سناریویی نیست که تنها کمترین دمای پیش‌بینی را ایجاد کند. کاهش شرایط حرارتی شدید باید در کنار میزان تعدیل نوسان دما، حفظ دسترسی نسبی به انرژی خورشیدی عبوری و نیاز حرارتی باقیمانده دیده شود. به بیان دیگر، انتخاب نهایی حاصل برتری در یک شاخص منفرد نیست، بلکه حاصل شناخت رابطه و بده‌بستان میان عملکرد حرارتی و دریافت خورشیدی است.

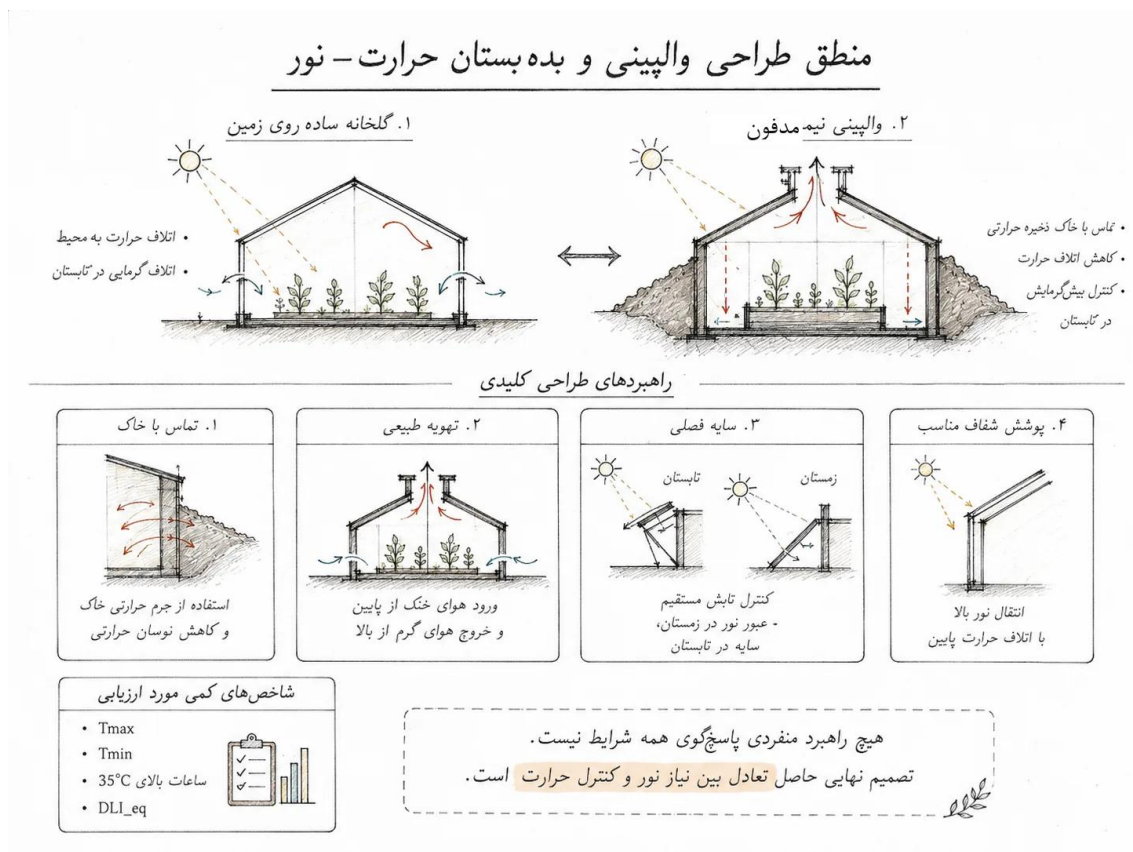
۲-۹. راهبردهای غیرفعال گلخانه و منطق والپینی

واژه «والپینی» از زبان آیمارا گرفته شده و در راهنمای منتشرشده برای ساخت گلخانه زیرسطحی در ناحیه لاپاز بولیوی به معنای «جای گرم» معرفی شده است. (Benson Agriculture and Food Institute, 2002) در آن الگو، پایین‌بردن فضای کشت نسبت به سطح زمین و استفاده از جرم خاک، همراه با دریافت تابش خورشیدی، برای ایجاد محیطی گرم‌تر و با نوسان کمتر در اقلیم مرتفع و سرد بولیوی به کار گرفته شده است. اما همین نکته، پرسش اصلی انتقال والپینی به یزد را شکل می‌دهد. اگر مسئله اولیه والپینی حفاظت در برابر سرمای شدید بوده است، آیا نیمه‌مدفون کردن محفظه در اقلیم گرم‌وخشک نیز الزاماً مفید خواهد بود؟ پاسخ را نمی‌توان از شکل تاریخی یا نام این الگو استخراج کرد. در یزد، زمین ممکن است در بخشی از سال به تعدیل نوسان حرارتی کمک کند، اما کاهش اتلاف حرارت و افزایش اینرسی می‌تواند در دوره‌های گرم، تخلیه گرمای اضافی را نیز دشوارتر کند. بنابراین، آنچه از والپینی به این پژوهش منتقل می‌شود **فرم آماده نیست؛ فرضیه‌ای درباره رابطه ساختمان با زمین است که باید دوباره در اقلیم مقصد آزموده شود.**

از این منظر، والپینی یک «نوع گلخانه ذاتاً پایدار» تلقی نمی‌شود، بلکه ترکیبی از چند تصمیم معماری است: میزان فرورفتگی در زمین، جرم و عایق جداره‌ها، سطح و ویژگی پوشش شفاف، امکان تهویه و نحوه کنترل سایه. اثر نهایی نیز حاصل عملکرد مشترک همین عوامل است. ممکن است تماس بیشتر با خاک نوسان دما را کاهش دهد اما گرمای ذخیره‌شده را دیرتر دفع کند؛ پوششی با انتقال حرارت کمتر می‌تواند اتلاف شبانه را محدود

کند، اما دریافت خورشیدی را نیز تغییر دهد؛ و سایه‌ای که در تابستان سودمند است، در صورت استفاده نامناسب در زمستان می‌تواند بخشی از تابش موردنیاز را حذف کند.

به همین دلیل، منطق طراحی والپینی در این پژوهش نه بر بیشینه‌کردن یک منفعت، بلکه بر شناخت اثر و پیامد جانبی هر راهبرد استوار است. شکل ۱۳-۲ این تفاوت را میان گلخانه ساده روی زمین و نیمه‌مدفون نشان می‌دهد و تأکید می‌کند که تماس با زمین، پوسته، تهویه و سایه باید به‌عنوان یک مجموعه هماهنگ ارزیابی شوند، نه راه‌حل‌هایی مستقل.



شکل ۱۳-۲. منطق طراحی والپینی و بده‌بستان نور-حرارت: مقایسه گلخانه ساده روی زمین و والپینی نیمه‌مدفون، همراه با راهبردهای طراحی کلیدی (تماس با خاک، تهویه طبیعی، سایه فصلی، پوشش شفاف مناسب)



شکل ۲-۱۴. والپینی به عنوان بسته راهبردهای حرارتی و دریافت خورشیدی، نه فرمی که ذاتاً برتر باشد.

۲-۹-۱. تماس با زمین، جرم و پوشش

قرارگرفتن بخشی از محفظه در تماس با خاک یکی از اصلی‌ترین تفاوت‌های والپینی با گلخانه متعارف است. ظرفیت حرارتی خاک می‌تواند تغییرات سریع دمای هوا را تعدیل کند و انتقال گرما میان فضای داخل و محیط بیرون را به تأخیر بیندازد. مطالعات مربوط به گلخانه‌های زمین‌پناه و سامانه‌های متصل به زمین نیز نشان داده‌اند که این ارتباط می‌تواند بر دامنه دما و نیاز به کنترل حرارتی اثر بگذارد، هرچند مقدار و حتی شدت این اثر به ویژگی خاک و نحوه تعریف شرایط مرزی آن وابسته است (Maranghi & Raymond, 2023; Al-Helal et al., 2022).

با این حال، جرم حرارتی به‌خودی‌خود معادل سرمایش نیست. جرم تنها می‌تواند گرما را دریافت، ذخیره و با تأخیر آزاد کند؛ مفیدبودن این فرایند به این بستگی دارد که گرمای ذخیره‌شده در چه زمانی و به کدام سمت منتقل شود. در اقلیمی مانند یزد که اختلاف دمای شب و روز قابل توجه است، استفاده از این ظرفیت زمانی ارزشمند است که امکان تخلیه گرمای انباشته‌شده در ساعات مناسب نیز وجود داشته باشد. در غیر این صورت، همان جرمی که نوسان را کاهش می‌دهد ممکن است ماندگاری گرمای نامطلوب را نیز افزایش دهد.

از این رو، پژوهش حاضر درباره تماس با زمین از پیش فرض مثبت ندارد. پرسش این است که نیمه‌مدفون‌شدن در شرایط اقلیمی یزد، در مقایسه با هندسه روی زمین، چه تغییری در دمای حداقل و حداکثر، دامنه نوسان و نیاز حرارتی محفظه ایجاد می‌کند. حساسیت نتیجه به نحوه تعریف دمای خاک نیز به‌طور مستقل بررسی می‌شود تا اثر مشاهده‌شده به یک شرط مرزی خاص نسبت داده نشود. جزئیات شرایط مرزی، دوره گرم‌سازی و نحوه اجرای این آزمون در فصل روش پژوهش ارائه می‌شود.

۲-۹-۲. پوشش شفاف؛ مرزی که هم گرما را کنترل می‌کند و هم نور را

پوسته شفاف در گلخانه نقشی دوگانه دارد. از یک سو مرز حرارتی میان داخل و خارج است و مقدار اتلاف گرما را تغییر می‌دهد؛ از سوی دیگر مسیر اصلی ورود تابش خورشیدی به محفظه است. بنابراین، انتخاب پوشش را نمی‌توان تنها با مقدار U یا تنها با میزان عبور نور ارزیابی کرد.

پوشش‌های چندجداره یا موادی با انتقال حرارتی کمتر می‌توانند اتلاف حرارت شبانه را کاهش دهند، اما تغییر در SHGC و ویژگی‌های طیفی آن‌ها می‌تواند دریافت خورشیدی داخل را نیز تغییر دهد. این مسئله در اقلیم گرم‌وخشک پیچیده‌تر می‌شود، زیرا کاهش دریافت خورشیدی در ماه‌های گرم ممکن است مطلوب باشد، درحالی‌که همان کاهش در دوره‌های سرد یا کم‌نور می‌تواند پیامدی نامطلوب داشته باشد.

در نتیجه، مقایسه شیشه و پلی‌کربنات در این پژوهش مقایسه نام دو ماده نیست، بلکه مقایسه رفتار دو پوسته با مشخصات حرارتی و خورشیدی متفاوت است. باین‌حال، مدل حاضر توزیع واقعی PAR و PPFD در سطح تاج‌پوشش گیاهی را محاسبه نمی‌کند. ازاین‌رو، DLI_{eq} فقط برای مقایسه نسبی انرژی خورشیدی عبوری میان سناریوها استفاده می‌شود و نتایج پوشش نباید به‌عنوان پیش‌بینی مستقیم نور قابل‌استفاده گیاه یا عملکرد محصول تفسیر شوند.

۲-۹-۳. تهویه و سایه؛ ضرورت امکان تخلیه و کنترل زمانی

اگر زمین و جرم حرارتی امکان ذخیره و تأخیر گرما را فراهم کنند، تهویه مسیر خروج آن را ایجاد می‌کند. در گلخانه، تهویه طبیعی می‌تواند از طریق باد و اختلاف چگالی هوا، گرمای اضافی را از محفظه خارج کند؛ اما کارایی آن به سطح و موقعیت بازشوها، اختلاف ارتفاع، شرایط بیرونی و نحوه کنترل آن‌ها وابسته است. ازاین‌رو، وجود بازشو به‌تنهایی معادل تهویه مؤثر نیست و اثر آن باید در شرایط مشخص مدل سنجیده شود.

این رابطه برای والپینی اهمیت بیشتری دارد. فرورفتگی در زمین می‌تواند پایداری حرارتی را افزایش دهد، اما اگر هوای گرم امکان خروج مؤثر نداشته باشد، همان محفظه ممکن است در ساعات گرم به فضای ذخیره‌کننده حرارت تبدیل شود. به همین دلیل، تهویه در این پژوهش نه یک افزودنی مستقل، بلکه مکمل منطق جرم و تماس با زمین تلقی می‌شود.

سایه نیز نقشی مشابه در کنترل زمانی تابش دارد. کاهش تابش ورودی می‌تواند دمای اوج و ساعات بسیار گرم را محدود کند، اما سایه ثابت یا بیش از اندازه ممکن است در فصل سرد یا دوره‌های کم‌نور، دریافت مفید خورشیدی را کاهش دهد. ادبیات فناوری‌های سرمایش گلخانه نیز سایه را در کنار تهویه و سایر راهبردهای

کنترل محیطی بررسی می‌کند، نه به‌عنوان راه‌حلی منفرد. (Sethi & Sharma, 2007)

بنابراین، مسئله معماری در اینجا «داشتن سایه» نیست، بلکه تعیین زمان و مقدار سایه است. راهبرد مناسب باید بتواند در دوره‌ای که تابش به گرمای نامطلوب تبدیل می‌شود آن را محدود کند، بدون آنکه دریافت خورشیدی در سایر زمان‌ها به‌طور غیرضروری کاهش یابد. همین منطق، مبنای تحلیل زمان‌بندی سایه و مقایسه آن با تغییرات DLI_eq در فصل نتایج است.

۴-۹-۲. راهبردهای مکمل و مرز ادعای پژوهش

راهکارهایی مانند مبدل حرارتی زمین-هوا (EAHE) یا دودکش خورشیدی می‌توانند در توسعه یک محفظه نیمه‌مدفون مورد توجه قرار گیرند. با این حال، عملکرد این سامانه‌ها تنها از روی حضور یک لوله مدفون یا دودکش قابل استنباط نیست EAHE. به طول و قطر لوله، عمق دفن، دبی هوا، خواص خاک و انرژی موردنیاز برای حرکت هوا وابسته است؛ دودکش خورشیدی نیز به ارتفاع، سطح جذب، اختلاف دما، سطح مقطع و افت فشار وابسته است.

از این رو، این پژوهش تنها در صورتی برای چنین سامانه‌هایی ادعای کمی مطرح می‌کند که مسیر جریان و پارامترهای تعیین‌کننده آن‌ها در مدل قابل ردیابی باشند. در غیر این صورت، آن‌ها به عنوان امکان توسعه آینده معرفی می‌شوند و از نتایج اصلی عملکرد والپینی جدا می‌مانند. این تفکیک مانع از آن می‌شود که یک ایده فنی، صرفاً به دلیل حضور در طرح معماری، دارای منفعت اثبات‌شده فرض شود.

به همین ترتیب، بار ایده‌آل نیز یک «راهبرد غیرفعال» نیست. این شاخص در پژوهش حاضر تنها برای پاسخ به پرسشی پس از ارزیابی راهبردهای غیرفعال به کار می‌رود: پس از آنکه هندسه، زمین، پوشش، تهویه و سایه اثر خود را گذاشتند، چه میزان بار نظری برای نگه‌داشتن محفظه در محدوده کنترل تعریف‌شده باقی می‌ماند؟ بنابراین این مقدار نه طراحی HVAC است، نه مصرف انرژی واقعی تجهیزات و نه پیش‌بینی هزینه بهره‌برداری.

جدول ۲-۱۰. راهبردهای معماری والپینی، اثر مورد انتظار و پیامد احتمالی

راهبرد	سازوکار معماری-فیزیکی	اثر مورد انتظار	پیامد یا شرط بررسی
تماس با زمین	استفاده از ظرفیت حرارتی و تأخیر انتقال در خاک	تعدیل نوسان و بهبود شرایط دوره‌های سرد	امکان ذخیره گرمای ناخواسته؛ حساسیت به شرایط خاک
جرم حرارتی	جذب و آزادسازی تأخیری گرما	کاهش یا تأخیر اوج دما	نیاز به مسیر تخلیه گرما، به‌ویژه در شب

راهبرد	سازوکار معماری- فیزیکی	اثر مورد انتظار	پیامد یا شرط بررسی
عایق	محدود کردن انتقال هدایت	کاهش اتلاف یا ورود گرمای ناخواسته	اثر وابسته به محل عایق و فصل
پوشش شفاف	کنترل همزمان اتلاف حرارتی و دریافت خورشیدی	تغییر بار و دمای محفظه	بدهستان میان عملکرد حرارتی و دریافت خورشیدی
تهویه طبیعی	دفع گرما با باد و شناوری	کاهش ساعات گرم و دمای اوج	وابسته به شرایط بیرون، سطح و موقعیت بازشو
سایه کنترل شده	کاهش تابش کوتاه موج در زمان لازم	کنترل بیش گرمایش	احتمال کاهش DLI_{eq} در صورت سایه بیش از اندازه

ترتیب دقیق سناریوها، جفت‌های مقایسه، شرایط ثابت، آزمون حساسیت خاک و نحوه محاسبه بار ایده‌آل در فصل سوم توضیح داده می‌شوند. در این فصل، هدف تنها روشن کردن این است که هر مداخله به چه سازوکار فیزیکی متکی است و چه پیامد جانبی باید همراه با اثر اصلی آن سنجیده شود.

۱۰-۲. سنتز دو مازول؛ یک منطق اقلیمی، دو نوع فضای معماری

مسکن و محفظه کشت از نظر کارکرد، کاربر و معیار ارزیابی یکسان نیستند. در مسکن، مسئله اصلی به آسایش انسان، بارهای حرارتی و دسترسی به نور روز مربوط است؛ در محفظه کشت، رفتار حرارتی فضا و حفظ دسترسی نسبی به انرژی خورشیدی موردنیاز برای محیط کشت در مرکز توجه قرار دارد. بنابراین، مقادیر kWh ، UDI و DLI_{eq} نه هم‌معنا هستند و نه می‌توان آن‌ها را در یک امتیاز مشترک ادغام کرد.

آنچه این دو بخش را به یکدیگر پیوند می‌دهد، **روش فکر کردن به اقلیم** است. در هر دو، ابتدا مسئله محیطی شناسایی می‌شود؛ سپس سازوکاری که معماری می‌تواند از طریق آن بر مسئله اثر بگذارد مشخص می‌شود؛ این سازوکار به عامل طراحی قابل آزمون تبدیل می‌شود؛ و در نهایت، اثر اصلی و پیامد جانبی آن در سناریوهای قابل مقایسه سنجیده می‌شود.

برای مثال، سایه در مسکن می‌تواند بار سرمایش را کاهش دهد، اما دسترسی به نور روز را نیز محدود کند. همان تصمیم در محفظه کشت می‌تواند دمای اوج را کاهش دهد، اما DLI_{eq} را نیز پایین بیاورد. جرم حرارتی در

هر دو فضا می‌تواند تغییرات دما را به تأخیر اندازد، اما بدون امکان تخلیه گرمای ذخیره‌شده الزاماً مفید نیست. تهویه نیز در هر دو، تنها زمانی ارزشمند است که شرایط بیرون و مسیر جریان امکان دفع گرما را فراهم کنند. بنابراین، سنتز دو ماژول در این پژوهش نه با جمع کردن شاخص‌ها، بلکه در سطح **قاعده طراحی** انجام می‌شود: هر تصمیم اقلیمی باید در کنار منفعت مورد انتظار، پیامد جانبی، شرایط کاربرد و حد اعتبار خود خوانده شود. این منطق امکان می‌دهد یافته‌های مسکن و محفظه در یک چارچوب معماری مشترک قرار گیرند، بی‌آنکه تفاوت عملکردی و تخصصی آن‌ها از بین برود.

ارتباط احتمالی این دو فضا از طریق آب، هوا، CO₂ یا انرژی نیز تنها زمانی می‌تواند به‌عنوان عملکرد سیستم مطرح شود که مقدار جریان، زمان‌بندی، تجهیزات و تراز آن به‌طور مستقل تعریف و ارزیابی شده باشد. چنین تبدیلی در مدل کمی این رساله صورت نگرفته است و از این‌رو به‌عنوان یافته پژوهش گزارش نمی‌شود؛ اما الزامات فضایی لازم برای توسعه چنین ارتباطی می‌تواند مبنای مطالعات تخصصی بعدی قرار گیرد.

۱۱-۲. از مرور ادبیات تا جایگاه پژوهش

مرور منابع نشان می‌دهد که درباره اقلیم گرم‌وخشک، معماری بومی یزد، عملکرد حیاط و بازشو، رفتار حرارتی ساختمان و همچنین کنترل محیط گلخانه، دانش قابل‌توجهی وجود دارد. مطالعات پیشین، هر یک بخشی از این مسائل را با روش‌های میدانی، شبیه‌سازی یا ارزیابی عملکرد بررسی کرده‌اند. بنابراین، شکاف این پژوهش را نمی‌توان در «نبود مطالعه اقلیمی» یا «نبود شبیه‌سازی انرژی و گلخانه» جست‌وجو کرد.

مسئله بیشتر در فاصله میان **شناخت و تصمیم معماری** قرار دارد. یک یافته اقلیمی چگونه به عامل طراحی تبدیل می‌شود؟ کدام بخش از یک راهکار بومی قابلیت انتقال دارد و کدام بخش وابسته به شرایط تاریخی و اجتماعی خود است؟ اگر یک تصمیم عملکرد حرارتی را بهبود دهد اما نور، بهره‌برداری یا نیاز دیگری را تضعیف کند، چگونه باید درباره آن داوری کرد؟ و در نهایت، چگونه می‌توان نتیجه یک آزمون را به قاعده‌ای بازگرداند که هم اثر آن را بیان کند و هم شرایط و محدودیت کاربرتش را؟

پژوهش حاضر در پاسخ به همین فاصله شکل گرفته است. منطق اقلیمی و آموزه‌های منتخب معماری یزد ابتدا در سطح سازوکار خوانده می‌شوند و سپس، تنها در مواردی که امکان تعریف و آزمون وجود دارد، به عوامل طراحی قابل‌سنجش تبدیل می‌شوند. این مسیر در دو محیط معماری متفاوت—مسکن و محفظه کشت نیمه‌مدفون—دنبال می‌شود. شاخص‌های ارزیابی این دو محیط یکسان نیستند، اما منطق تصمیم در هر دو

مشترک است: شناخت مسئله، تشخیص سازوکار، آزمون تصمیم، مشاهده اثر و پیامد جانبی، و بازگرداندن نتیجه به قاعده طراحی با حد اعتبار مشخص.

از این منظر، سهم پژوهش نه ارائه یک فرم بهینه برای یزد و نه اثبات برتری یک الگوی تاریخی یا فناوری خاص است. سهم اصلی، تدوین مسیری مستند و قابل ردیابی میان شناخت اقلیمی و تصمیم معماری است؛ مسیری که در آن منشأ داده‌ها، فرض‌ها و حدود مدل مشخص می‌ماند و نتیجه هر راهکار همراه با پیامد و شرایط کاربرد آن گزارش می‌شود. اعتبار این قواعد نیز به شرایط اقلیمی، هندسه و خانواده سناریوهای بررسی شده محدود است و تعمیم آن‌ها به شرایط دیگر نیازمند آزمون دوباره خواهد بود.

صورت‌بندی سهم پژوهش

چارچوبی برای تصمیم‌گیری اقلیمی‌یاسخ که آموزه‌های اقلیمی و فضایی یزد را از سطح سازوکار به عامل قابل آزمون معماری منتقل می‌کند و نتیجه هر تصمیم را همراه با اثر، پیامد جانبی، شرایط کاربرد و حد اعتبار آن باز می‌گرداند.

۱۲-۲. ماتریس تصمیم حاصل از مرور ادبیات

مرور ادبیات در این پژوهش تنها برای گردآوری اطلاعات انجام نشده است. هر بخش زمانی در ادامه پژوهش نقش پیدا می‌کند که بتواند یک مسئله طراحی را روشن کند، بر انتخاب یک عامل معماری اثر بگذارد یا حدود تفسیر نتیجه را مشخص سازد. جدول ۲-۱۱ این ارتباط را خلاصه می‌کند و نشان می‌دهد هر دسته از شواهد چگونه به تصمیم‌های بعدی پژوهش پیوند می‌خورد.

جدول ۲-۱۱. ارتباط شواهد مرور ادبیات با تصمیم‌های پژوهش

مسئله/شاهد	تصمیم پژوهش	متغیر	شاخص/خروجی
زمینه یا شاهد	آنچه از ادبیات آموخته می‌شود	پیامد برای تصمیم معماری	نحوه ادامه در پژوهش
اقلیم گرم‌وخشک یزد	کنترل تابش، بیش‌گرمایش و نوسان دمای شب و روز از مسائل اصلی‌اند	جهت‌گیری، پوسته، سایه و امکان دفع گرما باید هم‌زمان دیده شوند	آزمون در مدل مسکن و محفظه
مطالعات مسکن یزد	عملکرد به هندسه، بازشو، پوسته و شیوه بهره‌برداری وابسته است	هیچ عامل منفردی بدون توجه به پیامدهای حرارتی و نوری دآوری نمی‌شود	ارزیابی هم‌زمان انرژی و نور روز

مسئله/شاهد	تصمیم پژوهش	متغیر	شاخص/خروجی
معماری بومی یزد و خرانق	ارزش عناصر تاریخی در منطق عملکرد و روابط فضایی آن‌هاست، نه تکرار فرم	آموزه بومی ابتدا به سازوکار و سپس، در صورت امکان، به عامل قابل آزمون تبدیل می‌شود	استفاده کمی و کیفی متناسب با نوع شواهد
نمونه‌های معاصر	فاصله میان ایده، اجرا و بهره‌برداری می‌تواند نتیجه را تغییر دهد	نتیجه شبیه‌سازی معادل تضمین عملکرد واقعی تلقی نمی‌شود	ثبت شرایط کاربرد و محدودیت هر قاعده
نگاه یکپارچه به پایداری	بهبود یک جزء الزاماً به پایداری کل منجر نمی‌شود	معماری باید نقاط اتصال خود با آب، حرکت، انرژی، تولید و مدیریت را بشناسد	تعیین مرز مسئولیت پژوهش و پیش شرط‌های فضایی
ادبیات کشت حفاظت‌شده	عملکرد محفظه به اقلیم، پوسته، تهویه، محصول و مدیریت وابسته است	معماری تنها بخشی از شرایط محیطی کشت را کنترل می‌کند	تمرکز بر رفتار حرارتی و دریافت خورشیدی، بدون ادعای عملکرد محصول
مطالعات والپینی و زمین‌پناه	تماس با زمین می‌تواند نوسان حرارتی را تعدیل کند، اما منفعت آن قطعی نیست	نیمه‌مدفون شدن به‌عنوان فرضیه اقلیمی آزموده می‌شود، نه راهکار از پیش برتر	مقایسه رفتار حرارتی هندسه‌ها
پوشش، تهویه و سایه گلخانه	کنترل گرما می‌تواند با کاهش دریافت خورشیدی همراه شود	انتخاب سناریو باید بده‌بستان حرارت و نور را آشکار کند	ارزیابی حرارت در کنار DLI_{eq}

این ماتریس در واقع مرز میان فصل دوم و مراحل بعدی پژوهش است: فصل حاضر روشن می‌کند چه چیزی ارزش آزمون دارد و چرا؛ فصل روش نشان می‌دهد این پرسش‌ها چگونه به مدل و سناریو تبدیل شده‌اند؛ و فصل‌های نتایج مشخص می‌کنند هر تصمیم در عمل چه اثری نشان داده است.

۱۳-۲. جمع‌بندی فصل

مرور این فصل نشان داد که پاسخ معماری به اقلیم گرم‌وخشک یزد را نمی‌توان به یک عنصر، یک فرم یا یک شاخص تقلیل داد. تابش شدید، گرمای روز، افت دمای شب، نیاز به سایه و محدودیت منابع در کنار یکدیگر

قرار دارند و هر تصمیم معماری می‌تواند چند پیامد هم‌زمان ایجاد کند. به همین دلیل، راهکاری که از یک منظر مطلوب است ممکن است در بعدی هزینه‌ای به همراه داشته باشد.

معماری بومی یزد و خرائق این موضوع را از زاویه دیگری آشکار می‌کنند. در این نمونه‌ها، سایه، فشردگی، حیاط، جرم و درون‌گرایی به صورت عناصر جدا از یکدیگر عمل نمی‌کنند؛ هر کدام بخشی از سازمانی هستند که اقلیم، حریم، حرکت و شیوه زندگی را هم‌زمان پاسخ می‌دهد. درس قابل‌انتقال از این معماری، تکرار کالبد تاریخی نیست، بلکه شناخت همین روابط و بازآزمایی سازوکار آن‌ها در شرایط امروز است.

نمونه‌های معاصر نیز نشان دادند که طراحی پایدار در لحظه طراحی پایان نمی‌یابد. تجربه مصدر، شهر پایدار دبی، BedZED و ICTA-ICP یادآور می‌شود که عملکرد نهایی به اجرا، بهره‌برداری، رفتار کاربر، مدیریت و کیفیت اتصال اجزای سیستم وابسته است. بنابراین، هیچ راهکار یا فناوری تنها با حضور در طرح، واجد منفعت اثبات‌شده تلقی نمی‌شود.

همین منطق در محفظه کشت نیز تکرار می‌شود. نیمه‌مدفون شدن، جرم، پوشش، تهویه و سایه هر یک می‌توانند شرایط حرارتی را تغییر دهند، اما اثر آن‌ها باید در کنار پیامد نوری دیده شود. در نتیجه، همان‌گونه که کاهش بار انرژی در مسکن بدون توجه به نور روز برای داوری کافی نیست، کاهش دمای محفظه نیز بدون توجه به دریافت نسبی انرژی خورشیدی نمی‌تواند به‌تنهایی معیار انتخاب باشد.

از مجموع این مطالعات، یک اصل مشترک برای ادامه پژوهش به دست می‌آید: **تصمیم اقلیمی زمانی قابل دفاع است که سازوکار آن روشن، اثر آن قابل‌سنجش، پیامد جانبی آن آشکار و حدود کاربردها مشخص باشد.** بر همین اساس، فصل بعد این منطق را به روش تحقیق تبدیل می‌کند و نحوه تعریف مدل‌ها، متغیرها، سناریوها، شاخص‌ها و کنترل کیفیت داده‌ها را توضیح می‌دهد. فصل‌های نتایج نیز نشان خواهند داد که هر یک از این تصمیم‌ها در دو ماژول مسکن و محفظه کشت چه رفتاری از خود نشان داده‌اند و در نهایت، کدام یافته‌ها قابلیت بازگشت به قاعده طراحی معماری را دارند.

فصل سوم: روش پژوهش و چارچوب ارزیابی اقلیم پاسخ

رویکرد روش شناختی پژوهش

این پژوهش روشی برای تبدیل شناخت اقلیمی و سازوکارهای منتخب معماری یزد به عوامل قابل آزمون در طراحی ارائه می‌کند. این روش در دو بخش مسکن و محفظه کشت نیمه‌مدفون به کار گرفته می‌شود. منطق ارزیابی در هر دو مشترک است، اما معیارهای عملکرد متناسب با نیازهای متفاوت فضای سکونت و محیط کشت به‌طور مستقل تعریف می‌شوند.

۳-۱. مقدمه

شناخت معماری در اقلیم گرم‌وخشک زمانی می‌تواند به طراحی امروز کمک کند که رابطه میان شرایط محیطی، نیاز فضا و سازوکارهای کالبدی روشن باشد. از این رو، روش این پژوهش بر بازتولید شکل تاریخی یا تبدیل عناصر معماری بومی به مجموعه‌ای از اعداد استوار نیست. آنچه مورد توجه قرار می‌گیرد، منطق عملکردی راهبردهایی است که از طریق کنترل تابش، ایجاد سایه، تعدیل انتقال و ذخیره حرارت، امکان تهویه و ارتباط با زمین بر شرایط محیطی بنا اثر می‌گذارند.

بر این اساس، هر موضوع ابتدا به‌صورت یک مسئله معماری تعریف می‌شود. سپس سازوکار فیزیکی مؤثر بر آن مشخص و به عاملی تبدیل می‌شود که بتوان آن را در مدل تغییر داد و اثرش را سنجید. برای مثال، جهت‌گیری به‌عنوان یک ویژگی صوری بررسی نمی‌شود، بلکه از طریق تغییر دریافت تابش، بارهای حرارتی و نور روز ارزیابی می‌گردد. به همین ترتیب، جرم حرارتی، سایه، بازشو یا تماس با زمین زمانی وارد آزمون می‌شوند که رابطه آن‌ها با رفتار محیطی فضا قابل تعریف باشد.

مسیر پژوهش از شناخت مسئله تا ارزیابی نتیجه به‌صورت پیوسته تنظیم شده است: **مسئله اقلیمی، سازوکار مؤثر، عامل طراحی، سناریوی آزمون، شاخص ارزیابی و در نهایت قاعده طراحی**. در این مسیر، نتیجه تنها به شکل یک مقدار عددی گزارش نمی‌شود. اهمیت هر یافته در این است که نشان دهد تغییر یک تصمیم معماری چه اثری ایجاد کرده، چه پیامد دیگری همراه آن بوده و این نتیجه تحت چه شرایطی معتبر است.

دو محیط معماری در پژوهش بررسی می‌شوند: یک بلوک مسکونی و یک محفظه کشت شفاف نیمه‌مدفون. این دو از نظر کاربر، شیوه بهره‌برداری و معیارهای عملکرد یکسان نیستند، اما با برخی سازوکارهای محیطی مشترک مواجه‌اند؛ از جمله دریافت تابش خورشیدی، انتقال و ذخیره حرارت، تهویه، سایه و ارتباط با زمین. این اشتراک امکان می‌دهد منطق تصمیم‌گیری اقلیمی در دو محیط بررسی شود، بدون آنکه شاخص‌های انرژی و نور روز مسکن با شاخص‌های حرارتی و DLI_{eq} محفظه در یک معیار واحد ادغام شوند.

برای حفظ امکان بررسی روش، ورودی‌های اصلی، فایل‌های مدل، تغییرات سناریوها و خروجی‌های مورد استفاده ثبت و با منشأ آن‌ها مرتبط شده‌اند. میزان قابلیت بازتولید هر بخش نیز متناسب با اسناد و فایل‌های موجود همان بخش گزارش می‌شود. جزئیات مربوط به کنترل فایل‌ها، بازتولید محاسبات و حدود مستندات در بخش کنترل کیفیت و اعتبار روش توضیح داده خواهد شد.

۲-۳. طرح کلی پژوهش

پژوهش حاضر با رویکرد کمی، مقایسه‌ای و مبتنی بر سناریو انجام شده است. مرور منابع برای شناخت سازوکارهای اقلیمی و تعیین حدود ارزیابی به کار رفته و شبیه‌سازی انرژی، رفتار حرارتی و نور روز امکان سنجش اثر تصمیم‌های معماری را فراهم کرده است. تحلیل نتایج نیز در مقیاس ساعتی، ماهانه، فصلی و سالانه انجام می‌شود تا تغییرات عملکرد در طول سال در میانگین‌های کلی پنهان نماند.

اصل اساسی در مقایسه سناریوها، حفظ ارتباط میان متغیر تغییرکرده و نتیجه مشاهده‌شده است. هر جا تنها یک عامل میان دو سناریو تغییر کرده باشد، تفاوت نتیجه می‌تواند با احتیاط به همان عامل نسبت داده شود. اما در مقایسه‌هایی که هندسه یا چند ویژگی به‌طور هم‌زمان تغییر کرده‌اند، نتیجه به عملکرد مجموعه آن تصمیم‌ها مربوط است و به یک عامل منفرد نسبت داده نمی‌شود.

انتخاب سناریوی مناسب نیز بر یک شاخص منفرد استوار نیست. در بخش مسکن، بارهای حرارتی در کنار شاخص‌های نور روز بررسی می‌شوند؛ زیرا کاهش مصرف انرژی ممکن است با کاهش کیفیت دریافت نور همراه باشد. در محفظه کشت نیز تغییر شرایط حرارتی در کنار DLI_{eq} سنجیده می‌شود تا کاهش گرمای ناخواسته بدون توجه به تغییر دریافت خورشیدی به‌عنوان بهبود قطعی تفسیر نشود.

این شیوه اجازه می‌دهد هر نتیجه در ارتباط با مسئله‌ای که برای آن تعریف شده است خوانده شود و از ترکیب شاخص‌های ناهم‌سنخ در یک امتیاز قراردادی پرهیز شود.

جدول ۳-۱. مشخصات کلی طرح پژوهش

مؤلفه	تعریف در این پژوهش	نتیجه مورد انتظار
واحدهای مطالعه	دو مدل معماری مستقل در اقلیم یزد: بلوک مسکونی و محفظه کشت نیمه‌مدفون	ارزیابی مستقل هر محیط با معیارهای متناسب با عملکرد آن
منطق مقایسه	تغییر کنترل‌شده عوامل طراحی و مقایسه سناریوهای هم‌شرایط تا حد امکان	تشخیص اثر عامل منفرد در مقایسه‌های همسان و اثر مجموعه تصمیم‌ها در مقایسه‌های چندمتغیره

مؤلفه	تعریف در این پژوهش	نتیجه مورد انتظار
مقیاس زمانی	شبیه‌سازی سال کامل ۸۷۶۰ ساعته و تحلیل نتایج در مقیاس ماهانه و فصلی	آشکارشدن تغییرات عملکرد در دوره‌های مختلف سال
مبنای ارزیابی	بررسی هم‌زمان شاخص‌های مرتبط با هر مسئله، بدون ادغام آن‌ها در یک امتیاز واحد	تشخیص منفعت و پیامد جانبی هر تصمیم
کنترل روش	ثبت ورودی‌ها، شرایط مدل، فایل‌های اصلی و خروجی‌های مورد استفاده و مقایسه نتایج با شواهد هم‌سنخ	امکان پیگیری منشأ نتایج و بررسی حدود اعتبار آن‌ها

۳-۳. زنجیره مشترک تبدیل منطق اقلیمی به تصمیم معماری

روش پژوهش بر یک زنجیره شش مرحله‌ای استوار است که از شناخت مسئله اقلیمی آغاز می‌شود و به قاعده‌ای برای تصمیم‌گیری در طراحی می‌رسد. در این مسیر، هیچ عنصر بومی یا راهکار معاصر صرفاً به دلیل سابقه استفاده یا عنوان «پایدار» وارد مدل نمی‌شود. ورود هر راهکار زمانی موجه است که روشن باشد به کدام نیاز اقلیمی پاسخ می‌دهد، از چه سازوکاری بر شرایط محیطی اثر می‌گذارد، چگونه می‌توان آن را در معماری تعریف کرد و اثر آن با چه شاخصی قابل سنجش است.

به این ترتیب، آنچه از معماری بومی به پژوهش منتقل می‌شود، شکل تاریخی نیست؛ بلکه رابطه‌ای است که میان نیاز اقلیمی، سازمان فضایی و عملکرد محیطی برقرار شده است. این رابطه در مدل به عاملی قابل کنترل تبدیل می‌شود و در شرایط مشخص مورد آزمون قرار می‌گیرد.

مسیر پژوهش در شش مرحله تعریف می‌شود:

صورت‌بندی مسئله: مشخص کردن تنش اقلیمی یا نیاز محیطی و پرسش معماری مرتبط با آن؛

شناخت سازوکار: توضیح چگونگی اثر راهکار از طریق تابش، انتقال و ذخیره حرارت، سایه یا تبادل هوا؛

ترجمه به تصمیم معماری: تبدیل سازوکار شناخته‌شده به عواملی مانند هندسه، جهت، پوسته، بازشو، سایه‌انداز یا تماس با زمین؛

تعریف متغیر در مدل: تعیین مقدار قابل کنترل، دامنه تغییر و منشأ مقدار انتخاب‌شده؛

آزمون سناریو: مقایسه گزینه‌ها در شرایط تا حد امکان همسان و استخراج خروجی‌های متناسب با مسئله؛

بازگرداندن نتیجه به طراحی: تفسیر اثر اصلی، پیامد جانبی، شرایط کاربرد و حدود اعتبار نتیجه و تبدیل آن به قاعده‌ای برای تصمیم معماری.



شکل ۳-۱. زنجیره مشترک تبدیل منطق اقلیمی به تصمیم طراحی در دو بخش پژوهش

برای مثال، سایه در بافت تاریخی یزد با بازتولید شکل ساباط به معماری امروز منتقل نمی‌شود. آنچه اهمیت دارد، سازوکاری است که از طریق کاهش مواجهه با تابش مستقیم و ایجاد تداوم سایه، شرایط مسیر را تعدیل می‌کند. این منطق می‌تواند در طراحی معاصر به متغیرهایی مانند عمق و هندسه سایه‌انداز، نسبت ارتفاع به عرض، جهت استقرار یا زمان حضور سایه تبدیل شود و سپس اثر آن بر دریافت تابش، بار سرمایش و نور روز بررسی گردد.

بنابراین، ساباط در این پژوهش یک «فرم پیشنهادی» نیست؛ بلکه نمونه‌ای برای فهم یک اصل است: چگونه می‌توان با سازمان فضایی، میزان و زمان مواجهه با تابش را تغییر داد؟ پاسخ این پرسش ممکن است در یک پروژه معاصر به شکلی کاملاً متفاوت از ساباط تاریخی ظاهر شود. همین منطق درباره حیاط، جرم حرارتی، بازشو، تهویه و تماس با زمین نیز دنبال می‌شود.

۳	۲	۱
ترجمه طراحی	سازوکار فیزیکی	صورت‌بندی مسئله
تبدیل منطق به فرم، پوسته، بازشو، سایه با تماس با زمین	توضیح مسیر اثر: تابش، هدایت، ذخیره یا تبادل هوا	تعیین تنش اقلیمی و تصمیم معماری مورد پرسش
۶	۵	۴
قاعده تصمیم‌گیری	آزمون سناریو	متغیر مدل
تفسیر چندشاخصی همراه با شرط کاربرد و پیامد جانبی	اجرای همسان، استخراج ساعتی و کنترل کیفیت	تعریف مقدار قابل کنترل و ثبت منشأ آن

۳-۴. منشأ داده‌ها و حدود شواهد پژوهش

از آنجا که نتایج این پژوهش از منابع متفاوتی به دست می‌آیند، منشأ هر داده باید از نوع استفاده آن قابل تشخیص باشد. بخشی از اطلاعات، مانند داده‌های اقلیمی، ویژگی مصالح یا حدود معیارها، از منابع علمی، استانداردها یا اطلاعات فنی معتبر گرفته شده‌اند. بخشی دیگر، مانند هندسه، جهت‌گیری، نسبت بازشو یا برنامه سایه، به عنوان تصمیم یا فرض مشخص در سناریوهای پژوهش تعریف شده‌اند. گروه سوم نیز خروجی‌هایی هستند که مستقیماً از شبیه‌سازی یا پردازش نتایج به دست آمده‌اند.

تفکیک این سه نوع داده از آن جهت اهمیت دارد که مقدار برگرفته از یک منبع علمی، فرض تعریف‌شده برای یک سناریو و نتیجه حاصل از شبیه‌سازی، نقش یکسانی در استدلال ندارند. برای مثال، U-value یک جداره ممکن است از مشخصات فنی یک ساختار انتخاب شود، اما بار سرمایش حاصل از آن نتیجه مدل است. به همین ترتیب، زاویه یک سایه‌انداز ممکن است متغیر طراحی باشد، درحالی‌که تغییر UDI یا دریافت تابش، خروجی ارزیابی همان تصمیم است.

در طول پژوهش، ورودی‌های اصلی و تغییرات سناریوها ثبت شده‌اند تا ارتباط میان تصمیم طراحی و نتیجه حاصل قابل پیگیری باشد. در مواردی که نتیجه از پردازش ثانویه خروجی‌های مدل به دست آمده است، روش محاسبه نیز مشخص می‌شود. این ثبت برای آن است که روشن باشد هر مقدار از کجا آمده و تحت چه شرایطی به دست آمده است، نه آنکه نتایج شبیه‌سازی به‌عنوان اندازه‌گیری مستقیم ساختمان واقعی تلقی شوند.

در مورد شکل‌ها نیز میان شکل توضیحی و شاهد کمی تفاوت گذاشته می‌شود. دیاگرام‌ها، شیت‌های معماری و تصاویر مفهومی برای توضیح سازمان فضا، سازوکار طراحی یا نحوه شکل‌گیری سناریو استفاده می‌شوند؛ اما نتیجه عددی از آن‌ها استخراج نمی‌شود. هر جا شکل یا داده‌ای از منبع بیرونی گرفته یا بر پایه آن بازترسیم شده باشد، منبع در عنوان یا توضیح شکل ذکر می‌شود. شکل‌های بدون منبع بیرونی، حاصل ترسیم، مدل‌سازی یا پردازش داده‌های همین پژوهش‌اند.

لایه پشتیبان: سناریوی فضایی و دسترسی روزمره

پژوهش حاضر طراحی شهری یا شبکه حمل‌ونقل را به‌عنوان موضوع مستقل بررسی نمی‌کند؛ بااین‌حال، تصمیم‌های معماری نیز نمی‌توانند بدون توجه به نحوه استقرار بلوک‌ها، مسیر حرکت و دسترسی روزمره شکل بگیرند. ازاین‌رو، یک سناریوی فضایی محدود برای بررسی این موضوع در نظر گرفته شده است که آیا سازمان پیشنهادی بلوک‌ها می‌تواند در کنار حرکت پیاده، دوچرخه و دسترسی به حمل‌ونقل سبک قرار گیرد یا خیر.

جمعیت در نظر گرفته‌شده برای این سناریو بخشی از فرض طراحی است و نتیجه پژوهش محسوب نمی‌شود. هدف نیز اثبات الگوی مشخصی از شهر یا تعیین ظرفیت بهینه سکونت نیست، بلکه کنترل اولیه رابطه میان فاصله، مسیر حرکت و استقرار اجزای معماری است.

برای نزدیک‌تر شدن فاصله مستقیم به مسیر واقعی حرکت، ضریب ۱٫۲۰ برای پیچ‌وخم مسیر اعمال شده است. بر این اساس، در دورترین نقاط بررسی‌شده، فاصله تا نزدیک‌ترین ایستگاه حدود ۶۲۶ متر و تا نزدیک‌ترین مرکز محله حدود ۸۳۶ متر به دست می‌آید. با سرعت‌های مفروض پیاده‌روی، این فاصله‌ها به ترتیب حدود ۷٫۵ تا ۸٫۷ دقیقه و ۱۰ تا ۱۱٫۶ دقیقه زمان نیاز دارند.

این محاسبه تنها نشان می‌دهد که در هندسه بررسی شده، امکان دسترسی روزمره در چنین دامنه‌ای وجود دارد. نتیجه نباید به عنوان مدل تقاضای سفر، ارزیابی کامل شبکه پیاده، طراحی حمل و نقل یا اثبات یک «شهر پانزده دقیقه‌ای» تفسیر شود.

اهمیت این کنترل برای معماری در آن است که محل بلوک‌ها، فضاهای میانی و مسیرهای حرکتی از ابتدا به گونه‌ای سازمان یابند که حرکت پیاده و دوچرخه، دسترسی خدماتی و امدادی و محل اتصال به حمل و نقل سبک در ساختار فضا امکان پذیر باشد. ظرفیت ناوگان، فاصله حرکت وسایل نقلیه، طراحی ریل یا زیرساخت شارژ و شیوه بهره‌برداری شبکه، به بررسی تخصصی مستقل نیاز دارند و در محدوده ارزیابی این پژوهش قرار نمی‌گیرند.



شکل ۳-۲. منطق دسترسی روزمره در سناریوی فضایی پروژه؛ نمودار دسترسی، نه شعاع فرم شهری. منبع: ترسیم نگارنده بر اساس آرشیو پروژه.

۳-۵. داده اقلیمی و محیط محاسباتی

هر دو بخش پژوهش در اقلیم یزد بررسی می‌شوند و برای آنکه تفاوت نتایج ناشی از تغییر تصمیم‌های طراحی باشد، از ورودی آب‌وهوایی مشترک استفاده شده است. فایل اقلیمی مورد استفاده، TMYx ایستگاه فرودگاه بین‌المللی شهید صدوقی یزد از پایگاه Climate.OneBuilding با شناسه WMO=408210 است. موقعیت ایستگاه در عرض جغرافیایی ۳۱٫۹۰ درجه شمالی، طول جغرافیایی ۵۴٫۲۹ درجه شرقی و ارتفاع ۱۲۳۵٫۷ متر قرار دارد.

فایل TMYx از ماه‌های نماینده دوره ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳ تشکیل شده و یک سال اقلیمی نمونه را ایجاد می‌کند. بنابراین، نتایج این پژوهش بیانگر عملکرد مدل‌ها در یک سال متعارف اقلیمی‌اند و نباید به عنوان پیش‌بینی شرایط یک سال تقویمی مشخص یا اقلیم آینده تفسیر شوند.

جدول ۳-۲. داده اقلیمی و محیط محاسباتی

مؤلفه	مشخصات مورد استفاده	نقش در پژوهش
ایستگاه اقلیمی	فرودگاه بین‌المللی شهید صدوقی یزد	مرجع مشترک شرایط آب‌وهوایی
موقعیت	°N, 54.29°E ۳۱.۹۰	محاسبات خورشیدی و شرایط محیطی
ارتفاع	m ۱۲۳۵.۷	بخشی از مشخصات اقلیمی فایل
فایل آب‌وهوا	TMX، دوره ۲۰۲۳-۲۰۰۹	سال اقلیمی نمونه برای مقایسه سناریوها
EnergyPlus	نسخه ۲۴.۲.۰ در مدل گلخانه نیمه‌مدفون	محاسبات حرارتی و بارهای مدل
Ladybug / Honeybee	Ladybug 1.8.1 / Honeybee 1.8.0	تعریف مدل، سناریوها و استخراج خروجی‌ها
گام زمانی خروجی	ساعتی، ۸۷۶۰ ساعت	بررسی تغییرات سالانه، فصلی و آستانه‌ای

تحلیل ساعتی از آن جهت اهمیت دارد که میانگین سالانه به‌تنهایی نمی‌تواند زمان وقوع شرایط نامطلوب را نشان دهد. برای مثال، دو سناریو ممکن است بار سالانه مشابهی داشته باشند، اما یکی در دوره‌های گرم سال با اوج بار بیشتری روبه‌رو شود. به همین دلیل، در کنار مقادیر سالانه، تغییرات ماهانه، فصلی و ساعات قرارگیری در محدوده‌های مشخص نیز در بخش‌های متناسب بررسی می‌شوند.

در بخش مسکن، Honeybee برای سازمان‌دهی مدل و ارتباط با موتورهای محاسبات انرژی و نور روز به کار رفته است. شماره نسخه مستقل EnergyPlus مربوط به اجرای نهایی این بخش در آرشیو موجود ثبت نشده است. این موضوع مانع مقایسه سناریوهای ثبت‌شده با یکدیگر نیست، اما بازاجرای کاملاً یکسان همان محیط نرم‌افزاری را محدود می‌کند. از این‌رو، تفسیر نتایج مسکن بر ورودی‌های ثبت‌شده، شرایط ثابت مدل و تفاوت میان سناریوها استوار است.

در بخش گلخانه نیمه‌مدفون، نسخه EnergyPlus 24.2.0 ثبت شده و شرایط مدل با همان فایل اقلیمی یزد تعریف شده است. در این بخش نیز هدف اصلی، مقایسه اثر تغییر هندسه، تماس با زمین، پوشش، تهویه و سایه در شرایط یکسان است، نه پیش‌بینی قطعی مصرف انرژی یک گلخانه ساخته‌شده.

داده‌های سنجش‌ازدور دمای سطح زمین که در شناخت زمینه اقلیمی یزد استفاده شده‌اند، وارد محاسبات انرژی ساختمان نمی‌شوند. دمای سطح زمین و دمای هوای فایل EPW دو متغیر متفاوت‌اند؛ بنابراین داده‌های سنجش‌ازدور در این پژوهش برای توضیح زمینه حرارتی شهر به کار می‌روند، درحالی‌که شبیه‌سازی ساختمان بر داده‌های هواشناسی فایل اقلیمی و شرایط مرزی تعریف‌شده در مدل استوار است.

۳-۶. ماژول مسکن

۳-۶-۱. تعریف مدل و منطق غربالگری

ماژول مسکن برای بررسی اثر تصمیم‌های معماری بر رفتار حرارتی و نور روز، به صورت یک بلوک نمونه سه طبقه تعریف شده است. در هر طبقه دو واحد مسکونی شرطی شده و یک هسته مرکزی غیرشرطی قرار دارد. مجموع مساحت شرطی ساختمان ۵۸۸ مترمربع است که از شش واحد ۹۸ مترمربعی تشکیل می‌شود. این مدل نماینده آماری مسکن یزد نیست؛ بلکه بستری ثابت برای مقایسه اثر تغییر فرم، جهت‌گیری، بازشو، سایه و پوسته در شرایط اقلیمی یکسان است.

در مرحله نخست، سه پیکربندی $R1$ ، $R2$ و $R3$ برای بررسی تفاوت‌های کلی فرم مطالعه شدند:

$R1$: پیکربندی فشرده و نزدیک به مربع؛

$R2$: پیکربندی کشیده در راستای شمال-جنوب؛

$R3$: پیکربندی کشیده در راستای شرقی-غربی.

مقایسه این سه حالت برای یافتن یک «فرم بهینه» انجام نشد. هدف، شناخت رفتار اولیه فرم‌ها و انتخاب مسیری بود که امکان ادامه بررسی متغیرهای معماری را فراهم کند $R3$. از این نظر برای ادامه آزمون جهت‌گیری، بازشو، سایه و پوسته مناسب‌تر تشخیص داده شد و به خط اصلی توسعه مدل تبدیل شد. بنابراین، انتخاب آن به معنای اثبات برتری مطلق $R3$ نسبت به دو فرم دیگر نیست و مقایسه عملکرد سه پیکربندی در فصل چهارم ارائه می‌شود.

از آنجا که همه ویژگی‌های هندسی مراحل ابتدایی، از جمله نسبت سطح خارجی به حجم، با سطح یکسانی از جزئیات ثبت نشده‌اند، اختلاف عملکرد $R1$ ، $R2$ و $R3$ به یک عامل منفرد نسبت داده نمی‌شود. این مقایسه در سطح اثر کلی پیکربندی خوانده می‌شود و تفسیر مستقل یک متغیر تنها در آزمون‌هایی انجام می‌شود که سایر شرایط در آن‌ها ثابت مانده باشند.

پس از انتخاب مسیر اصلی، متغیرهای معماری به صورت مرحله‌ای وارد مدل شدند. مجموعه اولیه شامل ۱۰۰ حالت بود که پس از حذف موارد تکراری، ناقص یا نامطمئن، ۹۳ سناریوی قابل استفاده برای تحلیل اصلی باقی ماند. این سناریوها تغییرات فرم و جهت، نسبت بازشو، نوع شیشه، سایه، پوسته و برخی شرایط بهره‌برداری را پوشش می‌دهند.

در مرحله‌ای تکمیلی، ۱۸۰ ارزیابی پارامتریک برای محدود کردن دامنه تصمیم و بررسی دقیق‌تر برخی گزینه‌های منتخب انجام شد. این مرحله نقش کمکی دارد و جایگزین مقایسه‌های اصلی فصل چهارم نیست. نتایج آن نیز

به عنوان «بهینه جهانی» تفسیر نمی شوند، بلکه تنها برای شناخت بهتر رفتار گزینه ها در محدوده طراحی تعریف شده به کار می روند. جزئیات این مرحله در بخش ۳-۱۰-۱ توضیح داده می شود.

جدول ۳-۳. متغیرهای اصلی و شاخص های پاسخ در ماژول مسکن

حوزه تصمیم معماری	متغیرهای مورد بررسی	شاخص های اصلی پاسخ
فرم و جهت گیری	پیکربندی کلی و زاویه چرخش	بار گرمایش، سرمایش و مجموع بار حرارتی
بازشو و شیشه	WWR، جهت بازشو، U-value، VT و SHGC	بار حرارتی و شاخص های نور روز
سایه	عمق، جهت و نحوه کنترل سایه	سرمایش، گرمایش و شاخص های UDI، به ویژه UDI-low و UDI-up
پوسته	لایه های دیوار و بام، جرم و عایق	بارهای سالانه حرارتی
بهره برداری	حضور، روشنایی، تجهیزات، نفوذ هوا و نقاط تنظیم	شرایط ثابت مقایسه میان سناریوها

این ساختار سبب می شود هر متغیر نه به عنوان یک عدد مستقل، بلکه در ارتباط با پرسش معماری خود بررسی شود. برای مثال، WWR تنها نسبت سطح پنجره نیست؛ تغییر آن هم زمان بر دریافت تابش، انتقال حرارت و دسترسی به نور روز اثر می گذارد. به همین دلیل، مناسب بودن یک مقدار از طریق یک شاخص منفرد تعیین نمی شود.

۲-۶-۳. ورودی های تثبیت شده مدل

برای آنکه تفاوت میان سناریوها تا حد امکان ناشی از تصمیم معماری مورد بررسی باشد، مجموعه ای از ورودی های پایه در مدل ثابت نگه داشته شده است. این ورودی ها شامل ویژگی های اصلی پوسته، بارهای داخلی، حضور، نفوذ هوا و نقاط تنظیم دما هستند.

جدول ۳-۴. ورودی های پایه تثبیت شده در ماژول مسکن

ورودی	مقدار مورد استفاده	نقش در مدل
مساحت شرطی	$588 \text{ m}^2 \times 6 \text{ m}^2 = 98 \text{ m}^2$	مبنای نرمال سازی بارها
U-value دیوار خارجی	$0.3541 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	انتقال حرارت پوسته
U-value بام	$0.3081 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	انتقال حرارت بام

ورودی	مقدار مورد استفاده	نقش در مدل
تراکم حضور	$0.025 \times 0.25 \text{ person/m}^2$	بار داخلی و برنامه بهره‌برداری
نقطه تنظیم گرمایش	21.7°C	شرایط ثابت محاسبه بار
نقطه تنظیم سرمایش	24.4°C	شرایط ثابت محاسبه بار
نفوذ هوا	$0.000569 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$	تبادل ناخواسته هوا
روشنایی	8.8 W/m^2	بار داخلی
تجهیزات	6.0 W/m^2	بار داخلی
شیشه G3	$U=1.80 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ $VT=0.60; SHGC=0.35$	ویژگی حرارتی و نوری بازشو؛ فریم به صورت مستقل مدل نشده است

در آزمون‌های مربوط به پوسته، تفاوت میان بسته‌های M1، M2 و M3 تنها به تغییر U-value محدود نمی‌شود. تغییر لایه‌های دیوار و بام می‌تواند مقاومت حرارتی، ظرفیت ذخیره حرارت و زمان انتقال گرما را به‌طور هم‌زمان تغییر دهد. از این رو، اثر هر بسته در فصل نتایج به عملکرد مجموعه لایه‌ها نسبت داده می‌شود و نه به یک ویژگی منفرد مانند عایق یا جرم حرارتی. ضخامت، رسانایی حرارتی، چگالی، گرمای ویژه و ترتیب لایه‌های بسته‌های آزموده شده در پیوست الف ثبت می‌شوند.

الگوهای کامل ۲۴ ساعته حضور، روشنایی، تجهیزات و آب گرم در پیوست الف ارائه شده‌اند. در متن اصلی فصل، اهمیت این برنامه‌ها در ثابت بودن آن‌ها میان سناریوهای مقایسه‌ای است؛ زیرا تغییر هم‌زمان رفتار بهره‌بردار و ویژگی معماری، تشخیص اثر تصمیم طراحی را دشوار می‌کند.

نقاط تنظیم دما و برنامه حضور نیز در این پژوهش به عنوان شرایط مشترک مقایسه تعریف شده‌اند و نباید معادل رفتار واقعی همه خانوارهای یزد یا تعریف کامل آسایش حرارتی تلقی شوند. نتایج در چارچوب همین شرایط ثابت تفسیر می‌شوند.

۳-۶-۳. ارزیابی هم‌زمان انرژی و نور روز

ارزیابی ماژول مسکن بر این فرض استوار است که پاسخ اقلیمی ساختمان را نمی‌توان با یک شاخص منفرد سنجید. تصمیم‌هایی مانند کاهش سطح شیشه، افزایش سایه یا تغییر جهت ساختمان ممکن است بار سرمایش را کاهش دهند، اما در همان حال بر گرمایش زمستانی یا دسترسی به نور روز نیز اثر بگذارند. از این رو، خروجی حرارتی و نور روز در کنار یکدیگر بررسی می‌شوند.

در بخش حرارتی، بار سالانه گرمایش، سرمایش و مجموع بار حرارتی استخراج و بر اساس مساحت شرطی ۵۸۸ مترمربع نرمال می‌شوند. این مقادیر بیانگر بار نظری موردنیاز برای حفظ شرایط تعریف‌شده مدل هستند و نباید مستقیماً با مصرف واقعی برق یا گاز ساختمان یکسان تلقی شوند.

در بخش نور روز، شاخص‌های DA، cDA و UDI برای مقایسه سناریوها استفاده شده‌اند. در محاسبات اصلی، آستانه ۳۰۰ lux برای DA و cDA و محدوده ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ lux برای UDI در نظر گرفته شده است. همچنین سهم ساعات کمتر از این محدوده و ساعات بالاتر از آن بررسی می‌شود تا مشخص شود افزایش نور روز در چه شرایطی با کمبود نور یا دریافت بیش از اندازه همراه است.

مدل نور روز با Honeybee و موتور Radiance اجرا شده است. شبکه سنجش با فاصله تقریبی ۱ × ۱ متر، در ارتفاع ۰/۸ متر از کف و با فاصله ۰/۳ متر از جداره‌ها تعریف شده و در سناریوهای اصلی شامل ۲۹۴ نقطه سنجش است. شاخص‌ها ابتدا برای هر نقطه محاسبه و سپس برای مقایسه کلی سناریوها تجمیع شده‌اند.

جدول ۳-۵. تنظیمات ثبت‌شده شبیه‌سازی سالانه نور روز مسکن

مؤلفه	تنظیم مورد استفاده
روش محاسبه	Annual Daylight در Honeybee/Radiance
فایل اقلیمی	همان EPW/TMYx یزد
گام زمانی	ساعتی
آستانه cDA و DA	300 lux
محدوده UDI	100–3000 lux
ساعات ارزیابی	۱۸:۰۰–۰۸:۰۰
شبکه حسگر	حدود ۱ × ۱ m
ارتفاع حسگر	۰.۸ m
فاصله از جداره	0.3 m
تعداد نقاط اصلی	294
جهت بنا	north = 0

جزئیات نرم‌افزاری مانند دستورهای اجرایی و پارامترهای داخلی Radiance در پیوست روش ثبت می‌شوند و در متن اصلی تنها تنظیماتی آورده شده‌اند که بر تفسیر معماری نتایج اثر مستقیم دارند.

برنامه ۰۸:۰۰ تا ۱۸:۰۰ نیز یک بازه ثابت برای مقایسه سناریوهاست و نماینده الگوی حضور واقعی تمام خانوارهای یزد نیست. همچنین مصرف برق ناشی از روشنایی مصنوعی، عملکرد دیمرها و واکنش واقعی ساکنان به نور روز در این مدل محاسبه نشده است. بنابراین، اصطلاح «انرژی-نور» در این پژوهش به رابطه میان بار

نظری گرمایش و سرمایش و شاخص‌های نور روز اشاره دارد، نه به محاسبه کامل مصرف انرژی عملیاتی ساختمان.

در نتیجه، یک سناریو تنها زمانی به‌عنوان گزینه‌ای مناسب‌تر تفسیر می‌شود که اثر آن بر چند پیامد به‌طور هم‌زمان دیده شود. کاهش سرمایش در صورتی که با افزایش قابل‌توجه گرمایش یا افت شدید نور روز همراه باشد، به‌تنهایی نشانه بهبود کلی طراحی نیست.

کنترل مکمل: تراز سالانه فتوولتاییک در مرز بلوک

پس از بررسی راهکارهای کاهش نیاز ساختمان، یک کنترل تکمیلی برای سنجش امکان تأمین بخشی از نیاز عملیاتی از طریق تولید فتوولتاییک انجام شده است. هدف این مرحله طراحی کامل سامانه خورشیدی نیست، بلکه بررسی نسبت تقریبی میان نیاز سالانه بلوک و ظرفیت تولید محلی در محدوده کالبدی آن است.

در حالت پایه، حدود ۱۴۰ مترمربع سطح فعال فتوولتاییک در نظر گرفته شده است. بازده اسمی مدول ۰٫۲۰، سهم سطح فعال ۰٫۹۰، اتلاف سامانه ۰٫۱۲، بازده اینورتر ۰٫۹۶ و نسبت ظرفیت DC به AC برابر ۱٫۱۰ در محاسبه لحاظ شده‌اند.

خروجی AC سالانه با مصرف عملیاتی معادل سالانه همان بلوک مقایسه می‌شود. اتلاف ۱۲ درصد در محاسبه تولید منظور شده است و بنابراین دوباره از خروجی نهایی کسر نمی‌شود.

این مقایسه تنها **تراز سالانه تولید و تقاضا** را نشان می‌دهد. هم‌زمانی ساعتی تولید و مصرف، ذخیره‌سازی انرژی، خودمصرفی، تبادل با شبکه و بار زیرساخت‌های خارج از ساختمان در این محاسبه بررسی نشده‌اند. از این‌رو، نزدیک شدن تولید سالانه به تقاضای سالانه به معنای استقلال انرژی ساختمان نیست.

برای بررسی میزان وابستگی نتیجه به فرض‌های مدل، حساسیت تراز نهایی نسبت به تغییر بازده سامانه‌های سرمایش و گرمایش، بار روشنایی و تجهیزات، انرژی فن و میزان تولید PV بررسی شده است. این تحلیل بازاجرای مدل ساختمان نیست، بلکه نشان می‌دهد تغییر معقول برخی فرض‌های عملیاتی تا چه اندازه می‌تواند نتیجه تراز سالانه را جابه‌جا کند. جزئیات توزیع‌ها و نمونه‌گیری در پیوست روش ارائه می‌شوند.

همچنین زاویه شیب، آزمون آرایه و خودسایه‌اندازی ردیف‌های PV در مستندات موجود با دقت کافی برای تعمیم مستقیم مقدار سطح به پروژه‌ای دیگر تثبیت نشده‌اند. بنابراین، مساحت به‌دست‌آمده در این پژوهش مختص شرایط مدل حاضر است و در یک ساختمان یا سایت دیگر باید بر اساس هندسه، جهت‌گیری و شرایط سایه همان پروژه دوباره محاسبه شود.

۳-۷. ماژول گلخانه نیمه‌مدفون والپینی

۳-۷-۱. تعریف مدل و مسئله معماری

در ماژول دوم، یک محفظه کشت شفاف نیمه‌مدفون از نوع والپینی بررسی می‌شود. مسئله اصلی این بخش، پیش‌بینی میزان تولید محصول نیست؛ بلکه بررسی این پرسش معماری است که نحوه استقرار بنا نسبت به زمین، نوع پوشش، امکان تهویه و کنترل فصلی تابش چگونه می‌توانند شرایط حرارتی داخل را تغییر دهند، بدون آنکه دریافت خورشیدی بیش از اندازه محدود شود.

در اقلیم گرم‌و‌خشک یزد، دریافت تابش خورشیدی برای یک فضای شفاف هم فرصت است و هم مسئله. تابش بیشتر می‌تواند در دوره‌های سرد به افزایش دمای داخل کمک کند، اما در ماه‌های گرم احتمال بیش‌گرمایش را افزایش می‌دهد. از طرفی، کاهش بیش از حد ورود تابش از طریق پوشش یا سایه نیز می‌تواند میزان انرژی خورشیدی در دسترس فضای کشت را کاهش دهد. بنابراین، عملکرد این محفظه بر اساس یک شاخص منفرد سنجیده نمی‌شود و رابطه میان رفتار حرارتی و دریافت نسبی خورشیدی مبنای مقایسه سناریوهاست.

متغیرهای اصلی عبارت‌اند از:

قرارگیری روی زمین یا نیمه‌مدفون؛

میزان تماس جداره با خاک؛

نوع پوشش شفاف؛

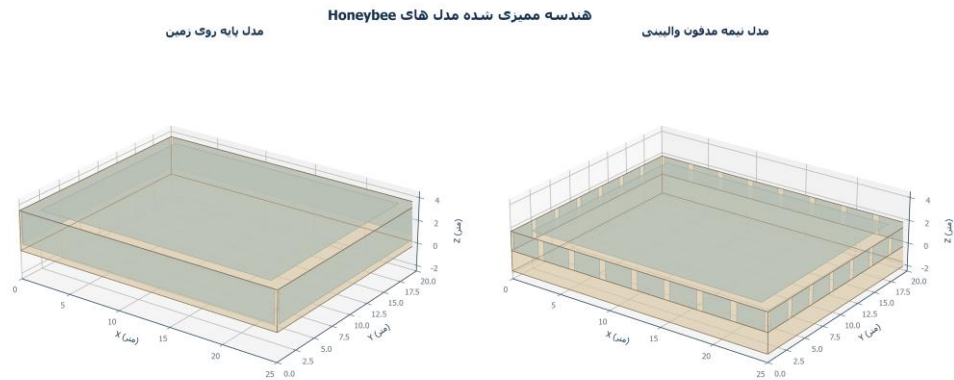
امکان تهویه طبیعی؛

میزان و زمان سایه فصلی.

خروجی‌ها نیز شامل دمای هوای داخل، ساعات شرایط بسیار گرم یا سرد، نوسان روزانه دما، بار نظری موردنیاز برای کنترل دما و شاخص نسبی DLI_{eq} هستند.

DLI_{eq} در این پژوهش برای مقایسه میزان انرژی خورشیدی عبوری میان سناریوها استفاده می‌شود و معادل اندازه‌گیری واقعی نور در سطح گیاه یا پیش‌بینی رشد و عملکرد محصول نیست. به همین دلیل، نتایج این بخش در محدوده رفتار حرارتی محفظه و دسترسی نسبی آن به تابش خورشیدی تفسیر می‌شوند.

فرایندهای رطوبتی و زیستی محیط کشت، از جمله تبخیر و تعرق، رطوبت، CO_2 و عملکرد گیاه، در مدل حاضر شبیه‌سازی نشده‌اند. بررسی این عوامل نیازمند توسعه مدل با داده‌ها و تخصص مرتبط با محیط کشت است و در دامنه مستقیم این رساله قرار ندارد.



منبع: قائم در باره واقعی دمای خانه نیمه مدفون: عمق دای ۱٫۸ متر و ارتفاع کل ۳٫۸ متر

شکل ۳-۳. هندسه ثبت شده دو خانواده پایه و والپینی و سطوح مؤثر پوشش

۳-۷-۲. هندسه و ارتباط با زمین

برای آنکه اثر نیمه مدفون شدن قابل بررسی باشد، دو خانواده هندسی با مساحت کف و ابعاد کلی یکسان تعریف شدند: یک محفظه روی زمین و یک محفظه نیمه مدفون. تفاوت اصلی آن‌ها در میزان سطح شفاف و نحوه ارتباط پوسته با خاک است.

جدول ۳-۶. هندسه و شرایط مرزی دو خانواده محفظه

مؤلفه	مدل پایه	مدل نیمه مدفون
مساحت کف	500 m ²	500 m ²
ابعاد مرجع	25 × 20 m	25 × 20 m
ارتفاع	3.8 m	3.8 m
مساحت پوشش شفاف	652.0 m ²	522.4 m ²
شرط مرزی اصلی خاک	سری دمای خاک EPW در عمق ۰.۵ m	سری دمای خاک EPW در عمق ۲ m
آزمون حساسیت خاک	EPW در ۰.۵، ۲ و ۴ m حالت ثابت ۲۰°C	EPW در ۰.۵، ۲ و ۴ m حالت ثابت ۲۰°C

در مدل نیمه مدفون، خاک بخشی از شرایط مرزی حرارتی بنا را تشکیل می‌دهد. با این حال، دمای خاک در عمق‌های مختلف یک مقدار ثابت و قطعی نیست. برای بررسی میزان وابستگی نتیجه به این فرض، چهار حالت مرزی شامل دمای خاک فایل اقلیمی در عمق‌های ۰.۵، ۲ و ۴ متر و یک حالت ثابت ۲۰ درجه سلسیوس مورد آزمون قرار گرفت.

این چهار حالت برای سناریوهای منتخب F_S4 ، F_S5 و نمونه‌های فعال متناظر آن‌ها بازاجرا شدند و در مجموع ۱۶ اجرای حساسیت شکل گرفت که در هر گروه تنها شرط مرزی خاک تغییر می‌کرد. هدف این آزمون یافتن یک «دمای صحیح خاک» نبود، بلکه بررسی این موضوع بود که آیا جهت و اندازه اثر نیمه‌مدفون‌شدن با تغییر فرض مربوط به زمین پایدار می‌ماند یا خیر.

مدل حاضر انتقال هم‌زمان حرارت و رطوبت در توده خاک را با جزئیات شبیه‌سازی نمی‌کند. از این‌رو، نتایج مربوط به زمین برای شناخت اثر نسبی تماس بنا با خاک و تصمیم معماری استفاده می‌شوند و نباید معادل پیش‌بینی دقیق رفتار واقعی خاک سایت تلقی شوند.

۳-۷-۳. مصالح پوشش

پوسته شفاف یکی از عوامل اصلی در رابطه میان دریافت خورشیدی و رفتار حرارتی محفظه است. پوششی با U-value پایین‌تر می‌تواند انتقال حرارت از طریق جداره را کاهش دهد، اما ویژگی‌های عبور تابش آن نیز بر مقدار انرژی خورشیدی واردشده به فضا اثر می‌گذارد. بنابراین انتخاب پوشش تنها بر اساس یک ویژگی حرارتی انجام نشده است.

دو پوشش اصلی مورد مقایسه قرار گرفتند:

جدول ۳-۷. مشخصات پوشش‌های شفاف در مدل نهایی

پوشش	U-value W/(m ² ·K)	SHGC	VT	منشأ مشخصات
شیشه تک‌جداره ۶ میلی‌متر	5.708	0.843	0.893	Saint-Gobain Glass (2023) برای مشخصات نوری/خورشیدی؛ U-value از EnergyPlus مدل ممیزی‌شده
پلی‌کربنات شش‌جداره ۱۶ میلی‌متر	1.801	0.631	0.592	arcoPlus, Gallina USA (n.d.) 6166

مقادیر جدول از مشخصات فنی منابع سازنده و ورودی‌های ثبت‌شده مدل استخراج شده‌اند.

در تفسیر نتایج، پلی‌کربنات صرفاً به دلیل U-value کمتر گزینه بهتر تلقی نمی‌شود؛ همان‌گونه که عبور بیشتر تابش در شیشه نیز به‌تنهایی مزیت محسوب نمی‌شود. اثر هر پوشش باید از طریق پیامد هم‌زمان آن بر دمای داخل، بار حرارتی و دریافت خورشیدی بررسی شود.

۴-۷-۳. سازمان سناریوهای طراحی

سناریوها به صورت مرحله‌ای تعریف شدند تا چهار تصمیم اصلی — هندسه، تهویه، پوشش و سایه — در ترکیب‌های مشخص بررسی شوند. در مقایسه‌هایی که تنها یک عامل تغییر کرده است، اثر همان عامل به صورت مستقل تفسیر می‌شود؛ اما هر جا چند ویژگی هم‌زمان تغییر کرده‌اند، نتیجه به عملکرد کل بسته طراحی نسبت داده می‌شود.

جدول ۳-۸. سناریوهای اصلی بخش والپینی

شناسه	هندسه	تهویه	پوشش	سایه فصلی	پرشش اصلی
F_S0	روی زمین	بسته	شیشه	ندارد	رفتار پایه محفظه بسته
F_S1	روی زمین	طبیعی	شیشه	ندارد	اثر تهویه
F_S2	نیمه‌مدفون	بسته	شیشه	ندارد	اثر بسته هندسی نیمه‌مدفون
F_S3	نیمه‌مدفون	طبیعی	شیشه	ندارد	ترکیب نیمه‌مدفون و تهویه
F_S4	روی زمین	طبیعی	شیشه	آوریل-سپتامبر	اثر سایه فصلی
F_S5	نیمه‌مدفون	طبیعی	شیشه	مه-اوت	اثر سایه در مدل نیمه‌مدفون
F_S6	روی زمین	طبیعی	پلی‌کربنات	ندارد	اثر تغییر پوشش
F_S7	نیمه‌مدفون	طبیعی	پلی‌کربنات	ندارد	پوشش کم‌انتقال‌تر در والپینی
F_S8	روی زمین	طبیعی	پلی‌کربنات	آوریل-سپتامبر	اثر ترکیب پوشش و سایه
F_S9	نیمه‌مدفون	طبیعی	پلی‌کربنات	مه-اوت	ترکیب نهایی راهبردهای غیرفعال

این ساختار امکان می‌دهد مسیر تغییر طراحی از یک محفظه شفاف ساده به مجموعه‌ای از راهبردهای اقلیم‌پاسخ دنبال شود؛ بدون آنکه نتیجه هر مرحله الزاماً به عنوان بهبود قطعی در همه شاخص‌ها تفسیر شود.

۵-۷-۳. تهویه طبیعی و سایه فصلی

تهویه طبیعی در سناریوهای اصلی با سطح بازشوی هندسی معادل ۳۰ درصد مساحت کف تعریف شد. بازشدن دریچه‌ها تابع شرایط دمای داخل و خارج است؛ به گونه‌ای که تهویه زمانی فعال می‌شود که دمای داخل از ۲۷ درجه سلسیوس بیشتر باشد، دمای بیرون حداقل ۱۶ درجه باشد و اختلاف مناسب میان داخل و خارج وجود داشته باشد.

هدف از این تعریف، بررسی ظرفیت بالقوه تهویه طبیعی برای دفع گرمای اضافی در شرایط یکسان میان سناریوهاست. سطح بازشو در این مرحله معادل سطح آزاد اجرایی پس از توری، قاب، عملگر و سایر موانع نیست

و بنابراین نباید مستقیماً به ابعاد اجرایی دریاچه‌ها تبدیل شود. آزمون تکمیلی با سطح بازشوی کمتر نیز برای بررسی حساسیت جهت پاسخ انجام شده است.

چیدمان بازشوها در دو هندسه کاملاً یکسان نیست؛ زیرا نیمه‌مدفون شدن بخشی از سطوح جانبی را تغییر می‌دهد. از این رو، مقایسه نهایی میان دو هندسه، رفتار ترکیبی **فرم و امکان تهویه آن** را نشان می‌دهد و نمی‌توان همه اختلاف را به یک عامل منفرد نسبت داد.

راهبرد دوم، سایه فصلی است. سایه تنها در ماه‌هایی فعال شده است که کنترل دریافت خورشیدی اهمیت بیشتری دارد. در سناریوهای شیشه‌ای اصلی، ضریب عبور خورشیدی سایه ۰.۷۵ در نظر گرفته شد و زمان فعال شدن آن بر اساس خانواده هندسی تغییر کرد.

این مقدار یک فرض مقایسه‌ای در مدل است و به معنای ویژگی نوری یک محصول کشاورزی یا سایه‌بان اجرایی مشخص نیست. هدف، بررسی این پرسش است که **کاهش کنترل شده تابش در چه دوره‌ای می‌تواند بیش گرمایش را محدود کند و در مقابل چه میزان از دریافت خورشیدی را کاهش می‌دهد.**

۳-۷-۶. حالت آزاد و بار حرارتی نظری

سناریوهای اصلی ابتدا در حالت آزاد یا free-running بررسی شدند؛ یعنی هیچ سامانه فعال گرمایش یا سرمایش برای ثابت نگه داشتن دمای داخل در مدل عمل نمی‌کند. این حالت امکان می‌دهد اثر مستقیم فرم، زمین، پوشش، تهویه و سایه بر رفتار حرارتی فضای داخلی مشاهده شود.

عملکرد سناریوهای آزاد از طریق دمای ساعتی، ساعات بسیار گرم و بسیار سرد و دامنه نوسان روزانه بررسی می‌شود.

در مرحله‌ای مکمل، چند سناریوی منتخب با کنترل نظری دما نیز اجرا شدند. در این حالت، محدوده ۱۷ تا ۲۷ درجه سلسیوس به عنوان شرایط ثابت مقایسه در نظر گرفته شد و بار لازم برای نگه داشتن فضا در این محدوده محاسبه گردید.

این بار، **نیاز حرارتی نظری مدل** است و معادل مصرف واقعی تجهیزات مکانیکی یک گلخانه نیست. هدف آن تنها پاسخ به این پرسش است که پس از اعمال راهبردهای غیرفعال، چه مقدار نیاز حرارتی برای کنترل شرایط داخل باقی می‌ماند.

شناسه‌ها و ساختار اجراهای فعال در فصل پنجم، همراه با نتایج متناظر، گزارش می‌شوند.

۳-۷-۷. شاخص‌های حرارتی و DLI_{eq}

میانگین سالانه دما برای ارزیابی یک فضای شفاف در اقلیم یزد کافی نیست؛ زیرا ممکن است دوره‌های طولانی بیش‌گرمایش یا افت دما در یک مقدار میانگین پنهان شوند. بنابراین، رفتار سناریوها در مقیاس ساعتی، روزانه، ماهانه و سالانه بررسی می‌شود.

جدول ۳-۹. شاخص‌های ارزیابی ماژول والپینی

شاخص	تعریف در پژوهش	کاربرد
ساعات بالاتر از $35^{\circ}C$	تعداد ساعات با دمای داخل بیش از $35^{\circ}C$	شناسایی دوره‌های گرمای شدید
ساعات کمتر از $10^{\circ}C$	تعداد ساعات با دمای داخل کمتر از $10^{\circ}C$	شناسایی دوره‌های سرمای شدید
ساعات $16-27^{\circ}C$	مدت قرارگیری در بازه میانی تعریف‌شده	مقایسه حرارتی سناریوهای آزاد
دامنه نوسان روزانه	اختلاف دمای بیشینه و کمینه هر روز	بررسی ثبات حرارتی
بار حرارتی نظری	بار لازم برای حفظ محدوده $17-27^{\circ}C$	سنجش نیاز کنترل باقیمانده

حدود دمایی فوق، معیارهای ثابت برای مقایسه سناریوها هستند و به‌عنوان محدوده بهینه رشد یک محصول مشخص تفسیر نمی‌شوند.

برای بررسی دریافت خورشیدی، انرژی ساعتی عبوری از سطوح شفاف که توسط EnergyPlus گزارش می‌شود، بر مساحت کف نرمال و به یک شاخص روزانه هم‌مبنا با عنوان DLI_{eq} تبدیل شده است. در این تبدیل از ضرایب ثابت برای برآورد سهم تابش مؤثر استفاده می‌شود. فرمول کامل، ضرایب و مراحل محاسبه در پیوست روش ارائه شده‌اند.

هدف از DLI_{eq} تعیین نور واقعی دریافتی گیاه نیست. این شاخص تنها اجازه می‌دهد سناریوهایی که هندسه، پوشش یا سایه متفاوت دارند بر یک مبنای ثابت از نظر میزان نسبی انرژی خورشیدی عبوری مقایسه شوند. بنابراین، از آن درباره رشد، کیفیت یا مقدار محصول نتیجه‌گیری نمی‌شود.

فایل‌های اصلی تحلیل شامل ۸۷۶۰ ساعت سال هستند و برای سناریوهای منتخب، پیوستگی زمانی و کامل بودن داده‌ها کنترل شده است. شاخص‌های روزانه و ماهانه نیز از همین خروجی‌های ساعتی بازتولید شده‌اند.

برای آنکه زمان وقوع مسئله در نتیجه سالانه گم نشود، علاوه بر مقادیر کلی از نمودارهای ماه-ساعت استفاده می‌شود. این نمودارها نشان می‌دهند افزایش دما، افت دما یا اثر سایه در چه فصل و چه ساعتی رخ داده است؛ موضوعی که برای تبدیل نتیجه شبیه‌سازی به تصمیم معماری اهمیت بیشتری از یک میانگین سالانه منفرد دارد.

۸-۷-۳. پردازش زمانی نتایج

خروجی‌های اصلی محفظه در مقیاس ساعتی استخراج شدند تا زمان وقوع شرایط نامطلوب در میانگین‌های سالانه پنهان نماند. فایل‌های ساعتی منتخب شامل سال کامل ۸۷۶۰ ساعته‌اند و از نظر پیوستگی زمانی، داده‌های تکراری و مقادیر خالی در متغیرهای اصلی کنترل شده‌اند.

شاخص DLI_{eq} روزانه و میانگین ماهانه نیز از همین خروجی‌های ساعتی دوباره محاسبه شد و با نتایج ثبت‌شده مطابقت داشت. این کنترل برای اطمینان از آن انجام شد که تبدیل داده خام به شاخص نهایی، خود منشأ اختلاف میان سناریوها نباشد.

در تحلیل نتایج، علاوه بر مقادیر سالانه از نمایش ماه-ساعت استفاده می‌شود. این نمایش نشان می‌دهد بیش‌گرمایش، افت دما یا اثر سایه در چه فصل و چه ساعتی رخ می‌دهد. چنین خوانشی برای طراحی اهمیت دارد؛ زیرا یک راهکار ممکن است مقدار سالانه را بهبود دهد، اما مسئله را در ساعت یا فصل دیگری تشدید کند.

۸-۳. لایه تحلیل مشترک دو ماژول

مسکن و محفظه نیمه‌مدفون از نظر کاربر، عملکرد و شاخص‌های ارزیابی یکسان نیستند و نتایج آن‌ها در یک امتیاز مشترک ادغام نمی‌شود. ارتباط میان دو بخش در سازوکارهای اقلیمی و شیوه تبدیل آن‌ها به تصمیم معماری است.

جدول ۳-۱۰. سازوکارهای مشترک و نحوه ارزیابی آن‌ها در دو بخش پژوهش

مسئله اقلیمی	در مسکن	در محفظه نیمه‌مدفون	ارزیابی مسکن	ارزیابی محفظه
دریافت خورشیدی	جهت، WWR ، $SHGC$ و سایه	هندسه، پوشش و سایه فصلی	بار حرارتی و نور روز	دما و DLI_{eq}
انتقال حرارت	U -value دیوار، بام و شیشه	U -value پوشش و ارتباط با خاک	گرمایش و سرمایش	دما و بار نظری
ذخیره و تأخیر حرارتی	جرم پوسته و عایق	جرم پوسته و تماس با زمین	بارهای حرارتی	نوسان روزانه و دمای حدی
دفع گرمای اضافی	در مدل اصلی به‌صورت متغیر مستقل آزمون نشده است	تهویه طبیعی و سطح بازشو	—	ساعات بیش از ۳۵ °C و دمای اوج
تعادل نور و گرما	بازشو و سایه	پوشش و سایه	انرژی در کنار UDI/DA	دما در کنار DLI_{eq}

این مقایسه نشان می‌دهد که یک سازوکار مشابه الزاماً در دو فضا به یک شاخص مشابه منتهی نمی‌شود. برای مثال، کنترل تابش در مسکن با نیاز حرارتی و نور روز انسان سنجیده می‌شود، در حالی که همان تصمیم در محفظه نیمه‌مدفون از طریق رفتار حرارتی و تغییر دریافت نسبی خورشیدی بررسی می‌گردد.

قاعده تفسیر

گزینه مناسب الزاماً گزینه دارای کمترین بار، کمترین دما یا بیشترین نور نیست. تصمیم زمانی از نظر معماری ارزشمند است که مسئله اصلی را تعدیل کند، پیامد آن بر سایر نیازها شناخته شده باشد و شرایط کاربرد آن نیز روشن باشد.

۹-۳. کنترل کیفیت، پیگیری و دامنه بازتولید

کنترل کیفیت در این پژوهش با هدف اطمینان از سازگاری ورودی‌ها، کامل‌بودن خروجی‌ها و صحت تبدیل داده‌های خام به شاخص‌های گزارش‌شده انجام شده است. این کنترل‌ها جایگزین اعتبارسنجی میدانی نیستند، بلکه برای کاهش خطا در مقایسه سناریوها و روشن کردن حدود اعتماد به نتایج به کار می‌روند.

در بخش محفظه نیمه‌مدفون، اجرای سناریوهای اصلی از نظر خاتمه صحیح شبیه‌سازی و وجود خطاهای جدی بررسی شد. برای بخشی از اجراها که آرشیو کامل ساعتی در دسترس بود، پیوستگی ۸۷۶۰ ساعت، مقادیر خالی و تکرار زمانی نیز کنترل شد. علاوه بر این، آزمون‌های مستقل حساسیت برای شرط مرزی خاک، سطح بازشو و روش سایه انجام گرفت تا مشخص شود تغییر نتیجه تا چه اندازه به فرض‌های منتخب مدل وابسته است.

محاسبه DLI_{eq} نیز برای سناریوهای منتخب مستقیماً از خروجی‌های ساعتی بازسازی شد و با مقادیر گزارش‌شده مطابقت داشت. مشخصات پوشش و شرایط مرزی نیز با ورودی‌های ثبت‌شده EnergyPlus تطبیق داده شدند. تعداد کامل کنترل‌ها، شناسه فایل‌ها و نتایج تفصیلی هر آزمون در پیوست روش ارائه می‌شود.

برای سنجش معقول‌بودن مرتبه بار حرارتی، نتیجه یکی از مدل‌های فعال با مطالعات قابل‌مقایسه گلخانه‌ای بررسی شد. هدف از این مقایسه اثبات صحت مقدار شبیه‌سازی شده نبود، بلکه تنها بررسی این موضوع بود که نتیجه خارج از مرتبه مقادیر گزارش‌شده در مطالعات هم‌سنخ قرار نگرفته باشد. بنابراین، این کنترل **sanity check** است و نباید به عنوان کالیبراسیون یا اعتبارسنجی تجربی مدل تفسیر شود.

یک آزمون تکمیلی نیز برای بررسی جهت پاسخ مدل نسبت به تغییر ویژگی خورشیدی پوشش انجام شد. مقدار انتخاب‌شده در این آزمون تنها برای سنجش حساسیت مدل بود و به عنوان محصول پیشنهادی یا مقدار بهینه طراحی تفسیر نمی‌شود.

در نتیجه، دامنه اعتماد به یافته‌ها بر سه پایه قرار دارد: ثبات شرایط مقایسه، کنترل خروجی‌های محاسباتی و بررسی حساسیت برخی فرض‌های مؤثر. در مقابل، نبود پایش میدانی و ساده‌سازی بعضی فرایندها، از جمله رفتار واقعی خاک و جریان هوا، در تفسیر نتایج حفظ می‌شود.

۳-۱۰. تبدیل نتایج به قاعده طراحی

هدف نهایی روش آن نیست که از میان مجموعه سناریوها صرفاً گزینه‌ای با کمترین مقدار عددی انتخاب شود. هر نتیجه باید دوباره به پرسشی معماری بازگردد: **کدام مسئله کاهش یافته، این تغییر از چه سازوکاری**

حاصل شده، چه پیامد دیگری ایجاد کرده و تحت چه شرایطی قابل استفاده است؟

از این رو، شاخص‌های مختلف در یک امتیاز نهایی واحد ادغام نمی‌شوند. بار سرمایش، گرمایش، نور روز، دمای اوج یا DLI_{eq} هر یک بخش متفاوتی از عملکرد را نشان می‌دهند و ارزش آن‌ها در نسبت با مسئله‌ای است که برای سنجش آن تعریف شده‌اند.

برای تفسیر هر راهکار، ساختار زیر استفاده می‌شود:

جدول ۳-۱۱. ساختار راهنمای تصمیم‌گیری در طراحی

جزء	پرسش
مسئله اقلیمی	کدام نیاز یا تنش محیطی مورد توجه است؟
سازوکار	تصمیم از چه مسیر فیزیکی بر فضا اثر می‌گذارد؟
تصمیم معماری	کدام ویژگی فرم، پوسته، بازشو، سایه یا ارتباط با زمین تغییر کرده است؟
شاهد	کدام سناریو، خروجی یا منبع از نتیجه پشتیبانی می‌کند؟
اثر اصلی	کدام شاخص و به چه میزان یا جهتی تغییر کرده است؟
پیامد همراه	چه اثری بر نیاز دیگری، مانند نور، گرمایش زمستانی یا دریافت خورشیدی، ایجاد شده است؟
شرایط کاربرد	نتیجه در چه هندسه، فصل یا شرایطی معتبر است؟
نیاز به بررسی تکمیلی	کدام بخش برای طراحی اجرایی به داده یا تخصص دیگری نیاز دارد؟

در بخش مسکن، این ساختار بارهای گرمایش و سرمایش را در کنار شاخص‌های نور روز قرار می‌دهد. در محفظه نیمه‌مدفون نیز دمای حدی، ساعات شرایط شدید، نوسان روزانه، DLI_{eq} و بار حرارتی نظری در کنار یکدیگر خوانده می‌شوند.

این شیوه سبب می‌شود پیامد نامطلوب یک تصمیم از نتیجه حذف نشود. اگر افزایش سایه سرمایش را کاهش دهد اما نور روز یا دریافت خورشیدی را نیز محدود کند، هر دو نتیجه بخشی از شناخت همان راهکارند. هدف، یافتن پاسخ بدون هزینه نیست؛ هدف، **شناخت روشن رابطه میان منفعت، پیامد و شرایط استفاده** است.

۱-۱۰-۳. جست‌وجوی پارامتریک تکمیلی در مدل مسکن

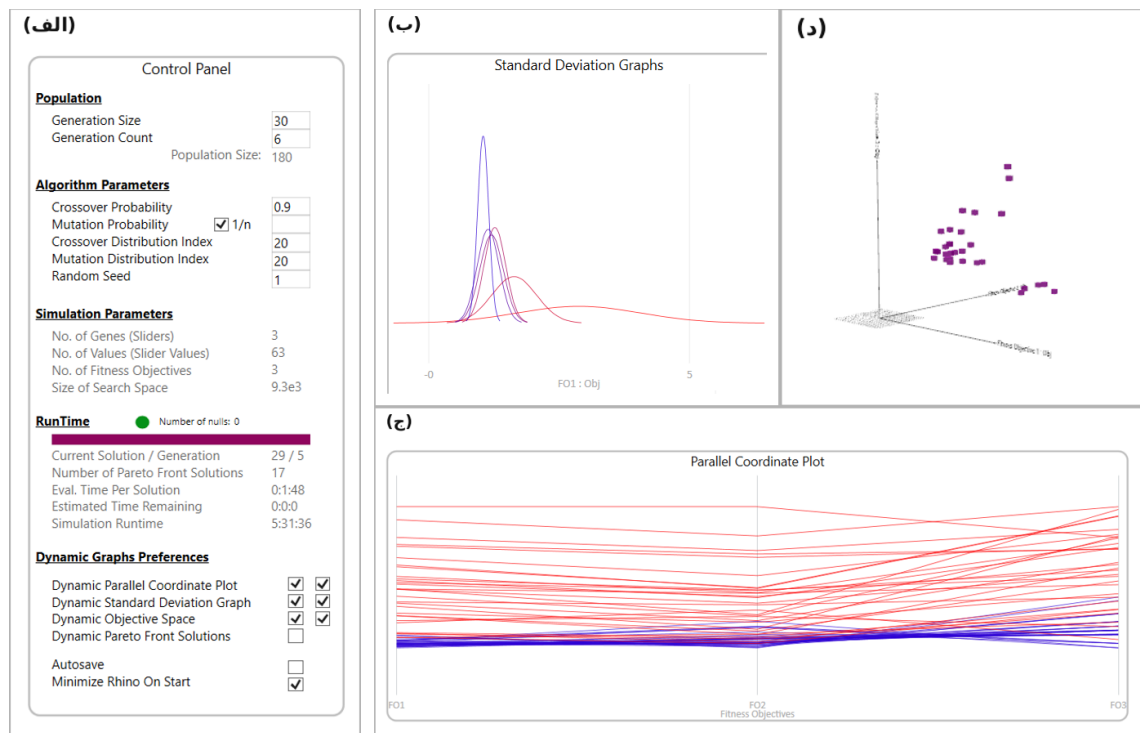
پس از آنکه مسیر اصلی توسعه مدل مسکن از طریق آزمون‌های مرحله‌ای مشخص شد، یک جست‌وجوی پارامتریک محدود با استفاده از Wallacei/NSGA-II انجام گرفت. این مرحله برای تولید فرم از ابتدا یا یافتن یک پاسخ بهینه جهانی طراحی نشده بود؛ بلکه هدف آن بررسی دقیق‌تر ترکیب چند متغیر در محدوده یک خانواده معماری از پیش تعیین شده بود.

در این مرحله، سه متغیر شامل نسبت بازشوی شمالی، نسبت بازشوی جنوبی و عمق سایه‌بان جنوبی تغییر داده شدند و اثر آن‌ها بر گرمایش، سرمایش و UDI بررسی شد. اجرای ثبت‌شده شامل ۱۸۰ ارزیابی در شش نسل بود.

از آنجا که تعداد نسل‌ها محدود و معیار مستقلی برای اثبات همگرایی ثبت نشده است، خروجی این مرحله تنها به‌عنوان ریزتنظیم فضای تصمیم تفسیر می‌شود. بنابراین، هیچ گزینه‌ای صرفاً به دلیل جایگاه آن در خروجی الگوریتم به‌عنوان «بهینه» پذیرفته نمی‌شود.

برای مرور اولیه مجموعه، یک شاخص مرکب قراردادی نیز به‌عنوان ابزار غربال استفاده شد. وزن‌های این شاخص از استاندارد یا معیار خارجی استخراج نشده‌اند؛ در نتیجه، رتبه حاصل از آن ارزش مستقل علمی ندارد و مبنای نهایی انتخاب نیست. تصمیم نهایی با بازگشت به مقادیر واقعی بارهای حرارتی، UDI، UDI-up، روابط پارتو و امکان‌پذیری معماری انجام می‌شود.

مقادیر عملکرد و مقایسه گزینه‌های حاصل نیز در فصل چهارم، در کنار سایر نتایج مسکن، ارائه می‌شوند.



یادداشت روش: برچسب‌های FO1 تا FO3 مطابق آرشیو اصلی Wallacei به‌صورت عمومی ثبت شده‌اند؛ معنای تازه‌ای به آن‌ها نسبت داده نشده است. پذیرش/رد گزینه‌ها بر پایه بار حرارتی، UDI و UDI-up (فصل ۴) انجام شده است.

شکل ۳-۴. جست و جوی پارامتریک تکمیلی در محدوده مدل منتخب مسکن؛ نمایش فضای گزینه‌ها و روابط پارتو، نه اثبات یک بهینه جهانی.

۱۱-۳. جمع‌بندی فصل

روش پژوهش از شناخت مسئله اقلیمی آغاز می‌شود و از طریق شناخت سازوکار، تبدیل آن به تصمیم معماری، تعریف سناریو و سنجش عملکرد، دوباره به طراحی بازمی‌گردد. در این مسیر، شبیه‌سازی جایگزین قضاوت معماری نیست؛ بلکه ابزاری برای روشن کردن اثر و پیامد تصمیم‌هایی است که از مسئله محیطی و فضایی آغاز شده‌اند.

در بخش مسکن، فرم، جهت‌گیری، پوسته، بازشو و سایه از طریق بارهای حرارتی و شاخص‌های نور روز بررسی می‌شوند. در محفظه نیمه‌مدفون نیز ارتباط با زمین، نوع پوشش، تهویه و سایه از طریق رفتار حرارتی و تغییر دریافت نسبی خورشیدی سنجیده می‌شوند. تفاوت عملکرد این دو محیط حفظ می‌شود و ارتباط آن‌ها نه در یک شاخص مشترک، بلکه در منطق پاسخ‌گویی معماری به اقلیم شکل می‌گیرد.

حد اعتبار هر نتیجه نیز متناسب با روش به دست آمدن آن حفظ می‌شود. شرایط ثابت مدل، آزمون‌های حساسیت و کنترل خروجی‌ها امکان مقایسه سناریوها را تقویت می‌کنند؛ اما ساده‌سازی جریان هوا و رفتار خاک، نبود اندازه‌گیری میدانی برای همین مدل‌ها و محدود بودن دامنه جست و جوی پارامتریک مانع از تعمیم نتایج به عنوان پاسخ‌های قطعی و مستقل از زمینه می‌شوند.

حاصل این روش، مجموعه‌ای از پاسخ‌های آماده یا فرم‌های پیشنهادی نیست. آنچه از تحلیل انتظار می‌رود، استخراج قواعدی است که نشان دهند چه مسئله‌ای مطرح بوده، کدام تصمیم معماری آن را تغییر داده، از چه سازوکاری اثر ایجاد شده، چه پیامد دیگری همراه آن بوده و نتیجه در چه شرایطی قابل استفاده است.

به این ترتیب، بخشی از آموزه‌های اقلیمی و فضایی معماری یزد از سطح مشاهده و توصیف به پرسش‌های قابل آزمون در طراحی معاصر منتقل می‌شوند و نتیجه سنجش نیز دوباره به زبان تصمیم معماری بازمی‌گردد.

فصل چهارم: نتایج طراحی اقلیم پاسخ در ماژول مسکن

۴-۱. پرسش و منطق تفسیر نتایج

این فصل به بررسی نتایجی می‌پردازد که از پرسش‌های اقلیمی و معماری مطرح شده در فصل دوم شکل گرفته‌اند. مسئله اصلی آن نیست که از میان چند فرم، یک نمونه به‌عنوان «بهترین» انتخاب شود؛ بلکه باید دید تغییر در فرم، جهت‌گیری، بازشو، سایه و پوسته چگونه رابطه بنا با تابش، گرما و نور روز را تغییر می‌دهد و از این تغییر چه اصلی برای طراحی می‌توان به دست آورد.

در اقلیم گرم‌وخشک یزد، تابش خورشید هم‌زمان می‌تواند یک امکان و یک مسئله باشد. در فصل گرم، کنترل تابش مستقیم و کاهش گرمای ناخواسته اهمیت دارد، اما در فصل سرد همین دریافت خورشیدی می‌تواند بخشی از نیاز حرارتی بنا را تأمین کند. نور روز نیز از همین رابطه میان بازشو، جهت، سایه و پوسته تأثیر می‌پذیرد. بنابراین، کاهش دریافت خورشیدی به‌خودی‌خود نشانه بهبود عملکرد نیست.

به همین دلیل، اثر هر تصمیم در نسبت با دو سوی مسئله خوانده می‌شود. برای مثال، سایه‌بان زمانی راهکار مناسبی است که بتواند دریافت نامطلوب تابستانی را محدود کند، بی‌آنکه دریافت زمستانی یا نور روز را بیش از اندازه کاهش دهد. نسبت بازشو نیز تنها از نظر مقدار سطح شیشه اهمیت ندارد؛ محل و جهت آن تعیین می‌کند که چه مقدار تابش وارد فضا شود، چه میزان انتقال حرارت رخ دهد و نور روز چگونه در عمق فضا توزیع شود. در بررسی حرارتی، بار سرمایش، بار گرمایش و مجموع بار سالانه در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند تا بهبود یک فصل، پیامد آن در فصل دیگر را پنهان نکند. بارهای گزارش شده، بار نظری مدل در شرایط تعریف شده فصل سوم هستند و برای مقایسه اثر تصمیم‌های معماری به کار می‌روند.

در بررسی نور روز نیز UDI ، cDA ، DA و UDI -up در کنار یکدیگر خوانده می‌شوند. UDI . در این پژوهش سهم ساعات ارزیابی را نشان می‌دهد که مقدار روشنایی محاسبه شده در نقاط سنجش در محدوده ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ لوکس قرار دارد. بنابراین، افزایش یا کاهش آن به‌تنهایی نمی‌تواند بیانگر کیفیت کامل نور در فضای سکونت باشد؛ بلکه باید همراه با کمبود نور، دریافت بیش از اندازه و سایر شاخص‌ها تفسیر شود.

شناخت معماری بومی نیز در این فصل به‌صورت الگوی آماده وارد طراحی نمی‌شود. فشردگی بافت، همجواری، حیاط و درون‌گرایی زمانی برای طراحی امروز معنا پیدا می‌کنند که سازوکار اقلیمی آن‌ها شناخته شود. برای نمونه، فشردگی می‌تواند توجه را به کاهش سطح در معرض محیط و سایه متقابل جلب کند؛ حیاط نیز مسئله

رابطه فضای باز و بسته، حریم، سایه و ورود نور را پیش می‌کشد. آنچه در مدل آزموده می‌شود، صورت تاریخی این عناصر نیست، بلکه رابطه‌ای است که میان کالبد و شرایط محیطی برقرار می‌کنند.

از این‌رو، در ادامه فصل هر نتیجه با سه پرسش خوانده می‌شود: چه تغییری در بنا ایجاد شده است؟ این تغییر از چه سازوکاری بر شرایط حرارتی یا نور روز اثر گذاشته است؟ و حاصل آن برای ادامه طراحی چه معنایی دارد؟

۴-۲. ترتیب بررسی نتایج

نتایج به همان ترتیبی بررسی می‌شوند که تصمیم‌های معماری در روند طراحی وارد مدل شده‌اند. ابتدا تفاوت پیکربندی‌های اصلی بررسی می‌شود، سپس اثر جهت‌گیری و پس از آن تغییر بازشو، سایه، شیشه و پوسته مطالعه می‌شود. در پایان نیز تنظیم دقیق‌تر نسبت بازشوهای شمالی و جنوبی در محدوده فرم منتخب بررسی خواهد شد.

این ترتیب از آن جهت اهمیت دارد که نتیجه هر مرحله، زمینه تصمیم بعدی را روشن می‌کند. بنابراین، سناریوها تنها مجموعه‌ای از حالت‌های جداگانه نیستند؛ بلکه مسیر تغییر تدریجی یک تیپ مسکونی را نشان می‌دهند. در مقایسه‌هایی که تنها یک عامل تغییر کرده است، اثر مشاهده‌شده را می‌توان در محدوده همان آزمون به آن عامل نسبت داد. اما هر جا چند ویژگی بنا هم‌زمان تغییر کرده‌اند، نتیجه بیانگر رفتار مجموعه آن تغییرات است و نمی‌توان آن را به یک جزء منفرد نسبت داد.

جدول ۴-۱. سازمان خانواده‌های سناریو و نقش هر خانواده در استدلال فصل

مرحله بررسی	پرسش معماری	شاخص‌های مورد بررسی
R1, R2 و R3	تفاوت پیکربندی‌های اولیه چه اثری بر رفتار حرارتی و نور روز دارد و کدام حالت زمینه مناسب‌تری برای ادامه بررسی فراهم می‌کند؟	گرمایش، سرمایش، مجموع بار حرارتی و UDI
چرخش R3	تغییر جهت استقرار تیپ منتخب چه اثری بر رفتار حرارتی آن دارد؟	گرمایش، سرمایش و مجموع بار حرارتی
NS → SH2 → G3 → M3	تغییر بازشو، سایه، شیشه و پوسته چگونه رابطه میان دریافت خورشیدی، انتقال حرارت و نور روز را تغییر می‌دهد؟	بارهای حرارتی و شاخص‌های نور روز
N21/S11	تنظیم نسبت بازشوهای شمالی و جنوبی تا چه اندازه می‌تواند تعادل میان نیاز حرارتی و نور روز را بهبود دهد؟	بارهای حرارتی، UDI, UDI-up, cDA و DA

۴-۳. غربال فرم و جهت‌گیری

از «غربال فرم و جهت‌گیری» طبیعی‌تر و معماری‌تر است.

۴-۳-۱. مقایسه تیپ‌های R1، R2 و R3

در مرحله نخست، سه پیکربندی R1، R2 و R3 در شرایط یکسان بررسی شدند تا روشن شود تفاوت شکل کلی بنا چه اثری بر رفتار حرارتی و نور روز دارد و کدام پیکربندی امکان مناسب‌تری برای ادامه بررسی فراهم می‌کند.

نتایج نشان داد که R2 با مجموع بار حرارتی $179.19 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ ، در میان سه حالت بررسی‌شده بیشترین نیاز حرارتی را دارد. در مقابل، عملکرد R1 و R3 بسیار نزدیک بود؛ مجموع بار حرارتی در R1 برابر $162.44 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ و در R3 برابر $162.87 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ به دست آمد. اختلاف حدود ۰.۲۶ درصد میان این دو، برای آنکه یکی صرفاً بر پایه بار حرارتی بر دیگری ترجیح داده شود، معنادار نیست.

جدول ۴-۲. مقایسه عملکرد سه پیکربندی اولیه

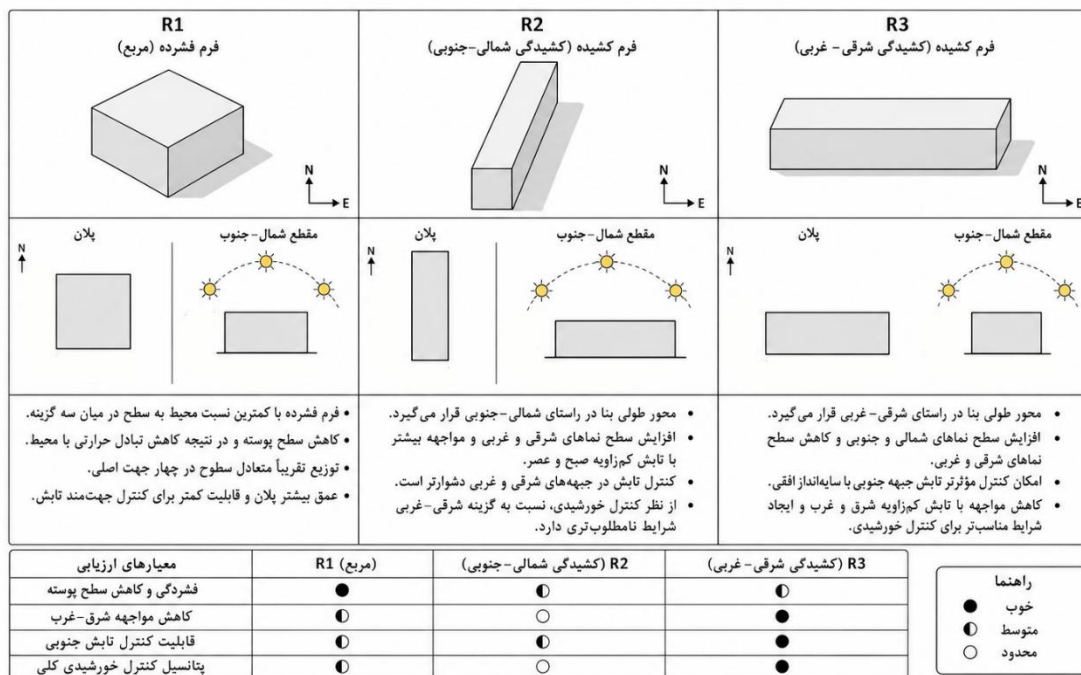
تیپ	سرمایش	گرمایش	مجموع بار حرارتی	UDI
R1	131.7	30.8	162.4	77.8%
R2	145.3	33.9	179.2	76.0%
R3	131.2	31.7	162.9	77.4%

واحد بارهای حرارتی $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$

نزدیکی R1 و R3 نشان می‌دهد که در این مرحله، تنها مقدار بار نمی‌تواند مبنای ادامه طراحی باشد. تفاوت اصلی این دو برای پژوهش در نحوه سازمان‌یافتن جبهه‌های بنا بود. کشیدگی R3 در راستای شرقی-غربی، جبهه‌های شمالی و جنوبی مشخص‌تری ایجاد می‌کرد و امکان بررسی رابطه میان جهت استقرار، نسبت بازشو و سایه را در مراحل بعد فراهم می‌ساخت.

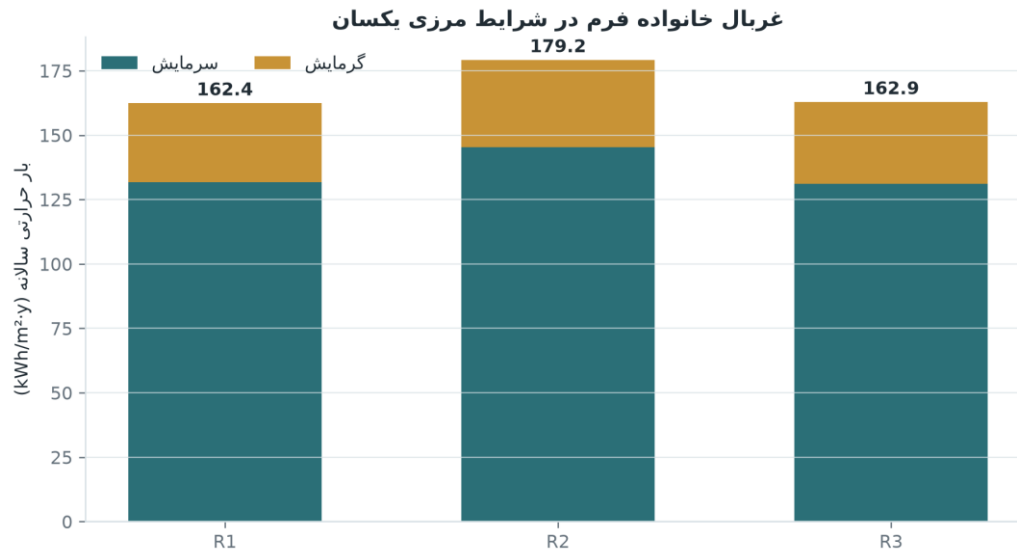
از این‌رو، R3 برای ادامه بررسی انتخاب شد. این انتخاب به معنای برتری ذاتی فرم کشیده شرقی-غربی نیست؛ R1 از نظر عملکرد حرارتی و UDI بسیار نزدیک به آن باقی ماند. اهمیت R3 در این پژوهش بیشتر به امکان ادامه و تفکیک روشن‌تر تصمیم‌های بعدی درباره بازشو و کنترل تابش مربوط است تا برتری عددی آن.

سناریوهای فرم و مسیر انتخاب



شکل ۴-۱. سه پیکربندی اولیه R1، R2 و R3 و تفاوت آن‌ها از نظر فشرده‌گی، جهت استقرار و نحوه شکل‌گیری جبهه‌های

اصلی؛ شکل، مبنای خوانش معماری گزینه‌هاست و نه شاهد مستقل عملکرد کمی



شکل ۴-۲. سهم بار سرمایش و گرمایش در سه پیکربندی اولیه، تحت شرایط مرزی یکسان



شکل ۳-۴. روند شکل‌گیری تیپ مسکونی مورد بررسی

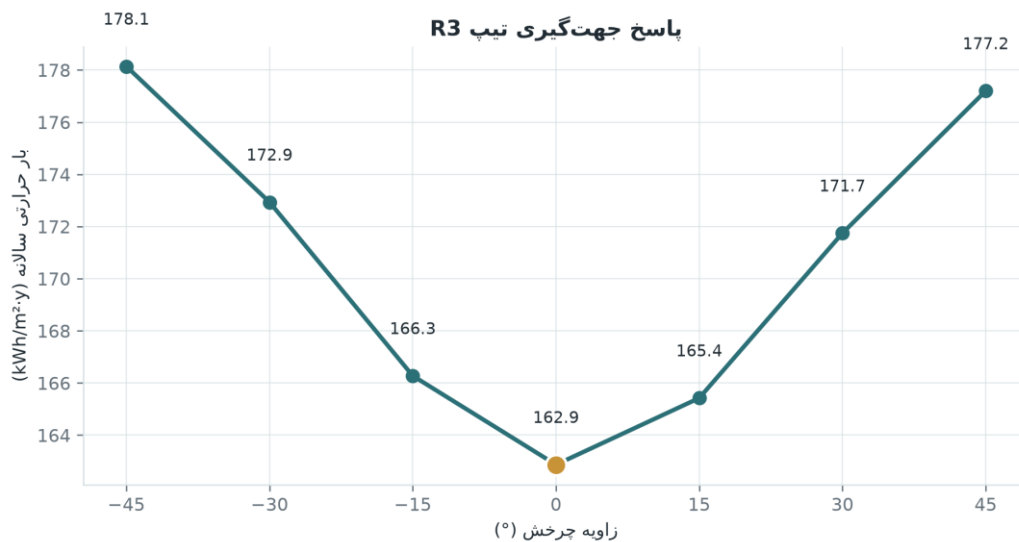
۴-۳-۲. پاسخ تیپ R۳ به جهت‌گیری

پس از انتخاب R3 برای ادامه مطالعه، اثر تغییر جهت استقرار آن بررسی شد. چرخش تیپ در فاصله ۴۵- تا ۴۵+ درجه نشان داد که کمترین بار حرارتی در حالت صفر درجه، یعنی در استقرار پایه شرقی-غربی، به دست آمده است. مجموع بار در این حالت $162.87 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ بود و با دور شدن از این جهت افزایش یافت؛ به‌طوری‌که در زاویه‌های ۴۵- و ۴۵+ درجه به ترتیب به 178.14 و $177.20 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ رسید.

نکته مهم تنها مقدار دو حالت انتهایی نیست. روند تغییرات در هر دو سوی زاویه صفر نشان می‌دهد که با افزایش انحراف از جهت پایه، بار حرارتی نیز به تدریج افزایش یافته است. در زاویه‌های ± 15 درجه تغییر هنوز محدود است، اما در ± 30 و ± 45 درجه افزایش بار آشکارتر می‌شود. بنابراین، جهت استقرار برای همین هندسه یک عامل مؤثر در رفتار حرارتی بناست.

این نتیجه را می‌توان در ارتباط با نحوه مواجهه جبهه‌های اصلی بنا با تابش خورشیدی خواند. در تیپ کشیده R3، تغییر جهت استقرار، نسبت مواجهه جبهه‌های طولی با مسیر خورشید را تغییر می‌دهد و در نتیجه شرایط دریافت گرما در طول سال نیز دگرگون می‌شود. باین‌حال، نتیجه حاضر مربوط به همین هندسه، همین پوسته و همین شرایط اقلیمی است و به‌تنهایی یک جهت ثابت برای همه ساختمان‌های یزد تعیین نمی‌کند.

در یک طرح واقعی، شکل زمین، همجواری، حریم، دسترسی و نحوه استقرار فضاها ممکن است امکان قرارگیری بنا در جهت پایه را محدود کند. در چنین شرایطی، اصل قابل‌انتقال نه تکرار صلب جهت صفر درجه، بلکه بازتنظیم رابطه میان جهت استقرار، بازشو و سایه متناسب با شرایط قطعه است.



شکل ۴-۴. تغییر مجموع بار حرارتی تیپ R3 با تغییر جهت استقرار؛ کمینه بار در حالت پایه و افزایش تدریجی آن با انحراف از محور شرقی-غربی

۴-۳-۳. پیکربندی‌های جایگزین L و U

برای آنکه ادامه پژوهش تنها به یک فرم کشیده محدود نماند، دو پیکربندی L و U نیز با همان شرایط پایه مورد بررسی قرار گرفتند. این دو فرم از نظر سازمان فضایی با R3 متفاوت‌اند و امکان شکل‌گیری شکست در بدنه یا فضای نیمه‌محصور را فراهم می‌کنند؛ از این‌رو، بررسی آن‌ها می‌توانست نشان دهد که آیا این تفاوت کالبدی در شرایط آزمون‌شده با پاسخ حرارتی مناسب‌تری همراه است یا خیر.

در میان حالت‌های بررسی‌شده برای فرم L، کمترین بار حرارتی پیش از تنظیم بازشو در زاویه ۲۷۰ درجه و برابر با ۱۸۴.۲۳ kWh/(m²·y) بود؛ مقداری که ۱۳.۱۱ درصد بیشتر از R3 در حالت پایه است. پس از تنظیم بازشوی شمالی و جنوبی، مقدار بار در مناسب‌ترین حالت L به ۱۴۹.۰۴ kWh/(m²·y) کاهش یافت، اما همچنان ۷.۸۶ درصد بیشتر از R3 با همان تنظیم بازشو باقی ماند.

در فرم U نیز مجموع بار حرارتی در حالت پایه حدود ۲۰۹.۸ kWh/(m²·y) بود. پس از تنظیم بازشو، کمترین مقدار ثبت‌شده به ۱۶۳.۷۵ kWh/(m²·y) رسید که ۱۸.۵۰ درصد بیشتر از R3-NS بود.

بنابراین، تغییر شکل از R3 به L یا U در شرایط این مطالعه به بهبود عملکرد حرارتی منجر نشد. با این حال، این نتیجه به معنای نامناسب بودن این فرم‌ها از نظر معماری نیست. فرم L می‌تواند در پاسخ به گوشه زمین، شکست مسیر یا نحوه دسترسی معنا پیدا کند و فرم U نیز امکان تعریف فضای باز نیمه‌محصور را فراهم می‌سازد. آنچه این آزمون نشان می‌دهد محدودتر از این است: در شرایط اقلیمی، پوسته و بازشوی تعریف‌شده در این پژوهش، مزیت فضایی بالقوه این دو پیکربندی با کاهش بار حرارتی همراه نشد.

از این‌رو، مسیر اصلی بررسی با R3 ادامه یافت؛ نه به این دلیل که این فرم پاسخ نهایی معماری است، بلکه چون در محدوده آزمون‌شده، هم رفتار حرارتی مناسب‌تری نشان داد و هم امکان روشن‌تری برای ادامه مطالعه جبهه‌های شمالی و جنوبی، بازشو و سایه فراهم کرد.

۴-۴. توسعه مرحله‌ای راهکارهای طراحی

پس از انتخاب R3 برای ادامه بررسی، تغییرات طراحی به‌صورت مرحله‌ای در بازشو، سایه، شیشه و پوسته اعمال شد. هدف از این روند، رسیدن سریع به یک فرم نهایی نبود؛ بلکه روشن‌کردن این موضوع بود که هر تغییر چگونه رابطه بنا با تابش، انتقال حرارت و نور روز را دگرگون می‌کند و چه زمینه‌ای برای تصمیم بعدی فراهم می‌سازد.

بازتنظیم بازشوها بر پایه جهت

نخست، نسبت بازشو در جبهه‌های شمالی و جنوبی بازتنظیم شد. در گذار از R3 به NS، بار سرمایش ۲۳،۱۸ درصد و مجموع بار حرارتی ۱۵،۱۶ درصد کاهش یافت. هم‌زمان، میانگین UDI نیز ۱۱،۱۸ واحد درصد افزایش پیدا کرد.

برای آنکه روشن شود این تغییر بیشتر از بازشودیری پنجره ناشی شده یا از نحوه توزیع سطح شیشه در دو جبهه، چهار حالت کنترل‌شده با ترکیب پنجره باز و بسته و WWR یکنواخت و جهت‌مند بررسی شد. نزدیکی پاسخ حالت‌های متناظر نشان داد که بخش اصلی تغییر به نحوه توزیع سطح بازشو میان جبهه‌ها مربوط بوده است، نه صرفاً امکان بازشدن پنجره.

از دید معماری، این نتیجه نشان می‌دهد که جبهه‌های بنا را نمی‌توان یکسان دید. شمال و جنوب در اقلیم یزد دریافت خورشیدی و شرایط نوری یکسانی ندارند؛ از این‌رو، نسبت بازشو نیز باید متناسب با جهت و نقشی که هر جبهه در دریافت نور و گرما دارد تنظیم شود.

سایه‌بان جنوبی و تعادل فصلی

در مرحله بعد، سایه‌بان افقی در جبهه جنوبی افزوده شد. با گذار از NS به SH2، بار سرمایش از ۱۰۰،۷۶ به ۸۹،۰۶ $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ کاهش یافت. هم‌زمان، سهم ساعات با روشنایی بیش از ۳۰۰۰ لوکس، یعنی UDI-up، از ۷،۰۵ به ۲،۴۴ درصد رسید.

این تغییر، با وجود کاهش بار سرمایش و کنترل نور بیش از اندازه، در همه فصل‌ها اثر یکسانی نداشت. بار گرمایش افزایش یافت و مجموع بار حرارتی از ۱۳۸،۱۸ به ۱۳۸،۸۰ $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ رسید.

بنابراین، سایه در اینجا نه یک لایه ثابت و همواره مفید، بلکه وسیله‌ای برای تنظیم دریافت خورشیدی است. همان سطحی که در تابستان از ورود گرمای ناخواسته جلوگیری می‌کند، ممکن است در زمستان بخشی از تابش مفید را نیز محدود سازد. ارزش سایه‌بان در میزان، عمق و زمان اثر آن است، نه صرفاً در حضور آن.

شیشه و پوسته

پس از تنظیم سایه، شیشه G3 با U-value برابر $1.80 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ ، SHGC برابر ۰.۳۵ و VT برابر ۰.۶۰ بررسی شد. مجموع بار حرارتی در این مرحله به $138.58 \text{ kWh/(m}^2\cdot\text{y)}$ رسید.

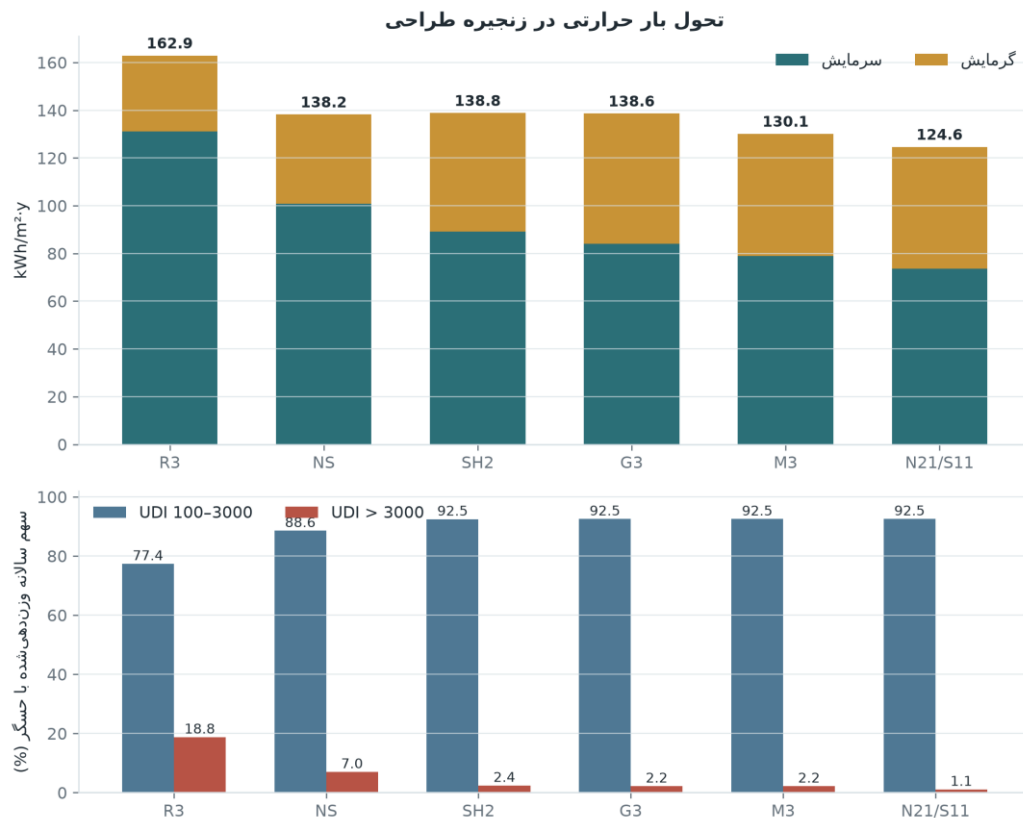
در گام بعد، ترکیب پوسته M3 که بر هم‌زمانی عایق و جرم حرارتی استوار بود، مورد بررسی قرار گرفت و مجموع بار حرارتی به $130.08 \text{ kWh/(m}^2\cdot\text{y)}$ کاهش یافت.

در این مرحله، اثر پوسته تنها با یک ویژگی مانند U-value یا میزان عایق خوانده نمی‌شود. رفتار حرارتی بنا حاصل رابطه میان مقاومت حرارتی، ظرفیت ذخیره گرما و نحوه دریافت انرژی خورشیدی است؛ بنابراین نتیجه M3 به کل ترکیب لایه‌ها مربوط است و نه به یک جزء منفرد.

سناریوی تهویه طبیعی مسکن به دلیل کامل نبودن اطلاعات مربوط به سطح بازشوی مؤثر و منطق کنترل، وارد نتیجه‌گیری اصلی این فصل نشد و هیچ‌یک از یافته‌های اصلی به عملکرد تهویه طبیعی نسبت داده نمی‌شود.

جدول ۳-۴. تغییرات مرحله‌ای در عملکرد حرارتی و نور روز

مرحله	سرمایش	گرمایش	کل	UDI	$\text{UDI} > 3000$
مبنای R۳	۱۳۱.۲	۳۱.۷	۱۶۲.۹	۷۷.۴٪	۱۸.۸٪
کنترل بازشو NS	۱۰۰.۸	۳۷.۴	۱۳۸.۲	۸۸.۶٪	۷.۰٪
سایه‌بان SH۲	۸۹.۱	۴۹.۷	۱۳۸.۸	۹۲.۵٪	۲.۴٪
شیشه G۳	۸۴.۰	۵۴.۶	۱۳۸.۶	۹۲.۵٪	۲.۲٪
پوسته M۳	۷۸.۸	۵۱.۲	۱۳۰.۱	۹۲.۵٪	۲.۲٪
نهایی N۲۱/S۱۱	۷۳.۶	۵۱.۱	۱۲۴.۶	۹۲.۵٪	۱.۱٪
واحد بارها $\text{kWh/(m}^2\cdot\text{y)}$					



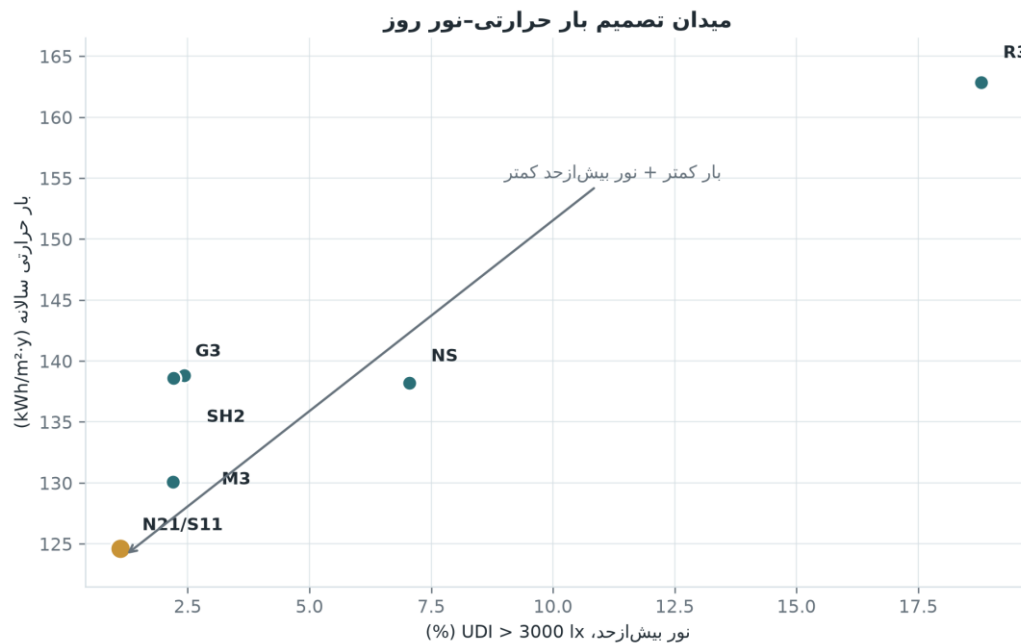
شکل ۴-۵. تغییر هم‌زمان بارهای حرارتی و شاخص‌های نور روز در مسیر توسعه تیپ مسکونی

۴-۵. خواندن هم‌زمان حرارت و نور روز

نتایج مراحل پیشین نشان می‌دهد که تصمیم درباره تابش را نمی‌توان تنها با بار حرارتی یا تنها با نور روز سنجید. کاهش UDI-up می‌تواند بیانگر محدود شدن ساعات با روشنایی بیش از اندازه باشد، اما اگر این تغییر هم‌زمان با افزایش UDI-low یا کاهش DA و cDA همراه شود، بخشی از دسترسی مطلوب به نور روز نیز از دست رفته است.

به همین دلیل، بار حرارتی و شاخص‌های نور روز در کنار یکدیگر خوانده می‌شوند. هدف یافتن کمترین بار یا بیشترین UDI نیست؛ مسئله این است که کنترل تابش تا چه اندازه می‌تواند بار سرمایش و روشنایی بیش از اندازه را کاهش دهد، بی‌آنکه نیاز گرمایشی یا دسترسی به نور روز بیش از حد آسیب ببیند.

N21/S11 را نشان می‌دهد UDI-up شکل ۴-۶ تنها دو وجه از این رابطه، یعنی مجموع بار حرارتی و در این دو شاخص در موقعیت مناسب‌تری قرار دارد، اما این نمودار به‌تنهایی برای انتخاب نهایی کافی نیست. نتیجه زمانی معنا پیدا می‌کند که سایر شاخص‌های حرارتی و نوری نیز در کنار آن دیده شوند.



شکل ۴-۶. رابطه میان مجموع بار حرارتی و سهم ساعات با نور بیش از اندازه در گزینه‌های بررسی شده

۴-۵-۱. نقش سایه به عنوان تصمیم چندفصلی

اثر سایه در یک جفت سناریوی همسان M3، با و بدون سایه، به طور مستقل بررسی شد. افزودن سایه موجب شد:

بار سرمایش از ۸۵.۴۷ به ۷۸.۸۳ kWh/(m²·y) کاهش یابد؛ معادل ۷.۷۷ درصد؛

بار گرمایش ۲۷.۳۹ درصد افزایش یابد؛

مجموع بار از ۱۲۵.۷۱ به ۱۳۰.۰۸ kWh/(m²·y) افزایش یابد؛ معادل ۳.۴۸ درصد؛

UDI-up از ۶.۵۷ به ۲.۲۰ درصد کاهش یابد.

جدول ۴-۴. مقایسه‌ی سایه و تنظیم نهایی در بسته‌ی پوسته M3

سناریو	سرمایش	گرمایش	کل	UDI	UDI-up
M3 با سایه	78.8	51.2	130.1	92.5%	2.2%
M3 بدون سایه	85.5	40.2	125.7	88.8%	6.6%
N21/S11	73.6	51.1	124.6	92.5%	1.1%

این مقایسه یکی از روشن‌ترین نمونه‌های بده‌بستان فصلی در این پژوهش است. سایه توانسته است در دوره گرم بار سرمایش و ساعات نور بیش از اندازه را کاهش دهد، اما همین کاهش دریافت خورشیدی، نیاز گرمایشی را افزایش داده است.

بنابراین، اصل حاصل از این مرحله «افزایش سایه» نیست، بلکه **تنظیم سایه** است. عمق و نحوه اثر آن باید با جهت جبهه، زمان حضور خورشید و نیاز متفاوت فصل گرم و سرد هماهنگ شود.

N21/S11 در این جدول حاصل تغییر هم‌زمان چند عامل است؛ از این رو، تفاوت آن با M3 را نمی‌توان تنها به سایه نسبت داد.

۴-۶. نقش ترکیب مصالح و پوسته

مقایسه M1، M2 و M3 نشان می‌دهد که رفتار حرارتی پوسته را نمی‌توان تنها با عباراتی مانند «جرم حرارتی بیشتر» یا «عایق بیشتر» توضیح داد. آنچه بر شرایط داخل اثر می‌گذارد، ترکیب لایه‌ها و رابطه میان مقاومت حرارتی، ظرفیت ذخیره گرما و دریافت خورشیدی است.

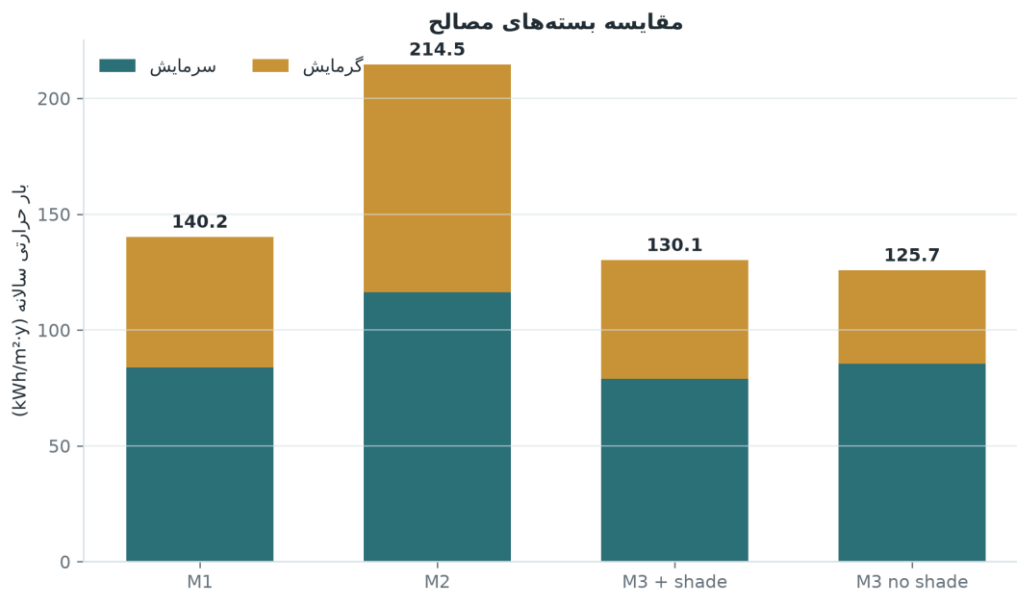
مجموع بار حرارتی سه حالت بررسی شده عبارت بود از:

$$M1: 140.15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$$

$$M2: 214.51 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$$

$$M3 \text{ سایه‌دار: } 130.08 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$$

این اعداد مربوط به سه ترکیب کامل پوسته‌اند. از آنجا که همه ویژگی‌های آن‌ها به‌صورت تک‌متغیره تغییر نکرده‌اند، اختلاف عملکرد را نمی‌توان تنها به جرم حرارتی یا مقدار عایق نسبت داد.



شکل ۴-۷. مقایسه سهم بار سرمایش و گرمایش در سه ترکیب پوسته مورد بررسی

نتیجه این مرحله آن است که پوسته در اقلیم گرم‌و‌خشک باید به‌عنوان یک مجموعه دیده شود. افزایش ظرفیت حرارتی زمانی مفید است که امکان کنترل ورود و دفع گرما نیز فراهم باشد و عایق زمانی معنا پیدا می‌کند که در ارتباط با نحوه دریافت تابش و رفتار فصلی بنا بررسی شود.

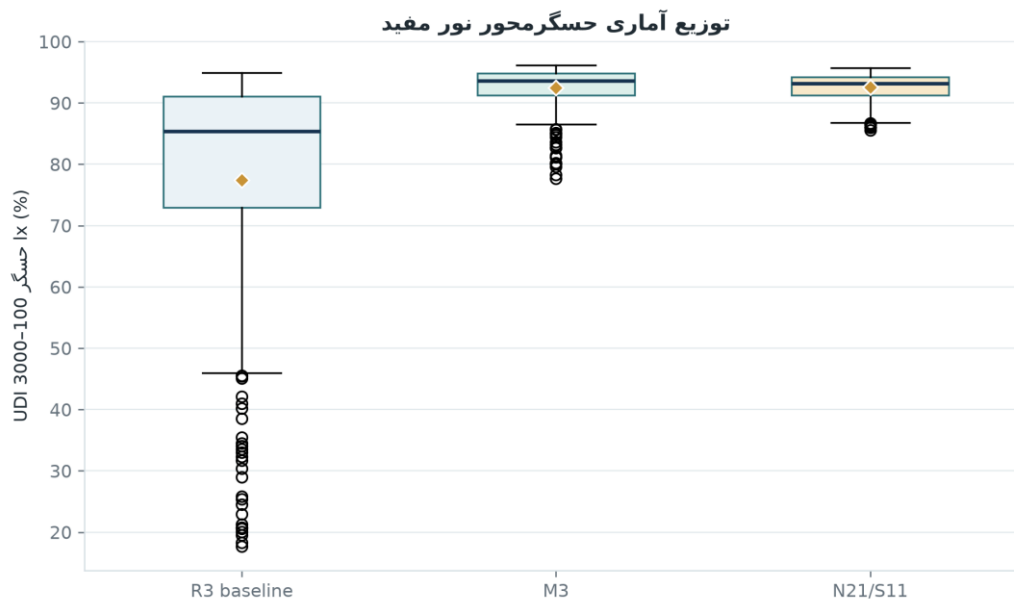
در مدل حاضر، M3 زمینه مناسب تری برای ادامه تنظیم بازشو فراهم کرد؛ اما این نتیجه به همان ترکیب لایه ها و شرایط آزمون مربوط است و به معنای برتری عمومی یک مصالح یا یک شیوه ساخت نیست.

اصل طراحی: پاسخ حرارتی پوسته از هماهنگی میان مقاومت حرارتی، ظرفیت ذخیره گرما و کنترل دریافت خورشیدی شکل می گیرد؛ هیچ یک از این عوامل به تنهایی تعیین کننده نیست.

۴-۷. بررسی نور روز در شبکه حسگرها

میانگین UDI به تنهایی نشان نمی دهد که همه نقاط فضا رفتار مشابهی دارند. برای شناخت بهتر نحوه توزیع پاسخ نوری، نتایج ۲۹۴ حسگر نیز بررسی شد.

در R3 پایه، پراکندگی UDI میان حسگرها بیشتر بود و بخشی از نقاط سهم کمتری از ساعات را در محدوده ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ لوکس ثبت کردند. پس از اعمال M3، توزیع مقادیر فشرده تر شد و میانه UDI به بیش از ۹۰ درصد رسید. در N21/S11 نیز این وضعیت کلی حفظ شد و UDI-up نسبت به M3 کاهش یافت.



شکل ۴-۸. توزیع UDI در شبکه حسگرها برای پایه، M3 و N21/S11

این نمودار، توزیع آماری پاسخ حسگرها را نشان می دهد و نه جای دقیق نقاط روشن یا کم نور در پلان. بنابراین، از آن نمی توان مستقیماً نتیجه گرفت که کدام اتاق یا کدام بخش از فضا شرایط نوری مناسب تری دارد.

در N21/S11 مقادیر زیر ثبت شد:

$$UDI = 92.54\%$$

$$UDI-up = 1.12\%$$

$$UDI-low = 6.35\%$$

$$DA = 83.72\%$$

$$cDA = 91.24\%$$

UDI برابر ۹۲.۵۴ درصد به این معناست که در میانگین شبکه حسگرها، ۹۲.۵۴ درصد از ساعات ارزیابی در محدوده ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ لوکس قرار گرفته‌اند. این مقدار به‌تنهایی بیانگر آسایش بصری یا کیفیت کامل نور فضای داخلی نیست.

کاهش UDI-up نشان می‌دهد ساعات با روشنایی بیش از اندازه به مقدار اندکی رسیده‌اند. با این حال، UDI-low به ۶.۳۵ درصد رسیده و DA و cDA نیز نسبت به حالت پایه کاهش یافته‌اند. بنابراین، کنترل بیشتر تابش در کنار کاهش نور بیش از اندازه، بخشی از دسترسی به نور روز را نیز محدود کرده است. از دید معماری، مسئله یافتن کمترین سطح بازشو یا بیشترین سایه نیست؛ نسبت بازشو و سایه باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که کنترل تابش، به کمبود ناموجه نور در عمق فضا منجر نشود. برای شناخت محل دقیق نواحی کم‌نور، تحلیل مکانی پلان لازم است و نمودار آماری حاضر به‌تنهایی چنین اطلاعاتی فراهم نمی‌کند.

۸-۴. پیکربندی نهایی آزموده‌شده و بازتاب معماری نتایج

در پایان مسیر بررسی، تنظیم N21/S11 در تیپ R3 مقادیر زیر را ثبت کرد:

بار سرمایش: $73.57 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$

بار گرمایش: $51.06 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$

مجموع بار حرارتی: $124.62 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$

$$UDI: 92.54\%$$

در مقایسه با R3 پایه، بار سرمایش ۴۳،۹۲ درصد و مجموع بار حرارتی ۲۳،۴۸ درصد کاهش یافت؛ در مقابل، بار گرمایش ۶۱،۰۹ درصد افزایش پیدا کرد.

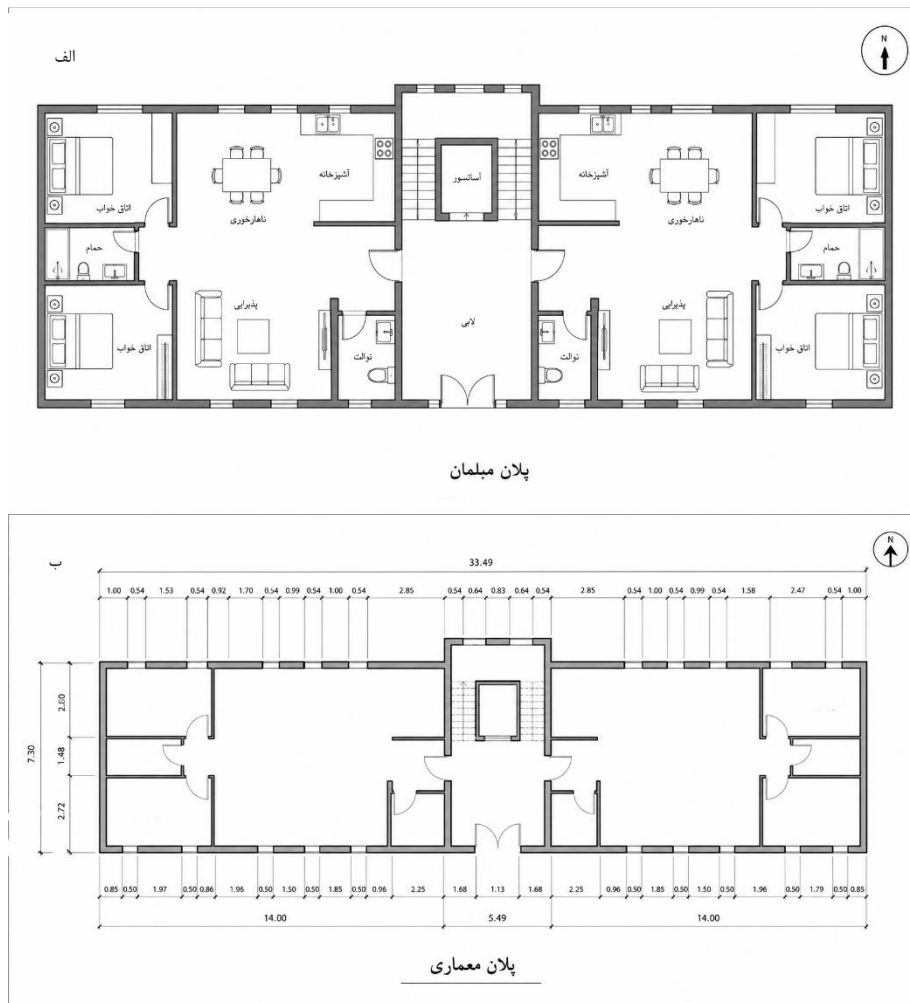
این نتیجه نشان می‌دهد که مسیر طراحی بیش از همه بر مسئله غالب اقلیم، یعنی کنترل بار سرمایش و دریافت بیش از اندازه تابش، اثر گذاشته است؛ اما این بهبود با افزایش نیاز گرمایشی همراه بوده است. بنابراین، N21/S11 را نمی‌توان به‌عنوان حالتی که در همه شاخص‌ها برتر است معرفی کرد. اهمیت آن در تعادلی است که در محدوده آزمون شده میان بار حرارتی و نور روز ایجاد کرده است.

شناسه N21/S11 به تنظیم نسبت بازشوهای شمالی و جنوبی در همین تیپ اشاره دارد. آنچه مستقیماً از مدل پشتیبانی می‌شود شامل جهت کلی R3، تفاوت رفتار جبهه‌های شمالی و جنوبی، نسبت‌های آزموده‌شده بازشو، منطق سایه‌اندازی جنوبی و ویژگی‌های اصلی شیشه و پوسته است.

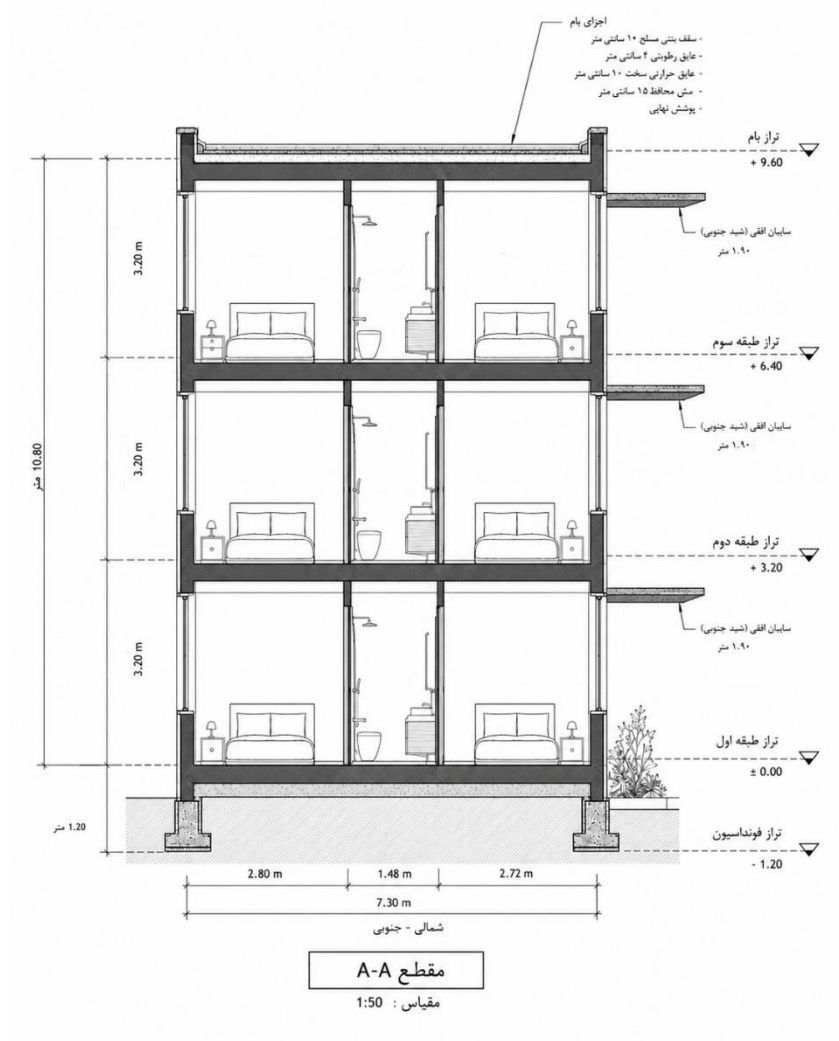
این نتایج در ادامه به زبان معماری بازگردانده شدند. در پلان، فضاهای اصلی زندگی در ارتباط با جبهه‌های دارای بازشو قرار گرفته‌اند و فضاهای خدماتی و ارتباطی در بخش میانی سازمان یافته‌اند. در مقطع نیز همین رابطه در سه طبقه ادامه یافته است. در نما، جبهه جنوبی با سطح بازشوی محدودتر و سایه عمیق‌تر و جبهه شمالی با بازشدگی بیشتر شکل گرفته است.

این بخش از طراحی، ترجمه معماری نتایج محاسباتی است. جانمایی دقیق اتاق‌ها، شکل نهایی پنجره‌ها، جزئیات اتصال سایه‌بان و ترکیب نهایی نما به صورت مستقل شبیه‌سازی نشده‌اند؛ از این رو، نباید عملکرد عددی ثبت‌شده در مدل را مستقیماً به این جزئیات نسبت داد.

آنچه از این مرحله برای طراحی باقی می‌ماند، نه یک نمای ثابت یا یک پلان قابل تکرار، بلکه مجموعه‌ای از روابط است: تفاوت رفتار جبهه‌ها، تنظیم نسبت بازشو بر پایه جهت، کنترل فصلی تابش، و هماهنگی پوسته با نیاز هم‌زمان حرارتی و نوری فضا.



شکل ۴-۹. بازتاب نتایج در پلان تیپ R۳: الف) سازمان فضایی مبله؛ ب) پلان اندازه‌گذاری شده و هسته میانی. ترسیم نگارنده.



شکل ۴-۱۰. مقطع سه طبقه تیپ مسکونی از میان واحدها؛ جانمایی اتاق‌ها، سرویس، بازشوها و پوسته. ترسیم نگارنده.



شکل ۴-۱۱. توسعه نمای معماری تیپ نماینده: الف) نمای جنوبی؛ ب) نمای شمالی. ترسیم نگارنده.

کنترل مکمل: تراز سالانه فتوولتاییک در مرز بلوک

پس از کاهش نیاز حرارتی ساختمان، امکان استفاده از سطح در دسترس برای تولید برق خورشیدی نیز بررسی شد. هدف این بخش طراحی یک سامانه مستقل انرژی نبود؛ بلکه سنجش این موضوع بود که سطح قابل استفاده بنا در مقیاس سالانه تا چه اندازه می‌تواند با نیاز عملیاتی برآورد شده ساختمان هم‌خوان شود.

در حالت پایه، حدود ۱۴۰ مترمربع سطح فعال فتوولتاییک، $50,039.69 \text{ kWh/y}$ انرژی DC و $48,007.53 \text{ kWh/y}$ انرژی AC تولید کرد. نیاز عملیاتی معادل سالانه مدل $47,625.23 \text{ kWh/y}$ بود؛ بنابراین نسبت تولید سالانه AC به این نیاز حدود 100.8% درصد به دست آمد.

این برابری تنها در مقیاس سالانه معنا دارد. تولید خورشیدی و مصرف ساختمان در ساعت‌های یکسان رخ نمی‌دهند؛ بنابراین این عدد به معنای استقلال از شبکه یا خودکفایی ساعتی ساختمان نیست. همچنین نیازهای مربوط به آب، کشت، روشنایی عمومی و حمل‌ونقل در این تراز وارد نشده‌اند.

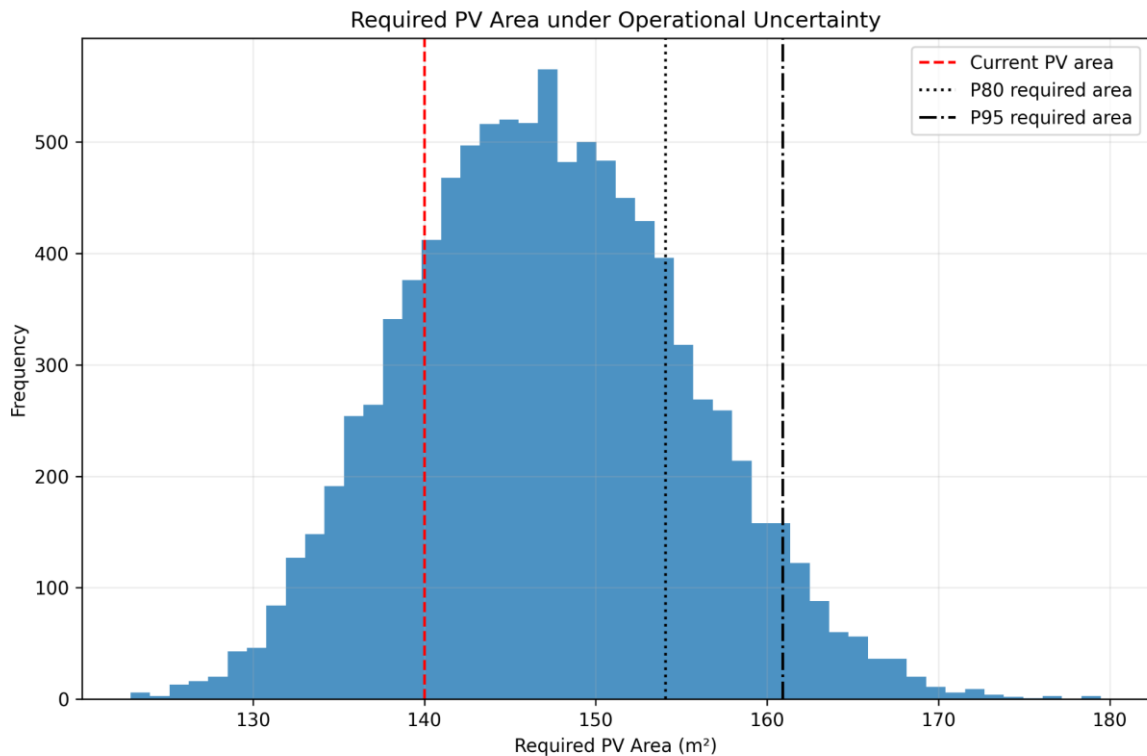
تحلیل عدم قطعیت نشان داد که سطح ۱۴۰ مترمربع حاشیه مطمئنی ایجاد نمی‌کند. احتمال مثبت ماندن تراز سالانه در این حالت 19.7% درصد بود و میانگین و میانه تراز به ترتیب به $2,360$ و $2,334.9 \text{ kWh/y}$ -رسید.

با افزایش سطح فعال، مقدار مورد نیاز برای احتمال ۵۰، ۸۰ و ۹۵ درصد به ترتیب ۱۴۶،۹، ۱۵۴،۱ و ۱۶۰،۹ مترمربع برآورد شد.

جدول ۴-۵. تراز سالانه فتوولتاییک با در نظر گرفتن عدم قطعیت

شاخص	نتیجه	معنای آن برای طراحی
میانگین تراز سالانه	$\text{kWh/y} \times 360 -$	سطح ۱۴۰ مترمربع حاشیه کافی ندارد
میانه تراز سالانه	$\text{kWh/y} \times 334/9 -$	مرکز توزیع زیر صفر قرار دارد
احتمال تراز مثبت	۱۹/۷٪	سطح پایه برای اطمینان بیشتر کافی نیست
سطح P50	$\text{m}^2 146/9$	سطح میانی مورد نیاز
سطح P80	$\text{m}^2 154/1$	حدود $\text{m}^2 155$
سطح P95	$\text{m}^2 160/9$	حدود $\text{m}^2 161$

از این رو، نقش این بررسی در طراحی تعیین یک عدد قطعی برای سطح پنل نیست؛ بلکه نشان دادن فاصله میان «تراز اسمی» و «تراز قابل اتکاتر» است. در این نمونه، افزایش سطح فعال از حدود ۱۴۰ مترمربع به حدود ۱۵۵ تا ۱۶۱ مترمربع، امکان بیشتری برای جبران تغییرات تولید و مصرف در مقیاس سالانه فراهم می کند.



شکل ۴-۱۲. سطح فعال فتوولتاییک موردنیاز با در نظر گرفتن عدم قطعیت؛ خطوط P80 و P95 تفاوت میان تراز اسمی و سطح دارای حاشیه بیشتر را نشان می‌دهند

سرمایش: ۷۳/۵۷ $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$	گرمایش: ۵۱/۰۶ $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$	بار حرارتی کل: ۱۲۴/۶۲ $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$	UDI مفید: ۹۲/۵۴٪
در پلان، مقطع و نما، نتایج به صورت تصمیم‌های معماری بازخوانی شده‌اند. جهت استقرار، نسبت بازشوهای شمالی و جنوبی، سایه جنبه جنوب و منطق کلی پوسته مستقیماً از مسیر محاسباتی پشتیبانی می‌شوند؛ اما جانمایی نهایی اتاق‌ها، شکل پنجره‌ها، اتصال سایه‌بان و ترکیب نهایی نما حاصل ادامه طراحی معماری‌اند. بنابراین، این ترسیم‌ها صورت معماری اصول به‌دست‌آمده را نشان می‌دهند، نه یک مدل عددی تازه.			

۴-۹. نسبت نتایج با شواهد محلی و معماری یزد

نتایج این فصل را می‌توان در امتداد برخی شواهد پیشین درباره معماری و عملکرد ساختمان در اقلیم گرم‌و‌خشک یزد خواند. اهمیت جهت استقرار، هندسه، نسبت بازشو، سایه و ساخت پوسته در مطالعات پیشین نیز مطرح شده است؛ با این حال، مقصود از این مقایسه انتقال مستقیم مقادیر عددی نیست، بلکه بررسی هم‌جهتی سازوکارهایی است که در شرایط متفاوت، رابطه بنا با تابش و انتقال حرارت را شکل می‌دهند.

مطالعه Akbari et al. (2021) در یزد نشان می‌دهد که هندسه و نسبت‌های فضایی حیاط می‌توانند بر دریافت تابش و شکل‌گیری سایه اثر بگذارند. این موضوع با یافته این فصل درباره اهمیت فرم و جهت استقرار هم‌راستاست؛ نه از آن جهت که یک هندسه مشخص در همه موارد برتر باشد، بلکه از این نظر که شکل بنا، سطح در معرض تابش و نحوه سایه‌اندازی را تغییر می‌دهد.

در مطالعه Kamyab et al. (2023) نیز نسبت بازشو و سایه به عنوان عوامل مؤثر در رفتار حرارتی و نور روز بررسی شده‌اند. یافته‌های این فصل نیز نشان دادند که بازشو و سایه را نمی‌توان جدا از جهت جبهه و فصل بررسی کرد؛ کاهش دریافت تابش در یک دوره می‌تواند سودمند باشد و در دوره‌ای دیگر نیاز گرمایشی یا نور روز را تحت تأثیر قرار دهد.

نتایج Roostaei Firouzabad & Pourfayaz (2024) نیز بر حساسیت عملکرد ساختمان به ترکیب لایه‌های پوسته تأکید دارند. در مدل حاضر نیز تفاوت M1، M2 و M3 نشان داد که نام یک مصالح یا افزایش یک ویژگی، به تنهایی بیانگر عملکرد پوسته نیست و رفتار نهایی از ترکیب مقاومت حرارتی، ظرفیت ذخیره گرما و شرایط دریافت خورشیدی شکل می‌گیرد.

از نظر روش ارزیابی نیز مطالعه Ramezani et al. (2026) به دلیل استفاده از خانواده ابزارهای Ladybug/Honeybee و فایل TMYx در زمینه مسکن یزد، نزدیک‌ترین شاهد روش‌شناختی به پژوهش حاضر است. در آن مطالعه بخش انرژی با داده مصرف واقعی مقایسه شده است؛ با این حال، این اعتبارسنجی مربوط به مدل همان پژوهش است و مستقیماً به مدل حاضر منتقل نمی‌شود.

جدول ۴-۶. نسبت یافته‌های این فصل با شواهد محلی

یافته این فصل	شاهد هم‌راستا	وجه مشترک
اثر فرم و جهت استقرار	Akbari et al. (2021)، یزد	رابطه هندسه، سایه و دریافت خورشیدی
نقش نسبت بازشو و سایه	Kamyab et al. (2023)، یزد	تنظیم دریافت تابش در نسبت با بازشو و سایه
اهمیت ترکیب لایه‌های پوسته	Roostaei Firouzabad & Pourfayaz (2024)، یزد	حساسیت رفتار حرارتی به ساخت پوسته
ارزیابی هم‌زمان انرژی و نور روز	Ramezani et al. (2026)، یزد	روش و ابزارهای هم‌خانواده در شرایط اقلیمی یزد

بنابراین، ارزش این مقایسه در تأیید یک عدد یا یک فرم مشخص نیست؛ بلکه در آن است که مسئله‌هایی که در مدل حاضر آشکار شده‌اند — جهت، سایه، بازشو و پوسته — در شواهد دیگر مربوط به یزد نیز به عنوان عوامل مؤثر بر عملکرد بنا دیده می‌شوند. درصدهای گزارش شده در این فصل متعلق به همین هندسه و همین شرایط مدل‌اند، اما سازوکارهایی که پشت آن‌ها قرار دارند، امکان بازخوانی معماری گسترده‌تری فراهم می‌کنند.

۱-۹-۴. تیپ مکمل حیاط مرکزی-ساباط

در کنار مسیر اصلی R3، تیپ حیاط مرکزی-ساباط به عنوان پاسخی دیگر به سازمان فضایی مسکن بررسی شد. اهمیت این تیپ در پژوهش حاضر در مقایسه عددی با R3 نیست، بلکه در پاسخ‌دادن به جنبه‌هایی از

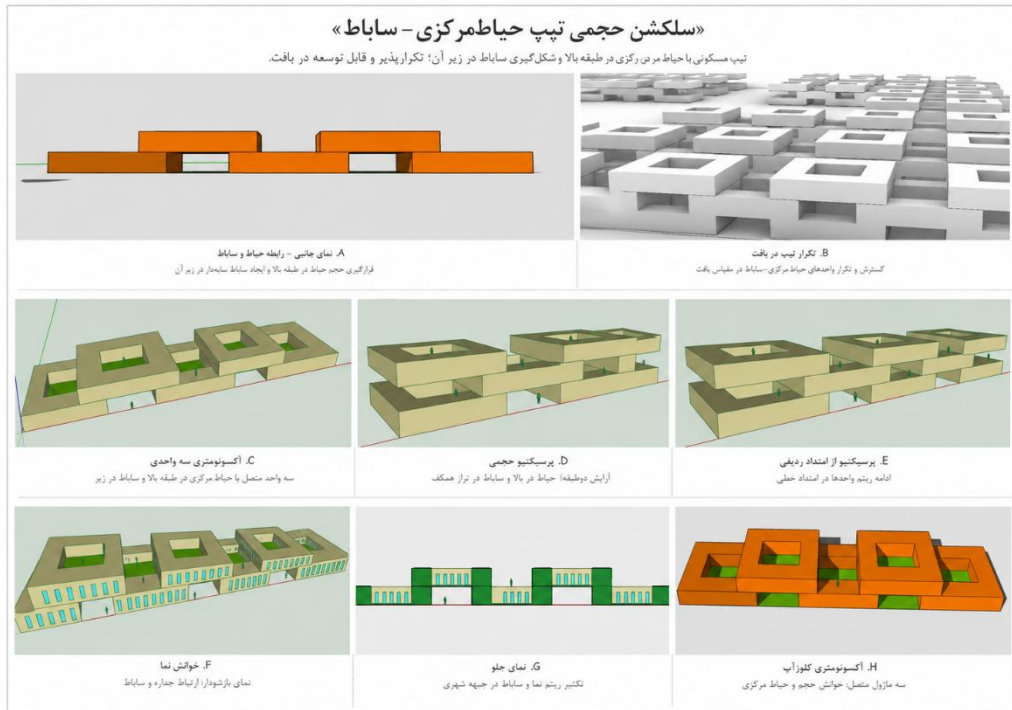
سکونت است که تنها با بار حرارتی یا UDI توضیح داده نمی‌شوند؛ از جمله فضای میانی، حریم، سایه مسیر حرکت و نحوه پیوند فضای باز و بسته .

در این خوانش، ساباط یک عنصر تاریخی برای تکرار نیست. اهمیت آن در ایجاد پیوستگی سایه و شکل‌دادن به مرحله‌ای میان فضای عمومی و فضای خصوصی است. حیاط نیز تنها یک فضای خالی مرکزی نیست؛ کیفیت آن از نسبت میان عمق فضا، میزان محصوریت، محل بازشوها، ورود نور، امکان جریان هوا و رابطه دیداری میان درون و بیرون شکل می‌گیرد.

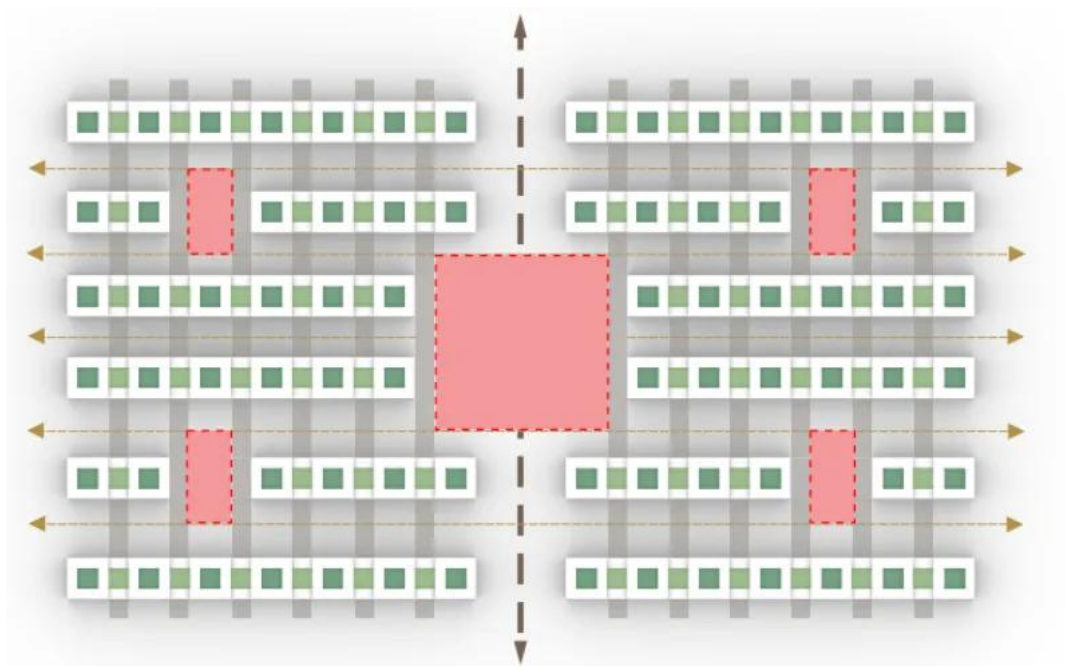
به این ترتیب، آنچه از معماری بومی به طراحی امروز منتقل می‌شود **صورت عنصر نیست، بلکه سازوکار فضایی و اقلیمی آن است**. سایه، حریم، فضای میانی و کنترل رابطه درون و بیرون اصولی‌اند که می‌توانند در ترکیب‌های جدید معماری بازتعریف شوند .

تیپ حیاط مرکزی-ساباط در این پژوهش با همان شرایط مدل R3 به صورت مستقل شبیه‌سازی نشده است. همچنین خانواده O/OR مسیر محاسباتی دیگری داشته و به دلیل تفاوت هندسه و سازمان فضایی، نتایج آن را نمی‌توان مستقیماً به این تیپ نسبت داد. از این رو، جایگاه این بخش بیش از آنکه عملکردی باشد، در روشن کردن یک امکان فضایی دیگر برای سکونت در اقلیم یزد است .

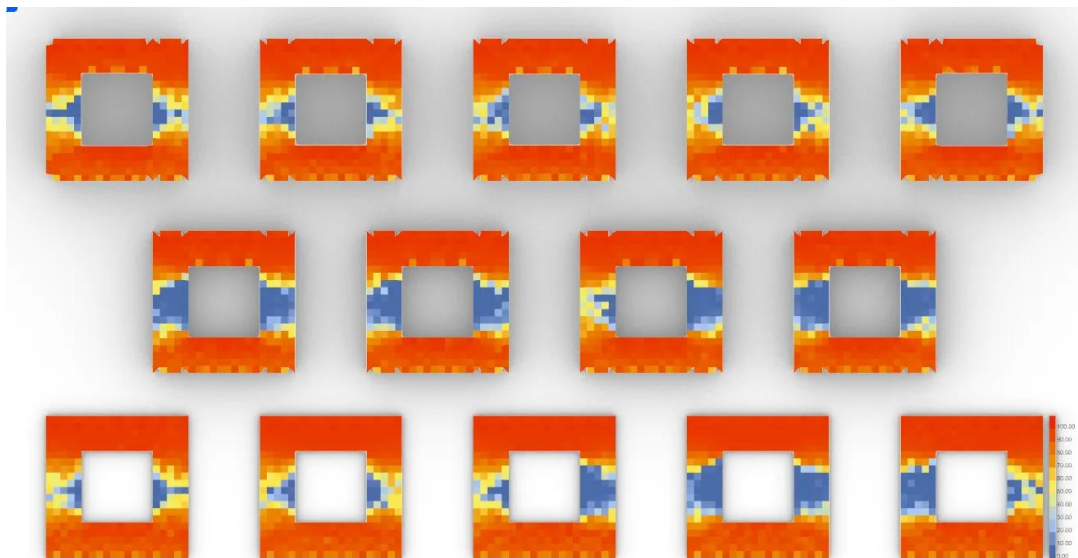
رندرهای شکل ۴-۱۵ نیز نشان می‌دهند که شرایط روشنایی در طبقات یکسان نیست و بخش‌هایی از همکف ممکن است دریافت نور کمتری داشته باشند. این مشاهده، مسئله نورگیری در عمق فضا را مطرح می‌کند، اما برای داوری دقیق‌تر باید همین هندسه با شبکه حسگر و شاخص‌های کمی نور روز بررسی شود.



شکل ۴-۱۳. فرایند شکل‌گیری و سازمان فضایی تیپ حیاط مرکزی-ساباط؛ نمایش استقرار واحدهای حیاطدار در دو تراز، شکل‌گیری ساباط، هم‌نشینی واحدها، مسیر نیمه‌خصوصی و مقطع اقلیمی



شکل ۴-۱۴. سلسله‌مراتب حرکت و دسترسی در تیپ حیاط مرکزی-ساباط؛ ارتباط واحدها، میدانچه‌های محلی و مسیرهای سایه‌دار



شکل ۴-۱۵. مقایسه کیفی روشنایی طبقات در آرایش حیاطدار؛ ردیف پایین طبقه همکف، ردیف میانی طبقه اول و ردیف بالا طبقه دوم

جدول ۴-۷. نسبت تیپ «R۳» با تیپ مکمل حیاط مرکزی-ساباط

موضوع	تیپ R3	حیاط مرکزی-ساباط
رفتار حرارتی و نور روز	در مسیر اصلی پژوهش محاسبه شده است	نیازمند شبیه‌سازی مستقل
حریم و کنترل دید	وابسته به سازمان پلان و نما	ظرفیت بیشتر برای ایجاد لایه‌های حریم
فضای باز خصوصی	در مدل پایه محدودتر	امکان بیشتر برای حیاط و فضای نیمه‌باز
هندسه و استقرار	ساده‌تر و تکرارپذیرتر	وابسته‌تر به شرایط زمین و همجواری
پوسته	در مدل R3 سنجیده شده است	نیازمند ارزیابی در هندسه واقعی خود
نقش در پژوهش	تیپ اصلی برای سنجش عملکرد	مسیر مکمل برای بررسی سازمان فضایی

در نتیجه، این دو تیپ پاسخ یک پرسش واحد نیستند R3. بیشتر امکان سنجش روشن رابطه جهت، بازشو، سایه و پوسته را فراهم کرده است؛ درحالی‌که حیاط مرکزی-ساباط مسئله حریم، فضای میانی و سازمان فضایی را پررنگ‌تر می‌کند. مقایسه آن‌ها زمانی کامل خواهد شد که هر دو در شرایط محاسباتی یکسان ارزیابی شوند.

۲-۹-۴. تیپ کمی مستقل حیاط خصوصی طبقه‌ای

در شاخه‌ای دیگر، یک تیپ حیاطدار به‌صورت مستقل و کمی بررسی شد. هدف از این آزمون آن بود که مشخص شود در شرایطی که شکل زمین یا نیاز به حریم استفاده مستقیم از R3 را محدود می‌کند، تغییر جهت و نحوه تقسیم واحدها در یک هندسه حیاطدار چه اثری بر رفتار حرارتی و نور روز دارد.

مدل پایه ابعاد ۲۰×۲۰ متر، حیاطی به ابعاد ۱۰×۱۰ متر و ارتفاع طبقه ۳٫۲ متر داشت. ابتدا جهت‌های صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه بررسی شدند و سپس حالت O کامل با دو پیکربندی ۲ U و ۴ L مقایسه شد.

در بررسی جهت استقرار، مجموع بار حرارتی در حالت صفر درجه $160.74 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ بود. این مقدار در زاویه 45° درجه به 165.38 و در زاویه 90° درجه به $163.67 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ رسید. تغییرات بار حرارتی میان سه حالت محدود بود، اما رفتار نور روز حساسیت بیشتری نشان داد؛ UDI از 82.14% درصد در حالت صفر به 80.40% درصد در 45° درجه و 65.38% درصد در 90° درجه کاهش یافت.

این تفاوت نشان می‌دهد که در این تیپ، جهت استقرار بیش از آنکه بار حرارتی را دگرگون کند، نحوه ورود و توزیع نور روز را تحت تأثیر قرار داده است. بنابراین، انتخاب جهت در یک فرم حیاط‌دار را نمی‌توان تنها با بار انرژی انجام داد؛ عمق فضا، دیواره‌های حیاط و محل بازشوها نیز در کیفیت نور داخل نقش دارند.

در بررسی نحوه تقسیم واحدها نیز اختلاف بار حرارتی میان O کامل، ۲U و ۴L اندک بود؛ اما شاخص‌های نور روز تفاوت بیشتری داشتند. O کامل UDI برابر 82.14% درصد و UDI-low برابر 16.03% درصد ثبت کرد، درحالی‌که در ۲U و ۴L مقدار UDI به ترتیب به 76.56% و 77.04% درصد کاهش یافت و UDI-low به 21.62% و 21.17% درصد رسید.

بنابراین، در سه حالت بررسی شده، تقسیم بیشتر واحدها به بهبود نور روز منجر نشد. این نتیجه را می‌توان به‌عنوان نشانه‌ای از اهمیت عمق، تقسیم‌بندی داخلی و رابطه فضاها با حیاط خواند؛ هرچند برای شناخت دقیق محل نقاط کم‌نور، تحلیل جداگانه هر طبقه و نقشه مکانی روشنایی لازم است.

جدول ۴-۸. نتایج تیپ حیاط خصوصی طبقه‌ای

حالت	بار حرارتی $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$	UDI	UDI-low	برداشت معماری
چرخش 0°	160.74	82.14%	—	حالت مرجع
چرخش 45°	165.38	80.40%	—	تغییر محدود بار و کاهش جزئی نور روز
چرخش 90°	163.67	65.38%	—	افت محسوس نور روز
O کامل	160.74	82.14%	16.03%	مناسب‌ترین پاسخ نوری در سه پیکربندی
2U	161.13	76.56%	21.62%	کاهش UDI و افزایش ساعات کم‌نور

حالت	بار حرارتی kWh/(m ² ·y)	UDI	UDI-low	برداشت معماری
4L	161.48	77.04%	21.17%	رفتار نوری ضعیف‌تر از O کامل

این تیپ با حیاط مرکزی-ساباط یکی نیست. حیاط خصوصی طبقه‌ای یک مدل کمی مستقل است؛ درحالی‌که تیپ حیاط مرکزی-ساباط در این فصل برای بررسی حریم، فضای میانی، سایه و سازمان فضایی مطرح شده است.

۳-۹-۴. قابلیت انتقال قواعد R۳ به شرایط استقرار متفاوت

در تیپ R3، حالت صفر درجه در میان جهت‌های آزموده‌شده کمترین بار حرارتی را نشان داد. بااین‌حال، ارزش این نتیجه در تثبیت یک جهت یا یک فرم مشخص برای همه قطعات نیست. در طرح واقعی، شکل زمین، همجواری، مسیر حرکت، حریم، دید و امکان نورگیری می‌توانند سازمان بنا را تغییر دهند.

بنابراین، آنچه از R3 قابلیت انتقال دارد فرم آن نیست، بلکه منطق تنظیم رابطه با اقلیم است. اگر جهت بنا تغییر کند، نسبت بازشوی شمال و جنوب، عمق سایه‌بان، محل فضاهای اصلی و حتی نحوه استفاده از فضاهای نیمه‌باز نیز باید دوباره متناسب با جهت جدید بررسی شوند.

در زمینی که فرم خطی با حریم، شکل قطعه یا دسترسی سازگار نباشد، فرم‌های L، U یا حیاط‌دار می‌توانند پاسخ‌های دیگری فراهم کنند. اما هر یک از این فرم‌ها سطح پوسته، نحوه دریافت تابش، عمق نورگیری و روابط فضایی متفاوتی دارند؛ بنابراین باید در هندسه واقعی خود سنجیده شوند و نمی‌توان نتیجه R3 را مستقیماً به آن‌ها منتقل کرد.

به این ترتیب، حاصل فصل چهارم یک «تیپ نهایی» برای تکرار نیست. آنچه از این بررسی باقی می‌ماند، مجموعه‌ای از روابط طراحی است:

نحوه دریافت تابش ← جهت استقرار

رابطه نور و انتقال حرارت ← بازشو

تنظیم دریافت خورشیدی در فصل‌های مختلف ← سایه

ذخیره و انتقال گرما ← پوسته

نحوه برخورد این عوامل با نیازهای سکونت ← سازمان فضایی

این روابط در هر زمین و هر برنامه فضایی باید دوباره با شرایط همان طرح تنظیم شوند. همین قابلیت بازتنظیم است که نتیجه را از یک فرم مشخص فراتر می‌برد و آن را به اصل طراحی تبدیل می‌کند.

۴-۱۰. جمع‌بندی فصل

نتایج این فصل نشان داد که پاسخ معماری به اقلیم گرم‌وخشک از انتخاب یک فرم یا افزودن یک راهکار منفرد به دست نمی‌آید. آنچه رفتار نهایی بنا را شکل می‌دهد، نحوه قرارگرفتن تصمیم‌های مختلف در کنار یکدیگر است؛ جهت استقرار، بازشو، سایه، شیشه و پوسته هر یک بخشی از رابطه بنا با تابش، گرما و نور روز را تنظیم می‌کنند.

در نخستین مرحله، نزدیکی عملکرد R1 و R3 نشان داد که انتخاب فرم را نمی‌توان تنها بر پایه کمترین بار حرارتی انجام داد R3. نه به دلیل برتری مطلق، بلکه به سبب سازمان هندسی روشن‌تر جبهه‌های شمالی و جنوبی و امکان ادامه بررسی جهت، بازشو و سایه انتخاب شد. به این ترتیب، فرم در این پژوهش بیش از آنکه پاسخ نهایی باشد، زمینه‌ای برای شکل‌گیری تصمیم‌های بعدی بود.

در ادامه، بازتنظیم بازشوها نشان داد که جبهه‌های بنا را نمی‌توان یکسان دید. تفاوت جهت دریافت تابش سبب می‌شود نسبت بازشو در شمال و جنوب نیز نیازمند پاسخ متفاوت باشد. این تغییر، بار سرمایش و مجموع بار حرارتی را کاهش داد و شرایط UDI را بهبود بخشید؛ اما همین مسیر با ورود سایه روشن کرد که کنترل تابش همواره اثری یک‌سویه ندارد.

سایه جنوبی توانست بار سرمایش و ساعات با روشنایی بیش از ۳۰۰۰ لوکس را کاهش دهد، اما هم‌زمان نیاز گرمایشی افزایش یافت. این نتیجه یکی از نکات اصلی فصل را آشکار می‌کند: در اقلیم یزد، مسئله حذف خورشید نیست، بلکه تنظیم زمان، جهت و مقدار دریافت آن است. تابشی که در تابستان می‌تواند به گرمای ناخواسته تبدیل شود، در زمستان بخشی از نیاز حرارتی بنا را تأمین می‌کند؛ از این رو، سایه نیز باید متناسب با فصل و جهت شکل گیرد.

همین رابطه در بررسی شیشه و پوسته نیز دیده شد. عملکرد پوسته را نمی‌توان تنها با میزان عایق یا جرم حرارتی توضیح داد؛ رفتار آن از ترکیب مقاومت حرارتی، ظرفیت ذخیره گرما و نحوه دریافت خورشیدی شکل می‌گیرد. در مدل حاضر، M3 امکان مناسب‌تری برای ادامه تنظیم بازشو فراهم کرد، اما این نتیجه مربوط به همان ترکیب لایه‌ها و شرایط آزمون است.

در پایان مسیر اصلی، پیکربندی N21/S11 نسبت به R3 پایه بار سرمایش را حدود ۴۳٫۹ درصد و مجموع بار حرارتی را حدود ۲۳٫۵ درصد کاهش داد، درحالی‌که بار گرمایش حدود ۶۱٫۱ درصد افزایش یافت. بنابراین،

ارزش این پیکربندی در کاهش یک‌جانبه همه نیازها نیست؛ بلکه در روشن کردن نقطه‌ای از تعادل میان کنترل گرمای تابستان، دریافت خورشیدی زمستان و نور روز است.

بررسی نور روز نیز همین موضوع را تأیید کرد. کاهش UDI-up نشان داد که ساعات با روشنایی بیش از اندازه محدود شده‌اند، اما هم‌زمان افزایش UDI-low و کاهش DA و cDA نشان می‌دهد که کنترل بیشتر تابش می‌تواند بخشی از دسترسی به نور روز را نیز کاهش دهد. از این‌رو، بازشو و سایه زمانی مناسب‌اند که کنترل گرما به تأریک شدن ناموجه فضای سکونت منجر نشود.

تیپ‌های حیاط‌دار مسیر دیگری از همین نگاه را پیش کشیدند. ارزش حیاط و سابات تنها در صورت تاریخی آن‌ها نیست؛ اهمیت آن‌ها در ایجاد فضای میانی، تدریج حریم، پیوستگی سایه و تنظیم رابطه میان درون و بیرون است. باین‌حال، عملکرد حرارتی و نوری هر هندسه باید در همان شکل و سازمان فضایی خود سنجیده شود. از این‌رو، حیاط مرکزی-ساباط در این فصل بیش از آنکه جایگزین R3 باشد، امکان دیگری برای ادامه همان منطق اقلیمی و فضایی است.

در نهایت، حاصل این فصل یک فرم ثابت برای تکرار در یزد نیست. آنچه از نتایج قابلیت انتقال دارد، مجموعه‌ای از روابط است: جهت استقرار نحوه دریافت تابش را تغییر می‌دهد؛ بازشو میان نور و انتقال حرارت تعادل برقرار می‌کند؛ سایه دریافت خورشیدی را در فصل‌های مختلف تنظیم می‌کند؛ پوسته در ذخیره و انتقال گرما نقش دارد؛ و سازمان فضایی این عوامل را با نیازهای سکونت پیوند می‌دهد.

به این ترتیب، شبیه‌سازی در این پژوهش جایگزین تصمیم معماری نیست؛ ابزاری است برای آنکه پیامد هر تصمیم پیش از تبدیل شدن به فرم نهایی شناخته شود و پاسخ بنا به اقلیم، نه بر پایه تقلید از یک شکل گذشته، بلکه بر پایه شناخت سازوکار آن شکل گیرد.

فصل پنجم: نتایج عملکرد حرارتی محفظه نیمه‌مدفون والپینی و شاخص نسبی انرژی خورشیدی عبوری

۵-۱. مسئله و منطق تفسیر نتایج

محفظه شفاف در اقلیم گرم‌وخشک با مسئله‌ای دوگانه روبه‌روست. ورود تابش خورشیدی برای روشنایی و دریافت انرژی درون محفظه ضروری است، اما همین تابش در دوره گرم می‌تواند سبب افزایش شدید دمای داخل و انباشت گرما شود. از سوی دیگر، محدود کردن بیش از اندازه تابش نیز پاسخ مناسبی نیست، زیرا بخشی از انرژی موردنیاز فضای کشت از همین مسیر تأمین می‌شود.

از این رو، مسئله اصلی در این فصل نه دستیابی به کمترین دماست و نه بیشترین دریافت خورشیدی؛ مسئله، **تنظیم رابطه میان محفظه، زمین، هوا و تابش** است. نیمه‌مدفون شدن، تهویه طبیعی، نوع پوشش و سایه فصلی هر یک بخشی از این رابطه را تغییر می‌دهند و باید در کنار پیامدهای حرارتی و خورشیدی آن‌ها خوانده شوند.

قرارگیری بخشی از محفظه در زمین می‌تواند نوسان دما را تعدیل کند و در دوره سرد از افت شدید دمای داخل بکاهد؛ اما همین تماس با خاک و کاهش سطح در معرض هوای آزاد ممکن است در فصل گرم دفع گرمای انباشته‌شده را دشوارتر کند. تهویه طبیعی، در مقابل، راهی برای خروج این گرما فراهم می‌کند. سایه و نوع پوشش نیز میزان دریافت خورشیدی و انتقال حرارت را تغییر می‌دهند. بنابراین هیچ‌یک از این عوامل به تنهایی پاسخ مسئله نیستند.

برای شناخت این روابط، دو حالت هندسی روی زمین و نیمه‌مدفون در شرایط اقلیمی یکسان بررسی شده‌اند. سپس اثر تهویه طبیعی، سایه فصلی و تغییر پوشش در مراحل بعدی خوانده می‌شود. دمای هوا، ساعات وقوع شرایط بسیار گرم و بسیار سرد، دامنه نوسان، بار حرارتی نظری و شاخص DLI_{eq} در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند تا روشن شود هر تغییر چه مسئله‌ای را کاهش می‌دهد و چه پیامدی به همراه دارد.

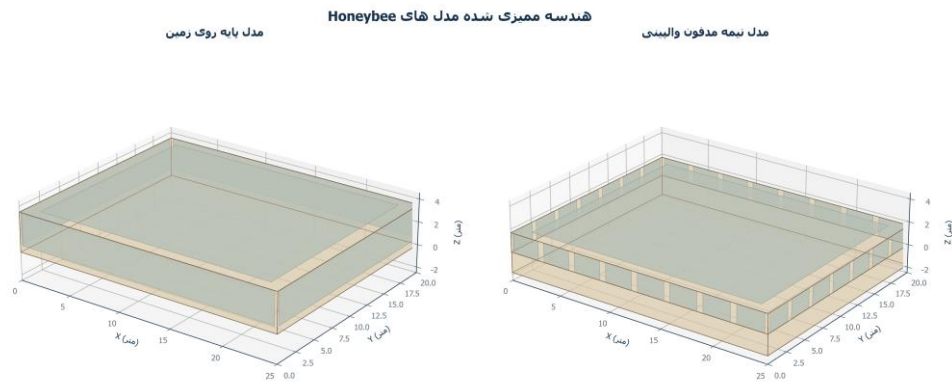
DLI_{eq} در این پژوهش تنها برای مقایسه نسبی انرژی خورشیدی عبوری از پوسته به کار می‌رود. این شاخص نه توزیع واقعی PPFD در سطح گیاه را نشان می‌دهد، نه تفاوت طیفی پوشش‌ها را به‌طور کامل بازنمایی می‌کند و نه مبنایی برای پیش‌بینی رشد یا عملکرد محصول است. بنابراین، در این فصل افزایش یا کاهش DLI_{eq} تنها به معنای تغییر در مقدار نسبی انرژی خورشیدی عبوری است.

در نتیجه، پرسش اصلی فصل چنین است: چگونه می‌توان با تنظیم ارتباط محفظه با زمین، هوا، پوشش و سایه، شدت نوسان و بیش‌گرمایش را کاهش داد، بی‌آنکه پیامد این تصمیم‌ها بر دریافت خورشیدی نادیده گرفته شود؟

۵-۲. ساختار سناریوها و شاخص‌های ارزیابی

مساحت کف هر دو هندسه مرجع ۵۰۰ مترمربع است. مدل روی‌زمین به‌عنوان حالت پایه و مدل نیمه‌مدفون با عمق ۱۰۸ متر به‌عنوان حالت دوم بررسی شده است. در مدل پایه نیمه‌مدفون، دمای ماهانه خاک در عمق دو متر به‌عنوان شرط مرزی زمین در نظر گرفته شده است.

برابری مساحت کف امکان مقایسه دو حالت را فراهم می‌کند، اما تفاوت آن‌ها تنها به تماس با خاک محدود نیست. در هندسه نیمه‌مدفون، میزان سطح شفاف، نسبت سطوح در تماس با زمین و مقدار پوسته در معرض هوای بیرون نیز تغییر می‌کند. بنابراین، هر جا دو هندسه مستقیماً با یکدیگر مقایسه می‌شوند، نتیجه بیانگر رفتار کلی آرایش روی‌زمین و نیمه‌مدفون است و نمی‌توان تمام تفاوت را تنها به اثر خاک نسبت داد.



مجموعه فاکتورهای پایه واکتبی نمایش داده شده است: عمق دای ۱٫۸ متر و ارتفاع کل ۲٫۸ متر

شکل ۵-۱. مقایسه هندسه مرجع روی‌زمین و نمونه نیمه‌مدفون والپینی و نحوه ارتباط آن‌ها با زمین و پوسته شفاف پس از شناخت رفتار پایه دو هندسه، تهویه طبیعی، سایه فصلی و پوشش جایگزین به‌صورت مرحله‌ای وارد بررسی می‌شوند. این ترتیب کمک می‌کند اثر هر تصمیم در نسبت با مسئله اصلی آن خوانده شود: دفع گرما، کنترل دریافت خورشیدی یا کاهش انتقال حرارت.

جدول ۵-۱. سازمان سناریوهای پذیرفته‌شده و نقش هر گروه در تحلیل

مرحله بررسی	شناسه‌ها	تغییر اصلی	پرسش
هندسه در حالت بسته	F_S0 / F_S2	روی‌زمین / نیمه‌مدفون	تفاوت دو هندسه در نبود امکان دفع گرما چیست؟
افزودن تهویه طبیعی	F_S1 / F_S3	بازشو معادل ۳۰٪ مساحت کف	تهویه تا چه اندازه گرمای انباشته‌شده را خارج می‌کند؟
سایه فصلی	F_S4 / F_S5	عبور خورشیدی ۰/۷۵ با برنامه فصلی	کاهش تابش چه اثری بر دما و DLI_eq دارد؟

مرحله بررسی	شناسه‌ها	تغییر اصلی	پرسش
تغییر پوشش	F_S9 تا F_S6	پلی‌کربنات ۱۶ میلی‌متر	کاهش انتقال حرارت چه تغییری در دریافت خورشیدی ایجاد می‌کند؟
بار حرارتی نظری	F_S1_ACTIVE / F_S10_ACTIVE / F_S4_ACTIVE / F_S5_ACTIVE	کنترل نظری دما در ۱۷- C۲۷°	پس از راهکارهای غیرفعال چه مقدار نیاز حرارتی باقی می‌ماند؟
حساسیت تهویه	F_S1_V20 / F_S9_V20	بازشو ۲۰٪ در برابر ۳۰٪	آیا جهت پاسخ با کاهش سطح بازشو نیز حفظ می‌شود؟

۵-۲-۱. شاخص‌های حرارتی

برای تشخیص شرایط حرارتی شدید، ساعات با دمای بیشتر از ۳۵ درجه و کمتر از ۱۰ درجه سلسیوس شمارش شده‌اند. این دو مقدار در این پژوهش مرزهای مقایسه‌اند و نباید به‌عنوان آستانه زیستی یک محصول مشخص در نظر گرفته شوند.

بازه ۱۶ تا ۲۷ درجه نیز برای شناخت مدت زمانی به کار می‌رود که دمای محفظه در محدوده‌ای میانی قرار دارد. افزایش ساعات حضور در این بازه به‌تنهایی به معنای فراهم‌شدن شرایط مناسب رشد نیست؛ زیرا عواملی مانند رطوبت، VPD، دمای برگ، سرعت هوا و نیاز گونه در این مدل وارد نشده‌اند.

در کنار تعداد ساعات، میانگین، دمای کمینه و بیشینه و دامنه نوسان روزانه نیز بررسی می‌شوند. اهمیت این شاخص‌ها در آن است که میانگین سالانه می‌تواند شدت تغییرات واقعی را پنهان کند. یک راهکار ممکن است میانگین دما را اندکی تغییر دهد، اما اوج گرما یا افت شبانه را به مقدار بیشتری کاهش دهد؛ تغییری که از نظر رفتار حرارتی فضا اهمیت مستقیم دارد.

۵-۲-۲. شاخص نسبی انرژی خورشیدی عبوری DLI_eq

برای آنکه اثر سایه و پوشش تنها از نظر دما خوانده نشود، مقدار نسبی انرژی خورشیدی عبوری نیز با DLI_eq دنبال شده است. این شاخص از انرژی خورشیدی عبوری محاسبه‌شده در EnergyPlus، با فرض سهم ثابت PAR برابر ۰٫۴۵ و ضریب تبدیل ۴۰۵۷ μmol/J به دست آمده است.

DLI_eq در اینجا یک شاخص مقایسه‌ای است. تفاوت واقعی انتقال طیفی شیشه و پلی‌کربنات، توزیع PPFD در داخل محفظه و پاسخ گیاه در آن وارد نشده‌اند؛ از این‌رو، این مقدار با DLI واقعی در سطح گیاه یکسان نیست.

در ادامه فصل، DLI_eq کمتر تنها به معنای عبور نسبی کمتر انرژی خورشیدی و DLI_eq بیشتر به معنای عبور نسبی بیشتر آن است. هیچ‌یک به‌تنهایی نشان نمی‌دهند که شرایط نوری برای یک محصول خاص مناسب یا نامناسب است.

اهمیت این شاخص زمانی روشن می‌شود که در کنار رفتار حرارتی قرار گیرد. راهکاری که گرمای داخل را کاهش می‌دهد، اگر هم‌زمان مقدار زیادی از دریافت خورشیدی را نیز محدود کند، باید با این پیامد سنجیده شود. بنابراین، در این پژوهش کنترل گرما و دریافت خورشیدی دو مسئله جدا نیستند؛ هر دو از نحوه تنظیم رابطه پوسته با خورشید ناشی می‌شوند.

۳-۵. تهویه طبیعی و نقش آن در دفع گرمای انباشته‌شده

نخستین نتایج نشان می‌دهد که مسئله اصلی محفظه شفاف در اقلیم یزد، تنها ورود تابش نیست؛ نبود راه خروج برای گرمای حاصل از آن نیز به همان اندازه اهمیت دارد.

در حالت روی‌زمین و بدون تهویه، F_S0 در ۴۷۰۵ ساعت از سال دمایی بیش از ۳۵ درجه سلسیوس داشت. در مدل نیمه‌مدفون بسته، F_S2، این مقدار به ۴۹۳۵ ساعت رسید. بنابراین، نیمه‌مدفون شدن به‌خودی‌خود مسئله بیش‌گرمایش را حل نکرد و در حالت بسته حتی تعداد ساعات بسیار گرم بیشتر شد.

با فعال‌شدن تهویه طبیعی، رفتار هر دو هندسه به‌طور محسوسی تغییر کرد. ساعات بالاتر از ۳۵ درجه در F_S1 به ۱۵۲۵ ساعت و در F_S3 به ۱۶۲۳ ساعت کاهش یافت. این کاهش برای مدل روی‌زمین ۳۱۸۰ ساعت و برای مدل نیمه‌مدفون ۳۳۱۲ ساعت بود.

این تفاوت نشان می‌دهد که در محفظه شفاف، دفع گرما بخشی از منطق خود فرم است. تماس با زمین می‌تواند بخشی از نوسان حرارتی را تعدیل کند، اما زمانی که دریافت خورشیدی در فضای بسته ادامه پیدا کند، جرم و زمین به‌تنهایی جایگزین خروج هوا نمی‌شوند. راه خروج گرما باید از ابتدا در مقطع، باز شو و رابطه پایین و بالای پوسته پیش‌بینی شود.

جدول ۵-۲. رفتار حرارتی دو هندسه در حالت بسته و دارای تهویه

سناریو	$>35^{\circ}\text{C}$	$<10^{\circ}\text{C}$	$16-27^{\circ}\text{C}$	میانگین $^{\circ}\text{C}$	کمینه $^{\circ}\text{C}$	بیشینه $^{\circ}\text{C}$
روی‌زمین بسته — F_S0	۴۷۰.۵	۱۷۹	۱'۶۵۹	۳۶/۷	۴/۱	۷۰/۱
روی‌زمین + تهویه — F_S1	۱'۵۲۵	۱۸۵	۳'۵۸۶	۲۷/۰	۴/۱	۴۶/۰
نیمه‌مدفون بسته — F_S2	۴'۹۳۵	۹۴	۱'۶۳۳	۳۸/۰	۶/۱	۷۲/۲
نیمه‌مدفون + تهویه — F_S3	۱'۶۲۳	۹۹	۳'۵۲۸	۲۷/۵	۶/۱	۴۶/۱

در کنار کاهش ساعات بسیار گرم، تفاوت دمای کمینه نیز نکته مهمی را نشان می‌دهد. کمینه دما در حالت‌های روی‌زمین ۴۰/۱ درجه و در حالت‌های نیمه‌مدفون ۶۰/۱ درجه سلسیوس بود. این تفاوت نشان می‌دهد که تماس بیشتر با زمین در دوره سرد توانسته است از شدت افت دما بکاهد، هرچند همین ویژگی در دوره گرم بدون تهویه برای جلوگیری از انباشت گرما کافی نبوده است.

دمای بیشینه در مدل‌های بسته نیز بسیار بالا بود. در ۲۸ ژوئن ساعت ۱۴، دمای اوج F_S0 و F_S2 به ترتیب ۷۰.۱۳ و ۷۲.۲۱ درجه سلسیوس ثبت شد. بررسی ساعتی نشان داد که این مقادیر تنها یک جهش لحظه‌ای نبوده‌اند و دوره‌هایی چندساعته از دمای بسیار بالا در مدل رخ داده است.

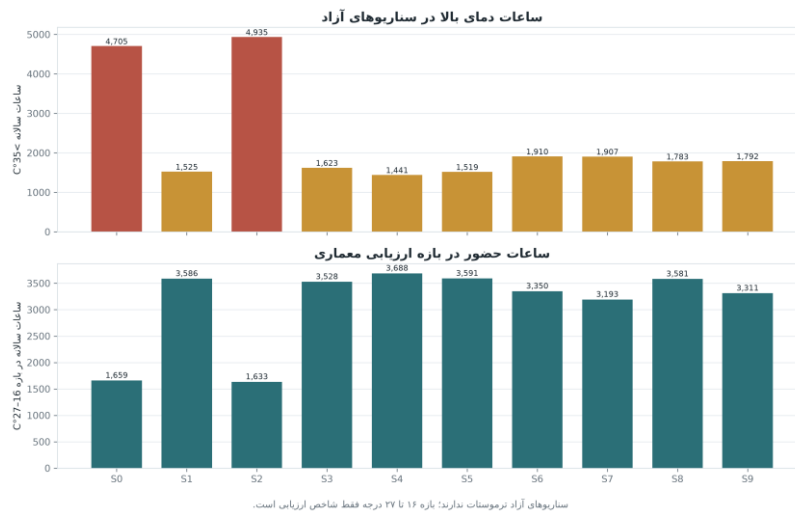
با فعال شدن تهویه، بیشینه دما در هر دو هندسه به حدود ۴۶ درجه کاهش یافت. این مقدار هنوز نشان‌دهنده باقی‌ماندن مسئله گرمای تابستان است، اما کاهش شدید آن نسبت به حالت بسته نشان می‌دهد که تهویه در این مجموعه بیش از هر مداخله دیگر، ظرفیت دفع گرمای انباشته‌شده را افزایش داده است.

در مدل حاضر، سطح هندسی بازشو معادل ۳۰ درصد مساحت کف در نظر گرفته شده است. مقدار واقعی سطح آزاد پس از توری، افت فشار و جزئیات اجرایی در این عدد وارد نشده است. همچنین تهویه زمانی فعال می‌شود که دمای داخل دست‌کم ۲۷ درجه، دمای بیرون دست‌کم ۱۶ درجه و اختلاف دمای داخل و خارج حداقل ۲ کلوین باشد. بنابراین، اعداد این بخش ظرفیت تهویه در همین شرایط تعریف‌شده را نشان می‌دهند.

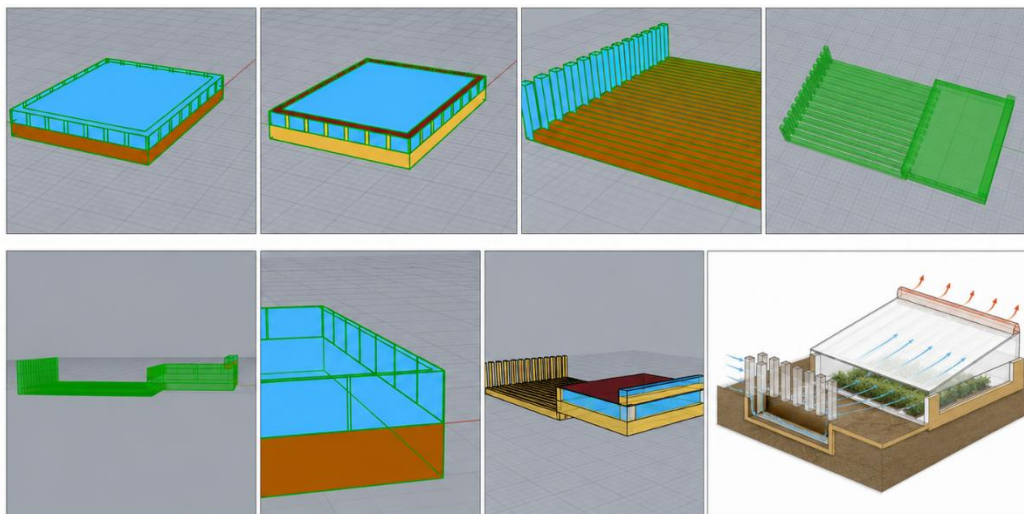
دمای بسیار بالای مدل‌های بسته نیز باید در چارچوب مدل حرارتی حاضر خوانده شود. تبخیر-تعرق گیاه، رطوبت خاک، سایه‌اندازی پوشش گیاهی و بار نهان در این شبیه‌سازی وارد نشده‌اند؛ بنابراین این مقادیر دمای یک گلخانه واقعی در حال کشت را پیش‌بینی نمی‌کنند. اهمیت آن‌ها در نشان‌دادن جهت و شدت خطر انباشت گرما در یک محفظه شفاف بدون مسیر مؤثر دفع حرارت است.

از دید معماری، حاصل این مرحله روشن است: در اقلیم گرم‌و‌خشک، تهویه نباید پس از شکل‌گیری محفظه به آن افزوده شود. مقطع، ارتفاع بازشوها و مسیر حرکت هوا باید از آغاز همراه با زمین‌پناهی و پوسته شفاف شکل

بگیرند. محفظه زمانی می‌تواند از ظرفیت تعدیل حرارتی زمین بهره‌برد که در دوره گرم، امکان خروج گرمای اضافی نیز در ساختار فضایی آن پیش‌بینی شده باشد.



شکل ۵-۲. مقایسه ساعات دمای بالاتر از ۳۵ درجه و ساعات حضور در بازه ۱۶ تا ۲۷ درجه در سناریوهای آزاد



شکل ۵-۳. مسیر و مستندات شبیه‌سازی محفظه گلخانه در Honeybee

۵-۴. اثر هر راهبرد و پیامدهای همراه آن

نتایج مرحله‌ای نشان می‌دهند که هیچ‌یک از راهبردهای بررسی‌شده را نمی‌توان تنها بر پایه یک اثر مطلوب ارزیابی کرد. تهویه، سایه و تغییر پوشش هر یک از مسیر متفاوتی بر رفتار محفظه اثر می‌گذارند؛ یکی امکان خروج گرما را افزایش می‌دهد، دیگری مقدار تابش ورودی را تنظیم می‌کند و سومی هم‌زمان انتقال حرارت و عبور انرژی خورشیدی را تغییر می‌دهد.

جدول ۵-۳. تغییر یک مرحله‌ای راهکارها نسبت به سناریوی مرجع مستقیم

تغییر ساعات DlI_eq	تغییر ساعات ۱۶-۲۷°C	تغییر Tmin	تغییر ساعات >۳۵°C	راهبرد
۰٪	h۱۹۲۷+	C۰/۰۱°-	h۳۱۸۰-	تهویه طبیعی - روی زمین
۰٪	h۱۸۹۵+	C۰/۰۰°	h۳۳۱۲-	تهویه طبیعی - نیمه‌مدفون
۱۸/۲٪-	h۱۰۲+	C۰/۱۸°-	h۸۴-	سایه - روی زمین
۱۲/۶٪-	h۶۳+	C۰/۱۲°-	h۱۰۴-	سایه - نیمه‌مدفون
۳۳/۰٪-	h۲۳۶-	C۷/۸۴°+	h۳۸۵+	پلی کربنات - روی زمین
۳۲/۹٪-	h۳۳۵-	C۷/۹۶°+	h۲۸۴+	پلی کربنات - نیمه‌مدفون

تهویه؛ خروج گرما بدون کاهش دریافت خورشیدی

در دو مقایسه هم‌ساخت، افزودن تهویه طبیعی بیش از ۳۱۰۰ ساعت از زمان وقوع دمای بالاتر از ۳۵ درجه کاست، درحالی‌که DLI_eq تغییری نکرد. این تفاوت از ماهیت خود راهبرد ناشی می‌شود: تهویه مقدار تابش عبوری از پوسته را تغییر نمی‌دهد، بلکه امکان خروج گرمایی را فراهم می‌کند که در اثر تابش و تبادل حرارتی درون محفظه انباشته شده است.

در مدل روی زمین، ساعات قرارگیری در بازه ۱۶ تا ۲۷ درجه ۱۹۲۷ ساعت و در نمونه نیمه‌مدفون ۱۸۹۵ ساعت افزایش یافت. در مقابل، دمای کمینه تقریباً ثابت ماند. بنابراین اثر اصلی تهویه در این مطالعه نه گرم‌تر کردن دوره سرد، بلکه محدود کردن انباشت گرما در دوره گرم بوده است.

از دید معماری، این نتیجه بار دیگر اهمیت مسیر حرکت هوا را نشان می‌دهد. در محفظه شفاف، سطح بازو تنها یک عدد نیست؛ محل ورود هوا، ارتفاع خروج آن و امکان عبور جریان از فضای داخل بخشی از سازمان مقطع‌اند.

سایه؛ کاهش دریافت تابش همراه با کاهش انرژی خورشیدی عبوری

سایه فصلی در هر دو هندسه تعداد ساعات بیش‌گرمایش را کاهش داد، اما این کاهش با افت DLI_eq همراه بود. در مدل روی زمین، ۸۴ ساعت و در نمونه نیمه‌مدفون ۱۰۴ ساعت از زمان دمای بالاتر از ۳۵ درجه کاسته شد؛ در همان حال، DLI_eq به ترتیب ۱۸/۲ و ۱۲/۶ درصد کاهش یافت.

این نتیجه نشان می‌دهد که نقش سایه در محفظه شفاف با ساختمان مسکونی یکسان نیست. در اینجا تابش تنها منبع گرمای ناخواسته نیست؛ بخشی از انرژی خورشیدی موردنظر فضای کشت نیز از همان پوسته عبور

می‌کند. بنابراین هر مقدار کاهش تابش، هم‌زمان دو پیامد دارد: کاهش بار خورشیدی و کاهش دریافت خورشیدی درون محفظه.

از این رو، مسئله طراحی «سایه بیشتر» نیست. زمان حضور سایه، میزان عبور آن و انطباقش با دوره‌ای که خطر بیش‌گرمایش بیشتر است، اهمیت تعیین‌کننده دارد.

پلی‌کربنات؛ کاهش افت دمای سرد در برابر افزایش گرمای دوره گرم

تغییر پوشش به پلی‌کربنات ۱۶ میلی‌متر بیش از سایر راهبردها بر دمای کمینه اثر گذاشت T_{min} . در مدل روی‌زمین ۷٫۸۴ درجه و در نمونه نیمه‌مدفون ۷٫۹۶ درجه افزایش یافت. این تغییر از نظر کاهش افت دمای دوره سرد قابل‌توجه است.

اما همین پوشش در دوره گرم پیامد دیگری داشت. ساعات بالاتر از ۳۵ درجه در مدل روی‌زمین ۳۸۵ ساعت و در نمونه نیمه‌مدفون ۲۸۴ ساعت افزایش یافت و مدت حضور در بازه ۱۶ تا ۲۷ درجه نیز کاهش پیدا کرد. DLI_{eq} نیز در هر دو حالت نزدیک به یک‌سوم کمتر شد.

بنابراین، کاهش اتلاف حرارت از پوسته به‌تنهایی نمی‌تواند ملاک انتخاب پوشش باشد. پوششی که در شب و دوره سرد از افت دما جلوگیری می‌کند، ممکن است در روزهای گرم خروج گرما را دشوارتر کند و هم‌زمان مقدار کمتری از انرژی خورشیدی را به داخل برساند.

در نتیجه، انتخاب پوشش باید در نسبت با رفتار شب و روز و فصل گرم و سرد انجام شود. آنچه اهمیت دارد کمترین U -value یا بیشترین شفافیت به‌تنهایی نیست، بلکه هماهنگی انتقال حرارت و دریافت خورشیدی با نیاز زمانی محفظه است.



شکل ۴-۵. اثر جداگانه تهویه، سایه و تغییر پوشش بر ساعات بیش‌گرمایش، دمای کمینه و دریافت نسبی انرژی خورشیدی

۵-۵. رابطه بیش‌گرمایش و دریافت خورشیدی

نتایج بخش پیشین نشان داد که کنترل گرما و حفظ دریافت خورشیدی همیشه در یک جهت حرکت نمی‌کنند. برای روشن‌تر شدن این رابطه، شکل ۴-۵ تعداد ساعات بالاتر از ۳۵ درجه را در کنار DLI_{eq} نشان می‌دهد. این نمودار تنها دو وجه از رفتار محفظه را کنار یکدیگر قرار می‌دهد. بنابراین نمی‌توان از آن به‌تنهایی درباره رفتار زمستانی، دمای کمینه یا نوسان روزانه داوری کرد. ارزش آن در نشان‌دادن رابطه میان **خطر بیش‌گرمایش و مقدار نسبی انرژی خورشیدی عبوری** است.

در مقایسه هر راهبرد با حالت مرجع خودش، هیچ‌یک از تغییرات بررسی‌شده هم‌زمان با کاهش ساعات بیش‌گرمایش، افزایش DLI_{eq} را ایجاد نکرد. راهبردهایی که از طریق سایه یا تغییر پوشش دریافت خورشیدی را محدود کردند، به همان نسبت بخشی از انرژی خورشیدی عبوری را نیز کاهش دادند.

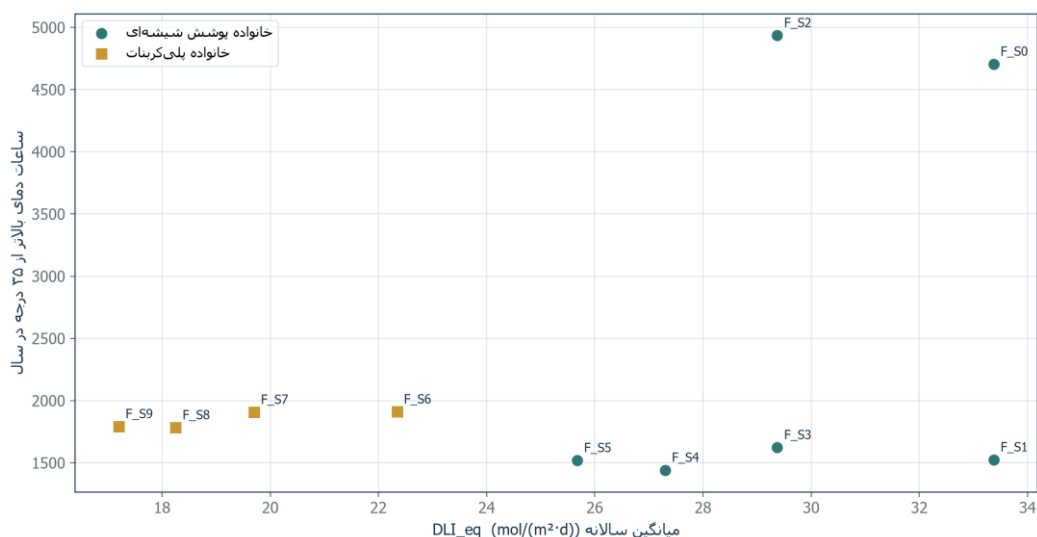
در میان دو حالت شیشه‌ای سایه‌دار، F_{S4} تعداد ۱۴۴۱ ساعت دمای بالاتر از ۳۵ درجه و DLI_{eq} برابر ۲۷٫۳ داشت. در F_{S5} این مقادیر به‌ترتیب ۱۵۱۹ ساعت و ۲۵٫۷ بود. بنابراین، اگر تنها همین دو شاخص در نظر گرفته شوند، F_{S4} هم ساعات بسیار گرم کمتری دارد و هم مقدار بیشتری از انرژی خورشیدی را عبور می‌دهد.

این تفاوت، به‌تنهایی به معنای مناسب‌تر بودن کلی هندسه روی‌زمین نیست. نمونه نیمه‌مدفون در شاخص‌های مربوط به دوره سرد، دمای کمینه و تعدیل نوسان رفتار دیگری نشان می‌دهد. از این‌رو، مقایسه دو هندسه باید در طول سال و با در نظر گرفتن نیازهای متفاوت فصل گرم و سرد انجام شود.

در سناریوهای F_{S8} و F_{S9} که سایه و پوشش پلی‌کربنات هم‌زمان به کار رفته‌اند، DLI_{eq} به حدود ۱۸٫۳ و ۱۷٫۲ کاهش یافت؛ کمترین مقادیر ثبت‌شده در میان حالت‌های بررسی‌شده. این نتیجه نشان می‌دهد

که قرارگرفتن دو عامل محدودکننده تابش در کنار یکدیگر می‌تواند دریافت خورشیدی را به مقدار قابل‌توجهی کاهش دهد.

بالین‌حال، این اعداد درباره کفایت نور برای یک گونه گیاهی داوری نمی‌کنند. برای چنین نتیجه‌ای باید PPFD واقعی در سطح گیاه، ویژگی طیفی پوشش، شکل و تراکم تاج گیاه و برنامه کشت به‌طور مستقل بررسی شود. از دید معماری، نتیجه این بخش آن است که پوسته شفاف باید هم‌زمان امکان دریافت و امکان کنترل را فراهم کند. اگر کنترل تابش تنها از راه کاهش دائمی عبور خورشیدی انجام شود، مسئله بیش‌گرمایش ممکن است کاهش یابد، اما ظرفیت استفاده از خورشید نیز محدود می‌شود. بنابراین، راهکارهایی که قابلیت تغییر در طول فصل یا روز دارند — مانند سایه فصلی و تهویه قابل‌کنترل — از نظر منطق طراحی انعطاف بیشتری نسبت به تغییر ثابت و دائمی پوسته ایجاد می‌کنند.



جهت مطلوب در این دو شاخص: حرکت به پایین و راست؛ انتخاب نهایی به شاخص‌های دیگر نیز وابسته است.

شکل ۵-۵. رابطه میان ساعات دمای بالاتر از ۳۵ درجه و شاخص نسبی DLI_{eq} در سناریوهای آزاد

ساعات بالاتر از ۳۵°C در	ساعات بالاتر از ۳۵°C در	میانگین سالانه DLI_{eq}	میانگین سالانه DLI_{eq}
F_S۵: ۱'۵۱۹	F_S۴: ۱'۴۴۱	F_S۵: ۲۵/۷	F_S۴: ۲۷/۳
روزانه	روزانه	روزانه	روزانه

۵-۶. ساختار زمانی دما

میانگین سالانه به‌تنهایی نمی‌تواند نشان دهد مسئله حرارتی در چه زمانی از سال و در چه ساعاتی از روز رخ می‌دهد. از این‌رو، نتایج ساعتی در مقیاس ماه و ساعت روز نیز بررسی شدند تا زمان شکل‌گیری بیش‌گرمایش و تفاوت رفتار سناریوها روشن‌تر شود.

نقشه‌های ماه-ساعت نشان می‌دهند که بیشترین فشار حرارتی از اواخر بهار آغاز می‌شود، در تابستان شدت می‌گیرد و تا اوایل پاییز ادامه دارد. این افزایش دما بیشتر در ساعات میانی و بعدازظهر رخ می‌دهد؛ یعنی زمانی که دریافت خورشیدی روزانه با گرمای ذخیره‌شده در محفظه هم‌زمان می‌شود.

افزودن تهویه طبیعی، گستره این ناحیه گرم را نسبت به حالت بسته به مقدار محسوسی کاهش می‌دهد. با این حال، در تیر و مرداد همچنان ساعت‌هایی با دمای بالا باقی می‌ماند. بنابراین تهویه، هرچند مهم‌ترین عامل دفع گرمای انباشته در این مطالعه است، به تنهایی همه مسئله تابستان را برطرف نمی‌کند.

سایه فصلی نیز بخشی از دریافت خورشیدی دوره گرم را محدود می‌کند و در نتیجه شدت ناحیه گرم کاهش می‌یابد. تفاوت مهم آن با سایه ثابت در این است که کنترل تابش تنها در دوره‌ای انجام می‌شود که خطر بیش‌گرمایش بیشتر است و دریافت زمستانی به همان اندازه محدود نمی‌شود.

رفتار دو هندسه دارای تهویه نیز از نظر نوسان روزانه یکسان نبود. دامنه متوسط روزانه در F_S1 برابر ۱۴/۳ درجه و در F_S3 برابر ۱۳/۳ درجه سلسیوس بود. صدک ۹۵ دامنه نیز از ۲۳/۸ درجه در F_S1 به ۲۱/۲ درجه در F_S3 کاهش یافت. در F_S5، این دو مقدار به ترتیب به ۱۳/۱ و ۲۰/۹ درجه رسیدند.

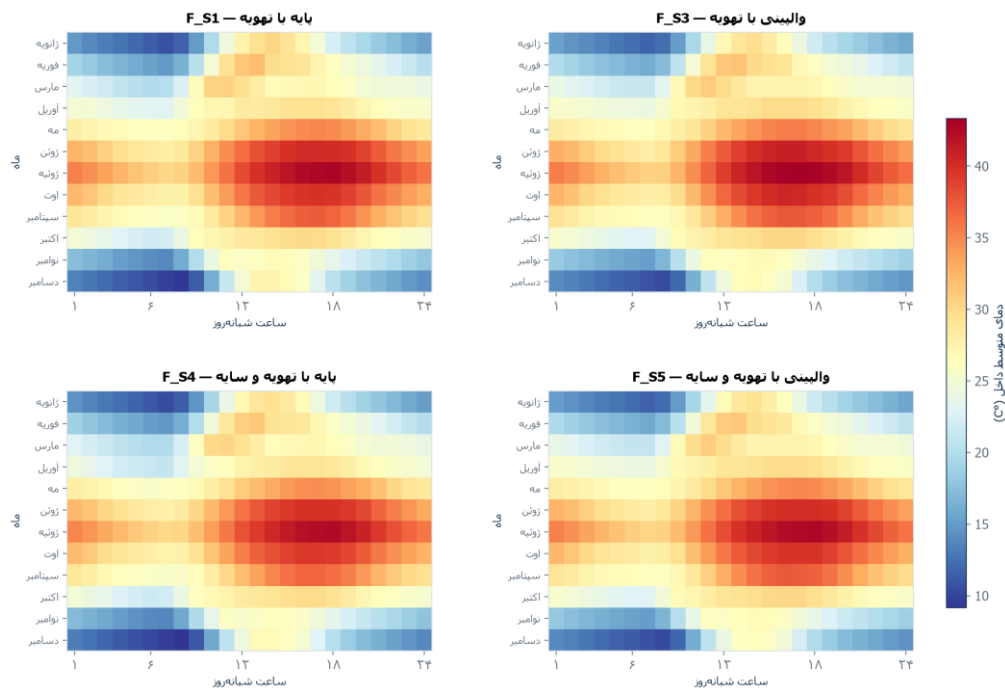
جدول ۴-۵. نوسان حرارتی و دریافت خورشیدی فصلی در سناریوهای شیشه‌ای منتخب

سناریو	دامنه متوسط روزانه °C	صدک ۹۵ دامنه °C	DLI_eq تابستان mol/(m ² ·d)	DLI_eq زمستان mol/(m ² ·d)
F_S1	۱۴/۳	۲۳/۸	۴۱/۷	۲۴/۳
F_S3	۱۳/۳	۲۱/۲	۳۷/۸	۲۰/۳
F_S4	۱۴/۰	۲۳/۱	۲۹/۹	۲۳/۵
F_S5	۱۳/۱	۲۰/۹	۲۷/۷	۱۹/۹

کاهش دامنه نوسان در نمونه نیمه‌مدفون نشان می‌دهد که ارتباط بیشتر با زمین با رفتار آرام‌تر دمای داخل همراه بوده است. زمین در اینجا مانند یک منبع سرمایش عمل نمی‌کند؛ نقش آن بیشتر در کندکردن تغییرات و تعدیل شدت نوسان دیده می‌شود.

همین نکته تفاوت میان «دمای پایدارتر» و «دمای پایین‌تر» را روشن می‌کند. محفظه نیمه‌مدفون می‌تواند تغییرات شب و روز را محدود کند، اما اگر در دوره گرم مسیر کافی برای دفع گرما وجود نداشته باشد، همین پایداری حرارتی الزاماً به معنای کاهش بیش‌گرمایش یا کاهش نیاز سالانه به سرمایش نیست.

از دید معماری، ارتباط با زمین زمانی معنا پیدا می‌کند که همراه با امکان تخلیه گرمای اضافی باشد. زمین می‌تواند نوسان را تعدیل کند؛ اما دفع گرمای تابستان همچنان به مقطع، باز شو و حرکت هوا وابسته است.



شکل ۵-۶. نقشه ماه-ساعت دمای متوسط داخل در چهار سناریوی شیشه‌ای منتخب؛ نمایش زمان و شدت دوره‌های گرم در طول سال.

۵-۷. تغییرات فصلی دریافت خورشیدی

همان‌گونه که میانگین سالانه دما می‌تواند اوج گرمای تابستان را پنهان کند، یک مقدار سالانه برای DLI_{eq} نیز نشان نمی‌دهد انرژی خورشیدی در چه فصل‌هایی و با چه شدتی وارد محفظه شده است. از این‌رو، تغییرات ماهانه این شاخص نیز به‌صورت جداگانه بررسی شد.

در F_{S1} ، میانگین روزانه ماهانه DLI_{eq} از $20/17$ تا $43/46 \text{ mol/(m}^2 \cdot \text{d)}$ تغییر می‌کند. در نمونه نیمه‌مدفون F_{S3} ، این دامنه از $16/63$ تا $39/53$ است. بنابراین حتی بدون سایه، تفاوت هندسه و مقدار سطح شفاف سبب شده است دریافت خورشیدی دو نمونه در طول سال یکسان نباشد.

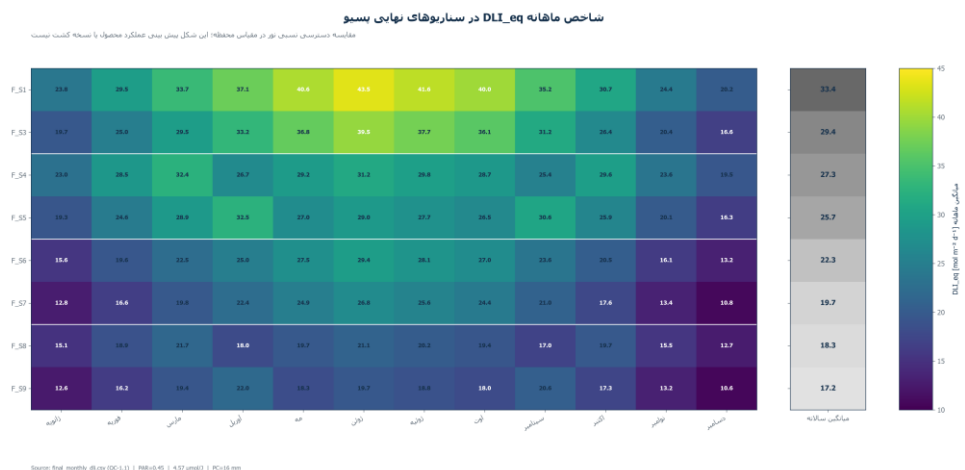
با ورود سایه فصلی، دامنه تغییرات محدودتر شد. در F_{S4} ، مقادیر ماهانه بین $19/50$ و $32/37$ و در F_{S5} بین $16/32$ و $32/52 \text{ mol/(m}^2 \cdot \text{d)}$ قرار گرفتند.

جدول ۵-۵. تغییرات ماهانه DLI_{eq} در سناریوهای منتخب

سناریو	میانگین سالانه DLI_eq روزانه	کمینه ماهانه	بیشینه ماهانه
F_S1	۳۳/۳۶	۲۰/۱۷	۴۳/۴۶
F_S3	۲۹/۳۶	۱۶/۶۳	۳۹/۵۳
F_S4	۲۷/۳۰	۱۹/۵۰	۳۲/۳۷
F_S5	۲۵/۶۷	۱۶/۳۲	۳۲/۵۲
F_S7	۱۹/۶۹	۱۰/۷۸	۲۶/۸۵
F_S9	۱۷/۲۰	۱۰/۵۸	۲۱/۹۷

مقایسه F_S4 و F_S5 باید با توجه به تفاوت هندسه آن‌ها انجام شود. این دو حالت تنها در برنامه سایه متفاوت نیستند؛ سطح شفاف و نحوه ارتباط محفظه با زمین نیز یکسان نیست. بنابراین اختلاف مقادیر آن‌ها بیانگر رفتار کلی دو حالت است و نه اثر مستقل سایه.

آنچه از این نتایج برای طراحی اهمیت بیشتری دارد، زمان اثر سایه است. سایه فصلی تنها مقدار سالانه دریافت خورشیدی را کاهش نداده، بلکه توزیع آن را در طول سال تغییر داده است. در نتیجه، طراحی سایه باید با زمانی هماهنگ شود که خطر بیش‌گرمایش بیشتر است، نه اینکه پوسته در تمام سال به یک اندازه از خورشید جدا شود.



شکل ۵-۷. تغییرات ماهانه شاخص نسبی DLI_eq در سناریوهای منتخب و اثر سایه و پوشش بر توزیع فصلی دریافت خورشیدی.

۸-۵. سایه فصلی؛ تنظیم دریافت خورشیدی در دوره گرم

آزمون ضریب عبور سایه در بازه ۰٫۶۵ تا ۰٫۸۵ رابطه روشنی را نشان داد: هرچه عبور خورشیدی کمتر شد، تعداد ساعات بسیار گرم نیز کاهش یافت، اما هم‌زمان DLI_{eq} نیز پایین آمد.

این رابطه از ماهیت دوگانه تابش در محفظه شفاف ناشی می‌شود. تابش از یک سو عامل اصلی افزایش گرمای روز است و از سوی دیگر، همان انرژی خورشیدی است که باید بخشی از آن به فضای کشت برسد. بنابراین سایه نه برای حذف خورشید، بلکه برای تنظیم دریافت آن در زمانی که گرمای حاصل از تابش بیش از نیاز فضاست به کار می‌رود.

ضریب عبور ۰٫۷۵ در این پژوهش تنها مقدار میانی بازه آزمون شده است. این مقدار نه به‌عنوان مقدار بهینه و نه به‌عنوان توصیه‌ای برای یک محصول یا سامانه اجرایی خاص انتخاب شده است.

زمان فعال‌بودن سایه نیز در دو هندسه یکسان نیست. در F_S4 سایه از ابتدای آوریل تا پایان سپتامبر و در F_S5 از ابتدای مه تا پایان اوت فعال است. این تفاوت نشان می‌دهد که سایه در اینجا بخشی از پاسخ فصلی محفظه است و نه لایه‌ای ثابت بر روی پوسته.

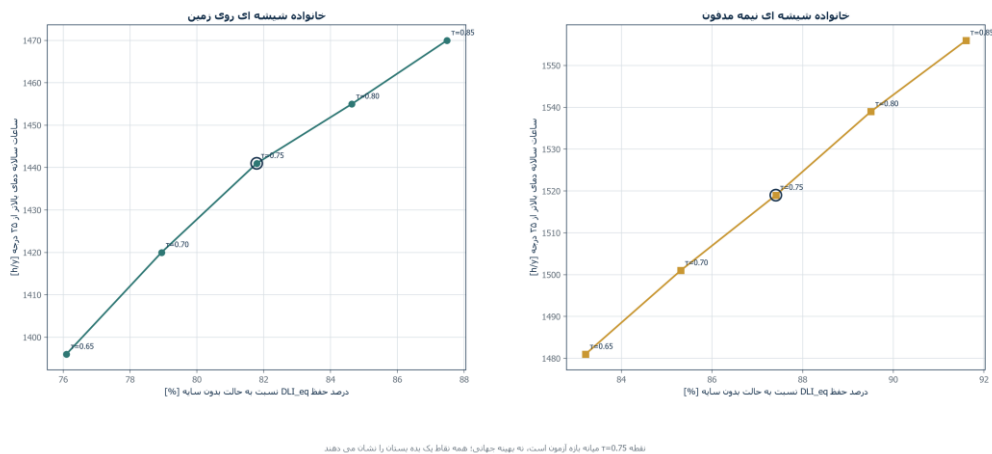
جدول ۵-۶. اثر برنامه سایه بر دریافت نسبی انرژی خورشیدی

سناریو	پوشش	دوره فعال سایه	میانگین سالانه DLI_{eq} روزانه	دامنه DLI_{eq} در دوره فعال	تغییر نسبت به مرجع بدون سایه
F_S4	شیشه	آوریل-سپتامبر	۲۷/۳۰	۳۱/۱۸-۲۵/۳۸	-۱۸/۲٪
F_S5	شیشه	مه-اوت	۲۵/۶۷	۲۸/۹۹-۲۶/۵۰	-۱۲/۶٪
F_S8	پلی‌کربنات	آوریل-سپتامبر	۱۸/۲۵	۲۱/۱۳-۱۷/۰۵	-۱۸/۳٪
F_S9	پلی‌کربنات	مه-اوت	۱۷/۲۰	۱۹/۷۰-۱۷/۹۵	-۱۲/۷٪

در حالت‌های پلی‌کربنات، سایه بر پوسته‌ای افزوده شده که خود آن نیز عبور خورشیدی کمتری دارد. به همین دلیل، ترکیب این دو راهبرد مقدار دریافت خورشیدی را بیش از هر یک به‌تنهایی محدود می‌کند. این نتیجه دوباره نشان می‌دهد که راهکارهای اقلیمی را نمی‌توان مستقل از یکدیگر بر روی بنا انباشته کرد؛ اثر نهایی از رابطه آن‌ها با یکدیگر شکل می‌گیرد.

از دید معماری، ارزش سایه فصلی در قابلیت تغییر آن است. برخلاف کاهش دائمی شفافیت پوسته، سایه می‌تواند در دوره گرم فعال شود و در فصل سرد کنار برود. این امکان، رابطه محفظه با خورشید را به یک وضعیت ثابت محدود نمی‌کند و اجازه می‌دهد پاسخ بنا با تغییر فصل نیز تغییر کند.

حساسیت عبور خورشیدی سایه: بده بسنات گرما و نور نسبی



شکل ۵-۸. اثر تغییر ضریب عبور سایه بر ساعات دمای بالاتر از 35°C و شاخص نسبی DLI_{eq} در بازه 0.65 تا 0.85 .

۵-۹. نیاز نظری باقی‌مانده برای کنترل دما

بررسی حالت آزاد نشان می‌دهد راهکارهای غیرفعال تا چه اندازه می‌توانند رفتار طبیعی محفظه را تغییر دهند؛ اما برای شناخت مقدار نیاز حرارتی باقی‌مانده، چهار حالت منتخب با Ideal Loads و محدوده کنترل 17°C تا 27°C درجه سلسیوس نیز بررسی شدند.

بارهای این بخش مصرف واقعی یک سامانه سرمایش و گرمایش نیستند. آن‌ها مقدار نظری گرمایش و سرمایشی را نشان می‌دهند که مدل برای نگه‌داشتن دمای داخل در محدوده تعریف‌شده نیاز دارد و از این‌رو بیشتر برای مقایسه باقی‌مانده نیاز حرارتی میان سناریوها به کار می‌روند.

جدول ۵-۷. بار حرارتی نظری و DLI_{eq} در چهار حالت منتخب

سناریو	گرمایش kWh	سرمایش kWh	کل kWh	کل $\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$	میانگین سالانه DLI_{eq} روزانه
F_S1_ACTIVE	۱۳'۸۶۸	۲۵۲'۸۶۲	۲۶۶'۷۳۰	۵۳۳/۵	۳۳/۴
F_S10_ACTIVE	۱۵۷	۲۱۲'۴۶۷	۲۱۲'۶۲۴	۴۲۵/۲	۱۷/۲
F_S4_ACTIVE	۱۴'۵۵۳	۱۷۵'۶۷۶	۱۹۰'۲۲۸	۳۸۰/۵	۲۷/۳

میانگین سالانه DLI_eq روزانه	کل kWh/(m ² ·y)	کل kWh	سرمایش kWh	گرمایش kWh	سناریو
۲۵/۷	۴۰۸/۴	۲۰۴'۲۰۳	۱۹۳'۴۴۷	۱۰'۷۵۵	F_S5_ACTIVE

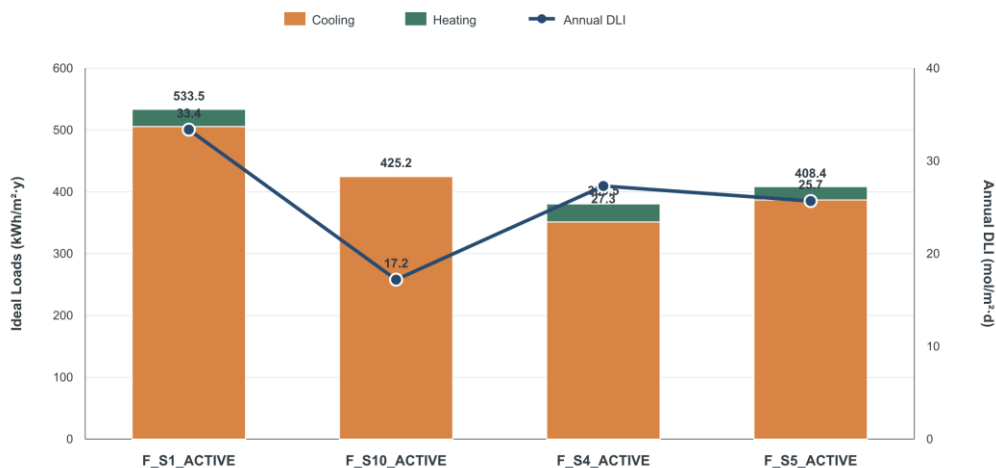
نخستین نکته، غلبه بار سرمایش بر گرمایش در همه حالت‌هاست. حتی پس از ورود راهکارهای غیرفعال، مسئله اصلی محفظه در اقلیم یزد همچنان دفع گرمای دوره گرم باقی می‌ماند. بنابراین کاهش افت حرارتی زمستان، اگر با افزایش نگهداشت گرما در تابستان همراه باشد، لزوماً مجموع نیاز سالانه را کاهش نمی‌دهد.

F_S1_ACTIVE و F_S10_ACTIVE از نظر هندسه، پوشش و سایه تفاوت‌های هم‌زمان دارند. اختلاف میان آن‌ها در نتیجه بیانگر رفتار دو ترکیب کامل است و نمی‌توان آن را به یک عامل مانند نیمه‌مدفون شدن یا نوع پوشش نسبت داد.

همین موضوع در مقایسه F_S4_ACTIVE و F_S5_ACTIVE نیز برقرار است. در F_S5_ACTIVE، بار گرمایش نسبت به F_S4_ACTIVE حدود ۲۶،۰۰۹ درصد کمتر بود، اما بار سرمایش ۱۰،۱۲ درصد و مجموع بار ۷،۳۵ درصد بیشتر شد DLI_eq. نیز حدود ۶ درصد کاهش یافت.

این نتیجه بار دیگر رفتار دوگانه زمین‌پناهی را نشان می‌دهد. نمونه نیمه‌مدفون در دوره سرد از افت دما بهتر جلوگیری می‌کند و در نتیجه به گرمایش کمتری نیاز دارد؛ اما کاهش تبادل با محیط و تفاوت هندسه می‌تواند در دوره گرم خروج گرما را دشوارتر کند. در نتیجه، کاهش نیاز گرمایشی به‌تنهایی نشانه عملکرد سالانه بهتر نیست.

از دید معماری، رابطه با زمین زمانی سودمند است که مزیت تعدیل زمستانی آن با امکان کافی برای دفع گرمای تابستان همراه شود. در چنین محفظه‌ای، زمین‌پناهی، پوسته شفاف و تهویه سه تصمیم جدا از یکدیگر نیستند؛ مقطع باید به‌گونه‌ای شکل گیرد که زمین نوسان را تعدیل کند، پوسته دریافت خورشیدی را فراهم سازد و مسیر هوا اجازه دهد گرمای اضافی از فضا خارج شود.



شکل ۹-۵. مقایسه بار حرارتی نظری گرمایش و سرمایش با شاخص نسبی DLI_{eq} در چهار سناریوی فعال منتخب.

۵-۱۰. آزمون حساسیت و پایداری جهت پاسخ

نتایج بخش‌های پیشین بر پایه مجموعه مشخصی از فرض‌های مربوط به پوسته، بازشو و شرایط مرزی زمین به دست آمده‌اند. برای آنکه روشن شود جهت پاسخ تا چه اندازه به این فرض‌ها وابسته است، چند متغیر اصلی به‌صورت جداگانه تغییر داده شدند. هدف این آزمون‌ها یافتن مقدار بهینه نبود؛ بلکه بررسی این موضوع بود که با تغییر فرض‌های مدل، روابط اصلی مشاهده‌شده همچنان باقی می‌مانند یا خیر. ۵-۱۰-۱. حساسیت دریافت

خورشیدی پوسته

در یک آزمون تک‌متغیره، $SHGC$ از ۰٫۸۴ به ۰٫۵۰ کاهش یافت، درحالی‌که VLT برابر ۰٫۸۹ ثابت نگه داشته شد.

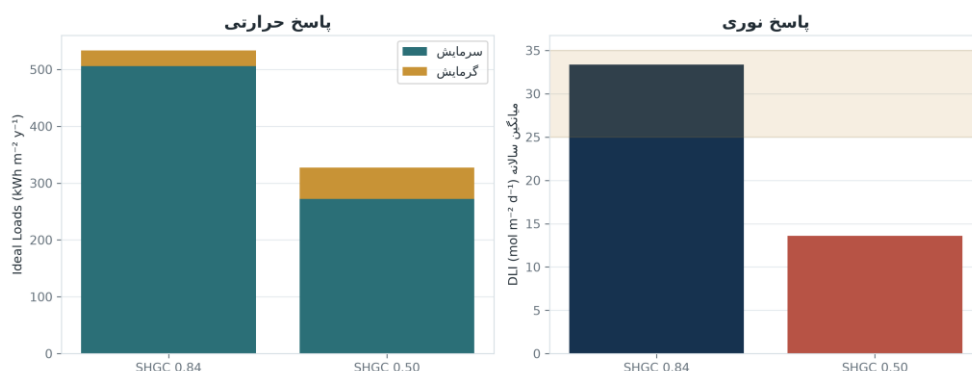
در این حالت، بار سرمایش ۴۶٫۱۷ درصد کاهش یافت، اما بار گرمایش از ۲۷٫۷۴ به ۵۵٫۰۷ $kWh/(m^2 \cdot y)$ افزایش پیدا کرد و DLI_{eq} نیز ۵۹٫۲۴ درصد کاهش یافت.

این نتیجه بار دیگر همان رابطه‌ای را نشان می‌دهد که در بررسی سایه نیز دیده شد: کاهش ورود انرژی خورشیدی می‌تواند مسئله گرمای تابستان را محدود کند، اما همین تصمیم در فصل سرد و در میزان انرژی خورشیدی عبوری پیامد دیگری دارد.

بنابراین، مقدار کمتر $SHGC$ به‌خودی‌خود نشانه پوشش مناسب‌تر نیست. رفتار پوسته باید از نسبت میان انتقال حرارت، دریافت خورشیدی و عبور نور خوانده شود.

ثابت‌ماندن VLT در این آزمون تنها برای جداکردن اثر $SHGC$ در مدل بوده است و به معنای معرفی یک محصول واقعی با این ترکیب خواص نیست.

حساسیت تک‌متغیره SHGC: سرمایش کمتر، گرمایش بیشتر و نور بسیار کمتر



شکل ۵-۱۰. تغییر بارهای حرارتی و شاخص نسبی DLI_{eq} در آزمون کاهش فرضی SHGC از ۰٫۸۴ به ۰٫۵۰.

۵-۱۰-۲. حساسیت سطح بازشو

سطح بازشو نیز در دو مقدار ۲۰ و ۳۰ درصد مساحت کف بررسی شد. افزایش بازشو از ۲۰ به ۳۰ درصد در نمونه روی‌زمین، ساعات دمای بالاتر از ۳۵ درجه را ۵۳ ساعت کاهش داد. در F_{S9} نیز همین تغییر ۸۵ ساعت از ساعات بسیار گرم کاست.

هم‌زمان، مدت حضور در بازه ۱۶ تا ۲۷ درجه در دو مقایسه به‌ترتیب ۱۱۱ و ۲۵۶ ساعت افزایش یافت.

این تغییرات نشان می‌دهند که افزایش امکان تبادل هوا در جهت کاهش بیش‌گرمایش عمل کرده است؛ باین‌حال، مقدار ۳۰ درصد را نمی‌توان به‌عنوان نسبت ثابت یا بهینه برای اجرا در نظر گرفت. در ساختمان واقعی، آنچه جریان هوا را تعیین می‌کند تنها سطح هندسی بازشو نیست؛ سطح آزاد پس از نصب توری، افت فشار، جهت و سرعت باد و نحوه بازشدن دریچه‌ها نیز در عملکرد آن دخالت دارند.

از دید معماری، نتیجه این آزمون بیش از آنکه یک نسبت عددی ثابت ارائه کند، بر اهمیت کافی‌بودن مسیر عبور هوا تأکید دارد. سطح ورودی و خروجی، جای آن‌ها در مقطع و اختلاف ارتفاع میان آن‌ها باید به‌صورت یک مجموعه طراحی شوند.

۵-۱۰-۳. حساسیت شرط مرزی خاک و رفتار فصلی نیمه‌مدفون

برای بررسی نقش شرط مرزی خاک، چهار حالت متفاوت برای دمای زمین در هر دو هندسه اعمال شد. با وجود تغییر شرایط مرزی، جهت کلی تفاوت میان نمونه روی‌زمین و نیمه‌مدفون در همه حالت‌ها مشابه باقی ماند.

در دوره سرد، پیکربندی نیمه‌مدفون:

۲۱٫۷۵ تا ۲۹٫۵۱ درصد بار گرمایش کمتری داشت؛

ساعات کمتر از ۱۰ درجه در آن حدود ۳۰٫۸۸ تا ۵۳٫۳۸ درصد کمتر بود؛

و Tmin حدود ۱۰۶۴ تا ۲۰۲۲ درجه بالاتر قرار گرفت .

در مقابل، در دوره گرم:

بار سرمایش ۹۰۷۳ تا ۱۰۰۶۵ درصد بیشتر شد؛

مجموع بار نظری ۷۰۰۳ تا ۸۰۱۷ درصد افزایش یافت؛

ساعات بالاتر از ۳۵ درجه حدود ۵۰۴۸ تا ۵۰۷۹ درصد بیشتر بود؛

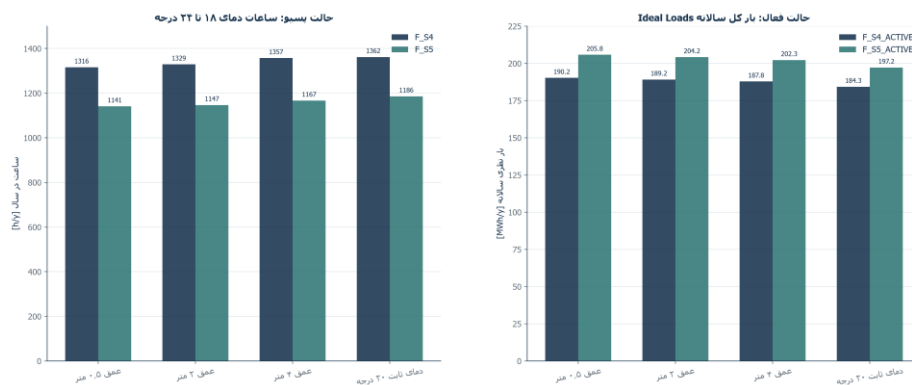
و ساعات قرارگیری در بازه ۱۸ تا ۲۴ درجه حدود ۱۲۰۹۲ تا ۱۴۰۰۰ درصد کاهش یافت .

پایداری این جهت پاسخ در چهار شرط مرزی، یکی از نتایج مهم این فصل است .ارتباط بیشتر با زمین در مدل حاضر عمدتاً از شدت شرایط سرد و نوسان حرارتی کاسته است، اما به‌تنهایی مسئله گرمای تابستان را حل نکرده است.

زمین در اینجا نباید به‌عنوان «منبع سرمایش» تلقی شود. نقش اصلی آن در کاهش سرعت تغییرات حرارتی و محدودکردن افت دمای دوره سرد دیده می‌شود. در تابستان، اگر گرمای واردشده از پوسته شفاف امکان خروج کافی نداشته باشد، همین پایداری بیشتر می‌تواند با باقی‌ماندن گرما در داخل همراه شود.

ازاین‌رو، نیمه‌مدفون‌شدن زمانی به یک پاسخ اقلیمی کامل‌تر نزدیک می‌شود که مقطع زمین‌پناه با سایه و مسیر مؤثر دفع گرما به‌صورت هم‌زمان طراحی شود.

حساسیت نتایج به شرط مرزی دمای خاک



درون هر خانواده فقط شرط مرزی خاک تغییر کرده است؛ دو خانواده F_S4 و F_S5 از نظر هندسه، پوششی و تقویم سایه یکسان هستند.

شکل ۵-۱۱. پایداری جهت پاسخ نمونه نیمه‌مدفون در شرایط مرزی مختلف خاک؛ مقایسه رفتار دوره سرد و گرم.

۱۱-۵. قواعد حاصل برای ادامه طراحی معماری

نتایج این فصل نشان می‌دهند که هیچ‌یک از راهبردهای بررسی‌شده را نمی‌توان بدون توجه به فصل و اثر همراه آن به دستور ثابتی برای طراحی تبدیل کرد. آنچه قابلیت انتقال دارد، نه مقدار یک پارامتر به‌تنهایی، بلکه رابطه‌ای است که هر تصمیم میان محفظه و محیط برقرار می‌کند.

جدول ۵-۸. اصول طراحی حاصل از بررسی حرارتی و دریافت خورشیدی

راهبرد	اثر مشاهده‌شده	پیامد همراه	اصل حاصل برای طراحی
نیمه‌مدفون‌شدن تا عمق ۱/۸ متر	گرمایش $-21/75$ ٪۲۹/۵۱ کمتر و T_{min} حدود $1/64 - 2/22$ °C بالاتر	سرمایش $9/73 - 10/65$ ٪ و بار کل $7/03 - 8/17$ ٪ بیشتر	استفاده از زمین برای تعدیل دوره سرد باید همراه با امکان مؤثر دفع گرمای تابستان باشد
تهویه طبیعی در سطح بازشوی آزموده‌شده	کاهش بیش از ۳۱۰۰ ساعت دمای بالاتر از $35^{\circ}C$	عملکرد واقعی وابسته به سطح آزاد، باد، توری و افت فشار است	مسیر ورود و خروج هوا باید از ابتدا بخشی از سازمان مقطع باشد
سایه فصلی با $\tau=0.75$	کاهش بیش‌گرمایش در دوره فعال	کاهش هم‌زمان DLI_{eq}	سایه باید متناسب با فصل و زمان مسئله حرارتی عمل کند، نه به‌صورت مانع ثابت سالانه
پلی کربنات ۱۶ میلی‌متر	افزایش T_{min} نزدیک به $8^{\circ}C$	کاهش حدود ۳۳٪ DLI_{eq} و افزایش بیش‌گرمایش	کاهش اتلاف حرارت باید در کنار دریافت خورشیدی و رفتار تابستانی سنجیده شود
کاهش SHGC	کاهش محسوس بار سرمایش	افزایش گرمایش و افت شدید DLI_{eq}	انتخاب پوشش باید بر پایه رابطه U ، $SHGC$ ، VLT و ویژگی طیفی انجام شود

این جدول نشان می‌دهد که پاسخ اقلیمی محفظه نیمه‌مدفون از کنار هم قرارگرفتن چند «تکنیک» مستقل به دست نمی‌آید. زمین، پوسته، سایه و هوا اجزای یک مقطع واحدند و اثر هر کدام به نحوه ارتباطش با سایر اجزا وابسته است.

۵-۱۱-۱. پیکربندی معماری برای ادامه توسعه

هندس نیمه‌مدفون بررسی شده دارای ابعاد 25×20 متر، سطح کف 500 مترمربع و عمق 1.8 متر است. مساحت پوسته شفاف این مدل 522.4 مترمربع بوده است.

از میان ویژگی‌های این پیکربندی، هندسه اصلی، عمق نیمه‌مدفون، سطح بازشوی آزموده‌شده، ویژگی‌های پوشش و منطق زمانی سایه مستقیماً در مدل ارزیابی شده‌اند.

اما تبدیل این اصول به یک بنای قابل اجرا، تصمیم‌های دیگری نیز می‌طلبد. توزیع دقیق دریچه‌ها، مسیر دسترسی، آب‌بندی و زهکشی جداره‌های در تماس با خاک، اتصال پوسته شفاف و سازوکار اجرایی سایه در مدل حاضر به‌صورت مستقل ارزیابی نشده‌اند. این موارد مرحله بعدی توسعه معماری و فنی طرح را تشکیل می‌دهند. نتایج نیز یک پاسخ واحد را به‌عنوان گزینه نهایی تحمیل نمی‌کنند F_{S4} و F_{S5} دو رفتار متفاوت را نشان می‌دهند. در حالت فعال متناظر، F_{S4_ACTIVE} مجموع بار حرارتی کمتری داشت، درحالی‌که F_{S5_ACTIVE} به گرمایش کمتری نیاز داشت و نوسان حرارتی آن نیز محدودتر بود. در مقابل، سرمایش و بار کل در F_{S5} بیشتر و DLI_{eq} آن پایین‌تر بود.

بنابراین، تفاوت این دو بیش از آنکه رقابت میان دو «گزینه نهایی» باشد، بیانگر دو تأکید متفاوت است: یکی بیشتر به کاهش نیاز سالانه و دیگری به تعدیل شرایط سرد و نوسان دما نزدیک می‌شود.

در طراحی واقعی، انتخاب میان این مسیرها تنها با افزودن اطلاعات مربوط به رطوبت، تبخیر-تعرق، نفوذ واقعی هوا، اثر توری، کنترل باد و نیاز محصول معنا پیدا می‌کند. از این نقطه به بعد، مسئله دیگر صرفاً معماری یا انتقال حرارت نیست و باید با دانش کشاورزی و تأسیسات ادامه یابد.

۵-۱۱-۲. کنترل مرتبه بزرگی و حدود استفاده از نتایج

برای کنترل مرتبه بزرگی بار محاسبه‌شده، بار سرمایش F_{S1_ACTIVE} که برابر $505.7 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ است با مقادیر گزارش شده در نمونه‌های دیگر مقایسه شد. مقدار $427.2 \text{ kWh}/\text{m}^2$ برای گلخانه فاس و $647 \text{ kWh}/\text{m}^2$ برای نمونه بخارست گزارش شده است.

قرارگرفتن مقدار مدل حاضر میان این دو عدد تنها نشان می‌دهد که مرتبه بزرگی نتیجه با دامنه‌ای از مقادیر گزارش شده برای گلخانه‌ها بی‌ارتباط نیست. این مقایسه اعتبارسنجی مدل حاضر نیست؛ زیرا تفاوت اقلیم، هندسه، نوع گیاه، رطوبت‌زدایی، نقاط تنظیم و روش محاسبه اجازه مقایسه مستقیم عددی را نمی‌دهد.

مدل حاضر اساساً رفتار حرارتی هوا، انتقال حرارت پوسته و مقدار نسبی انرژی خورشیدی عبوری را بررسی کرده است. رطوبت، VPD، تعرق گیاه، شکل و تراکم تاج پوشش، دمای برگ، نفوذ واقعی هوا پس از نصب توری، بار فن، CO_2 و عملکرد محصول در آن حل نشده‌اند.

از این رو، نتیجه فصل پنجم یک طراحی کامل برای گلخانه کشاورزی نیست. دستاورد این بخش روشن کردن رفتار محیطی چند تصمیم معماری است: اینکه تماس با زمین در چه بخشی از سال سودمند است، گرمای اضافی از چه مسیری باید دفع شود، سایه در چه زمانی ضرورت پیدا می‌کند و تغییر پوشش چه رابطه‌ای میان نگهداشت گرما و دریافت خورشیدی ایجاد می‌کند.

این شناخت، نقطه پایان طراحی نیست؛ زمینه‌ای است که ادامه طراحی تخصصی می‌تواند بر آن شکل گیرد.

۱۲-۵. جمع‌بندی فصل

بررسی محفظه شفاف در اقلیم گرم و خشک یزد نشان داد که پاسخ مناسب از یک راهکار منفرد به دست نمی‌آید. ارتباط با زمین، تهویه، سایه و نوع پوشش هر یک بخشی از رفتار حرارتی محفظه را تغییر می‌دهند، اما اثر نهایی زمانی روشن می‌شود که این عوامل در کنار یکدیگر و در نسبت با تغییر فصل دیده شوند.

قرارگیری بخشی از محفظه در زمین، بیش از همه در دوره سرد اثر خود را نشان داد. در آزمون‌های حساسیت خاک، پیکربندی نیمه‌مدفون با دمای کمینه بالاتر، ساعات سرد کمتر، نیاز گرمایشی کمتر و نوسان حرارتی محدودتر همراه بود. زمین در اینجا نقش یک منبع سرمایش را ندارد؛ اهمیت آن در **کند کردن تغییرات دما و تعدیل افت حرارتی** است.

همین ویژگی در دوره گرم به تنهایی کافی نبود. در مقایسه‌های همسان شرایط مرزی خاک، نمونه نیمه‌مدفون بار سرمایش و بار حرارتی کل بیشتری داشت و ساعات دمای بالاتر از ۳۵ درجه نیز اندکی افزایش یافت. بنابراین، بهره‌گیری از ظرفیت حرارتی زمین زمانی می‌تواند به پاسخ اقلیمی مناسب‌تری منجر شود که امکان خروج گرمای تابستان نیز در مقطع پیش‌بینی شده باشد.

در میان راهبردهای بررسی‌شده، تهویه طبیعی بیشترین اثر را بر کاهش بیش‌گرمایش داشت. در شرایط تعریف‌شده مدل، افزودن تهویه ۳۱۸۰ ساعت از دمای بالاتر از ۳۵ درجه در نمونه روی زمین و ۳۳۱۲ ساعت در نمونه نیمه‌مدفون کاست. این نتیجه نشان می‌دهد که در یک محفظه شفاف، **مسیر خروج گرما بخشی از معماری خود فضا است**؛ یعنی محل و اندازه بازشوها و رابطه ورودی و خروجی هوا باید هم‌زمان با شکل‌گیری مقطع تعیین شوند، نه پس از تثبیت فرم.

سایه نیز زمانی معنا پیدا کرد که به‌صورت فصلی خوانده شد. کاهش تابش در دوره گرم توانست ساعات بیش‌گرمایش را محدود کند، اما هم‌زمان مقدار DLI_{eq} را نیز کاهش داد. از این‌رو، مسئله طراحی حذف خورشید نیست؛ بلکه **تنظیم زمان و مقدار دریافت آن** است. سایه باید در زمانی حضور داشته باشد که دریافت خورشیدی به گرمای ناخواسته تبدیل می‌شود و در زمانی که این دریافت می‌تواند مفید باشد، تا حد امکان مانع ورود آن نشود.

رفتار پوشش پلی‌کربنات نیز همین دوگانگی را نشان داد. این پوشش دمای کمینه را نزدیک به ۸ درجه افزایش داد و از افت دمای دوره سرد کاست، اما در مقابل ساعات بیش‌گرمایش بیشتر شد و DLI_{eq} حدود یک‌سوم کاهش یافت. بنابراین، کم‌شدن ضریب انتقال حرارت به‌تنهایی ملاک مناسبی برای انتخاب پوسته نیست. در محفظه شفاف، پوسته باید هم‌زمان از نظر انتقال حرارت و عبور انرژی خورشیدی بررسی شود.

نتایج اجراهای دارای کنترل دما نیز این تفاوت فصلی را تأیید کردند F_{S5_ACTIVE} . نسبت به F_{S4_ACTIVE} به گرمایش کمتری نیاز داشت، اما بار سرمایش و بار حرارتی کل آن بیشتر بود و DLI_{eq} نیز حدود ۶ درصد کاهش یافت. در میان چهار اجرای فعال بررسی‌شده، F_{S4_ACTIVE} با $380.5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ کمترین بار حرارتی کل نظری را ثبت کرد. این مقدار باین‌حال به‌تنهایی مبنای انتخاب نهایی نیست، زیرا تفاوت هندسه، سطح شفاف و برنامه سایه در کنار هم در شکل‌گیری این پاسخ نقش دارند و رفتار زیستی محیط کشت نیز در مدل حاضر بررسی نشده است.

در مجموع، نتایج این فصل چهار رابطه اصلی را برای ادامه طراحی روشن می‌کنند: **زمین نوسان و افت دمای دوره سرد را تعدیل می‌کند؛ تهویه امکان دفع گرمای انباشته‌شده را فراهم می‌سازد؛ سایه زمان و مقدار دریافت خورشیدی را تنظیم می‌کند؛ و پوشش میان نگهداشت گرما و عبور انرژی خورشیدی تعادل برقرار می‌کند.** هیچ‌یک از این روابط مستقل از دیگری نیست.

از این‌رو، حاصل این فصل یک «والپینی بهینه» یا یک فرم آماده برای تکرار نیست. آنچه از شبیه‌سازی به معماری منتقل می‌شود، شناخت سازوکارهایی است که باید در مقطع واحد با یکدیگر هماهنگ شوند: **تماس با زمین برای تعدیل، مسیر هوا برای دفع گرما، سایه برای کنترل فصلی تابش و پوسته برای تنظیم رابطه درون و بیرون.**

این شناخت نقطه پایان طراحی نیست؛ بلکه زمینه‌ای است که ادامه طراحی معماری، تأسیساتی و کشاورزی می‌تواند بر پایه آن شکل گیرد.

فصل ششم: تفسیر نتایج و اصول حاصل برای طراحی

۶-۱. منطق مشترک یافته‌های پژوهش

دو بخش مسکن و محفظه نیمه‌مدفون از نظر کارکرد، کاربر و شرایط مورد انتظار یکسان نیستند؛ باین‌حال، هر دو با یک پرسش بنیادی روبه‌رو هستند: بنا چگونه باید رابطه خود را با خورشید، زمین، پوسته و هوا تنظیم کند تا شرایط درون از نوسان‌های شدید اقلیم بیرون مصون بماند، بی‌آنکه ظرفیت‌های همان اقلیم از دست برود؟ در مسکن، این مسئله بیشتر در رابطه میان آسایش حرارتی، دریافت خورشیدی و نور روز ظاهر می‌شود. تابشی که می‌تواند در تابستان بار سرمایش را افزایش دهد، در زمستان بخشی از نیاز حرارتی را تأمین می‌کند و در تمام سال بر روشنایی فضای داخلی اثر می‌گذارد. بنابراین، جهت، بازشو، سایه و پوسته را نمی‌توان جدا از یکدیگر دید.

در محفظه نیمه‌مدفون نیز مسئله از همین جنس است، هرچند نیاز فضا متفاوت است. ورود انرژی خورشیدی برای محفظه ضروری است، اما اگر گرمای حاصل از آن امکان خروج نداشته باشد، پوسته شفاف خود به عامل بیش‌گرمایش تبدیل می‌شود. از سوی دیگر، محدود کردن بیش از اندازه تابش نیز دریافت خورشیدی را کاهش می‌دهد. ارتباط با زمین، پوشش، سایه و تهویه در اینجا نیز تنها زمانی معنا پیدا می‌کنند که در کنار یکدیگر خوانده شوند.

بنابراین، وجه مشترک دو بخش در یکسان‌بودن شاخص‌ها نیست. بار حرارتی و UDI در فضای مسکونی، و دمای داخل، نوسان حرارتی و DLI_{eq} در محفظه، نیازهای متفاوتی را می‌سازند و نباید در یک معیار واحد ادغام شوند. آنچه میان این دو بخش قابلیت انتقال دارد، منطق شناخت مسئله و نحوه پاسخ معماری به آن است.

در هر دو مورد، ابتدا مسئله اقلیمی شناخته شده، سپس سازوکاری که در شکل‌گیری آن نقش دارد بررسی شده است؛ پس از آن، این سازوکار به عاملی معماری مانند جهت استقرار، بازشو، سایه، پوسته یا تماس با زمین تبدیل شده و اثر تغییر آن در مدل سنجیده شده است. نتیجه نیز زمانی ارزش طراحی پیدا کرده که در کنار اثر مطلوب، پیامد دیگر آن نیز دیده شده باشد.

نتایج مسکن این موضوع را به‌روشنی نشان دادند. در مسیر نهایی، مجموع بار حرارتی نسبت به R3 پایه ۲۳،۴۸ درصد کاهش یافت، اما این کاهش با افزایش بار گرمایش و تغییر هم‌زمان برخی شاخص‌های نور روز همراه بود. در محفظه نیمه‌مدفون نیز راهکاری که شرایط سرد را تعدیل می‌کرد، الزاماً پاسخ مناسب‌تری برای تابستان نبود

و کاهش دریافت خورشیدی، هرچند می‌توانست بیش‌گرمایش را محدود کند، هم‌زمان DLI_{eq} را نیز کاهش می‌داد.

از این‌رو، پاسخ اقلیمی را نمی‌توان به یک فرم، یک مصالح یا یک عدد فروکاست. ارزش یک راهکار در شناخت سازوکاری است که از طریق آن بر محیط اثر می‌گذارد، زمانی که این اثر سودمند است و شرایطی که ممکن است همان راهکار به مسئله‌ای دیگر منجر شود.

در این معنا، آموزه معماری گذشته نیز نه در تکرار حیاط، ساباط، ضخامت دیوار یا صورت مشخص یک بنا، بلکه در فهم رابطه‌ای است که این عناصر میان اقلیم، فضا و انسان برقرار می‌کرده‌اند. آنچه قابلیت انتقال دارد شکل نیست؛ منطق شکل‌گیری پاسخ است.

۲-۶. مسیر مشترک از مسئله اقلیمی تا تصمیم معماری

روند مشترک پژوهش از شناخت یک مسئله محیطی آغاز می‌شود و به یک قاعده ثابت برای فرم ختم نمی‌شود. میان این دو، چند مرحله وجود دارد که تصمیم معماری را از مشاهده صرف اقلیم جدا می‌کند.

نخست باید روشن شود که **نیاز فضا چیست**. در مسکن، مسئله اصلی کنترل گرمای ناخواسته در کنار حفظ شرایط مناسب نور روز است. در محفظه نیمه‌مدفون، مسئله کنترل بیش‌گرمایش در کنار حفظ دریافت نسبی انرژی خورشیدی است.

پس از آن، باید سازوکاری که این مسئله را ایجاد یا تشدید می‌کند شناخته شود. دریافت تابش، انتقال و ذخیره گرما، تبادل هوا و تماس با زمین از مهم‌ترین سازوکارهایی بودند که در دو بخش پژوهش تکرار شدند. تنها پس از شناخت این روابط است که می‌توان آن‌ها را به تصمیم معماری تبدیل کرد.

در بخش مسکن، این تصمیم‌ها در جهت استقرار، نسبت بازشوهای شمالی و جنوبی، سایه جبهه جنوب، مشخصات شیشه و ترکیب پوسته ظاهر شدند. در محفظه، ارتباط با زمین، سطح بازشو، نوع پوشش و زمان حضور سایه همان نقش را بر عهده داشتند.

شبیه‌سازی در این روند نقطه آغاز طراحی نیست. ابتدا باید پرسش معماری شکل بگیرد؛ سپس مدل می‌تواند نشان دهد تغییر یک عامل تا چه اندازه بر رفتار فضا اثر می‌گذارد و این اثر چه پیامدی در بخش دیگری از عملکرد دارد. به این ترتیب، عدد **وسیله شناخت تصمیم** است، نه جانشین تصمیم معماری.



شکل ۶-۱. زنجیره‌ی روش مشترک برای دو ماژول

جدول ۶-۱. منطق مشترک بررسی در دو بخش پژوهش

مرحله	مسکن	محفظه نیمه‌مدفون
نیاز اصلی	تعدیل شرایط حرارتی و حفظ نور روز	تعدیل شرایط حرارتی و حفظ دریافت نسبی انرژی خورشیدی
مسئله اقلیمی	دریافت بیش از اندازه تابش و غلبه بار سرمایش	انباشت گرما در پوسته شفاف و نوسان فصلی دما
سازوکارهای اصلی	دریافت تابش، انتقال و ذخیره گرما، سایه و تبادل هوا	دریافت تابش، تماس با زمین، انتقال حرارت، سایه و تبادل هوا
تصمیم‌های معماری	جهت، نسبت بازشو، سایه، شیشه و پوسته	عمق استقرار، بازشو، پوشش و سایه فصلی
شاخص‌های سنجش	گرمایش، سرمایش، بار کل و شاخص‌های نور روز	دمای شدید، نوسان حرارتی، DLI_{eq} و بار حرارتی نظری
اصل حاصل	جهت، بازشو، سایه و پوسته باید در ارتباط با نیاز هم‌زمان حرارتی و نوری تنظیم شوند	زمین، تهویه، سایه و پوشش باید به‌صورت اجزای یک مقطع واحد و متناسب با فصل هماهنگ شوند

این مقایسه نشان می‌دهد که تفاوت کارکرد دو فضا، منطق طراحی را از میان نمی‌برد. در هر دو، یک عامل معماری زمانی قابل فهم است که رابطه آن با نیاز فضا و سازوکار محیطی روشن باشد. سایه به‌خودی‌خود راهکار نیست؛ باید دانست چه تابشی را، در چه زمانی و با چه پیامدی کنترل می‌کند. جرم حرارتی یا تماس با زمین نیز به‌خودی‌خود به معنای سرمایش نیست؛ باید دید در چه زمانی گرما را ذخیره یا آزاد می‌کنند و آیا امکان دفع گرمای اضافی وجود دارد یا خیر.

از این رو، آنچه از دو بخش پژوهش به یکدیگر منتقل می‌شود مجموعه‌ای از اعداد یا فرم‌های مشابه نیست. شیوه نگاه مشترک است: شناخت اقلیم، تشخیص سازوکار، تبدیل آن به تصمیم کالبدی، سنجش پیامد و بازگرداندن نتیجه به معماری.

۳-۶. سازوکارهای مشترک و پاسخ‌های متفاوت

تفاوت کاربری دو بخش پژوهش، سازوکارهای پایه اقلیمی را از میان نمی‌برد. دریافت تابش، انتقال و ذخیره گرما، مقاومت پوسته، تماس با زمین و تبادل هوا در هر دو محیط حضور دارند؛ اما نقش و مقدار مطلوب آن‌ها تابع نیاز فضا است.

در مسکن، کنترل تابش باید هم‌زمان با شرایط حرارتی و نیاز انسان به نور روز سنجیده شود. در محفظه نیمه‌مدفون نیز کاهش تابش می‌تواند از بیش‌گرمایش بکاهد، اما ممکن است بخشی از انرژی خورشیدی عبوری را نیز از دسترس خارج کند. بنابراین، یک راهکار مشابه در دو فضای متفاوت الزاماً به یک نتیجه منجر نمی‌شود. همین موضوع درباره جرم و تماس با زمین نیز دیده شد. افزایش ظرفیت ذخیره حرارت یا کاهش تبادل با بیرون می‌تواند افت دمای دوره سرد را محدود کند، اما اگر امکان دفع گرمای انباشته‌شده فراهم نباشد، همین ویژگی در دوره گرم به مسئله تبدیل می‌شود.

از این رو، سازوکار اقلیمی را نمی‌توان مستقل از زمان، کاربری و رابطه آن با سایر اجزای بنا ارزیابی کرد. آنچه از یک پروژه به پروژه دیگر منتقل می‌شود، مقدار یک متغیر یا شکل یک عنصر نیست؛ بلکه شناخت رابطه‌ای است که آن عنصر با اقلیم برقرار می‌کند.

۴-۶. چهار یافته مشترک دو بخش



شکل ۴-۲. یافته‌های مشترک حاصل از تحلیل دو مجموعه سناریو

۴-۶-۱. کنترل خورشیدی، مسئله‌ای چندهدفه است

در بخش مسکن، سایه بار سرمایش و میزان UDI-up را کاهش داد، اما هم‌زمان با افزایش ۲۷،۳۹ درصدی بار گرمایش همراه شد. در محفظه نیز کاهش فرضی SHGC از ۰،۸۴ به ۰،۵۰، بار سرمایش را ۴۶،۱۷ درصد کاهش داد، درحالی‌که بار گرمایش افزایش یافت و DLI_eq حدود ۵۹،۲۴ درصد افت کرد.

این نتایج نشان می‌دهند که مسئله معماری در اقلیم یزد جلوگیری از ورود خورشید نیست؛ مسئله، تنظیم زمان، جهت و مقدار دریافت آن است.

تابش در بخشی از سال و ساعات روز می‌تواند مفید باشد و در زمان دیگری به بار ناخواسته تبدیل شود. بنابراین سایه، شیشه، جهت و عمق بازشو باید نه به‌صورت عناصر مستقل، بلکه به‌عنوان اجزای یک سازوکار تنظیم تابش در نظر گرفته شوند.

این نگاه امکان بازخوانی دقیق‌تری از معماری بومی را نیز فراهم می‌کند. ارزش سایه در ساباط، حیاط یا عمق بازشو در خود شکل آن‌ها نیست؛ در کیفیت رابطه‌ای است که میان تابش و فضای قابل استفاده ایجاد می‌کنند. در معماری امروز نیز همین منطق باید متناسب با جهت، هندسه و نیاز فضای جدید دوباره تعریف شود.

۴-۶-۲. ذخیره گرما بدون امکان دفع آن راهبرد کاملی نیست

جرم حرارتی زمانی مفید است که زمان دریافت، ذخیره و دفع گرما با شرایط اقلیمی و نحوه بهره‌برداری هماهنگ باشد. در مسکن، ترکیب جرم و عایق هنگامی بخشی از بسته موفق‌تر شد که بازشو و سایه نیز در کنار آن کنترل شدند.

در محفظه، تماس با زمین و نیمه‌مدفون شدن موجب افزایش کمینه دما و کاهش نیاز به گرمایش شد، اما در همان مقایسه‌ها سرمایش و بار کل افزایش یافت. زمین در زمستان نقش محافظتی داشت، ولی این حفاظت به معنای عملکرد بهتر در تمام سال نبود.

از این رو، آموزه جرم حرارتی در معماری یزد را نمی‌توان به «هرچه جرم بیشتر، بهتر» تقلیل داد. دیوار ضخیم، فضای زیرسطحی و ظرفیت حرارتی زمانی مؤثرند که بنا امکان دفع گرمای ذخیره‌شده، به‌ویژه در شب یا فصل گرم، داشته باشد. ذخیره و تخلیه دو بخش یک راهبردند.

۳-۴-۶. تهویه راهکاری عمومی برای همه شرایط نیست

در محفظه نیمه‌مدفون، تهویه طبیعی مؤثرترین مداخله آزموده‌شده برای کاهش بیش‌گرمایش بود و در دو مقایسه هم‌سنخ بیش از ۳۱۰۰ ساعت از زمان قرارگیری دما در محدوده بالاتر از ۳۵ درجه کاست.

اما این نتیجه به معنای آن نیست که افزایش تهویه در هر زمان و هر شرایطی مفید است. اثر حرکت هوا به دمای بیرون، اختلاف دما، باد، سطح آزاد واقعی بازشوها و نحوه کنترل آن‌ها وابسته است.

در بخش مسکن نیز به دلیل کافی نبودن مستندات مربوط به بازشو و منطق کنترل، تهویه طبیعی وارد استدلال اصلی نتایج نشد. بنابراین، پژوهش حاضر مبنایی برای مقایسه عددی تهویه در دو محیط فراهم نمی‌کند.

با این حال، اصل معماری روشن است: هوا زمانی به راهبرد اقلیمی تبدیل می‌شود که مسیر، زمان و امکان حرکت آن در سازمان فضایی و مقطع بنا پیش‌بینی شده باشد. بازشو صرفاً وجود یک حفره در پوسته نیست؛ بخشی از رابطه بنا با شرایط بیرون است.

۴-۴-۶. عملکرد مجموعه راهکارها از نام یک راهبرد مهم‌تر است

نتایج دو بخش پژوهش بارها نشان دادند که تغییر یک عامل، تنها در ارتباط با سایر اجزا قابل تفسیر است. جهت بر نحوه دریافت تابش اثر می‌گذارد، اما نتیجه آن به نسبت بازشو وابسته است؛ سایه دریافت تابش را تغییر می‌دهد، اما عملکرد آن با مشخصات شیشه و فصل ارتباط دارد؛ تماس با زمین نوسان را تعدیل می‌کند، اما بدون دفع گرما ممکن است شرایط تابستان را دشوارتر کند.

از این رو، عنوان‌هایی مانند «نیمه‌مدفون»، «دارای جرم حرارتی»، «عایق‌تر» یا «سایه‌دار» به‌تنهایی اطلاعات کافی درباره عملکرد بنا نمی‌دهند.

این نتیجه در بازخوانی معماری یزد نیز اهمیت دارد. حیاط، ساباط، دیوار ضخیم یا فضای زیرسطحی به‌صورت اجزای جداگانه عمل نمی‌کردند؛ کیفیت محیطی بنا حاصل رابطه میان اجزا، زمان استفاده و شرایط اقلیمی بود.

بنابراین، انتقال آموزه‌های معماری گذشته نیز زمانی معنا پیدا می‌کند که این روابط شناخته و متناسب با نیاز امروز بازتعریف شوند، نه آنکه یک عنصر تاریخی از مجموعه خود جدا و تکرار شود.

۵-۶. وحدت منطق اقلیمی و تفاوت معیارهای ارزیابی

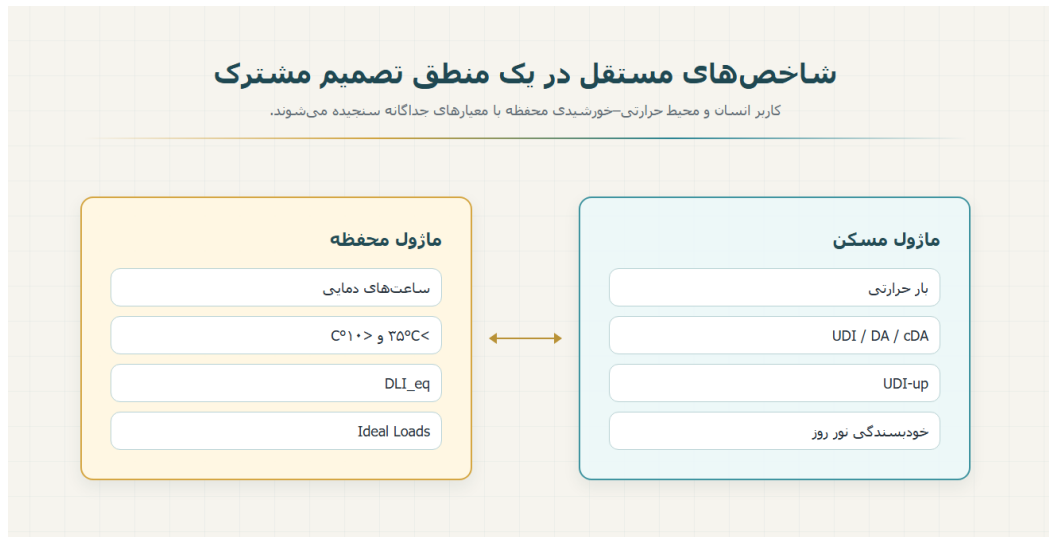
وجود سازوکارهای مشترک به معنای یکسان بودن شرایط مطلوب در دو بخش پژوهش نیست.

مسکن فضایی برای سکونت انسان است و ارزیابی آن باید در نسبت با نیاز حرارتی، کیفیت نور روز و نحوه حضور انسان انجام شود. در مقابل، محفظه نیمه‌مدفون محیطی شفاف با مسئله حرارتی و دریافت انرژی خورشیدی است و DLI_eq در این پژوهش تنها برای مقایسه نسبی انرژی خورشیدی عبوری میان سناریوها به کار رفته است.

بنابراین، UDI، cDA و DA را نمی‌توان با DLI_eq ترکیب کرد و بار حرارتی مسکن نیز قابل تبدیل به امتیازی مشترک با ساعات دمایی محفظه نیست.

آنچه قابلیت انتقال دارد، جهت استدلال است: اگر تابش کاهش می‌یابد، باید دید چه نیازی از آن تأمین می‌شده است؛ اگر جرم یا تماس با زمین افزایش می‌یابد، باید امکان دفع گرما نیز بررسی شود؛ اگر پوسته مقاوم‌تر می‌شود، اثر آن بر دریافت خورشیدی و شرایط فصل گرم نیز باید خوانده شود.

به این ترتیب، وحدت دو بخش پژوهش در یکسان بودن پاسخ‌ها نیست؛ در نوع نگاه به مسئله اقلیمی است. هر فضا پاسخ خاص خود را می‌طلبد، اما پاسخ زمانی قابل اتکا است که اثر یک تصمیم در رابطه با سایر اجزا و در نسبت با نیاز واقعی همان فضا سنجیده شود.



شکل ۶-۳. تفاوت معیارهای ارزیابی در دو بخش پژوهش در چارچوب یک منطق مشترک اقلیمی

این تفکیک اجازه می‌دهد دو محیط در یک بحث اقلیمی قرار گیرند، بدون آنکه نیازهای متفاوت انسان و محیط کشت با یکدیگر خلط شوند.

در مقیاسی بزرگ‌تر نیز همین اصل برقرار است. پایداری یک سکونتگاه حاصل جمع تعدادی راهکار مستقل نیست. انرژی، آب، حرکت، تولید غذا، مواد، پسماند و شیوه بهره‌برداری بر یکدیگر اثر می‌گذارند و عملکرد نامناسب یک حلقه می‌تواند بخشی از دستاورد حلقه‌های دیگر را محدود کند. ساختمانی با بار انرژی کم، اگر در الگویی بسیار پرمصرف از نظر آب یا حرکت قرار گیرد، به‌تنهایی مجموعه‌ای پایدار ایجاد نمی‌کند.

باین‌حال، نگاه یکپارچه به معنای ادعای تخصص در همه این حوزه‌ها نیست. این پژوهش بخش‌هایی را که در محدوده طراحی اقلیم‌پاسخ و فیزیک ساختمان قرار دارند به‌صورت کمی بررسی کرده و سایر بخش‌ها را تنها تا جایی وارد بحث می‌کند که برای تصمیم معماری محدودیت، نیاز فضایی یا نقطه ارتباط ایجاد کنند.

۶-۶. از نتیجه محاسباتی تا تصمیم معماری

یکی از مسائل اساسی در استفاده از شبیه‌سازی، تشخیص مرز میان آن چیزی است که مستقیماً در مدل آزموده شده و آن چیزی که در ادامه، از سوی معمار تفسیر و به فضا تبدیل می‌شود.

در بخش مسکن، نتایج کمی به هندسه‌ها، نسبت‌های بازشو، سایه، شیشه و ترکیب‌های مشخص پوسته‌ای تعلق دارند که در سناریوهای فصل چهارم آزموده شدند. اما سازمان داخلی پلان، نحوه اتصال فضاها، شکل نهایی حیاط، جزئیات سایه‌بان و چگونگی قرارگیری عناصر در نمای نهایی، مرحله دیگری از طراحی‌اند. این تصمیم‌ها از نتایج اقلیمی تغذیه می‌کنند، اما خودشان خروجی مستقیم شبیه‌سازی نیستند.

در محفظه نیمه‌مدفون نیز عمق استقرار، تماس با زمین، مشخصات پوسته شفاف، سطح هندسی بازشو و زمان حضور سایه مستقیماً در مدل بررسی شده‌اند. در مقابل، مسیر دسترسی، جزئیات آب‌بندی و زهکشی، نحوه اجرایی توزیع بازشوها و سازمان نهایی فضای کشت به مرحله توسعه معماری و فنی تعلق دارند.

این فاصله میان «نتیجه محاسباتی» و «تصمیم معماری» یک نقص نیست؛ بخشی از ماهیت طراحی است. شبیه‌سازی می‌تواند نشان دهد یک تغییر چه اثری بر رفتار محیطی بنا دارد، اما نمی‌تواند به‌تنهایی تعیین کند این تغییر چگونه باید در سازمان فضایی، سازه، جزئیات اجرایی و تجربه استفاده از فضا تجسم پیدا کند.

از این‌رو، نقش عدد در این پژوهش پایان‌دادن به فرایند طراحی نیست. عدد حدود و پیامد تصمیم را روشن می‌کند تا معمار بتواند با آگاهی بیشتری شکل، پوسته، بازشو و رابطه بنا با محیط را توسعه دهد.

۶-۷. جایگاه معماری در زنجیره پایداری

پایداری در مقیاس سکونتگاه را نمی‌توان از جمع چند راهکار مستقل به دست آورد. ساختمان، آب، حرکت، تولید غذا، مواد، پسماند و شیوه بهره‌برداری به یکدیگر وابسته‌اند و عملکرد نامناسب یکی از این بخش‌ها می‌تواند بخشی از دستاورد بخش‌های دیگر را خنثی کند.

برای نمونه، ساختمانی با مصرف انرژی پایین، اگر در الگوی قرار گیرد که برای دسترسی‌های روزمره وابستگی زیادی به حرکت پرمصرف ایجاد می‌کند، به‌تنهایی یک محیط پایدار نمی‌سازد. به همین ترتیب، جمع‌آوری یا بازچرخانی آب زمانی معنا پیدا می‌کند که نوع مصرف آب نیز با محدودیت منابع در اقلیم گرم‌وخشک سازگار باشد. استفاده از فضای سبز، تولید غذا و انتخاب نوع کشت نیز بدون توجه به آب موردنیاز آن‌ها نمی‌تواند جدا از مسئله اقلیم ارزیابی شود.

از این‌رو، پایداری بیش از آنکه مجموعه‌ای از اجزای «سبز» باشد، رابطه‌ای میان چند نظام وابسته به یکدیگر است. کیفیت کل مجموعه به عملکرد هر حلقه و به نحوه ارتباط آن با حلقه‌های دیگر وابسته است.

با این حال، چنین نگاهی به معنای آن نیست که معماری باید جای تخصص‌های دیگر را بگیرد. دامنه کمی این پژوهش بر طراحی اقلیم‌پاسخ و فیزیک ساختمان متمرکز بوده است. رفتار حرارتی و نوری مسکن و محفظه نیمه‌مدفون به‌طور مستقیم بررسی شده‌اند و موضوعاتی مانند آب، کشاورزی، پسماند، تجهیزات و بهره‌برداری تنها در جایی وارد بحث می‌شوند که با تصمیم فضایی یا کالبدی ارتباط پیدا می‌کنند.

برای نمونه، توسعه تخصصی محفظه کشت نیازمند داده‌هایی درباره گونه گیاهی، مرحله رشد، رطوبت، VPD، CO₂، ساختار تاج‌پوشش و الگوی آبیاری است. طراحی سامانه فعال نیز بدون بار ساعتی، راندمان واقعی

تجهیزات، توان فن، رطوبت‌گیری و منطق کنترل کامل نمی‌شود. این موضوعات خارج از محدوده محاسبات حاضرند، اما معماری باید از ابتدا فضایی ایجاد کند که امکان توسعه آن‌ها وجود داشته باشد. بنابراین، نقش معماری در چنین سیستمی حل کامل همه زیرسامانه‌ها نیست؛ بلکه هماهنگ کردن تصمیم‌های کالبدی با ظرفیت اقلیم و فراهم کردن بستری برای پیوند تخصص‌های دیگر است. پایداری یک ویژگی افزوده‌شده به ساختمان نیست؛ کیفیت رابطه‌ای است که میان ساختمان، منابع، شیوه استفاده و نظام‌های پشتیبان آن شکل می‌گیرد.

۸-۶. اصول حاصل برای تصمیم معماری

نتایج پژوهش نشان می‌دهند که تصمیم اقلیم‌پاسخ را نمی‌توان با انتخاب یک فناوری، مصالح یا فرم از پیش تعیین‌شده آغاز کرد. نقطه آغاز، شناخت نیاز فضا و مسئله‌ای است که اقلیم برای آن ایجاد می‌کند. سپس باید سازوکار مؤثر شناخته شود و پاسخ کالبدی متناسب با آن شکل گیرد. بر این اساس، چند اصل می‌توان برای ادامه طراحی استخراج کرد:

فرم و استقرار

جهت و هندسه باید پیش از تثبیت فرم نهایی و در نسبت با دریافت تابش، نور روز و بار حرارتی بررسی شوند. فرم مطلوب تنها از هندسه حاصل نمی‌شود؛ نحوه قرارگیری بازشو و سایه می‌تواند رفتار یک فرم را به‌طور جدی تغییر دهد.

بازشو

مقدار بازشو به‌تنهایی معیار کافی نیست. جهت، توزیع، امکان کنترل و نقش آن در نور و تبادل هوا باید هم‌زمان دیده شوند. در مسکن، توزیع متفاوت بازشو در جبهه شمال و جنوب مؤثرتر از افزایش یکنواخت سطح شیشه بود؛ در محفظه نیز بازشو زمانی معنا داشت که بتواند مسیر مؤثری برای دفع گرما ایجاد کند.

سایه

سایه نباید به‌عنوان مانعی ثابت در برابر خورشید طراحی شود. عملکرد مناسب آن وابسته به جهت، فصل و نیاز نوری فضا است. هدف، تنظیم دریافت خورشیدی است، نه حذف آن.

پوسته

مقاومت حرارتی، ظرفیت ذخیره گرما، SHGC و عبور نور را نمی‌توان جداگانه انتخاب کرد. تغییر یک ویژگی پوسته می‌تواند هم‌زمان بر گرمایش، سرمایش و نور اثر بگذارد. بنابراین عملکرد مجموعه پوسته مهم‌تر از کیفیت ظاهراً مطلوب یک مشخصه منفرد است.

جرم و تماس با زمین

ظرفیت حرارتی و تماس با زمین می‌توانند افت و نوسان دما را کاهش دهند، اما در دوره گرم به مسیر دفع گرما نیاز دارند. استفاده از زمین یا جرم حرارتی باید همراه با پاسخ تابستانی طراحی شود.

سامانه‌های فعال

سامانه مکانیکی باید پس از استفاده از ظرفیت‌های غیرفعال و برای پاسخ به بار باقی‌مانده تعریف شود. بار ایده‌آل تنها میزان نیاز حرارتی نظری را نشان می‌دهد و انتخاب تجهیزات واقعی نیازمند راندمان، کنترل و شرایط بهره‌برداری مشخص است.



شکل ۶-۴. مسیر تبدیل نتایج ارزیابی به اصول تصمیم معماری

جدول ۶-۲. اصول حاصل برای تصمیم معماری

عامل طراحی	اصل حاصل
فرم و استقرار	دریافت تابش و نور باید پیش از تثبیت هندسه نهایی بررسی شود.
بازشو	جهت و توزیع بازشو از مقدار کلی آن جدا نیست.
سایه	دریافت خورشیدی باید متناسب با جهت و فصل تنظیم شود.
پوسته	انتقال حرارت، ذخیره گرما و عبور خورشید باید هم‌زمان دیده شوند.
جرم و زمین	تعدیل دما بدون امکان دفع گرما پاسخ کاملی نیست.
تهویه	مسیر و زمان حرکت هوا باید بخشی از شکل‌گیری مقطع باشد.
سامانه فعال	تجهیزات باید پاسخ‌گوی بار باقی‌مانده پس از راهکارهای غیرفعال باشند.

در نهایت، پاسخ اقلیمی در محیط گرم و خشک را نمی‌توان با بیشترین عایق، بیشترین سایه، بیشترین جرم یا بیشترین تهویه تعریف کرد. هر یک از این راهکارها تنها در زمانی مفیدند که با نیاز فضا و سایر اجزای بنا هماهنگ باشند.

اصل کلی حاصل از پژوهش آن است که معماری اقلیم‌پاسخ به معنای مقابله بیشتر با اقلیم نیست؛ به معنای تنظیم دقیق‌تر رابطه بنا با خورشید، گرما، نور، هوا و زمین است.

۹-۶. سهم پژوهش

سهم این پژوهش در معرفی یک فرم نهایی، یک فناوری برتر یا یک پاسخ ثابت برای اقلیم یزد نیست. آنچه پژوهش ارائه می‌کند، روشی برای تبدیل شناخت اقلیم به تصمیم معماری قابل‌سنجش و سپس بازگرداندن نتیجه به زبان طراحی است.

نخست، معماری بومی در این پژوهش به صورت مجموعه‌ای از شکل‌های آماده برای تکرار خوانده نشده است. حیاط، سایه، جرم حرارتی، فضای نیمه‌مدفون، بازشو و جریان هوا از منظر نقشی که در رابطه بنا با اقلیم داشته‌اند بررسی شده‌اند. سپس آن بخش از این منطق که امکان سنجش داشته، به متغیرهای معماری معاصر تبدیل شده است. به این ترتیب، انتقال از گذشته نه در بازتولید شکل، بلکه در فهم سازوکار و بازتعریف آن در شرایط امروز صورت گرفته است.

دوم، پژوهش نشان می‌دهد که پاسخ اقلیمی را نمی‌توان با یک شاخص واحد سنجید. در بخش مسکن، کاهش بار سرمایش در کنار تغییر بار گرمایش و کیفیت نور روز خوانده شده است. در محفظه نیمه‌مدفون نیز کاهش بیش گرمایش در کنار تغییر دریافت نسبی انرژی خورشیدی و بارهای فصلی بررسی شده است. در نتیجه، یک راهکار تنها زمانی قابل ارزیابی است که اثر مطلوب و پیامد جانبی آن هم‌زمان دیده شوند.

سوم، میان نتیجه محاسباتی و تصمیم معماری تمایز برقرار شده است. شبیه‌سازی در این پژوهش برای تعیین خودکار فرم نهایی به کار نرفته، بلکه برای روشن کردن پیامد تغییرات کالبدی استفاده شده است. تصمیم‌هایی مانند سازمان فضایی نهایی، شکل حیاط، جزئیات بازشو یا نحوه توسعه محفظه، پس از خواندن نتایج و در مرحله طراحی شکل گرفته‌اند. این تمایز، جایگاه شبیه‌سازی را به عنوان ابزار شناخت و اصلاح طراحی روشن می‌کند. چهارم، پژوهش دو محیط متفاوت—مسکن و محفظه نیمه‌مدفون—را بدون ادغام مصنوعی معیارهای آن‌ها در یک بحث مشترک قرار داده است. وحدت این دو بخش نه از یکسان‌بودن شاخص‌ها، بلکه از تکرار چند سازوکار مشترک شکل گرفته است: دریافت تابش، انتقال و ذخیره گرما، سایه، تبادل هوا، پوسته و تماس با زمین. این

امر امکان می‌دهد تفاوت نیاز انسان و محیط کشت حفظ شود و در عین حال، یک منطق معماری مشترک برای خواندن رابطه بنا و اقلیم شکل گیرد.

پنجم، پژوهش نگاه ساختمان را به زنجیره بزرگ‌تر پایداری متصل می‌کند، بدون آنکه برای حوزه‌هایی که مستقیماً بررسی نشده‌اند ادعای عملکرد مطرح کند. انرژی ساختمان و تراز سالانه فتوولتاییک در محدوده مدل‌های انجام‌شده بررسی شده‌اند، درحالی‌که آب، کشاورزی، مواد، پسماند و مدیریت بهره‌برداری به‌عنوان حوزه‌هایی دیده شده‌اند که تصمیم معماری باید امکان هماهنگی با آن‌ها را فراهم کند.

دامنه محاسبات نیز امکان آزمون مکرر این منطق را فراهم کرده است؛ باین‌حال، تعداد سناریوها خود به‌تنهایی سهم پژوهش محسوب نمی‌شود. اهمیت آن‌ها در این است که نشان می‌دهند چگونه یک پرسش معماری می‌تواند در چند مرحله آزموده، اصلاح و دوباره به تصمیم طراحی بازگردانده شود.

در مجموع، سهم اصلی پژوهش را می‌توان در تبدیل معماری اقلیم‌پاسخ از مجموعه‌ای از توصیه‌های شکلی به مجموعه‌ای از روابط قابل‌سنجش میان اقلیم، نیاز فضا، سازوکار فیزیکی و تصمیم معماری دانست.

۱۰-۶. حدود کاربرد و انتقال نتایج

نتایج این پژوهش در محدوده اقلیم، هندسه، مصالح، شرایط مرزی و نحوه بهره‌برداری تعریف‌شده در مدل‌ها معتبرند. بنابراین، اعداد حاصل را نمی‌توان بدون بازبینی مستقیم به پروژه‌ای دیگر منتقل کرد.

در بخش مسکن، نتایج امکان مقایسه گزینه‌های آزموده‌شده در همان خانواده مدل را فراهم می‌کنند. در محفظه نیمه‌مدفون نیز آزمون‌های اصلی و حساسیت‌ها جهت برخی روابط—مانند اثر تهویه، تماس با زمین، سایه و نوع پوشش—را در محدوده شرایط بررسی شده نشان داده‌اند.

آنچه قابلیت انتقال بیشتری دارد، جهت رابطه است، نه مقدار دقیق عدد.

برای نمونه، این پژوهش نشان داد که افزایش تماس با زمین می‌تواند افت دمای دوره سرد را کاهش دهد، اما ممکن است در دوره گرم نیاز به دفع گرما را افزایش دهد. همچنین کاهش دریافت خورشیدی می‌تواند از بیش‌گرمایش بکاهد، اما هم‌زمان بخشی از نور یا انرژی خورشیدی مفید را نیز کاهش دهد. چنین روابطی می‌توانند پرسش طراحی پروژه بعدی را شکل دهند، اما مقدار مناسب هر متغیر باید دوباره برای زمینه جدید تعیین شود.

در انتقال نتایج به پروژه‌ای دیگر، اقلیم، هندسه، مشخصات خاک، سطح آزاد واقعی بازشوها، ویژگی‌های حرارتی و طیفی پوشش، زمان استفاده و الگوی کنترل باید دوباره تعریف شوند. به‌ویژه در محفظه کشت، مقادیر حاصل

بدون در نظر گرفتن رطوبت، تبخیر-تعرق، VPD، رفتار گیاه و عملکرد واقعی محصول نباید به عنوان پیش‌بینی شرایط کامل کشت تفسیر شوند.

به همین ترتیب، بارهای گزارش شده در مدل‌های فعال بیانگر نیاز حرارتی نظری‌اند و نمی‌توان آن‌ها را مستقیماً به مصرف برق یا اندازه تجهیزات تبدیل کرد. طراحی سامانه واقعی نیازمند راندمان تجهیزات، توان فن، کنترل رطوبت و منطق بهره‌برداری مشخص است.

از این‌رو، نتایج پژوهش **قواعد ثابت و مستقل از زمینه نیستند**. ارزش آن‌ها در روشن کردن روابطی است که می‌توانند طراحی پروژه بعدی را هدایت کنند و سپس در شرایط جدید دوباره آزموده شوند.

۱۱-۶. پاسخ به پرسش پژوهش و جمع‌بندی

پرسش اصلی این پژوهش آن بود که چگونه می‌توان شناخت اقلیم گرم‌وخشک یزد و آموزه‌های معماری شکل گرفته در این بستر را، بدون تکرار صوری معماری گذشته، به تصمیم‌های قابل استفاده در طراحی امروز تبدیل کرد.

نتایج پژوهش نشان می‌دهند که این انتقال زمانی امکان‌پذیر است که ابتدا **نیاز فضا و مسئله اقلیمی** شناخته شود، سپس سازوکاری که میان بنا و محیط عمل می‌کند مشخص شود و در ادامه، آن سازوکار به عاملی قابل آزمون در طراحی تبدیل گردد. شبیه‌سازی در این روند وسیله‌ای برای سنجش پیامد تصمیم است؛ نه نقطه آغاز طراحی و نه داور نهایی آن.

دو بخش مسکن و محفظه نیمه‌مدفون این منطق را در دو فضای متفاوت آزموده‌اند. معیارهای آن‌ها یکسان نیستند، اما هر دو نشان می‌دهند که یک تصمیم اقلیمی زمانی قابل اتکاست که تنها اثر مطلوب آن دیده نشود و پیامدهای دیگر آن نیز در کنار آن بررسی شوند.

۱۱-۶. نتیجه معماری

در بخش مسکن، کاهش بار سرمایش و بار حرارتی کل تنها بخشی از مسئله بود. تغییر سایه، بازو و پوسته هم‌زمان بر بار گرمایش و کیفیت نور روز نیز اثر گذاشت. از این‌رو، کنترل خورشیدی را نمی‌توان به کم کردن تابش فروکاست؛ آنچه اهمیت دارد، **تنظیم جهت، زمان و مقدار دریافت خورشیدی در نسبت با نیاز حرارتی و نوری فضا است**.

در محفظه نیمه‌مدفون نیز تماس با زمین توانست شرایط سرد را تعدیل کند، اما بدون امکان مناسب دفع گرما، پاسخ دوره گرم را بهبود نداد. تهویه طبیعی در شرایط آزموده شده مؤثرترین راهبرد برای کاهش ساعات

بیش گرمایش بود و سایه فصلی نیز نشان داد که کاهش گرمای ناخواسته همواره با کاهش بخشی از دریافت خورشیدی همراه است.

از مجموع این نتایج چند اصل معماری به دست می‌آید:

- سایه باید دریافت نامطلوب را تنظیم کند، نه آنکه خورشید مفید را نیز بی‌تمایز حذف کند .
 - جرم حرارتی و تماس با زمین زمانی معنا پیدا می‌کنند که زمان و مسیر دفع گرمای ذخیره‌شده نیز در نظر گرفته شود .
 - بازشو تنها یک نسبت سطح نیست؛ جهت، جایگاه، زمان استفاده و نقش آن در نور و جریان هوا نیز اهمیت دارد .
 - پوسته باید به‌صورت مجموعه‌ای از ویژگی‌های حرارتی و نوری خوانده شود .
 - راهکار غیرفعال زمانی مؤثر است که با سازمان فضا، فصل و نحوه بهره‌برداری هماهنگ باشد .
- در این معنا، بازخوانی معماری بومی یزد به معنای تکرار حیاط، بادگیر، ساباط یا دیوار خشتی نیست. ارزش این عناصر در **رابطه‌ای** است که میان تابش، سایه، جرم، هوا، زمین و فضای قابل‌استفاده ایجاد می‌کردند. همین روابط می‌توانند در معماری امروز ادامه یابند، اما شکل و اندازه آن‌ها باید متناسب با شرایط جدید دوباره تعریف شود.

بنابراین، نتیجه معماری پژوهش را می‌توان چنین بیان کرد:

معماری اقلیم‌پاسخ در یزد از انتخاب یک فرم از پیش تعیین‌شده حاصل نمی‌شود؛ از تنظیم رابطه بنا با خورشید، نور، گرما، هوا و زمین شکل می‌گیرد.

۲-۱۱-۶. نتیجه در مقیاس پایداری

نتایج پژوهش همچنین نشان می‌دهند که عملکرد مناسب ساختمان، به‌تنهایی معادل پایداری یک سکونتگاه نیست. انرژی، آب، حرکت، تولید غذا، مواد، پسماند و شیوه بهره‌برداری در ارتباط با یکدیگر عمل می‌کنند و ضعف یک بخش می‌تواند بخشی از دستاورد بخش‌های دیگر را کاهش دهد.

بالین‌حال، این پیوستگی به معنای آن نیست که معماری باید جای همه تخصص‌ها را بگیرد. نقش معماری در این سطح، شناخت اثر تصمیم‌های کالبدی بر این روابط و فراهم کردن بستری است که سامانه‌های دیگر بتوانند بدون تعارض اساسی با ساختار فضایی و ظرفیت اقلیم توسعه یابند.

در این پژوهش، مسکن و محفظه نیمه‌مدفون هسته اصلی ارزیابی کمی را تشکیل داده‌اند. موضوعاتی مانند فتوولتائیک، دسترسی، آب، کشاورزی، مواد و پسماند در سطحی وارد مطالعه شده‌اند که برای روشن شدن رابطه آن‌ها با تصمیم معماری ضروری بوده است؛ نه به‌عنوان ارزیابی تخصصی کامل هر حوزه.

از این‌رو، پایداری در این رساله نه به‌صورت مجموعه‌ای از راهکارهای جداگانه، بلکه به‌صورت **زنجیره‌ای از تصمیم‌های وابسته** دیده می‌شود. کیفیت کل مجموعه زمانی تقویت می‌شود که هر بخش هم وظیفه خود را درست انجام دهد و هم با سایر بخش‌ها ناسازگار نباشد.

جمع‌بندی نهایی

دست‌آورد این پژوهش یک فرم نهایی، یک تیپ ثابت یا یک نسخه آماده برای معماری یزد نیست. حاصل آن، روشی برای خواندن اقلیم و تبدیل این شناخت به تصمیم معماری است:

شناخت نیاز ← تشخیص سازوکار ← تبدیل آن به عامل طراحی ← سنجش پیامدها ← بازگرداندن نتیجه به معماری

ارزش این مسیر در آن است که معماری گذشته را به مجموعه‌ای از نشانه‌ها تقلیل نمی‌دهد، شبیه‌سازی را جایگزین طراحی نمی‌کند و پایداری را نیز به عملکرد یک ساختمان محدود نمی‌سازد.

نتیجه نهایی رساله این است که معماری همساز با اقلیم نه از مقابله بیشتر با محیط، بلکه از شناخت دقیق‌تر و تنظیم آگاهانه‌تر رابطه بنا با محیط شکل می‌گیرد.

- Aghaeimeybodi, M., & Andaroodi, E. (2021). Cultural landscape and typology of the Kharanaq village in Iran. *Space&FORM*, 47, 203–212. <https://doi.org/10.21005/pif.2021.47.e-01>
- Akbari, H., Moradi Cherati, S., Hamidi Monazam, N., & Noguchi, M. (2021). Effect of courtyards' geometrical parameters on climate adaptability and shading performance in hot-arid climate of Yazd (Iran). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 48, 101594. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101594>
- Al-Helal, I., Alsadon, A., Marey, S., Ibrahim, A., Shady, M., & Abdel-Ghany, A. (2022). Geothermal energy potential for cooling/heating greenhouses in hot arid regions. *Atmosphere*, 13(1), 105. <https://doi.org/10.3390/atmos13010105>
- Alayed, E., Bensaid, D., O'Hegarty, R., & Kinnane, O. (2022). Thermal mass impact on energy consumption for buildings in hot climates: A novel finite element modelling study comparing building constructions for arid climates in Saudi Arabia. *Energy and Buildings*, 271, 112324. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112324>
- Asadi, S., Fakhari, M., & Sendi, M. (2016). A study on the thermal behavior of traditional residential buildings: Rasoulia house case study. *Journal of Building Engineering*, 7, 334–342. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.07.012>
- Behroozeh, S., Hayati, D., Karami, E., Nassiri, S. M., & Rezaei-Moghaddam, K. (2024). Evaluation and comparison of energy use efficiency among cucumber greenhouses. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1427530. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1427530>
- Benson Agriculture and Food Institute. (2002). Walipini Construction: The Underground Greenhouse. Brigham Young University, Benson Agriculture and Food Institute.
- Bioregional. (2019). BedZED – the UK's first major sustainable community. Retrieved August 17, 2026, from <https://www.bioregional.com/projects-and-services/case-studies/bedzed-the-uks-first-large-scale-eco-village>
- Brækken, A., Sannan, S., Jerca, I. O., & Bădulescu, L. A. (2023). Assessment of heating and cooling demands of a glass greenhouse in Bucharest, Romania. *Thermal Science and Engineering Progress*, 41, 101830. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101830>
- Ciolkosz, D. E. (2008). Design daylight availability for greenhouses using supplementary lighting. *Biosystems Engineering*, 100(4), 571–580. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.04.010>
- Climate.OneBuilding. (n.d.). IRN_YA_Yazd.Sadooghi.Intl.AP.408210 TMYx 2009–2023 weather file. Retrieved August 10, 2026, from https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_2_Asia/IRN_Iran/index.html
- EnergyPlus. (2024). Input Output Reference, Version 24.2: Group–Airflow; ZoneVentilation:WindandStackOpenArea. U.S. Department of Energy. <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/24-2/input-output-reference/group-airflow.html>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for Mediterranean climate areas (FAO Plant Production and Protection Paper No. 217). FAO. <https://www.fao.org/4/i3284e/i3284e.pdf>
- Foster + Partners. (n.d.). Masdar Institute. Retrieved August 17, 2026, from <https://www.fosterandpartners.com/projects/masdar-institute>

- Gallina USA. (n.d.). arcoPlus 6166: Six-wall polycarbonate glazing system [Technical data sheet]. <https://gallinausa.com/arcoplus/arcoplus-6166/>
- Garcia, C., & Lopez, R. G. (2020). Supplemental radiation quality influences cucumber, tomato, and pepper transplant growth and development. *HortScience*, 55(6), 804–811. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14820-20>
- Ghazi, B., Salehi, H., Cheshami, M., Zeydalienejad, N., & Linh, N. T. T. (2025). Projection of climate change impact on main climate variables and assessment of the future of Köppen–Geiger climate classification in Iran. *Acta Geophysica*, 73(2), 2017–2027. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01457-6>
- Griffiths, S., & Sovacool, B. K. (2020). Rethinking the future low-carbon city: Carbon neutrality, green design, and sustainability tensions in the making of Masdar City. *Energy Research & Social Science*, 62, 101368. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101368>
- Gulf Organisation for Research and Development. (2019). GSAS 2019 Design & Build Assessment Manual and Technical Guide. Gulf Organisation for Research and Development (GORD).
- Hosseini, S. H., Shokry, E., Ahmadian Hosseini, A. J., Ahmadi, G., & Calautit, J. K. (2016). Evaluation of airflow and thermal comfort in buildings ventilated with wind catchers: Simulation of conditions in Yazd City, Iran. *Energy for Sustainable Development*, 35, 7–24. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.09.005>
- Hosseininassab, S., Hanif, S., Sami, U., & Arman, F. (2024). Shaping Space: The Impact of Socio-cultural Practices on the Spatial Organization of Kharanaq Fort, Yazd, Iran. *Journal for Social Science Archives*, 2(2), 159–171. <https://doi.org/10.59075/jssa.v2i2.51>
- International Organization for Standardization. (2019). Sustainability in buildings and civil engineering works — General principles (ISO 15392:2019). ISO. <https://www.iso.org/standard/69947.html>
- Jafari Sharami, H. (2023). Investigation of Pirnia's orientation theory (Roon) in Yazd Qajar houses. *Frontiers of Architectural Research*, 12(5), 906–922. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2023.06.002>
- Kamyab, A., Mahmoodi Zarandi, M., & Nikpour, M. (2023). Investigating the effect of different proportions of iwan and window area of adjacent room on cooling/heating load and energy consumption in central courtyard model in Yazd. *Iranian Journal of Energy and Environment*, 14(2), 118–126. <https://doi.org/10.5829/ijee.2023.14.02.04>
- Kangazian, A., & Pourghanbari, M. (2024). A many-objective optimization approach to design office building façade considering energy-daylight balance concept within prevalent climate types of Iran. *Journal of Building Engineering*, 98, 111234. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111234>
- Kansara, T., & Ridley, I. (2012). Post Occupancy Evaluation of buildings in a Zero Carbon City. *Sustainable Cities and Society*, 5, 23–25. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2012.05.010>
- Keshtkaran, P. (2011). Harmonization between climate and architecture in vernacular heritage: A case study in Yazd, Iran. *Procedia Engineering*, 21, 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2035>
- Kothawala, A., Circella, G., Alemi, F., Abou-Zeid, M., Rogmans, T., El-Jisr, K., et al. (2025). Travel Behavior and Transportation Emissions in Sustainable Communities: The Case of The Sustainable City in Dubai. *Transportation Research Record*, 2679(4). <https://doi.org/10.1177/03611981241292337>

- Ladybug Tools. (n.d.). HB Annual Daylight: Annual daylight recipe and default parameters. Retrieved August 10, 2026, from https://docs.ladybug.tools/hb-radiance-primer/components/3_recipes/annual_daylight
- Maleki, A., & Dehghan, N. (2021). Optimization of energy consumption and daylight performance in residential building regarding windows design in hot and dry climate of Isfahan. *Science and Technology for the Built Environment*, 27(3), 351–366. <https://doi.org/10.1080/23744731.2020.1812294>
- Mansourmoghaddam, M., Rousta, I., Ghafarian Malamiri, H., Sadeghnejad, M., Krzyszcak, J., & Ferreira, C. S. S. (2024). Modeling and estimating the land surface temperature (LST) using remote sensing and machine learning (case study: Yazd, Iran). *Remote Sensing*, 16(3), 454. <https://doi.org/10.3390/rs16030454>
- Maranghi, F., & Raymond, J. (2023). Numerical evaluation of the benefits provided by the ground thermal inertia to urban greenhouses. *Thermo*, 3(3), 452–482. <https://doi.org/10.3390/thermo3030028>
- Meek, D. W., Hatfield, J. L., Howell, T. A., Idso, S. B., & Reginato, R. J. (1984). A generalized relationship between photosynthetically active radiation and solar radiation. *Agronomy Journal*, 76(6), 939–945. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600060018x>
- Mesbahzadeh, T., Mirakbari, M., Mohseni Saravi, M., Soleimani Sardoo, F., & Miglietta, M. (2020). Meteorological drought analysis using copula theory and drought indicators under climate change scenarios (RCP). *Meteorological Applications*, 27(1), e1856. <https://doi.org/10.1002/met.1856>
- Mohammadi, A., Saghafi, M. R., Tahbaz, M., & Nasrollahi, F. (2018). The study of climate-responsive solutions in traditional dwellings of Bushehr City in Southern Iran. *Journal of Building Engineering*, 16, 169–183. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.12.014>
- Mostadam. (2024). Mostadam for Communities: Design + Construction (D+C) Rating System Guide. Sustainable Building Program, Kingdom of Saudi Arabia.
- Muñoz-Liesa, J., Royapoor, M., Cuerva, E., Gassó-Domingo, S., Gabarrell, X., & Josa, A. (2022). Building-integrated greenhouses raise energy co-benefits through active ventilation systems. *Building and Environment*, 208, 108585. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108585>
- Muñoz-Liesa, J., Royapoor, M., López-Capel, E., Cuerva, E., Rufi-Salís, M., Gassó-Domingo, S., & Josa, A. (2020). Quantifying energy symbiosis of building-integrated agriculture in a Mediterranean rooftop greenhouse. *Renewable Energy*, 156, 696–709. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.098>
- Nadal, A., Llorach-Massana, P., Cuerva, E., López-Capel, E., Montero, J. I., Josa, A., Rieradevall, J., & Royapoor, M. (2017). Building-integrated rooftop greenhouses: An energy and environmental assessment in the Mediterranean context. *Applied Energy*, 187, 338–351. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.051>
- Najafi, M. R., Abbasian, M., Na, W., RahimiMovaghar, M., Bakhtiari, S., Islam, M. R., Fereshtepour, M., Jalili Pirani, F., & Rezvani, R. (2025). Multi-model projection of climate extremes under 1.5°C–4°C global warming levels across Iran. *International Journal of Climatology*, 45(4), e8740. <https://doi.org/10.1002/joc.8740>
- Ouazzani Chahidi, L., & Mechaqrane, A. (2021). Energetic and economic analysis for improving greenhouse energy efficiency. *Journal of Energy Systems*, 5(4), 296–305. <https://doi.org/10.30521/jes.950754>
- Ramezani, M., Taheri, S., Gorgabi, M. S., & Nourbakhsh Sadabad, A. (2026). Energy and daylighting trade-offs in residential window design: multi-objective optimization for

- hot-arid regions. *Scientific Reports*, 16, 3458. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-33473-x>
- Rodrigues, E., Fereidani, N. A., Fernandes, M. S., & Gaspar, A. R. (2024). Diminishing benefits of thermal mass in Iranian climate: Present and future scenarios. *Building and Environment*, 258, 111635. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111635>
- Roostaei Firouzabad, M., & Pourfayaz, F. (2024). The impact of using PCM layers in simultaneously the external and internal walls of building on energy annual consumption. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 100689. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100689>
- Roshan, G., Oji, R., & Attia, S. (2019). Projecting the impact of climate change on design recommendations for residential buildings in Iran. *Building and Environment*, 155, 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.053>
- Saint-Gobain Glass. (2023). PLANILUX 6 mm: Environmental product declaration S-P-09213, version 2. International EPD System. <https://www.environdec.com/library/epd9213>
- Sanguinetti, A., Meier, A., Dessouky, N., & Outcalt, S. (2019). Developer-driven sustainable communities: Lessons from a case study of The Sustainable City in Dubai. *ECEEE 2019 Summer Study on Energy Efficiency*.
- Sarsangi, A., Toomanian, A., Neysani Samany, N., Kiavarz, M., & Saraci, M. H. (2024). Association between public and private greenspace availability and electricity consumption. *Energy and Buildings*, 324, 114855. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114855>
- Sethi, V. P., & Sharma, S. K. (2007). Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 81(12), 1447–1459. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.03.004>
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *International Agrophysics*, 32(2), 287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Soflaei, F., Shokouhian, M., Abraveshdar, H., & Alipour, A. (2016). Traditional Iranian courtyards as microclimate modifiers by considering orientation, dimensions, and proportions. *Frontiers of Architectural Research*, 5(2), 225–238. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.02.002>
- Solgi, E., Kari, B. M., Fayaz, R., & Taheri, H. (2017). The impact of phase change materials assisted night purge ventilation on the indoor thermal conditions of office buildings in hot-arid climates. *Energy and Buildings*, 150, 488–497. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.035>
- Tahbaz, M., Djalilian, S., & Mousavi, F. (2014). Outdoor microclimate observation for thermal comfort in harsh desert condition: A study in Kashan, Iran. *Civil Engineering and Architecture*, 2(8), 284–303. <https://doi.org/10.13189/cea.2014.020802>
- The Sustainable City. (n.d.). Our DNA. Retrieved August 17, 2026, from <https://thesustainablecity.com/our-dna/>
- Thimijan, R. W., & Heins, R. D. (1983). Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: A review of procedures for interconversion. *HortScience*, 18(6), 818–822. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.18.6.818>
- Tsafaras, I., Campen, J. B., de Zwart, H. F., Voogt, W., Al-Harbi, A., Al-Assaf, K., Abdelaziz, M. E., Qaryouti, M., & Stanghellini, C. (2022). Quantifying the trade-off between water and electricity for tomato production in arid environments.

- Agricultural Water Management, 271, 107819.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107819>
- Urban Planning Council Abu Dhabi. (2010). The Pearl Community Rating System: Design & Construction, Version 1.0. Abu Dhabi Urban Planning Council.
- USGBC. (2024). LEED v4.1 Cities and Communities: Rating system and guide. U.S. Green Building Council.
- Verheul, M. J., Maessen, H. F. R., Paponov, M., Panosyan, A., Kechasov, D., Naseer, M., & Paponov, I. A. (2022). Artificial top-light is more efficient for tomato production than inter-light. *Scientia Horticulturae*, 291, 110537.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110537>
- Wang, Y., Chu, Y., Wan, Z., Zhang, G., Liu, L., & Yan, Z. (2021). Root architecture, growth and photon yield of cucumber seedlings as influenced by daily light integral at different stages in the closed transplant production system. *Horticulturae*, 7(9), 328.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae7090328>
- Yardımlı, S., Güleç Özer, D., & Shahriary, A. (2020). Sustainable street architecture and its effects on human comfort conditions: Yazd, Iran. *A|Z ITU Journal of Faculty of Architecture*, 17(2), 113–122. <https://doi.org/10.5505/itujfa.2020.70188>
- Young, J. (2015). Towards zero energy buildings: Lessons learned from the BedZED development [Doctoral dissertation, University College London]. UCL Discovery.
<https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1472436/>
- Zarei, M. J., Kazemi, N., & Marzban, A. (2019). Life cycle environmental impacts of cucumber and tomato production in open-field and greenhouse. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(3), 249–255.
<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.07.001>
- Zolfagharkhani, M., & Ostwald, M. J. (2021). The spatial structure of Yazd courtyard houses: A space syntax analysis of the topological characteristics of the courtyard. *Buildings*, 11(6), 262. <https://doi.org/10.3390/buildings11060262>

منابع فارسی

علوم آب و CMIP۶ زارعیان، م. ج. ۱۴۰۱. (اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش استان یزد بر اساس خروجی ترکیبی مدل‌های خاک، ۲۶(۲)، ۹۱–۱۰۵).

پیوست الف: داده‌ها و کنترل‌های محاسباتی

این پیوست داده‌ها و کنترل‌های لازم برای بررسی مستقل روش و نتایج را در خود رساله گردآوری می‌کند. مجموعه اجراهای والپینی شامل ۱۶ اجرای سالانه است و همه اجراها با خاتمه عادی و صفر خطای شدید پایان یافتند. از این میان، برای ۱۱ اجرا پایگاه داده ساعتی کامل ۸۷۶۰ ردیفی در آرشیو موجود است و بازتحلیل ساعتی فقط بر همین مجموعه انجام می‌شود؛ پنج اجرای دیگر در کنترل خاتمه و خروجی‌های تجمیعی لحاظ شده‌اند و در ادعای بازتولید ساعتی وارد نمی‌شوند. محاسبات ساعتی DLI_eq برای F_S3 و F_S5، آزمون حساسیت بازشو، چهار شرط مرزی خاک و آزمون تشخیصی هشدار سایکرومتریک در جدول‌های این پیوست خلاصه شده‌اند.

برای ماژول مسکن، ورودی‌های ثابت انرژی، تنظیمات نور روز و برنامه‌های ۲۴ ساعته بهره‌برداری در فصل روش و این پیوست ثبت شده‌اند. برای والپینی نیز تعریف شاخص‌ها، نمونه بازحساب DLI_eq، کامل‌بودن داده ساعتی، حساسیت بازشو و خاک و کنترل هشدار هواشناسی در ادامه ارائه می‌شود. بنابراین اطلاعات درج‌شده در رساله برای بررسی مسیر محاسباتی، حدود تفسیر و کنترل ادعاهای اصلی کفایت می‌کند؛ بازاجرای کامل سناریوها مستلزم دسترسی به فایل‌های اجرایی و محیط نرم‌افزاری مربوط است.

الف-۱. دامنه داده‌ها و کنترل‌های محاسباتی

جدول الف-۱. خلاصه داده‌ها و کنترل‌های محاسباتی درج‌شده در پیوست

بخش	داده درج‌شده	کنترل انجام‌شده	نقش در استدلال
اقلیم	WMO=۴۰۸۲۱۰؛ TMYx یزد؛ دوره ۲۰۰۹-۲۰۲۳؛ ۸۷۶۰ ساعت	یک ورودی مشترک برای دو ماژول	تثبیت شرایط آب‌وهوایی مقایسه
مسکن	۵۸۸ m ² ؛ ورودی‌های پوسته، بار داخلی و نور روز	ثبات ورودی‌ها و گزارش هم‌زمان انرژی-نور	مقایسه خانواده سناریوهای مسکن
والپینی	۱۶ اجرای اصلی سالانه؛ ۱۰ سناریوی آزاد، ۴ اجرای فعال و ۲ آزمون حساسیت بازشو؛ آزمون‌های شرایط مرزی خاک و هشدار سایکرومتریک به‌صورت مستقل گزارش شده‌اند	خاتمه عادی همه اجراها؛ صفر خطای شدید	مقایسه حرارت، نور و بار باقیمانده

بخش	داده درج شده	کنترل انجام شده	نقش در استدلال
DLI_eq	شاخص نسبی انرژی خورشیدی عبوری روزانه	۸۷۶۰ رکورد، بدون شکاف/تکرار/مقدار ناموجود (NaN)؛ باز حساب تا دقت ماشین	کنترل فرمول، واحد و تجمیع ماهانه
حساسیت	بازشو، چهار شرط مرزی خاک و هشدار سایکرومتریک	پایداری جهت اثر و کنترل تغییر شاخص‌ها	تعیین دامنه اتکا و شرط انتقال

الف-۲. روند تبدیل واحدها در محاسبه DLI_eq

EnergyPlus واحد هر مرحله و فرمول هم‌ارز آن در DLI_eq در این پیوست، نام دقیق متغیر به‌صورت مستقیم و با یک روز نمونه ردیابی می‌شود. این شاخص، جانشین نسبی انرژی خورشیدی را نقطه میانی بازه آزمون می‌داند، نه آستانه زیستی یا $\tau=0.75$ عبوری است؛ جدول حساسیت سایه نیز محصول اجرایی.

جدول الف-۲. تعریف متغیرها و کنترل واحد در محاسبه DLI_eq

مرحله	تعریف	واحد	رابطه
خروجی خام	$E_{transmitted,h}$ ؛ انرژی عبوری کل سطوح شفاف در ساعت h	J	EnergyPlus SQL
شار معادل	نرمال سازی بر کف 500 m^2 و 3600 s	W/m^2	$I_{eq,h} = E_h / (500 \times 3600)$
سهم PAR	سهم ثابت 0.45 از انرژی خورشیدی	W/m^2	$I_{PAR,h} = 0.45 \times I_{eq,h}$
شار فوتونی معادل	تبدیل کوانتومی $4/57$	$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	$\text{PPFD}_{eq,h} = 4.57 \times I_{PAR,h}$
تجمیع روزانه	انتگرال ۲۴ مقدار ساعتی	$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$	$\text{DLI}_{eq,d} = \sum (\text{PPFD}_{eq,h} \times 3600) / 10^6$
صورت مستقیم	حذف جبری دو عامل 3600	$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$	$\sum (E_h \times 0.45 \times 4.57) / (500 \times 10^6)$

جدول الف-۳. بازحساب ردیابی‌شده یک روز از سناریوی F_S3

اختلاف	DLI ثبت‌شده	محاسبه مستقیم	Σ انرژی عبوری	تعداد رکورد	تاریخ
کمتر از ۱۰-۱۰	۳۹.۷۵۷۱۶۰۸۴ ۲۳	۳۹.۷۵۷۱۶۰۸۴ ۲۳	9,666,219,509.43 J	۲۴	۲۱ ژوئن (سال مرجع نرم‌افزاری ۲۰۰۶)

در این نمونه، ۹,۶۶۶,۲۱۹,۵۰۹.۴۳ ژول انرژی عبوری روزانه با رابطه مستقیم بر مساحت ۵۰۰ مترمربع نرمال و به ۳۹.۷۵۷۱۶۰۸۴۲۳ mol/(m²·d) تبدیل می‌شود. برابری با ستون روزانه CSV نشان می‌دهد عامل ۳۶۰۰ دوبار وارد نتیجه نشده است. سال ۲۰۰۶ در این ردیف، سال مرجع تقویمی فایل EPW/EnergyPlus است و سال اندازه‌گیری مستقل محسوب نمی‌شود؛ روز ۲۱ ژوئن یک روز نماینده TMY از فایل اقلیمی دوره ۲۰۰۹-۲۰۲۳ است.

الف-۳. کامل بودن داده ساعتی و بازتولید ماهانه

جدول الف-۴. کنترل کامل بودن و بازتولید مستقل DLI_eq

حکم	بیشینه اختلاف ماهانه	شکاف/تکرار/NaN	روز کامل	رکورد ساعتی	سناریو
قبول	۱۰ ⁻¹⁵ × ۳.۵۵	۰ / ۰ / ۰	۳۶۵	۸۷۶۰	F_S3
قبول	۱۰ ⁻¹⁵ × ۷.۱۱	۰ / ۰ / ۰	۳۶۵	۸۷۶۰	F_S5

الف-۴. حساسیت تهویه و معنای شاخص‌های دمایی

جدول الف-۵. کنترل حساسیت سطح بازشو در دو هندسه

نتیجه	ساعات بازه ۱۶ تا ۲۷°C	ساعات بالاتر از ۳۵°C	سطح بازشو	هندسه
مرجع حساسیت	۳۴۷۵	۱۵۷۸	۲۰٪	پایه
۵۳ ساعت داغ کمتر؛ ۱۱۱ ساعت بازه بیشتر	۳۵۸۶	۱۵۲۵	۳۰٪	پایه
مرجع حساسیت	۳۰۵۵	۱۸۷۷	۲۰٪	والپینی + PC + سایه
۸۵ ساعت داغ کمتر؛ ۲۵۶ ساعت بازه بیشتر	۳۳۱۱	۱۷۹۲	۳۰٪	والپینی + PC + سایه

این حساسیت فقط پایداری جهت اثر سطح بازشو را در مدل نشان می‌دهد. سطح آزاد خالص پس از توری، ضریب تخلیه واقعی، فشار باد، گردوغبار و منطق بهره‌برداری باید در طراحی اجرایی بازتعریف شود؛ از این‌رو ۳۰٪ حد بالای هندسی آزمون و نه سطح بهینه عمومی است.

جدول الف-۶. نقش شاخص‌های دمایی در پژوهش

شاخص	نقش	تفسیر مجاز	آنچه نتیجه نمی‌دهد
کمتر از ۱۰°C	شمارش شرایط سرد شدید	مقایسه سناریوها از نظر معماری	مرز مرگ یا خسارت همه محصولات
بالاتر از ۳۵°C	شمارش شرایط گرم شدید	غربال خطر بیش‌گرمایش	پیش‌بینی عملکرد محصول
16-27°C	بازه زمانی مقایسه غیرفعال	شاخص ثابت بین سناریوها	بازه بهینه مشترک گونه‌ها
17-27°C	بازه دمایی کنترل بار ایده‌آل	محاسبه بار نظری باقیمانده	نقطه تنظیم قطعی محصول یا مصرف واقعی

الف-۵. حساسیت شرط مرزی خاک

جدول الف-۷. پایداری جهت اثر بسته نیمه‌مدفون در چهار شرط مرزی خاک

جهت اثر	دامنه تغییر در چهار شرط مرزی	مقایسه بسته نیمه‌مدفون با بسته روی‌زمین؛ شاخص‌های غیرفعال از اجراهای آزاد و بارها از اجراهای فعال متناظر
افزایش پایدار	۱/۶۴+ تا ۲/۲۲+°C	کمینه دمای هوا
افزایش پایدار	۰/۳۱+ تا ۰/۴۶+°C	بیشینه دمای هوا
افزایش پایدار	۰/۴۷+ تا ۰/۵۶+°C	میانگین دمای هوا
افزایش پایدار	۷۹+ تا ۸۳+ ساعت؛ ۵/۴۸+ تا ۵/۷۹٪	ساعات بالاتر از ۳۵°C
کاهش پایدار	۶۳- تا ۸۱- ساعت؛ ۳۰/۸۸- تا ۵۳/۳۸٪-	ساعات کمتر از ۱۰°C
کاهش پایدار	۱۷۵- تا ۱۹۰- ساعت؛ ۱۲/۹۲- تا ۱۴/۰۰٪-	ساعات ۱۸ تا ۲۴°C
کاهش پایدار	۲۱/۷۵- تا ۲۹/۵۱٪-	گرمایش ایده‌آل
افزایش پایدار	۹/۷۳+ تا ۱۰/۶۵٪+	سرمايش ایده‌آل
افزایش پایدار	۷/۰۳+ تا ۸/۱۷٪+	بار ایده‌آل کل

چهار شرط مرزی شامل دمای ماهانه خاک در عمق‌های ۰/۵، ۲ و ۴ متر و شرط ثابت ۲۰ درجه سلسیوس بود. پایداری علامت همه شاخص‌های جدول نشان می‌دهد نتیجه مقایسه‌ای به انتخاب یک عمق منفرد وابسته نیست: بسته نیمه‌مدفون عملکرد در شرایط سرد را بهبود می‌دهد، اما عملکرد در شرایط گرم را تضعیف و بار کل را افزایش می‌دهد.

الف-۶. کنترل هشدار سایکرومتریک فایل اقلیمی

جدول الف-۸. بازتولید آزمون حساسیت هشدار سایکرومتریک

تغییر تابش سالانه	تغییر شمار ساعات	میانگین $ \Delta T $	بیشینه $ \Delta T $	رکورد	سناریو
J ۰	۰	۰/۰۰۰۰۰۴۰°C	۰/۰۱۲۱°C	۸۷۶۰	F_S0
J ۰	۰	۰/۰۰۰۰۰۳۳°C	۰/۰۱۰۵°C	۸۷۶۰	F_S3

در همه اجراهای اصلی، EnergyPlus هشدار PsyPsatFnTemp را در دو گذار کوتاه فایل TMYx گزارش کرد، درحالی‌که همه اجراها با صفر خطای شدید خاتمه یافتند. در آزمون تشخیصی، هموارسازی فقط رکوردهای ناپیوسته هواشناسی هشدار را حذف کرد. در F_S0 بیشینه اختلاف ساعتی دمای فضا ۰/۰۱۲۱ درجه و میانگین قدرمطلق اختلاف ۰/۰۰۰۰۰۴۰ درجه بود؛ برای F_S3 این مقادیر به ترتیب ۰/۰۱۰۵ و ۰/۰۰۰۰۰۳۳ درجه ثبت شد. شمار ساعات بیش از ۳۵، کمتر از ۱۰ و بازه ۱۶ تا ۲۷ درجه در هر دو سناریو بدون تغییر ماند و انرژی تابشی عبوری سالانه دقیقاً یکسان بود. این آزمون، ناپیوستگی کوتاه داده سایکرومتریک را منشأ محتمل هشدار نشان می‌دهد و در دو سناریوی نماینده تغییری در شاخص‌های گزارش شده ایجاد نکرد.

الف-۷. الگوهای ۲۴ ساعته بارهای داخلی و حضور مسکن

سه الگوی زیر برای کل سال، از ۱ ژانویه تا ۳۱ دسامبر، بدون Rule سالانه جداگانه به کار رفته‌اند؛ Saturday و Sunday/Holiday با Default Day یکسان‌اند. روزهای طراحی تابستان و زمستان فقط برای شرایط طراحی تعریف شده‌اند و Rule تقویمی مستقل محسوب نمی‌شوند. الگوی آب گرم با شناسه MidriseApartment Apartment DHW از کتابخانه Honeybee Energy/Ladybug Tools نسخه مورد استفاده مدل استخراج شده است.

جدول الف-۹. ضرایب ساعتی روشنایی، تجهیزات و آب گرم خانگی

آب گرم خانگی	تجهیزات	روشنایی	ساعت
۰.۰۸	۰.۴۵	۰.۰۶۷	۰
۰.۰۴	۰.۴۱	۰.۰۶۷	۱

ساعت	روشنایی	تجهیزات	آب گرم خانگی
۲	۰.۰۶۷	۰.۳۹	۰.۰۱
۳	۰.۰۶۷	۰.۳۸	۰.۰۱
۴	۰.۱۸۷	۰.۳۸	۰.۰۴
۵	۰.۳۹۴	۰.۴۳	۰.۲۷
۶	۰.۴۴۰	۰.۵۴	۰.۹۴
۷	۰.۳۹۳	۰.۶۵	۱.۰۰
۸	۰.۱۷۲	۰.۶۶	۰.۹۶
۹	۰.۱۱۹	۰.۶۷	۰.۸۴
۱۰	۰.۱۱۹	۰.۶۹	۰.۷۶
۱۱	۰.۱۱۹	۰.۷۰	۰.۶۱
۱۲	۰.۱۱۹	۰.۶۹	۰.۵۳
۱۳	۰.۱۱۹	۰.۶۶	۰.۴۷
۱۴	۰.۱۱۹	۰.۶۵	۰.۴۱
۱۵	۰.۲۰۶	۰.۶۸	۰.۴۷
۱۶	۰.۴۳۹	۰.۸۰	۰.۵۵
۱۷	۰.۶۱۶	۱.۰۰	۰.۷۳
۱۸	۰.۸۲۹	۱.۰۰	۰.۸۶
۱۹	۰.۹۸۶	۰.۹۳	۰.۸۲
۲۰	۱.۰۰۰	۰.۸۹	۰.۷۵
۲۱	۰.۶۹۲	۰.۸۵	۰.۶۱
۲۲	۰.۳۸۴	۰.۷۱	۰.۵۳
۲۳	۰.۱۶۰	۰.۵۸	۰.۲۹

منشأ: ورودی‌های ثبت‌شده مدل مسکن و کتابخانه استاندارد Honeybee Energy. هر سه الگو در همه

روزهای سال تکرار می‌شوند؛ مقادیر جدول ضریب بدون بعد بار ساعتی‌اند.

جدول الف-۱۰. ضرایب ساعتی حضور ساکن در روزهای کاری و پایان هفته/تعطیل

ساعت	دوشنبه تا جمعه	شنبه، یکشنبه و تعطیل
۶-۰	۰.۹۶۹	۰.۹۶۹
۷	۰.۸۲۳	۰.۸۲۳

ساعت	دوشنبه تا جمعه	شنبه، یکشنبه و تعطیل
۸	۰.۴۰۹	۰.۳۷۸
۱۱-۹	۰.۲۷۳	۰.۲۴۲
۱۲	۰.۲۵۸	۰.۲۴۲
۱۵-۱۳	۰.۲۷۳	۰.۲۴۲
۱۶	۰.۳۲۲	۰.۲۹۱
۱۷	۰.۵۰۴	۰.۵۰۴
۲۰-۱۸	۰.۸۴۳	۰.۸۴۳
۲۳-۲۱	۰.۹۶۹	۰.۹۶۹

منشأ: برنامه MidriseApartment Building در کتابخانه Honeybee Energy ۱.۸.۰ که در مدل G3 انتخاب شده است. Rule سالانه برای دوشنبه تا جمعه از ۱ ژانویه تا ۳۱ دسامبر اعمال می‌شود؛ شنبه، یکشنبه و تعطیل از الگوی پیش‌فرض یکسان استفاده می‌کنند. برنامه فعالیت ساکن در تمام ساعات ۹۵ W/person است.

الف-۸. تنظیمات فنی شبیه‌سازی نور روز مسکن

جدول الف-۱۱. تنظیمات فنی شبیه‌سازی نور روز مسکن

تنظیم	مؤلفه
HB Annual Daylight / HB-Radiance	ابزار
enhanced 2-phase	روش
EPW/TMYx همان WEA تولیدشده از یزد	فایل هوا
1	timestep
300 lux	DA / cDA
100–3000 lux	UDI
08:00–18:00	ساعات ارزیابی
-ab 2 -ad 5000 -lw 2e-05	Radiance
1×1 m	شبکه
0.8 m	ارتفاع
0.3 m	فاصله از دیوار
0	north
294	تعداد حسگر
میانگین حسابی حسگرها پس از محاسبه شاخص هر نقطه	تجمع

Master Thesis/ PhD Dissertation Examiners' Report	
Date	
National ID No.	

Thesis/ Dissertation Title	Designing a Sustainable Urban Development Model in a Hot-Arid Climate with an Emphasis on Resource Management and Energy Consumption Reduction
Discipline/ Major	Architectural Engineering — Building Science

The examiners evaluated this Thesis/Dissertation as follows, after they listened to the student's presentation and viva: Excellent Very Good Good Not Acceptable ☐ Excellent ☐ Very Good ☐ Good ☐ Not Acceptable	
Role	
Supervisor	
Dr. Mohammadreza Hafezi	
2nd Supervisor	
Dr. Mansoureh Tahbaz	
Co-Supervisor	
Co-Supervisor	
Examiner	
Examiner	

The examiners evaluated this Thesis/Dissertation as follows, after they listened to the student's presentation and viva: Excellent Very Good Good Not Acceptable

☐ Excellent ☐ Very Good ☐ Good ☐ Not Acceptable

Examiner

--

Abstract

Designing a Sustainable Urban Development Model in a Hot-Arid Climate with an Emphasis on Resource Management and Energy Consumption Reduction

In Yazd's hot-arid climate, sustainable architectural design cannot be reduced to envelope optimization or isolated green technologies. Solar control, thermal loads, daylight, spatial organization, and the interfaces between architecture, movement, and resource systems need to be read within one traceable decision chain. This research develops and tests a multi-layer climate-responsive framework that translates the climatic and spatial logic of Yazd into mechanisms, variables, scenarios, performance indicators, and design rules. The quantitative core is examined in two modules: a residential block and a transparent semi-buried Walipini enclosure. The controlled residential archive contained 100 initial records, of which 93 were complete and usable; the design search was then extended by 180 Wallacei tests and secondary analyses. In addition to the main R3 branch, a separate stepped private-courtyard typology was tested for orientation and privacy constraints. The Walipini module used 16 principal annual runs plus sensitivity checks to examine semi-buried geometry, natural ventilation, cover material, seasonal shading, ground boundary conditions, and the relative transmitted-solar indicator DLI_{eq} .

Across the main residential design chain, cooling load and total thermal load decreased by 43.92% and 23.48%, while heating load increased by 61.09%. Controlling excessive daylight also reduced some daylight-access indicators, so the final configuration is a trade-off, not a single optimum. R3 is treated as the deeply documented development branch, not the initial thermal winner. A separate stepped private-courtyard typology was tested as a quantified option under orientation and privacy constraints. About 140 m² of active PV produced a nominal annual generation-to-equivalent-demand ratio of 100.8%; uncertainty analysis indicated about 155–161 m² for P80–P95 annual-balance confidence. In the Walipini module, natural ventilation reduced hours above 35 °C by more than 3,100 hours. The semi-buried package reduced heating demand and cold hours but increased cooling demand and total thermal load; shading reduced both overheating and DLI_{eq} , revealing a thermal–solar trade-off.

The reported energy values are model-based loads and annual balances, not final equipment energy use, hourly self-sufficiency, or urban-system performance. DLI_{eq} is a relative comparison indicator derived from transmitted solar energy; it is not canopy DLI, PPFD, or a crop-performance metric. The spatial scenario tests bounded daily-access relationships and interfaces between buildings, movement, and resource systems. No optimal population, transport network, hydraulic design, waste-processing plant, or agricultural production system is validated. Comparative reading against LEED v4.1 Cities and Communities, GSAS, Mostadam for Communities, and Estidama is a conceptual scope check, not certification or scoring. The principal overall contribution is a traceable architectural decision framework connecting climatic and vernacular logic, design search, quantitative evidence, spatial and resource preconditions, uncertainty, architectural interpretation, and disciplinary limits, rather than a single optimal form, population, or fixed masterplan.

Keywords: hot-arid climate; Yazd; climate-responsive design; architectural decision-making; residential building; Walipini; energy simulation; daylight; photovoltaics; DLI_{eq} .



Shahid Beheshti University

Faculty of Architecture and Urban Planning

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Architectural Engineering,
Building Science Track

Designing a Sustainable Urban Development Model in a Hot-Arid Climate with an Emphasis on Resource Management and Energy Consumption Reduction

By

Amirhossein Bahrami

Supervisors

Dr. Mohammadreza Hafezi

Dr. Mansoureh Tahbaz

September 2026