

Evaluation and Optimization of the Visual Performance and Spatial Configuration of a Biomimetic Pattern in Design of a Commercial Complex in a Temperate and Humid Climate

Leila Sadat Hamidian Divkolaei ^{1*} , Forough Paridokht ² 

1. Instructor, Department of Architecture and Urban Planning, Faculty of Civil Engineering and Architecture, National University of Skills, Tehran, Iran. lhamidian@tvu.ac.ir
2. Undergraduate Student, Department of Architecture and Urban Planning, Faculty of Civil Engineering and Architecture, National University of Skill, Tehran, Iran. forooghparidokht@gmail.com

Research Article

*Corresponding Author:

Leila Sadat Hamidian
Divkolaei
lhamidian@tvu.ac.ir

Received: 2025/11/23

Accepted: 2026/03/20

Keywords: Biomimetic Design, Commercial Complex, Spatial Configuration, Visual Performance, Space Syntax, Parametric Design, Genetic Algorithm.

Abstract

Shopping malls, as complex and high-traffic commercial spaces, require innovative design strategies that simultaneously address visual quality, spatial legibility, and commercial value. In this context, biomimetic approaches — drawing inspiration from natural structures in the design process — hold considerable potential for meeting these demands, provided they move beyond mere aesthetics to achieve measurable functional objectives. This study aims to evaluate and optimize the visual performance and spatial configuration of a flower-structure-based biomimetic pattern in a commercial complex in Babolsar, Iran. The research adopts an analytical-simulation methodology, implemented through parametric modeling in Rhino/Grasshopper, genetic algorithm optimization (Galapagos), and quantitative analyses of three-dimensional isovist and Space Syntax. This methodological combination enables precise measurement of spatial qualities at both urban and interior scales. At the urban scale, results indicate that positioning the building mass at the center of the site — with an isovist value of 6% — and the double-petal pattern — with a mean isovist of 4.93% — provide the best visibility performance from surrounding streets. This finding translates directly into commercial value for retail complexes where attracting customers from urban space is of central importance. At the interior scale, the optimized biomimetic pattern demonstrates statistically significant superiority over the base form across all Space Syntax indicators. Integration increased from 5.16 to 9.40, connectivity from 21.53 to 100.79, and the choice index from 47.76 to 179.28. The most striking improvement is observed in the connectivity index, at a factor of 4.7, reflecting substantially enhanced visual and spatial accessibility between spaces. The increase in choice also diversifies movement routes, preventing traffic concentration at specific points. The findings suggest that a problem-driven approach to biomimicry — in which quantitative visibility objectives are translated into design parameters — can shift biomimetic design from mere imitation of natural forms toward performance-based architectural optimization. The proposed framework provides a quantitative basis for integrating biomimetic principles with computational design and spatial analysis, while helping improve visual accessibility, spatial configuration, and the potential commercial value of retail complexes.

Cite this article: Hamidian Divkolaei, L., & Paridokht, F. (2026). Evaluation and Optimization of the Visual Performance and Spatial Configuration of a Biomimetic Pattern in Design of a Commercial Complex in a Temperate and Humid Climate. *Journal of Architectural and Environmental Research*, 3(5), 153-177. <https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2089398.1218>



Print ISSN: 2588-6363
Online ISSN: 2981-247X

<https://jaer.znu.ac.ir/>

Authors 

University of Zanjan



DOI: 10.30470/jaer.2026.2089398.1218

ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد بصری و پیکربندی فضایی الگوی بیومیمتیک در طراحی یک مجموعه تجاری در اقلیم معتدل و مرطوب

لیلا السادات حمیدیان دیوکلائی^{۱*}، فروغ پریدخت^۲

۱. مربی، گروه معماری و شهرسازی، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران. رایانامه: lhamidian@tvu.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی، گروه معماری و شهرسازی، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران. رایانامه: forooghparidokht@gmail.com

چکیده:

مقاله پژوهشی

مراکز خرید به‌عنوان فضاهای تجاری پیچیده و پرتردد به راهبردهای طراحی نوآورانه‌ای نیاز دارند که بتوانند به‌طور همزمان کیفیت بصری، خوانایی فضایی و عملکرد تجاری را مورد توجه قرار دهند. در این زمینه، طراحی بیومیمتیک، هنگامی که بر اهداف عملکردی قابل‌اندازه‌گیری و نه صرفاً تقلید زیبایی‌شناختی از طبیعت استوار باشد ظرفیت قابل‌توجهی برای بهبود عملکرد فضایی و بصری دارد. پژوهش حاضر به ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد بصری و پیکربندی فضایی یک الگوی بیومیمتیک مبتنی بر ساختار گل در یک مجموعه تجاری در بلبسر، ایران، می‌پردازد. در این پژوهش، یک روش‌شناسی تحلیلی-شیمی‌سازی با تلفیق مدل‌سازی پارامتریک در نرم‌افزارهای (Rhino/Grasshopper)، بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تحلیل ایزووویست سه‌بعدی و تحلیل نحو فضا (SpaceSyntax) توسعه یافته است. این چارچوب یکپارچه امکان ارزیابی کمی عملکرد فضایی را در دو مقیاس شهری و داخلی فراهم می‌کند. در مقیاس شهری، نتایج نشان می‌دهد که قرارگیری توده ساختمان در مرکز سایت با دستیابی به مقدار ۶ درصد برای ایزووویست، و همچنین استفاده از پیکربندی دوگلبگی، با میانگین مقدار ایزووویست ۴۰۹۳ درصد بالاترین عملکرد بصری را از خیابان‌های پیرامونی ایجاد می‌کند. این نتایج برای محیط‌های تجاری اهمیت مستقیمی دارند؛ زیرا میزان دیده‌شدن و برجستگی فضایی مجموعه از بستر شهری می‌تواند در جذب مشتریان مؤثر باشد. در مقیاس داخلی نیز، پیکربندی بیومیمتیک بهینه‌شده در مقایسه با فرم پایه، بهبودهای قابل‌توجهی را در تمامی شاخص‌های نحو فضا نشان داد. مقدار شاخص یکپارچگی (Integration) از ۵.۱۶ به ۹.۴۰، شاخص اتصال‌پذیری (Connectivity) از ۲۱۵۳ به ۱۰۰.۷۹ و شاخص انتخاب (Choice) از ۴۷.۷۶ به ۱۷۹.۲۸ افزایش یافت. چشمگیرترین بهبود مربوط به شاخص اتصال‌پذیری بود که تقریباً ۴.۷ برابر افزایش یافت و بیانگر ارتقای قابل‌توجه دسترسی بصری و فضایی میان فضاهای داخلی است. افزایش شاخص انتخاب نیز نشان‌دهنده تنوع بیشتر مسیرهای بالقوه حرکت و کاهش تمایل به تمرکز جریان حرکتی در نقاط خاص است. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهند که رویکردی مسئله‌محور به بیومیمیک که در آن اهداف کمی مربوط به دیدپذیری و عملکرد فضایی به‌طور مستقیم به متغیرهای طراحی پارامتریک ترجمه می‌شوند می‌تواند طراحی بیومیمتیک را از تقلید صرف از فرم‌های طبیعی به سمت بهینه‌سازی معماری مبتنی بر عملکرد سوق دهد. چارچوب پیشنهادی، مبنایی کمی برای تلفیق اصول بیومیمتیک با طراحی محاسباتی و تحلیل فضایی فراهم می‌کند و در عین حال می‌تواند به بهبود دسترسی بصری، پیکربندی فضایی و ظرفیت بالقوه عملکرد تجاری مجموعه‌های خریدفروشی کمک کند.

* نویسنده مسئول:

لیلا السادات حمیدیان دیوکلائی
lhamidian@tvu.ac.ir

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲

انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۱۲/۲۹

واژگان کلیدی:

طراحی زیست‌تقلید، مجتمع تجاری، پیکربندی فضایی، عملکرد بصری، نحو فضا، طراحی پارامتریک، الگوریتم ژنتیک

مقدمه

طبیعت همواره منبعی از الهام برای انسان‌ها بوده است. از زمان‌های دور، بشر تلاش کرده تا اصول و فرآیندهای طبیعی را در زندگی روزمره خود وارد کرده تا بتواند بهینه‌تر و پایدارتر عمل کند. بیومیمتیک به عنوان یک رویکرد نوین در معماری، به معماران این امکان را می‌دهد تا از فرآیندها، ساختارها و عملکردهای طبیعی الهام بگیرند و آن‌ها را در طراحی ساختمان‌ها و فضاهای زیستی اعمال کنند. این رویکرد، که بر اساس الهام از طبیعت برای حل چالش‌های انسان‌ساخته استوار است، می‌تواند به طراحی ساختمان‌هایی با مصرف انرژی بهینه، سازگار با محیط زیست و افزایش پایداری در عملکردهای خود منجر شود.

ترکیب اصول بیومیمتیک با طراحی معماری به عنوان راهبردی نویدبخش برای مواجهه با چالش‌های پیچیده محیطی مطرح شده است. مراکز خرید به عنوان ساختارهای تجاری، چالش‌های منحصربه‌فردی در توزیع نور طبیعی، آسایش بصری و ادراک فضایی ایجاد می‌کنند. از این رو نیازمند رویکردهای نوآورانه‌ای هستند که هوشمندی زیستی را با تحلیل‌های محاسباتی ترکیب کرده و همزمان تجربه‌ای موفق را برای کاربر رقم بزنند. در محیط‌های وابسته به دید، نظیر ساختمان‌های تجاری، راهبردهای بقا در بسیاری از ارگانیسم‌ها از جمله حفظ میدان دید مؤثر، ایجاد تعادل میان مواجهه و پناه‌گیری، و سازمان‌دهی فضایی هماهنگ در قالب گروه‌ها، هم‌پوشانی مفهومی قابل توجهی با مبانی تحلیل ایزووویست دارند؛ ادبیات راهیابی در ساختمان‌های چندسطحی مانند مجتمع‌های تجاری نشان می‌دهد که «دید راهبردی»^۱ به مثابه یک ورودی شناختی، می‌تواند رفتار جهت‌یابی را شکل دهد و کیفیت تصمیم‌گیری در نقاط انتخاب مسیر را بهبود دهد. از سوی دیگر، ابزارهای تحلیل دید مانند ایزووویست^۲ و تحلیل گراف دید^۳ امکان می‌دهند که درجه‌ی گشودگی، پیوستگی بصری و دسترسی دیداری به صورت کمی مدل‌سازی شود و از سطح توصیف‌های کیفی فراتر رود. بنابراین، چارچوبی که بتواند الگوی زیستی الهام‌بخش را به اهداف کمی دید نگاشت کند و سپس آن را در سناریوهای طراحی واقعی ارزیابی/بهینه‌سازی نماید، می‌تواند به پر کردن یک خلأ معنادار در پژوهش‌های تقاطعی بیومیمتیک و تحلیل دید در مجموعه‌های تجاری منجر شود.

در میان الگوهای موجود در طبیعت، ساختار گل به دلیل چهار ویژگی عملکردی منحصربه‌فرد به عنوان منبع الهام این پژوهش انتخاب شده است: (۱) سازمان‌دهی شعاعی حول یک هسته مرکزی که امکان توزیع یکنواخت دید از مرکز به پیرامون را فراهم می‌کند؛ (۲) تقارن دورانی با تقسیم‌بندی زاویه‌ای منظم که کنترل‌پذیری پارامتریک بالایی به طراح می‌دهد؛ (۳) سلسله‌مراتب فضایی از هسته به لبه که با منطق تجاری «هسته جاذب — مسیر گردش — واحدهای تجاری» انطباق دارد؛ و (۴) اثبات‌شدگی این ساختار در سیستم‌های زیستی به عنوان راه‌حل بهینه برای حداکثرسازی دسترسی به منابع مرکزی. این انطباق مفهومی، گل را از یک «الهام تصویری» به یک «نقشه عملکردی» برای بهینه‌سازی دید در مجموعه تجاری تبدیل می‌کند.

پرسش‌های پژوهش

با توجه به هدف پژوهش حاضر که ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد بصری و پیکربندی فضایی یک الگوی بیومیمتیک مبتنی بر ساختار گل در یک مجموعه تجاری است، پرسش‌های پژوهش به صورت زیر تدوین شده‌اند:

۱. کدام پیکربندی هندسی از الگوی بیومیمتیک مبتنی بر ساختار گل (از نظر تعداد بال‌ها، شعاع گسترش، ارتفاع و زاویه چرخش) بیشترین میزان رؤیت‌پذیری (ایزوویست) حجم معماری را از معابر پیرامونی در مقیاس شهری فراهم می‌کند؟
۲. بهینه‌سازی این الگوی بیومیمتیک در مقیاس داخلی، شاخص‌های نحو فضا (هم‌پیوندی، اتصال، عمق و انتخاب‌پذیری) را در مقایسه با فرم پایه رایج در منطقه چگونه تغییر می‌دهد؟

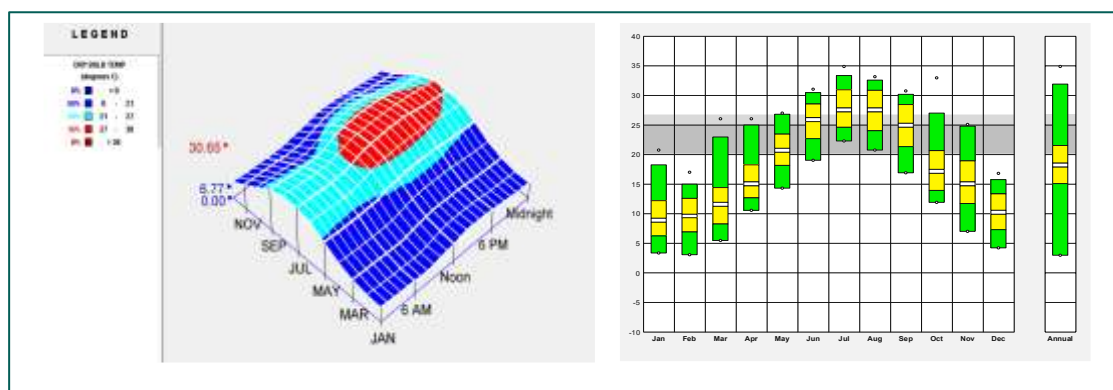
روش‌شناسی پژوهش

۱. رویکرد پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف در زمره پژوهش‌های کاربردی قرار می‌گیرد و از حیث ماهیت، مبتنی بر رویکرد تحلیلی-شبه‌سازی و طراحی محور است. در این چارچوب، به‌جای اتکا به داده‌های پیمایشی یا رفتاری کاربران، داده‌های پژوهش از طریق تولید سناریوهای طراحی در محیط مدل‌سازی دیجیتال و تحلیل کمی ساختار دید و سازمان فضایی استخراج می‌شوند (زالسکیس^۴ و همکاران، ۲۰۲۵؛ حسینی و همکاران، ۲۰۲۴؛ آیشا^۵ و همکاران، ۲۰۲۳). رویکرد اتخاذ شده امکان بررسی نظام‌مند تأثیرات هندسه‌های بیومیمتیک بر عملکرد بصری و فضایی یک مجموعه تجاری را فراهم می‌آورد. در این مطالعه، الگوی بیومیمتیک منتخب به‌عنوان یک سیستم مولد هندسی تعریف شده و با استفاده از مدل‌سازی پارامتریک، مجموعه‌ای از سناریوهای حجمی مختلف تولید می‌شود. سپس عملکرد هر سناریو از طریق شاخص‌های کمی دید و شاخص‌های نحو فضا مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل به‌صورت تطبیقی تحلیل می‌شوند. این رویکرد امکان بررسی رابطه میان منطق فرم‌زایی بیومیمتیک و کیفیت ادراک فضایی در معماری مراکز تجاری را فراهم می‌سازد.

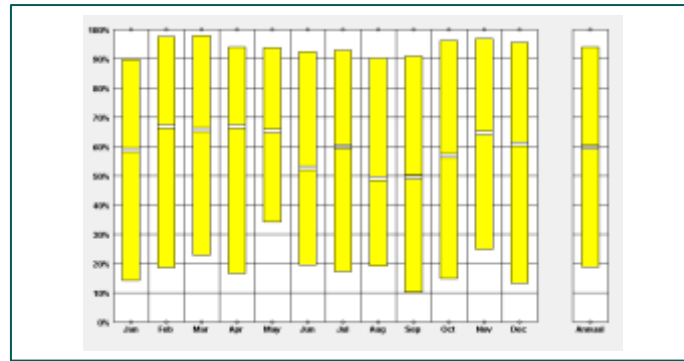
۲. معرفی سایت پژوهش

سایت مورد مطالعه در شهر بابلسر در استان مازندران واقع شده است. این شهر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شهرهای ساحلی شمال کشور، دارای ساختار شهری پویا و الگوهای حرکتی متأثر از فعالیت‌های گردشگری است. ویژگی‌های اقلیمی منطقه شامل رطوبت بالا، بارش قابل توجه و پوشش گیاهی متراکم نیز در شکل‌گیری الگوهای معماری و فضای شهری نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. این شهر از نظر مختصات جغرافیایی در ۳۶ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۵۲ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی واقع شده و بطور میانگین حدود ۲۱ متر پایین‌تر از سطح دریای آزاد قرار دارد. بیشترین دما متعلق به ماه تیر حدود ۳۳ درجه و کم‌ترین دمای هوا به ماه بهمن حدود ۳ درجه اختصاص یافته است (شکل ۱).



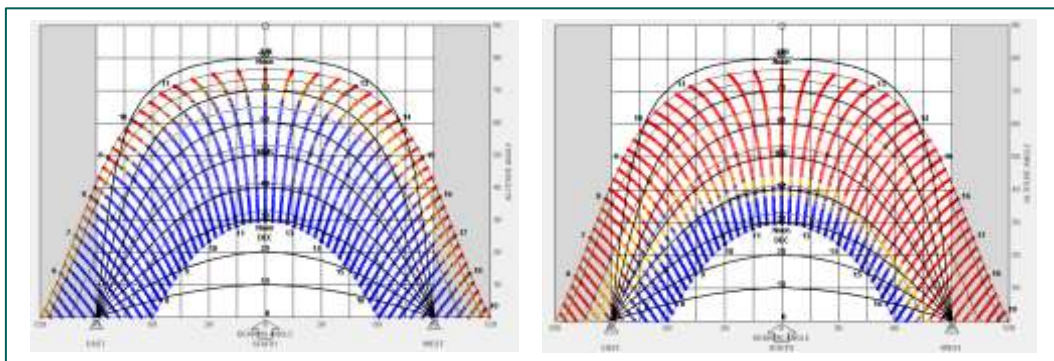
شکل ۱. میانگین دمای هوا و چارت سه بعدی دمای هوای ماهیانه در شهر بابلسر. تدوین: نرم‌افزار مشاور اقلیمی.

میزان دریافت انرژی خورشیدی و استفاده از نور طبیعی روز جهت روشنایی فضاها دو عامل اثرگذار در طراحی فضاها هستند که به شاخصه‌هایی نظیر میزان ابری یا صاف بودن آسمان نیز بستگی دارند. دیاگرام پوشش ابر نشان می‌دهد که بطور میانگین حدود ۶۱ درصد از آسمان شهر بابلسر در طول سال ابری است (شکل ۲).



شکل ۲. محدوده پوشش لبر در ماه‌های مختلف سال در شهر بلسر (تولین: نرم افزار مشاور اقلیمی)

نمودارهای خورشیدی در این منطقه بیانگر آن است که نیاز گرمایشی در این منطقه قابل توجه بوده و حدود ۱۳۴۴ ساعت نیاز به تابش آفتاب برای گرم کردن فضای داخلی وجود دارد. همچنین در فصول گرم سال ۹۵۰ ساعت آفتاب به درون ساختمان نفوذ پیدا کرده و ۳۸۴ ساعت از آن لازم است که سایه‌بان در نظر گرفته شود (شکل ۳).



شکل ۳. دیاگرام خورشیدی در فصول گرم (تصویر سمت راست) و در فصول سرد (تصویر سمت چپ) (تولین: نرم افزار مشاور اقلیمی)

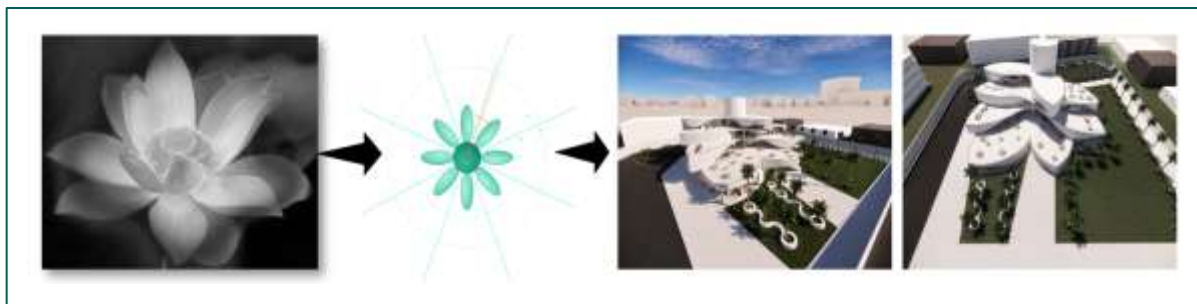
پس از تحلیل عوامل اقلیمی و استخراج راهکارهای مرتبط، گام بعدی در فرآیند شناخت سایت، مطالعه ویژگی‌های بصری و منظرین آن است. قرارگیری سایت در مجاورت محورهای حرکتی شهری و مسیرهای پرتردد، اهمیت خوانایی بصری و قابلیت رؤیت حجم معماری از فضای خیابان را افزایش می‌دهد (شکل ۴). از این رو، در این پژوهش نخستین مرحله ارزیابی عملکرد فرم معماری بر مبنای میزان رؤیت‌پذیری آن از معابر شهری تعریف شده است. این رویکرد امکان بررسی نقش فرم بیومیمتیک در تقویت هویت بصری و تبدیل بنا به یک نشانه شهری را فراهم می‌کند.



شکل ۴. معرفی سایت و موقعیت مکانی پژوهش (تولین: نگارنده)

۳. چارچوب کلی و مراحل پژوهش

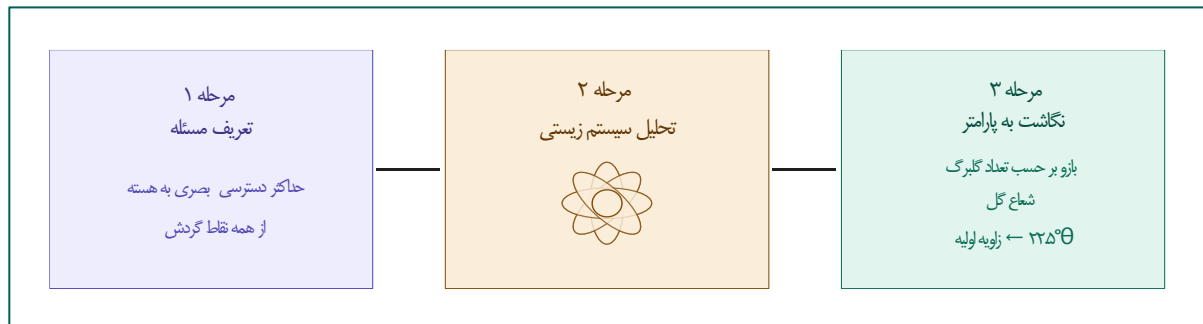
فرآیند پژوهش در چهار مرحله اصلی سازمان‌دهی شده است که به ترتیب شامل استخراج منطق بیومیمتیک، مدل‌سازی پارامتریک، تحلیل و بهینه‌سازی دید شهری، و تحلیل سازمان فضایی داخلی است. در مرحله نخست، یک الگوی طبیعی دارای ساختار سازمان‌دهی متمرکز انتخاب شده و منطق هندسی و فضایی آن بر اساس رویکرد بیومیمتیک مورد تحلیل قرار می‌گیرد (شکل ۵). در این مرحله، نحوه تمرکز، گسترش و هدایت دید در ساختار طبیعی بررسی شده و به مجموعه‌ای از قواعد هندسی قابل مدل‌سازی تبدیل می‌شود. این قواعد به صورت پارامترهای طراحی شامل تعداد بازوها، شعاع گسترش، ارتفاع، زاویه چرخش و موقعیت استقرار در سایت تعریف می‌شوند.



شکل ۵. معرفی الگوی طراحی الهام گرفته شده از طبیعت (تئوین: نگارنده خروجی از نرم افزار روبات).

الگوی استخراج‌شده دارای ساختاری شعاعی مبتنی بر تقارن دورانی است که سازمان فضایی آن از توزیع منظم عناصر پیرامون یک هسته مرکزی شکل می‌گیرد. در این ساختار، تقسیم دایره به ۱۶ بخش مساوی با زاویه ۲۲.۵ درجه، مبنای شکل‌گیری هندسه کلی قرار می‌گیرد. این نظم زاویه‌ای اولیه، ضمن ایجاد تعادل بصری، امکان هدایت کنترل‌شده دید، توزیع متعادل فضاها و توسعه سلسله‌مراتبی سازمان فضایی را فراهم می‌سازد. علاوه بر این، زاویه ۲۲.۵ درجه از منظر اقلیمی و عملکردی نیز دارای اهمیت است؛ زیرا این نوع چرخش و توزیع شعاعی می‌تواند به دریافت متعادل‌تر تابش خورشیدی، کاهش سایه‌اندازی نامطلوب، و افزایش دسترسی بصری و نور طبیعی در بخش‌های مختلف حجم کمک کند. از سوی دیگر، تناسب متعادل و هماهنگی فرمی موجود در ساختار گل، به عنوان یکی از عوامل اصلی زیبایی بصری آن شناخته می‌شود. تکرار منظم گلبرگ‌ها پیرامون مرکز، همراه با ریتم تدریجی تغییر ابعاد و جهت‌گیری عناصر، نوعی وحدت و پیوستگی بصری ایجاد می‌کند که درک فضایی و خوانایی فرم را تقویت می‌نماید. این ویژگی‌ها در فرآیند طراحی به عنوان الگویی برای سازمان‌دهی دید و کیفیت بصری مجموعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ به گونه‌ای که فرم نهایی بتواند ضمن ایجاد جذابیت بصری در مقیاس شهری، هدایت دید کاربران و شکل‌گیری کانون‌های بصری را نیز به صورت کنترل‌شده سامان‌دهی کند. انتخاب ساختار گل به عنوان منبع الهام بیومیمتیک در این پژوهش بر اساس یک استدلال سه مرحله‌ای «تعریف مسئله - تحلیل سیستم زیستی - نگاشت به پارامترهای طراحی» صورت گرفته است. در مرحله اول، مسئله اصلی طراحی مجموعه تجاری به صورت دقیق تعریف شد: چگونه می‌توان حداکثر دسترسی بصری به هسته مرکزی جاذب را از تمامی نقاط گردش کاربران تضمین کرد؟ در مرحله دوم، ساختار گل به عنوان یکی از موفق‌ترین راه‌حل‌های طبیعی برای «توزیع بهینه دسترسی به مرکز» شناسایی شد: گلبرگ‌ها با توزیع شعاعی خود، تمامی زوایای پیرامونی را پوشش می‌دهند و مسیرهای دید مستقیم به مرکز (پرچم) را در تمام جهات حفظ می‌کنند. این ویژگی دقیقاً با هدف «حداکثرسازی دسترسی بصری کاربران به هسته تجاری» همپوشانی دارد. در مرحله سوم، منطق این ساختار — تقسیم زاویه‌ای منظم، نسبت شعاع هسته به بازوها، و سلسله‌مراتب ارتفاعی — به پارامترهای قابل‌سنجش در محیط گرس هاپر ترجمه شد (شکل ۶). بدین ترتیب، گل نه به دلیل جذابیت بصری، بلکه به دلیل منطق

فضایی اثبات شده‌اش به عنوان منبع الهام برگزیده شد؛ و این همان وجه تمایز رویکرد مسئله محور از تقلید صرف فرمی است که (Badarnah (2017 و Ilieva et al. (2022 بر آن تأکید کرده‌اند.



شکل ۶. رویکرد مساله محور بیومیمتیک از تعریف مساله تا طراحی پارامترها (تدوین: نگارنده)

۴. متغیرها و توابع هدف

در این پژوهش، متغیرهای تصمیم شامل مجموعه‌ای از پارامترهای هندسی مرتبط با الگوی بیومیمتیک هستند که عبارت‌اند از: تعداد بازوهای الگو، شعاع گسترش، ارتفاع حجم و زاویه چرخش. تغییر در این پارامترها منجر به تولید پیکربندی‌های متفاوت فضایی و حجمی می‌شود (جدول ۱).

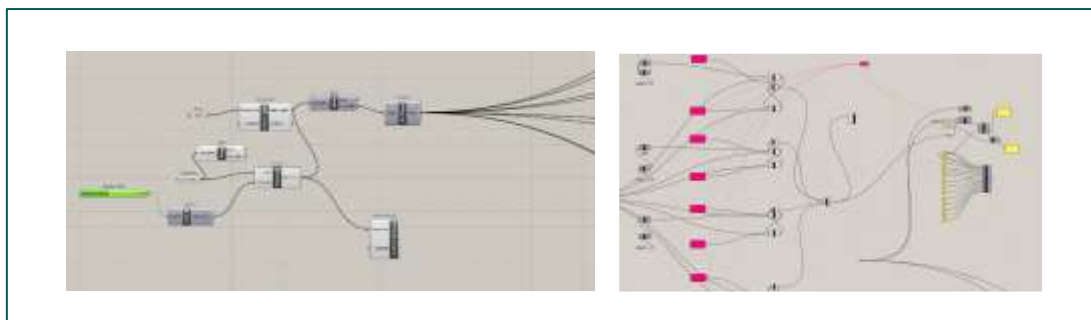
جدول ۱. معرفی پارامترهای طراحی ساختار بیومیمتیک (تدوین: نگارنده)

متغیرهای طراحی	معرف	بخش الگوبرداری	دامنه و واحد	تأثیر فضایی
تعداد بال‌ها	تعداد شاخه‌های شعاعی از مرکز	تعداد گلبرگ‌ها	۱-۳	تعیین جهت گیری
شعاع گسترش	فاصله از مرکز تا انتهای بال مورد نظر	نسبت طلایی	۱۰-۳۰ متر	مقیاس و حوزه نفوذ
ارتفاع	بعد عمودی ساختار	تناسب حجمی	۳-۱۲ متر	سلسله مراتب فضایی عمودی
زاویه چرخش	جهت گیری نسبت به شمال	زاویه طلایی	۰-۳۶۰ درجه	بهینه سازی دید

به منظور ارزیابی عملکرد سناریوهای طراحی، چند تابع هدف تعریف شده است. این توابع شامل بیشینه‌سازی درصد نقاطی است که حجم بیومیمتیک از خیابان قابل مشاهده است، بیشینه‌سازی مساحت ایزووویست در نقاط کلیدی مسیرهای حرکتی، افزایش یکپارچگی فضایی در پیرامون هسته مرکزی مجموعه و تقویت رؤیت پذیری در نقاط تصمیم‌گیری داخلی است.

۵. فرآیند بهینه‌سازی

در مرحله دوم، الگوی استخراج شده در محیط نرم‌افزار راینو و افزونه گرس هاپر به صورت یک سیستم پارامتریک پیاده‌سازی می‌شود (شکل ۷). طراحی پارامتریک امکان تعریف روابط میان اجزای هندسی و تولید مجموعه‌ای از سناریوهای مختلف طراحی را فراهم می‌کند. در نتیجه، تغییر در مقادیر پارامترها منجر به تولید گزینه‌های متنوع حجمی می‌شود که قابلیت ارزیابی عملکردی دارند (مارتین -مارسکال^۶ و همکاران، ۲۰۲۵).



شکل ۷. پیاده سازی الگوی استخراج شده در محیط نرم افزار Rhino و افزونه Grasshopper به صورت یک سیستم پارامتریک (تصویر: نگارنده)

در مرحله سوم، عملکرد بصری فرم معماری در مقیاس شهری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور از تحلیل ایزووویست استفاده می‌شود. ایزووویست به عنوان یکی از ابزارهای اصلی تحلیل دید، محدوده قابل مشاهده از یک نقطه مشخص در فضا را توصیف می‌کند و امکان سنجش کیفیت ادراک بصری محیط را فراهم می‌سازد. در این پژوهش، شاخص‌هایی نظیر مساحت ایزووویست، محیط ایزووویست و درصد رؤیت‌پذیری حجم معماری از نقاط کلیدی خیابان مورد تحلیل قرار می‌گیرند. به منظور یافتن پیکربندی بهینه فرم، فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک اجرا می‌شود (گاها، ۲۰۲۳). در این فرآیند، مقادیر پارامترهای هندسی به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که بیشترین میزان رؤیت‌پذیری و تسلط بصری حجم از فضای خیابان حاصل شود. بدین ترتیب، فرم بهینه از منظر ادراک شهری پیش از ورود به تحلیل‌های داخلی تثبیت می‌شود.

برای یافتن ترکیب بهینه پارامترهای طراحی از الگوریتم ژنتیک در محیط گرس هاپر و افزونه گالا پاگوس^۸ استفاده شده است (جانسون^۹، ۲۰۲۲). الگوریتم ژنتیک با الهام از فرآیند انتخاب طبیعی عمل می‌کند و از طریق تولید جمعیتی از پاسخ‌های اولیه، ارزیابی عملکرد آن‌ها و تکرار فرآیند انتخاب و ترکیب، به تدریج به پاسخ‌هایی با عملکرد بهتر دست می‌یابد. این الگوریتم به ویژه برای مسائل طراحی معماری که دارای روابط پیچیده، غیرخطی و چندمتغیره هستند کارآمد است. الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از زیرمجموعه‌های الگوریتم تکاملی، از اصول انتخاب طبیعی استفاده می‌کند تا مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها را که به راه‌حل بهینه نزدیک هستند، استخراج کند.

این الگوریتم، مبتنی بر جمعیت است و به طور موثری می‌تواند در مسایلی غیرخطی که ناپیوستگی و یا تعداد زیادی کمینه محلی دارند به کار برده شود و به همین دلیل به طور گسترده‌ای در حوزه بهینه‌سازی ساختمان به کار می‌رود در سطح پایه، سناریوهای مختلف به صورت گسسته تولید و شاخص‌های آن‌ها محاسبه می‌شود و سپس بهترین سناریوها بر اساس معیارهای تعریف شده انتخاب می‌گردند.

در صورت امکان، می‌توان از روش‌های ساده‌ی بهینه‌سازی پارامتریک در محیط نرم‌افزاری (مانند الگوریتم‌های جست‌وجوی تکراری یا ابزارهای بهینه‌سازی تعبیه شده) نیز استفاده کرد تا ترکیب‌های برتر پارامترها به صورت خودکار پیشنهاد شود (پیله‌چی‌ها، ۲۰۲۰).

در مرحله چهارم، پس از تعیین فرم بهینه، سازمان فضایی داخلی مجموعه با استفاده از نظریه نحو فضا^{۱۰} مورد تحلیل قرار می‌گیرد. نظریه‌ی اسپیس سینتکس یا تکنیک نحو فضا در میان سامانه‌های منطقی پژوهش بیش از سایر نظریه‌ها در حوزه‌ی معماری و شهرسازی مورد توجه بوده است (بیتی و همکاران، ۲۰۲۱). نظریه‌ی نحو فضا به معنی بررسی ارتباط هر واحد فضایی در یک مجموعه با فضاهای همجوار خود است که این مفهوم درست همانند بررسی یک واژه در داخل یک متن و ارتباط آن با دیگر واژه‌هاست (بشیرزاده و همکاران، ۲۰۲۲). در واقع نظریه‌ی نحو فضا در ساخت مایه‌ی خویش تلاشی در برقراری رابطه‌ی علی در میان جامعه‌ی انسانی و کالبد معماری دارد. از این رو جهت پیش برد پژوهش حاضر از این تکنیک استفاده شده است.

در این مرحله، تحلیل گراف دید^{۱۱} برای بررسی ساختار دید و ارتباطات فضایی در داخل مجموعه به کار گرفته می‌شود. شاخص‌های اصلی مورد بررسی شامل هم‌پیوندی^{۱۲}، اتصال^{۱۳} و عمق^{۱۴} هستند که به ترتیب بیانگر میزان یکپارچگی فضایی، تعداد ارتباطات مستقیم هر فضا و فاصله توپولوژیک میان فضاها در شبکه فضایی هستند. هم‌پیوندی اصلی‌ترین مفهوم چیدمان فضا است. هم‌پیوندی یک نقطه، نشان دهنده‌ی پیوستگی یا جدایی یک فضا از سیستم کلی یا سایر فضاها است. فضایی هم‌پیوندی زیادی دارد که با فضاها دیگر یکپارچگی داشته باشد (طباطبایی و همکاران، ۲۰۱۶).

هرچه به میزان هم‌پیوندی یک فضا اضافه شود، آن فضا انسجام بیشتری با دیگر فضاها دارد. هم‌پیوندی در روش چیدمان فضا مفهومی توپولوژیک (ارتباطی) و نه مفهومی فاصله‌ای و متریک دارد. اتصال از واضح‌ترین مفاهیم تحلیل فضایی بوده که به معنای ارتباط فضایی است. اتصال به تعداد فضاهایی اطلاق می‌شود که فضا بدون فاصله به آن‌ها متصل می‌شود. هرچه تعداد اتصالات بیشتر باشد، ارتباطات با دیگر فضاها بیشتر خواهد شد.

محورهایی که ارزش ارتباطی بیشتری دارند، از جهات مختلف در دسترس‌تر بوده و به مردم آزادی عمل بیشتری در انتخاب می‌دهند. عمق به عنوان حداقل مراحل لازم برای رسیدن به یک فضا از مکان دیگر تعریف می‌گردد. عمق به معنای میزان جداافتادگی و ایزولگی است. در نتیجه‌ی این جدا افتادگی معمولاً فضاها امنیت پایین‌تری نسبت به سایر نقاط داشته و برای تعاملات اجتماعی مناسب نیستند (چراغی فر و همکاران، ۲۰۲۳).

تحلیل این شاخص‌ها امکان ارزیابی میزان خوانایی فضایی، کنترل بصری و کیفیت دسترسی در سازمان فضایی مجموعه را فراهم می‌آورد. در نهایت، پس از انجام فرآیند بهینه‌سازی و تحلیل‌های فضایی، نتایج حاصل از سناریوهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده و تأثیر الگوی بیومیمتیک بر کیفیت ادراک بصری و سازمان فضایی مجموعه تجاری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

پیشینه پژوهش

در ادامه، مبانی نظری و پیشینه پژوهشی مرتبط با بیومیمتیک در معماری تجاری و تحلیل دید مرور می‌شود؛ طبیعت همواره منبعی از الهام برای انسان‌ها بوده است. از زمان‌های دور، بشر تلاش کرده تا اصول و فرآیندهای طبیعی را در زندگی روزمره خود وارد کرده تا بتواند بهینه‌تر و پایدارتر عمل کند. در دنیای معماری نیز، این تمایل به بهره‌برداری از طبیعت همچنان ادامه دارد (الملیگی^{۱۵}، ۲۰۱۶؛ الیواو^{۱۶} همکاران، ۲۰۲۲). بیومیمتیک به عنوان یک رویکرد نوین در معماری، به معماران این امکان را می‌دهد تا از فرآیندها، ساختارها و عملکردهای طبیعی الهام بگیرند و آن‌ها را در طراحی ساختمان‌ها و فضاهای زیستی اعمال کنند. این رویکرد، که بر اساس الهام از طبیعت برای حل چالش‌های انسان‌ساخته استوار است، می‌تواند به طراحی ساختمان‌هایی با مصرف انرژی بهینه، سازگار با محیط زیست و افزایش پایداری در عملکردهای خود منجر شود.

ادغام اصول بیومیمتیک در طراحی معماری به عنوان راهبردی نویدبخش برای مواجهه با چالش‌های پیچیده محیطی مطرح شده است (حسینی و همکاران، ۲۰۲۴؛ حسن و همکاران، ۲۰۲۳). مراکز خرید به عنوان ساختارهای تجاری در مقیاس بزرگ با بارهای داخلی بالا و پلان‌های عمیق، چالش‌های منحصربه‌فردی در توزیع نور طبیعی، آسایش بصری و ادراک فضایی ایجاد می‌کنند (یلماز^{۱۷} و همکاران، ۲۰۲۵). از این رو نیازمند رویکردهای نوآورانه‌ای هستند که هوشمندی زیستی را با تحلیل‌های محاسباتی ترکیب کرده و همزمان تجربه‌ای موفق را برای کاربر رقم بزنند.

در محیط‌های وابسته به دید، نظیر ساختمان‌های تجاری، راهبردهای بقا در بسیاری از ارگانیسم‌ها از جمله حفظ میدان دید مؤثر، ایجاد تعادل میان مواجهه و پناه‌گیری، و سازمان‌دهی فضایی هماهنگ در قالب گروه‌ها، هم‌پوشانی مفهومی قابل توجهی با مبانی تحلیل ایزووویست دارند؛ تحلیلی که نقش گشودگی، محصوریت و پیوستگی فضایی را در شکل‌دهی

به ادراک و الگوهای حرکتی انسان بررسی می‌کند (پتريک^{۱۸}، ۲۰۲۴). بر این اساس، به کارگیری بیومیمتیک در چارچوب تحلیل ایزووویست صرفاً به الهام‌گیری شکلی محدود نمی‌شود، بلکه رویکردی تحلیلی برای مبتنی‌سازی ارزیابی پیوستگی بصری و وضوح جهت‌یابی بر راهبردهای فضایی آزموده‌شده در سیستم‌های طبیعی به‌شمار می‌رود؛ امری که در نهایت به ارتقای تجربه کاربر و بهبود عملکرد کارکردی فضاهای تجاری منجر می‌شود.

در مجموعه‌های تجاری معاصر، تجربه‌ی فضایی تا حد زیادی به "ساختار دید" وابسته است؛ زیرا دید رو به هسته‌های جاذب^{۱۹}، مسیرهای اصلی و مقصدهای کلیدی، مستقیماً با راهیابی، ادراک امنیت، کاهش سردرگمی و حتی الگوهای مکث و حرکت مرتبط است (گت مراد^{۲۰} و همکاران، ۲۰۲۳؛ جبرا^{۲۱} و همکاران، ۲۰۲۵).

با وجود این ظرفیت‌ها، هنوز در بسیاری از پروژه‌های بیومیمتیک، به‌خصوص در فضاهای تجاری با الگوهای الهام‌گرفته از طبیعت (مثلاً سازمان‌یافتگی گل‌مانند، شعاعی-لایه‌ای، یا آرایش‌های گلبرگی) غالباً در سطح هندسه‌ی فرمی متوقف می‌شوند و کمتر به‌صورت پارامتریک و بهینه‌سازی‌شده برای رسیدن به اهداف عملکردی نظیر "حداکثرسازی دید مشترک به هسته تجاری" توسعه می‌یابند (وبرووغ^{۲۲} و همکاران، ۲۰۲۳).

۱. بیومیمتیک در معماری تجاری: از الهام‌گیری فرمی تا ارزیابی عملکردی

طراحی بیوفیلیک و بیومیمتیک در فضاهای تجاری از دهه‌ی ۲۰۱۰ به‌طور فزاینده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. جوی^{۲۳} و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که ادغام عناصر طبیعی در محیط‌های خرده‌فروشی — از جمله پوشش گیاهی، نور طبیعی و فرم‌های ارگانیک — تأثیر مثبتی بر کاهش استرس، آسایش ادراک‌شده و مدت‌زمان حضور کاربران دارد. ویژگی کلیدی این مطالعه، اتکا به داده‌های تجربی در محیط‌های واقعی بود؛ اما محدودیت اصلی آن در این است که تأثیر فرم معماری بر شاخص‌های کمی دید و راهیابی مورد بررسی قرار نگرفت.

گام نظری مهم‌تری توسط بدرناه^{۲۴} (۲۰۱۷) برداشته شد که تمایز اساسی میان "الهام‌گیری فرمی" و «بیومیمتیک کارکردی» را مطرح کرد. وی استدلال کرد که بیومیمتیک واقعی زمانی محقق می‌شود که منطق سازمانی سیستم‌های زیستی — نه صرف ظاهر آن‌ها — به پارامترهای طراحی قابل‌سنجش ترجمه شود. این چارچوب مفهومی پایه‌ای برای توسعه رویکرد مسئله‌محور در بیومیمتیک فراهم کرد، اما فاقد ابزارهای عملیاتی برای سنجش کمی عملکرد دید بود.

ایلیوا و همکاران (۲۰۲۲) این بحث را با معرفی چارچوب «بیومیمتیک برای پایداری» تعمیق دادند و هشدار دادند که بدون معیارهای ارزیابی روشن، ادعاهای بیومیمتیک می‌توانند مبهم و غیرقابل‌تکرار بمانند. آن‌ها بر ضرورت تعریف «هدف عملکردی» پیش از انتزاع الگوی زیستی تأکید کردند. با این حال این پژوهش نیز رویکردی نظری داشته و به اثبات تجربی این چارچوب در پروژه‌های معماری واقعی نپرداخت.

وربوغ و همکاران (۲۰۲۳) در یک مرور جامع، بیشتر پروژه‌های بیومیمتیک در معماری را بررسی کردند و نشان دادند که اکثر آن‌ها در مرحله «الهام/انتزاع» متوقف می‌شوند و کمتر مسیر استاندارد برای تبدیل الگوی زیستی به توابع هدف کمی قابل‌محاسبه ارائه می‌دهند. این یافته خلأ اصلی را در حوزه‌ی تلاقی بیومیمتیک و تحلیل عملکردی مجموعه‌های تجاری آشکار می‌سازد.

۲. تحلیل دید (Isovist/VGA) به‌عنوان ابزار کمی‌سازی: از هندسه تا رفتار

پایه‌ی نظری تحلیل دید در فضاهای معماری توسط ترنز^{۲۵} و همکاران (۲۰۰۱) بنا نهاده شد که با توسعه روش گراف دید (VGA)، امکان محاسبه ویژگی‌های محلی و سراسری دسترسی بصری را فراهم کردند. این مطالعه نقطه‌ی عطفی بود زیرا ایزووویست را از یک توصیف هندسی صرف به ابزاری برای تحلیل پیکربندی فضایی تبدیل کرد. محدودیت

اصلی این رویکرد اولیه، دوبعدی بودن تحلیل و عدم توانایی در لحاظ کردن دید در راستای عمودی — امری که در مراکز تجاری چندطبقه بسیار مهم است — بود.

جهش کیفی مهم با معرفی ایزوویست سه‌بعدی توسط کروکار^{۲۶} و همکاران (۲۰۲۱) رخ داد. آن‌ها نشان دادند که تفاوت ادراک دید در راستای عمودی/افقی و نقش «بدن مشاهده‌گر» در محیط‌های معماری را می‌توان با این روش مدل‌سازی کرد و پیش‌بینی دقیق‌تری از ادراکات فضایی نسبت به ایزوویست دوبعدی ارائه داد. با این حال این پژوهش بر محیط‌های آزمایشگاهی تمرکز داشت و پیوند آن با بهینه‌سازی پارامتریک در طراحی واقعی اثبات نشده بود.

اسنپکوا^{۲۷} و همکاران (۲۰۲۳) گامی مهم در اتصال ایزوویست به رفتار واقعی برداشتند و نشان دادند که برخی ویژگی‌های ایزوویستی مانند فشردگی می‌توانند با تصمیم‌های حرکتی در سناریوهای اضطراری همبسته باشند. این یافته نشان داد که ایزوویست صرفاً «هندسه» نیست بلکه می‌تواند به رفتار پیوند بخورد. این مطالعه بر شرایط اضطراری تمرکز داشت و کاربرد آن در محیط‌های تجاری عادی مستقیماً بررسی نشد.

گت مراد و همکاران (۲۰۲۴) در محیط‌های عمودی چندسطحی نشان دادند که دیده‌شدن عناصر کلیدی (ورودی، خروجی، مقصد) می‌تواند در نبود نشانه‌ها، محرک اصلی تصمیم‌گیری جهت‌یابی باشد. این پژوهش اهمیت «دید راهبردی» را به‌عنوان ورودی شناختی مستقیم در راهیابی ساختمان‌های چندطبقه اثبات کرد. با این حال تلاقی این یافته با الگوهای بیومیمتیک و بهینه‌سازی پارامتریک در مجموعه‌های تجاری بررسی نشد.

۳. نحو فضا در مراکز تجاری: از توصیف کیفی به بهینه‌سازی کمی

سفلائی و همکاران (۲۰۱۷) از ابزارهای تحلیل دید و نحو فضا برای سنجش پیامدهای فضایی آتریوم‌ها استفاده کردند و نشان دادند که عناصر دسترسی عمودی نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت پیکربندی فضایی دارند. ارزش این مطالعه در اثبات کارآمدی ابزارهای کمی در ارزیابی سازمان فضایی پیچیده بود، اما به بهینه‌سازی پارامتریک نپرداخت.

گیلبوا^{۲۸} و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که افزایش مواجهه بصری با محصولات یا نواحی در مراکز تجاری می‌تواند احتمال برخورد و بالقوه فروش را افزایش دهد. این مطالعه اهمیت راهبردی رؤیت‌پذیری را در طراحی تجاری اثبات کرد، اما رابطه میان الگوهای هندسی — به‌ویژه الگوهای بیومیمتیک — و شاخص‌های کمی نحو فضا را بررسی نکرد.

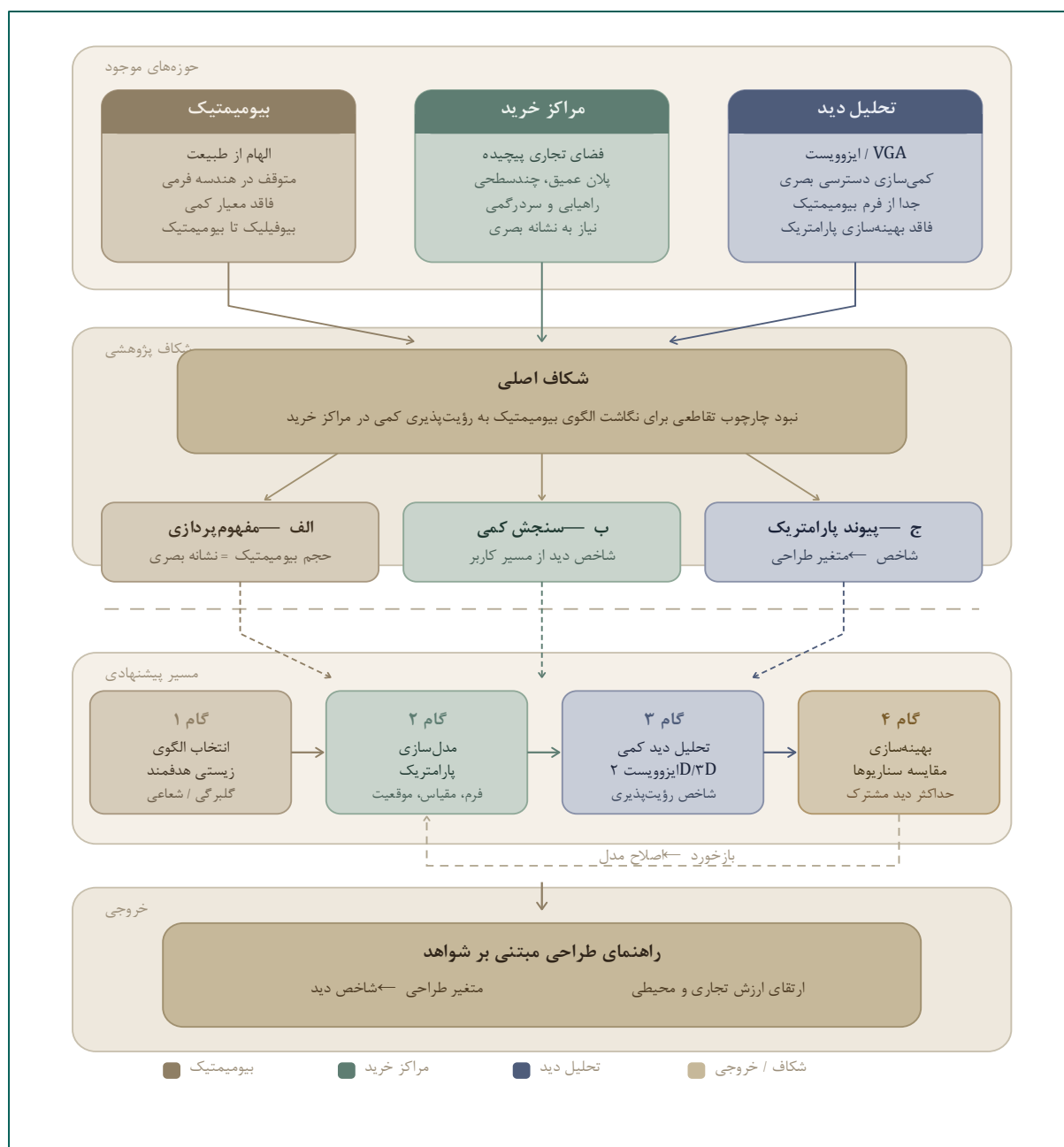
ازانی^{۲۹} و همکاران (۲۰۲۵) پیکربندی فضایی یک مرکز خرید را با رویکرد نحو فضا ارزیابی کردند و نشان دادند که خوانایی و تداوم خطوط دید در پلان‌های خطی تجربه راهیابی را تسهیل می‌کند. خلاصه‌ای در این مطالعه، بررسی نکردن الگوهای غیرخطی و شعاعی — مانند الگوهای بیومیمتیک — و تأثیر آن‌ها بر شاخص‌های نحو فضا است.

۴. جمع‌بندی: خلا پژوهشی و ضرورت پژوهش حاضر

مرور پیشینه سه محور تکاملی روشن را آشکار می‌سازد. نخست، بیومیمتیک در معماری از الهام‌گیری فرمی صرف (جوی و همکاران، ۲۰۱۰) به چارچوب‌های نظری کارکردی تکامل یافته، اما هنوز مسیر عملیاتی برای تبدیل الگوی زیستی به اهداف کمی در تحلیل دید مراکز تجاری ارائه نشده است. دوم، تحلیل دید از هندسه دوبعدی (ترنر و همکاران، ۲۰۰۱) به ایزوویست سه‌بعدی (کروکار و همکاران، ۲۰۲۱) و اثبات پیوند آن با رفتار راهیابی (گت مراد و همکاران، ۲۰۲۴) پیشرفت کرده، اما ترکیب آن با مدل‌سازی پارامتریک و بهینه‌سازی در الگوهای بیومیمتیک مجموعه‌های تجاری مستند نشده است.

سوم، نحو فضا در مراکز خرید برای ارزیابی سازمان فضایی به‌کار رفته (ازانی و همکاران، ۲۰۲۵؛ سفلائی و همکاران، ۲۰۱۷)، اما هیچ پژوهشی به‌طور همزمان این شاخص‌ها را با فرآیند بهینه‌سازی پارامتریک الگوهای بیومیمتیک مرتبط

نساخته است. پژوهش حاضر این سه خلأ را از طریق یک چارچوب یکپارچه شامل استخراج پارامتریک الگوی بیومیمتیک، بهینه‌سازی ایزووویست شهری، و ارزیابی سازمان فضایی داخلی با نحو پوشش می‌دهد (شکل ۸). شکل ۸ بیانگر نمایش تصویری سه خلأ اصلی شناسایی شده در پیشینه پژوهش (الهام‌گیری فرمی صرف در بیومیمتیک، محدودیت تحلیل دوبعدی ایزووویست، و عدم پیوند نحو فضا با بهینه‌سازی پارامتریک) و نشان دادن مسیری است که



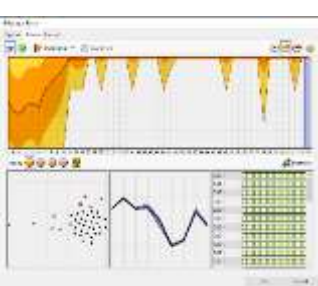
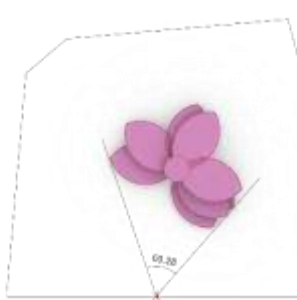
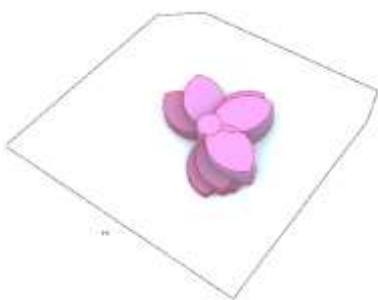
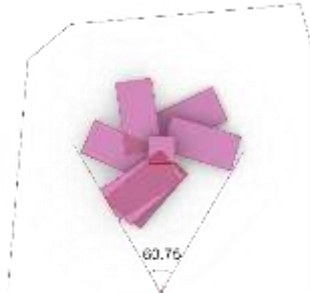
شکل ۸. چارچوب شکاف پژوهشی و مسیر پیشنهادی پژوهش (تلوین: نگارنده)

پژوهش حاضر برای پوشش این خلأها از طریق ترکیب استخراج پارامتریک الگوی زیستی، بهینه‌سازی ایزووویست شهری و تحلیل نحو فضای داخلی دنبال می‌کند.

تحلیل مفاهیم

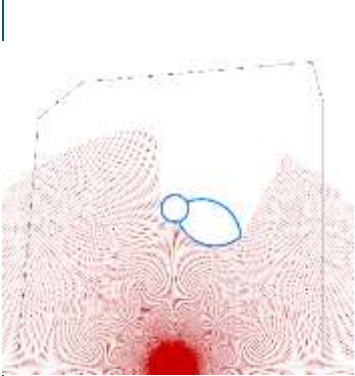
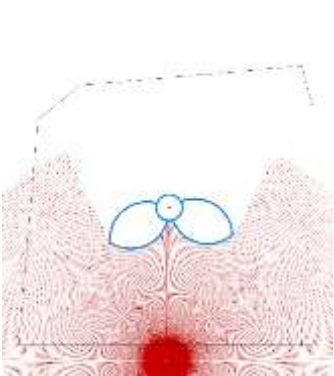
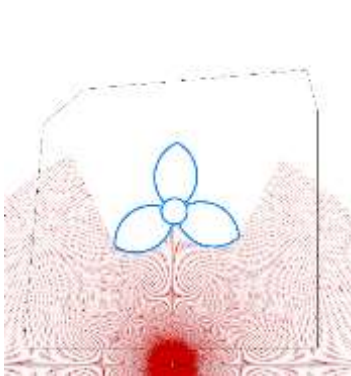
در این بخش نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام‌شده در چارچوب روش تحقیق ارائه می‌شود. ابتدا نتایج ارزیابی رؤیت‌پذیری حجم بیومیمتیک در مقیاس شهری بر اساس تحلیل ایزووویست و فرآیند بهینه‌سازی پارامتریک بیان می‌گردد. سپس در ادامه، سازمان فضایی داخلی مجموعه با استفاده از تحلیل گراف دید در چارچوب نظریه نحو فضا تحلیل شده و شاخص‌هایی نظیر هم‌پیوندی، اتصال و عمق فضایی برای ارزیابی خوانایی و کیفیت دسترسی فضایی ارائه می‌شود. به منظور دستیابی به نتایج با اعتبار بیشتر، در ابتدا یک نمونه‌ی کنترل با فرم متداول ساخت مجموعه‌های تجاری در این منطقه ارزیابی و بطور مقایسه‌ای با الگوی بیومیمتیک پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم شباهت در زاویه مطلوب و بهینه حاصل شده از نتایج بهینه‌سازی برای هر دو حالت (فرم پایه و الگوی بیومیمتیک)، میزان درصد آیزووویست حاصل شده برای الگوی بیومیمتیک (۷ درصد) به مراتب بالاتر از نتایج مشابه در فرم پایه (۲ درصد) است (جدول ۲).

جدول ۲. مقایسه نتایج بهینه‌سازی بیشترین مساحت دید در دو فرم: الگوی بیومیمتیک در تصویر بالا و الگوی پایه در تصویر پایین (توین: نگارنده)

فرآیند یافتن فرم بهینه	نما از بالا	دید سه بعدی
		
		

در ارزیابی اولیه ابتدا شاخص آیزووویست برای طرح‌هایی به ترتیب با ۱، ۲ و ۳ پره مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۳). پیش از ارزیابی در نظر گرفته شد تا نقطه میانی عرض خیابان در تماس با ضلع جنوبی زمین به عنوان نقطه شاخص دید به پروژه انتخاب گردد.

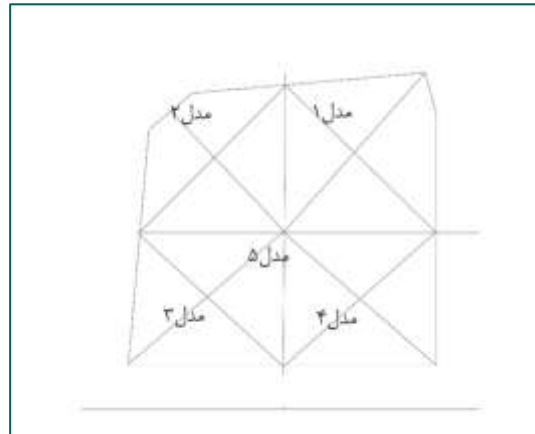
جدول ۳. مقایسه نتایج پهنه سازی بیشترین مساحت دید در دو فرم: الگوی بیومیمتیک در تصاویر بالا و الگوی پایه در تصاویر پایین (تنوین: نگارنده)

تک بال	دو بال	سه بال	تعداد بال های الگوبردار ی شده
			
۴.۴	4.93	2.33	میانگین ایزوویست سه بعدی به درصد

جدول ۳ بیانگر نمایش هم‌زمان تصویری و عددی نتایج ایزوویست برای سه پیکربندی تک‌پره، دوپره و سه‌پره است تا مبنای انتخاب الگوی دوپره به عنوان پیکربندی برتر برای ادامه پژوهش، هم از نظر کمی و هم از نظر کیفیت بصری میدان دید، برای خواننده روشن شود.

نتایج مطالعات این بخش نشان می‌دهد که میانگین ایزوویست سه بعدی در الگوی بیومیمتیک دو پر با مقدار ۴.۹۳ درصد بیشتر از دو الگوی دیگر تک پر با میزان ۴.۴ درصد و سه پر با میزان ۲.۳۳ درصد است. از این رو الگوی دو پر به عنوان الگوی اولیه در هر طبقه در نظر گرفته شد.

از طرفی با توجه متغیر موقعیت بنا در زمین و همچنین ترسیم خطوط بالقوه سایت، ۵ نوع جانمایی اولیه شناسایی شد که ۴ نقطه در مراکز ۴ گانه سایت و یک نقطه در مرکز لحاظ گردید (شکل ۹). نتایج مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین سطح ایزوویست ایجاد شده در مرکز زمین (مدل ۵) با میزان ۶ درصد است. این میزان برای بخش‌های دیگر سایت در جدول ۴ درج گردیده است.



شکل ۹. آتراتیو های موقعیت بنا در زمین با توجه به لولویت دید و دریافت بیشترین سطح آیزوویست سه بعدی (تولین: نگارنده)

جدول ۴. مقایسه میانگین آیزوویست‌های سه بعدی حاصل شده در ۵ آتراتیو موقعیت بنا در زمین (تولین: نگارنده)

مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴	مدل ۵	
					موقعیت مکانی بنا در زمین
۳٪	۳۶٪	۴٪	۴۳٪	۶٪	میانگین آیزوویست به درصد

با توجه به نتایج بدست آمده از میزان آیزوویست بیشتر در مدل دو بالی به منظور ایجاد دید حداکثری به پروژه در نظر گرفته شد تا هر طبقه متشکل از دو پره فرم گل با زاویه پارامتریک بین ۰ تا ۳۶۰ درجه و تا ۴ طبقه با ارتفاع هر طبقه ۵ متر به طور مجزا به عنوان متغیر لحاظ گردد. آنچه که حاصل می‌گردد در نهایت بیشترین میزان سطح آیزوویستی است که حجم بهینه شده از نظر دید به مخاطب خواهد داشت (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. حجم بهینه سازی شده با بیشترین درصد سطح آیزوویست دید از خیابان (تلوین: نگارنده)

جدول ۵. تعیین زوایای بهینه بین بال‌های ساختمانی بر اساس کسب بیشترین آیزوویست برای طبقات تعیین شده (تلوین: نگارنده)

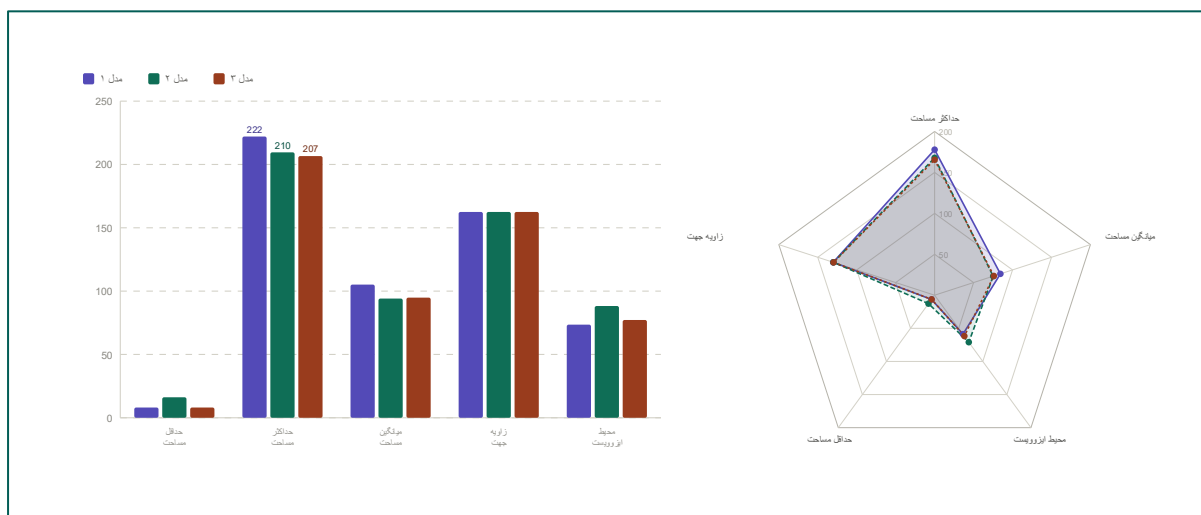
طبقه سوم	طبقه دوم	طبقه اول	طبقه همکف	موقعیت و زاویه بهینه در طبقات
۷۳.۲۰	۶۵.۶۸	۱۴۶.۸۹	۲۴.۹۱	زاویه بهینه

با توجه به جدول ۵ نیز زوایای بهینه در بال‌های ساختمانی به منظور کسب بیشترین سطح آیزوویست به تفکیک طبقات شناسایی و تعیین گردید. این زوایا در طبقات همکف، اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با ۲۴.۹۱، ۱۴۶.۸۹، ۶۵.۶۸ و ۷۳.۲۰ خواهند بود. در ادامه نتایج حاصل از تحلیل گراف دید در سه حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد. اولین حالت مدل پایه است. در این حالت آن چه که حاصل آمده گویای آن بوده که فرم پایه میزان آیزوویست کمتری را در مقایسه با الگوی بیومیمتیک به خود اختصاص داده است. مدل شماره ۲ دارای الگوی بیومیمتیک بیرونی و الگوی شبکه‌ای داخلی و مدل شماره ۳ دارای الگوی همزمان بیومیمتیک بیرونی و داخلی است. با توجه به تکرار الگوی پره دوتایی در هر طبقه و به منظور جلوگیری از تکرار، ارزیابی‌ها در یک طبقه انجام گردیده است (جدول ۶).

این جدول برای ارائه شاخص‌های کمی آیزوویست دوبعدی (مساحت، محیط و زاویه جهت‌گیری) در هر یک از سه مدل پیشنهادی آمده است تا مبنای داده‌ای لازم برای مقایسه تحلیلی این مدل‌ها، که در قالب نمودار مقایسه‌ای ارائه می‌شود، فراهم گردد.

جدول ۶. معرفی مشخصات آیزوویست دو بعدی ارزیابی شده در سه مدل پیشنهادی (تئوین: نگارنده)

مدل ۳	مدل ۲	مدل ۱	نوع پلان اولیه پیشنهادی
			تصویر گرافیکی شاخص آیزوویست



شکل ۱۱. مقایسه شاخص‌های آیزوویست در سه مدل پیشنهادی (تئوین: نگارنده)

بررسی مشخصات کمی آیزوویست در سه مدل پیشنهادی نشان می‌دهد که هر مدل از نظر کیفیت فضایی و میزان دید تفاوت‌های معناداری با یکدیگر دارند (شکل ۱۱). از منظر میانگین مساحت آیزوویست به‌عنوان شاخص کلی کیفیت دید در فضا، در مدل ۱ با مقدار ۱۰۵.۴۶ بیشترین مقدار را دارد. مدل‌های ۲ و ۳ با مقادیر تقریباً برابر ۹۴.۰۴ و ۹۴.۹۹ در سطح پایین‌تری قرار دارند. این تفاوت نشان می‌دهد که مدل ۱ به‌طور متوسط دید وسیع‌تری برای کاربران فراهم می‌کند.

زاویه جهت آیزوویست در هر سه مدل مقادیر بسیار نزدیکی را نشان می‌دهد (مدل ۱: ۱۶۲.۷، مدل ۲: ۱۶۲.۵۱، مدل ۳: ۱۶۲.۲۷)، که این همگونی نشان‌دهنده جهت‌گیری مشابه فضایی در هر سه مدل بوده و می‌توان گفت سازمان‌دهی کلی چیدمان در هر سه مدل از الگوی جهت‌گیری یکسانی تبعیت می‌کند.

محیط آیزوویست در مدل ۲ با مقدار ۸۸.۵۷ بیشترین مقدار را دارد که نشان‌دهنده پیچیدگی بیشتر مرز فضای دید در این مدل است. مدل ۱ با ۷۳.۶۶ کمترین محیط را دارد که به معنای سادگی و روانی بیشتر مرز دید و در نتیجه خوانایی فضایی بالاتر است.

در جمع‌بندی، مدل ۱ از نظر میانگین و حداکثر مساحت دید و همچنین خوانایی فضایی (محیط کمتر) عملکرد بهتری نشان می‌دهد. با این حال، مدل ۲ با توجه به تعادل میان شاخص‌های مختلف و محیط بیشتر آیزوویست، غنای بصری و پیچیدگی ادراکی بالاتری را ارائه می‌دهد که در طراحی فضاهای تجربی می‌تواند مزیت محسوب شود. پس از بررسی تحلیل گراف دید، نوبت به شاخص‌های نحو فضا با توجه به نتایج بدست آمده می‌رسد.

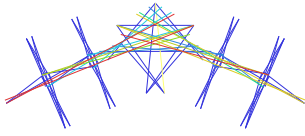
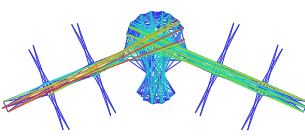
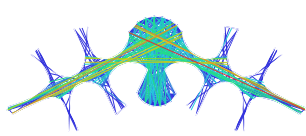
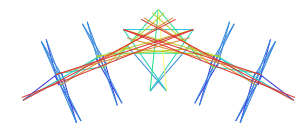
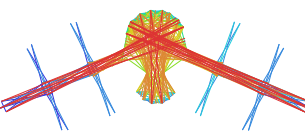
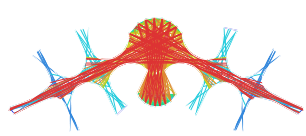
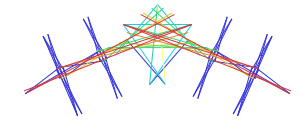
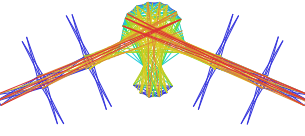
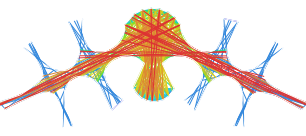
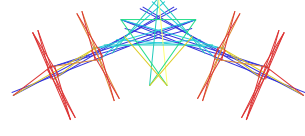
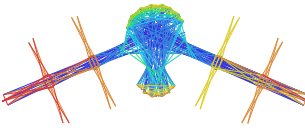
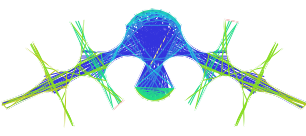
همچنین نتایج بدست آمده از تحلیل‌های نحو فضا (جدول ۷) نشان می‌دهد که هم‌پیوندی به‌عنوان اصلی‌ترین مفهوم چیدمان فضا در فرم پایه با میانگین ۵.۱۶ و بازه ۳.۰۷ تا ۱۱.۲۸ پایین‌ترین سطح یکپارچگی را دارد. این به معنای آن است که در فرم پایه، بسیاری از نقاط داخلی مجموعه از منظر دسترسی بصری نسبتاً منزوی هستند. در مقابل، آلترناتیو ۱ با میانگین ۹.۱۷ و آلترناتیو ۲ با میانگین ۹.۴۰ یکپارچگی فضایی به مراتب بالاتری دارند. از آنجا که هم‌پیوندی بالاتر با الگوهای حرکتی پرتدد، میزان مکث بیشتر کاربران و احتمال بالاتر دیده‌شدن واحدهای تجاری همبستگی دارد، می‌توان نتیجه گرفت که الگوی بیومیمتیک بهینه‌شده به‌طور ذاتی پتانسیل اقتصادی بالاتری برای واحدهای تجاری ایجاد می‌کند.

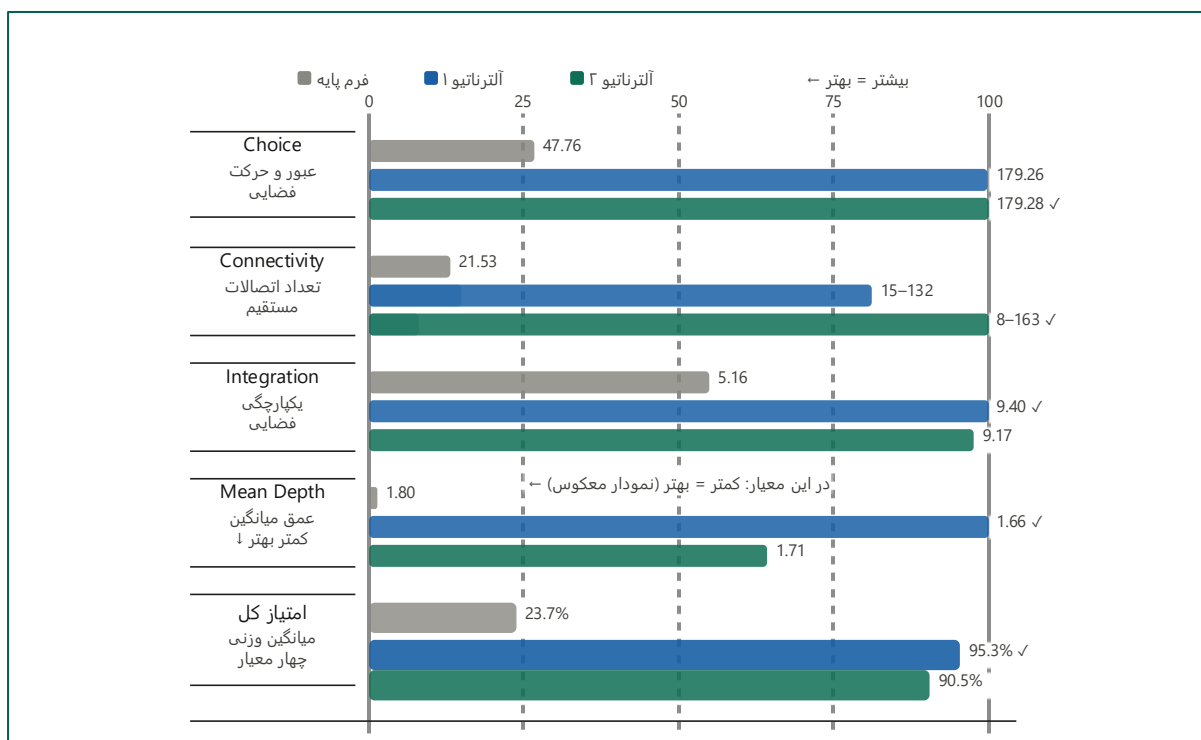
شاخص اتصال تعداد ارتباطات مستقیم فضایی هر نقطه را بیان می‌کند. فرم پایه با میانگین ۲۱.۵۳ و بازه ۱۱ تا ۴۱ محدودترین شبکه ارتباطی را دارد. آلترناتیو ۱ با میانگین ۱۰۰.۷۹ و بازه ۸ تا ۱۶۳ و آلترناتیو ۲ با میانگین ۸۱.۴۳ و بازه ۱۵ تا ۱۳۲ ارتباطات فضایی غنی‌تری ایجاد می‌کنند. بر اساس ادبیات نظریه نحو فضا، فضاهای با اتصال بالاتر آزادی عمل بیشتری در انتخاب مسیر به کاربران می‌دهند و با کاهش بار شناختی در راهیابی، تجربه فضایی روان‌تری را رقم می‌زنند. این موضوع به‌ویژه در مراکز تجاری چندطبقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چراکه کاربران اغلب با پیچیدگی‌های جهت‌یابی روبرو هستند.

عمق نشان‌دهنده میزان جداافتادگی و ایزوله‌بودن فضا است و با فاصله توپولوژیک میان نقاط سنجیده می‌شود. آلترناتیو ۱ با میانگین ۱.۷۱ و آلترناتیو ۲ با میانگین ۱.۶۶ در مقایسه با فرم پایه با میانگین ۱.۸۰ عمق اندکی کمتری دارند. کاهش عمق فضایی به معنای سهولت دسترسی توپولوژیک، کاهش احساس سردرگمی و افزایش حس امنیت در فضاهای داخلی است که در محیط‌های تجاری تأثیر مستقیم بر ماندگاری کاربران در فضا دارد.

شاخص انتخاب‌پذیری که میزان قرارگیری هر فضا در مسیرهای حرکتی کاربران را نشان می‌دهد، تفاوت چشمگیری میان سه حالت آشکار می‌کند. فرم پایه با میانگین ۴۷.۷۶ نسبت به آلترناتیو ۱ با میانگین ۱۷۹.۲۸ و آلترناتیو ۲ با میانگین ۱۷۹.۲۶ جریان حرکتی بسیار محدودتری پشتیبانی می‌کند. افزایش حدود سه‌برابری شاخص Choice در فرم‌های بهینه‌شده نشان می‌دهد که هسته مرکزی بیومیمتیک در این فرم‌ها به‌مثابه یک محور حرکتی اصلی عمل می‌کند و الگوی توزیع کاربران در فضا را به شکل بنیادی تغییر می‌دهد.

جدول ۷. جدول مقایسه شاخص‌های نحو فضا در سه فرم پایه، آلترناتیو ۱ و ۲ (تئوین: نگارنده)

تعریف نوع شاخص	فرم پایه	آلترناتیو ۱	آلترناتیو ۲
انتخاب پذیری			
اتصال			
یکپارچگی			
عمق میانگین			



شکل ۱۲. نمودار مقایسه‌ای شاخص‌های نحو فضا در سه فرم پایه، آلترناتیو ۱ و ۲ (تئوین: نگارنده)

تفسیر، تبیین و بحث

یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش، اثبات کارآمدی رویکرد «مسئله‌محور» در بیومیمتیک است. الگوی گل تنها زمانی به بهیمنی واقعی دست یافت که: (الف) هدف کمی مشخصی (بیشینه‌سازی ایزوویست) تعریف شد؛ (ب) منطق زیستی آن (توزیع شعاعی پیرامون هسته مرکزی) به پارامترهای طراحی قابل‌سنجش ترجمه شد؛ و (ج) این پارامترها در یک فرآیند بهینه‌سازی محاسباتی مورد آزمون قرار گرفتند. این یافته با هشدار نظری Ilieva و همکاران (۲۰۲۲) مبنی بر لزوم چارچوب ارزیابی روشن در بیومیمتیک همسو است و مسیر عملیاتی مشخصی برای تحقق آن ارائه می‌دهد.

در مقیاس شهری، برتری ۳.۵ برابری ایزوویست الگوی بیومیمتیک (۷ درصد) نسبت به فرم پایه (۲ درصد) نشان می‌دهد که هندسه شعاعی گل‌گونه به‌طور ذاتی ساختاری مناسب‌تر برای تسلط بصری در فضای شهری ایجاد می‌کند. زوایای بهینه متفاوت در هر طبقه (۲۴.۹۱، ۱۴۶.۸۹، ۶۵.۶۸ و ۷۳.۲۰ درجه) نشان‌دهنده آن است که هر طبقه باید به‌عنوان یک عنصر مستقل بصری در نظر گرفته شود؛ امری که ماهیت پارامتریک طراحی را ضروری می‌سازد. این یافته نشان می‌دهد که فرم بیومیمتیک دوپره‌ای با جانمایی مرکزی پتانسیل تبدیل شدن به یک نشانه شهری شاخص را در بافت ساحلی بابل‌سار دارد؛ موضوعی که در ادبیات پژوهشی مرتبط با هویت بصری مراکز تجاری اهمیت ویژه‌ای دارد.

یافته‌های مقیاس داخلی از منظر نظریه نحو فضا نتایج قابل توجهی را آشکار می‌سازند. افزایش هم‌پیوندی از ۵.۱۶ به ۹.۴۰ (معادل ۸۲ درصد بهبود) نشان می‌دهد که هسته مرکزی بیومیمتیک به‌مثابه یک کاتالیزور فضایی عمل می‌کند که تمام نقاط مجموعه را به هم متصل می‌کند. بر اساس ادبیات پژوهشی، مقادیر بالاتر هم‌پیوندی با افزایش تراکم پیاده، ماندگاری بیشتر کاربران و احتمال بالاتر دیده‌شدن واحدهای تجاری همبستگی دارد؛ بنابراین این بهبود نه‌تنها کیفیت محیطی، بلکه ارزش اقتصادی فضاهای تجاری را ارتقا می‌بخشد.

افزایش تقریباً پنج‌برابری اتصال (از ۲۱.۵۳ به ۱۰۰.۷۹) به معنای آزادی عمل بسیار بیشتر در انتخاب مسیر برای کاربران است. این یافته در مراکز تجاری چندطبقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا کاربران اغلب با پیچیدگی‌های جهت‌یابی مواجهند. همچنین افزایش تقریباً سه‌برابری شاخص انتخاب‌پذیری نشان می‌دهد که هسته مرکزی بیومیمتیک به یک محور حرکتی اصلی تبدیل می‌شود و الگوی توزیع کاربران را به‌شکل بنیادی بهبود می‌بخشد.

مقایسه مدل ۲ (بیومیمتیک بیرونی با شبکه‌ای داخلی) و مدل ۳ (بیومیمتیک همزمان بیرونی و داخلی) نشان می‌دهد که ترکیب الگو در هر دو مقیاس، هرچند ایزوویست داخلی اندکی کمتری دارد، غنای بصری و پیچیدگی ادراکی بیشتری ایجاد می‌کند که در فضاهای تجربی می‌تواند ارزش افزوده محسوب شود. این یافته پیام مهمی برای معماران دارد: انتخاب میان سادگی/وضوح بصری و غنای ادراکی باید متناسب با اهداف برنامه طراحی صورت گیرد.

در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد مسئله‌محور در بیومیمتیک، یعنی تعریف هدف کمی (بیشینه‌سازی دید)، انتزاع منطق زیستی و ترجمه آن به پارامترهای طراحی قابل‌سنجش، می‌تواند به بهبود واقعی و اندازه‌گیری‌پذیر کیفیت فضایی مجموعه‌های تجاری منجر شود. نتایج هر دو مقیاس با یکدیگر همسو بوده و نشان می‌دهند که یک الگوی زیستی واحد می‌تواند هم‌زمان در مقیاس شهری (نشانه بصری) و در مقیاس داخلی (کیفیت سازمان فضایی) عملکرد بهینه‌ای ارائه دهد؛ امری که ارزش محیطی و تجاری مرکز خرید را به‌طور همزمان ارتقا می‌بخشد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف پر کردن شکاف موجود میان الهام‌گیری بیومیمتیک و ارزیابی کمی عملکرد دید در مجموعه‌های تجاری طراحی شد. یافته‌ها به‌روشنی نشان می‌دهند که الگوی بیومیمتیک مبتنی بر ساختار گل، زمانی که از طریق ابزارهای کمی تحلیل دید ارزیابی و بهینه‌سازی شود، می‌تواند در هر دو مقیاس شهری و داخلی عملکردی به‌مراتب برتر از فرم‌های متداول ارائه دهد.

با وجود دستاوردهای این پژوهش، محدودیت‌هایی وجود دارند که در تفسیر نتایج باید مد نظر قرار گیرند:

اول: ماهیت شبیه‌سازی محور پژوهش. تمامی داده‌های این پژوهش از مدل‌های دیجیتال استخراج شده‌اند و اعتبارسنجی میدانی با کاربران واقعی صورت نگرفته است. رفتار واقعی کاربران در فضا ممکن است تحت تأثیر عوامل روان‌شناختی، فرهنگی و کاربردی متعددی باشد که در مدل‌سازی لحاظ نشده‌اند.

دوم: تک‌الگوبودن رویکرد بیومیمتیک. این پژوهش تنها یک الگوی طبیعی (ساختار گل) را بررسی کرده است. الگوهای طبیعی دیگر مانند ساختارهای لانه زنبوری، شاخه‌ای یا مارپیچی ممکن است عملکردهای بصری متفاوتی داشته باشند و مقایسه میان آن‌ها به غنای نتایج می‌افزاید.

سوم: عدم لحاظ کردن متغیرهای برنامه‌ریزی تجاری. این پژوهش صرفاً بر کیفیت فضایی و دید تمرکز داشته و متغیرهای مهمی مانند آکوستیک، آسایش حرارتی، هزینه ساخت و برنامه‌ریزی کارکردی واحدهای تجاری در تحلیل‌ها لحاظ نشده‌اند.

بر اساس یافته‌های این پژوهش و محدودیت‌های شناسایی شده، پیشنهادات زیر برای پژوهش‌های آینده ارائه می‌شود:

مهم‌ترین گام بعدی، انجام مطالعات رفتاری و میدانی برای تأیید فرضیه‌های این پژوهش در شرایط واقعی است. پیشنهاد می‌شود از روش‌هایی مانند GPS-tracking، Eye-tracking، کاربران در فضا، پرسش‌نامه‌های ادراک فضایی و مشاهده رفتار راهیابی برای سنجش تأثیر واقعی الگوی بیومیمتیک بهینه‌شده بر تجربه کاربران استفاده شود.

همچنین پژوهش‌های آینده می‌توانند چارچوب ارزیابی توسعه‌یافته در این مطالعه را برای الگوهای طبیعی دیگر مانند ساختار لانه زنبوری، آرایش‌های فیبوناچی، ساختارهای شاخه‌ای درختان و سیستم‌های مارپیچی به کار گیرند. مقایسه تطبیقی میان این الگوها می‌تواند به تدوین یک دیکشنری طراحی از الگوهای بیومیمتیک با پیامدهای فضایی مشخص منجر شود.

به منظور تعمیم‌پذیری بیشتر نتایج، اجرای این چارچوب پژوهشی در بسترهای شهری متنوع (شهرهای با اقلیم‌های مختلف، ساختارهای شهری متفاوت و فرهنگ‌های گوناگون) پیشنهاد می‌شود. این مطالعات تطبیقی می‌توانند مشخص کنند که آیا اصول کشف‌شده در این پژوهش ماهیت عام دارند یا به بستر خاص بابل‌سر وابسته‌اند.

دستآورد پژوهش

یافته‌های کلیدی این پژوهش نشان می‌دهند که قرارگیری توده ساختمان در مرکز سایت و استفاده از پیکربندی دوگلبگی، بالاترین عملکرد بصری را در مقیاس شهری ایجاد می‌کند، و در مقیاس داخلی، الگوی بیومیمتیک بهینه‌شده در تمامی شاخص‌های نحو فضا (هم‌پیوندی، اتصال، عمق و انتخاب‌پذیری) نسبت به فرم پایه بهبود قابل‌توجهی نشان می‌دهد.

نوآوری اصلی این پژوهش در معرفی و آزمون یک رویکرد مسئله‌محور به بیومیمتیک است که در آن، به جای الهام‌گیری صرفاً فرمی از طبیعت، اهداف کمی مربوط به دیدپذیری و سازمان فضایی مستقیماً به پارامترهای طراحی پارامتریک ترجمه و از طریق الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی می‌شوند.

این یافته‌ها می‌توانند در طراحی و ارزیابی مجموعه‌های تجاری مشابه، به‌ویژه در اقلیم‌های معتدل و مرطوب، به عنوان مبنایی کمی برای تصمیم‌گیری طراحان درباره جانمایی توده، شکل هندسی نما و سازمان فضایی داخلی به کار روند.

مسیرهای پیشنهادی برای پژوهش‌های آینده شامل اعتبارسنجی میدانی یافته‌ها با کاربران واقعی، آزمون این چارچوب برای الگوهای زیستی دیگر (مانند ساختار لانه زنبوری یا آرایش‌های فیبوناچی)، و تعمیم آن به بسترهای شهری و اقلیمی متنوع است.

ملاحظات اخلاقی و اطلاعات تکمیلی

بر گرفته از پایان نامه/رساله: «نویسندگان اعلام می‌دارند که این مقاله حاصل پژوهش مستقل بوده و مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد یا رساله دکتری نیست.»

حمایت مالی: «این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است»

تعارض منافع: «نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع شخصی، مالی یا حرفه‌ای در رابطه با پژوهش حاضر و انتشار این مقاله ندارند»

استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی: نویسندگان در این پژوهش از ابزار هوش مصنوعی (Claude) صرفاً جهت (بهبود روانی متن و تنظیم کیفیت بهتر برای ارائه تصاویر) استفاده کرده‌اند تمامی نویسندگان مسئولیت نهایی محتوای تولید شده و صحت مطالب علمی ارائه‌شده در این مقاله را بر عهده دارند و تأیید می‌کنند که استفاده از این ابزارها با اصول اخلاق پژوهشی و سیاست‌های این نشریه همخوانی دارد.

پی‌نوشت

1. Strategic Visibility
2. Isovist
3. Visibility Graph Analysis (VGA)1
4. Zaleckis
5. Ayesha
6. Martin-Mariscal
7. Gaha
8. Galapagos
9. Jenson
10. Space Syntax
11. Visibility Graph Analysis (VGA)2
12. Integration
13. Connectivity
14. Depth
15. Elmeligy
16. Ilieva
17. Yalmaz
18. Petherick
19. Atrium/Anchor
20. Gath-Morad
21. Djebbara
22. Verbrugghe
23. Joye
24. Badamah
25. Turner
26. krukár
27. Snopková
28. Gilboa
29. Ezani

منابع

- بشیرزاده، سحر، سهیلی، جمال الدین. و مفاخر، فرشاد. (۲۰۲۲). بررسی تأثیرات فرهنگ بر تغییرات الگوی خانه‌های بومی در روستای طولارود بالای شهرستان تالش. *پژوهش های روستائی*، ۱۳ (۲)، ۳۴۸-۳۶۱. <https://doi.org/10.22059/jrur.2022.335555.1704>
- بیتی، حامد، قره بگلو، مینو و پورجواد اصل، باقر. (۲۰۲۱). تجربه استفاده از خانه های تاریخی با کارکرد مدارس معماری از منظر تجربه زیسته دانشجویان مورد پژوهش: دانشگاه هنر اسلامی تبریز. *صفه*، ۳۱ (۱)، ۸۳-۹۶. <https://doi.org/10.29252/soffeh.31.1.83>
- پیلچی ها، پ. (۲۰۲۰). روش ها و الگوریتم های بهینه سازی در طراحی معماری و شهرسازی، راهکارهای ریاضی پایه. *نقش جهان - مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی*، ۱۰ (۳)، ۲۰۵-۲۱۷.
- چراغی فر، فرناز، سلطان زاده، حسین، و قدوسی فر، هادی. (۲۰۲۳). بازخوانی ادراک فضای سالمندان با تطبیق نقشه های نحو فضا و نقشه های شناختی مطالعه موردی: آسایشگاه سالمندان کهریزک. *صفه*، ۳۳ (۲)، ۳۵-۴۸. <https://doi.org/10.48308/sofeh.33.2.35>
- Ayesha, D., Ardiani, Y., & Suryawinata, B. (2023). Market With Visibility Graph Analysis Method in Palmerah Central Jakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1169. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1169/1/012056>
- Badarnah, L. (2017). Form Follows Environment: Biomimetic Approaches to Building Envelope Design for Environmental Adaptation. *Buildings*, 7(2), 40.
- Carlson, L., Hölscher, C., & Dalton, R. (2010). Getting Lost in Buildings. *Current Directions in Psychological Science - CURR DIRECTIONS PSYCHOL SCI*, 19, 284-289.
- Coskun, C., Zhao, T., Lai, J., Soy, M., & Cory, C. (2025). Visual Programming Language (VPL) for Generative Architecture Design: A Literature Review. *CIB Conferences*.
- Dolu, D. A., & Burkut, E. B. (2025). Reconnecting with nature: reflections of the concepts of biophilia and biomimicry in interior design. *Budownictwo i Architektura*, 24(3), 101-120.
- Elmeligy, D. A. (2016). Biomimicry for ecologically sustainable design in architecture: a proposed methodological study. *WIT Transactions on The Built Environment*, 161, 45-57.
- Ezani, W. M. S. M., Arab, Y., Hassan, A. S., Rakhmatulloh, A. R., Witchayangkoon, B. B., & Saeed, M. (2025). A Study Of Space Syntax Of Spaces For The Shopping Mall: The Grand Shopping Centre Toowoomba. *Journal of Architecture and Built Environment Research (JABER)*, 2(1), 1-14.
- Gaha, I. S. (2023). Parametric architectural design for a new city identity: materials, environments and new applications. *Journal of Contemporary Urban Affairs*, 7(1), 122-138.
- Gath-Morad, M., Baur, R., & Hölscher, C. (2023). The DesignMind toolkit. *Graz, Austria*, 51-60.
- Gath-Morad, M., Grübel, J., Steemers, K., Sailer, K., Ben-Alon, L., Hölscher, C., & Aguilar, L. (2024). The role of strategic visibility in shaping wayfinding behavior in multilevel buildings. *Sci Rep*, 14(1), 3735.
- Gilboa, S., Vilnai-Yavetz, I., & Mitchell, V. (2025). Revitalizing retail: The roles of functionality and recreation in shaping mall experiences in a changing retail era. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 84, 104232. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2025.104232>
- Hassan, F. H., Ali, K. A., & Ahmed, S. A. (2023). Biomimicry as an approach to improve daylighting performance in office buildings in Assiut City, Egypt. *Journal of Daylighting*, 10(1), 1-16.

- Hays, N., Badarnah, L., & Jain, A. (2024). Biomimetic design of building facades: an evolutionary-based computational approach inspired by elephant skin for cooling in hot and humid climates [Original Research]. *Frontiers in Built Environment*, Volume 10.
- Hosseini, S. M., Heidari, S., Attia, S., Wang, J., & Triantafyllidis, G. (2024). Biomimetic kinetic façade as a real-time daylight control: complex form versus simple form with proper kinetic behavior. *Smart and Sustainable Built Environment*.
- Ilieva, L., Ursano, I., Traista, L., Hoffmann, B., & Dahy, H. (2022). Biomimicry as a sustainable design methodology—Introducing the ‘Biomimicry for Sustainability’ framework. *Biomimetics*, 7(2), 37.
- Jenson, D. (2022). *Parametric Design in Landscape Architecture: Exploring Visual Scripting in Grasshopper as a Tool for Landscape Design Innovation*. SRS, Utahstate University.
- Joye, Y., Willems, K., Brengman, M., & Wolf, K. (2010). The effects of urban retail greenery on consumer experience: Reviewing the evidence from a restorative perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, 9(1), 57-64.
- Krukar, J., Manivannan, C., Bhatt, M., & Schultz, C. (2021). Embodied 3D isovists: A method to model the visual perception of space. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 48(8), 2307-2325. DOI: <https://doi.org/10.1177/2399808320974533>
- Lee, S. H. J., Tao, C.-W., Douglas, A., & Oh, H. (۲۰۲۲). All That Glitters is Not Green: Impact of Biophilic Designs on Customer Experiential Values. *Journal of Hospitality & Tourism Research*, 47(4). <https://doi.org/10.1177/10963480221134547>
- Martín-Mariscal, A., Fernández-Rodríguez, J. F., Picardo, A., & Peralta, E. (2025). Grasshopper Algorithmic Modelling: Parametric Design for Product Platform Customisation. *Applied Sciences*, 15(11), 6243. <https://doi.org/10.3390/app15116243>
- Petherick, L.-M. (2024). The wellbeing benefits of exposure to nature: The difference between environment types on different wellbeing types. *The Plymouth Student Scientist*, 17(1), 28-51. <https://doi.org/10.70156/1754-2383.1485>
- Snopková, D., De Cock, L., Juřík, V., Kvarda, O., Tancoš, M., Herman, L., & Kubíček, P. (۲۰۲۳). Isovists compactness and stairs as predictors of evacuation route choice. *Sci Rep*, 13(1), 2970. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29944-8>
- Soflaei, F., Shokouhian, M., & Soflaei, A. (2017). Traditional courtyard houses as a model for sustainable design: A case study on BWhs mesoclimate of Iran. *Frontiers of Architectural Research*, 6(3), 329-345. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foar.2017.04.004>
- Sommese, F., Badarnah, L., & Ausiello, G. (2022). A critical review of biomimetic building envelopes: towards a bio-adaptive model from nature to architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112850.
- Tabatabae Malazi, F., & Sabernejad, J. (2016). The Space Syntax Analytical Approach in Understanding the Configuration of Qeshm Vernacular Housing (Case Study: Laft Village), *JHRE*, 35(154), 75.
- Tekin, B. H., Izmir Tunahan, G., Disci, Z. N., & Ozer, H. S. (2025). Biophilic design in the built environment: Trends, gaps and future directions. *Buildings*, 15(14), 2516.

- Turner, A., Doxa, M., O'sullivan, D., & Penn, A. (2001). From isovists to visibility graphs: a methodology for the analysis of architectural space. *Environment and Planning B: Planning and design*, 28(1), 103-121.
- Vaughan, L., Peponis, J., & Dalton, R. (2025). *Space Syntax: Selected Papers by Bill Hillier*. UCL Press .
- Verbrugghe, N., Rubinacci, E., & Khan, A. Z.(2023). Biomimicry in architecture: a review of definitions, case studies, and design methods. *Biomimetics*, 8(1), 107.
- Yilmaz, B., & Arpacioğlu, Ü. (2025). Daylight Control Performance of Biomimetic Facades: Biomimetic Facade Proposals for an Office Building. *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 10(2), 703-718.
- Zakaria Djebbara, Mille Boye Nielsen, Christina Lomholt, Tsila Yaloz, CecilieMarie Busk & Maibritt Dammann (11 Mar 2025): Does the visibility of destination matter morethan distance in human navigation? *A pilot virtual reality study, Architectural Science Review*, DOI: <https://doi.org/10.1080/00038628.2025.2476648>.
- Zaleckis, K., Gražulevičiūtė-Vileniškė, I., & Viliūnas, G. (2025). Simulative Modeling of Psychologically Acceptable Architectural and Urban Environments Combining Biomimicry Approach and Concept of Architectural/Urban Genotype as Unifying Theories. *Urban Science*. <https://doi.org/10.3390/urbansci9030075>