

Identification and Prioritization of Bionic Architecture Indicators Affecting Energy Consumption Efficiency in Architectural Design Using the ANP-DEMATEL Model

1. Lena Safaiyan[✉]: Department of Art and Architecture, Za.C., Islamic Azad University, Zanjan, Iran

2. Zohreh Torabi^{✉*}: Department of Architecture, Za.C., Islamic Azad University, Zanjan, Iran.

3. Majid Shahbazi[✉]: Department of Art and Architecture, Za.C., Islamic Azad University, Zanjan, Iran

*Corresponding Author's Email Address: zohreh.torabi@lauz.ac.ir

How to Cite: Safaiyan, L., Torabi, Z., & Shahbazi, M. (2024). Identification and Prioritization of Bionic Architecture Indicators Affecting Energy Consumption Efficiency in Architectural Design Using the ANP-DEMATEL Model. *Manifestation of Art in Architecture and Urban Engineering*, 2(2), 126-149.

Abstract:

This study aimed to identify and prioritize bionic architecture indicators affecting energy consumption efficiency in residential buildings while accounting for the interdependent and network-based relationships among architectural design criteria. This applied study employed a survey-based research design. The relevant bionic architecture criteria and subcriteria were initially identified and refined through a review of the theoretical literature, previous studies, and expert judgments, resulting in a final framework comprising four main criteria and 19 subcriteria. Experts were selected purposively, with theoretical saturation used to determine sampling adequacy. Data were collected using a structured matrix questionnaire based on pairwise comparisons and fuzzy scales, whose face and content validity were evaluated by specialists in architecture and energy. An integrated fuzzy multi-criteria decision-making framework combining the Analytic Network Process (ANP) and DEMATEL was employed to determine relative importance, model interdependencies, and derive final criterion weights. Excel and MATLAB were used for data preparation and fuzzy computations. The final prioritization indicated that environmental and contextual factors ranked first, followed by institutional and value-related factors, cultural and social factors, and physical and spatial factors, respectively. Causal-network analysis further demonstrated that institutional and value-related factors exerted the greatest influence on other dimensions, whereas physical and spatial factors exhibited the lowest network influence. At the subcriterion level, “maintaining unity of elements with place and the cosmos while preserving plurality” achieved the highest normalized weight (0.0916), followed by “qualitative differentiation of spatial zones and continuity of spatial hierarchy” (0.0648). Inspiration from vernacular architecture and collectivity occupied the subsequent priority positions. Energy-efficient bionic architecture requires moving beyond formal imitation of nature toward the translation of natural principles of adaptation, integration, contextual responsiveness, and organization into architectural solutions. The divergence between final priority and causal influence also demonstrates the importance of adopting a network-based rather than exclusively weight-based approach to architectural decision-making.

Keywords: Bionic architecture; energy efficiency; energy consumption optimization; residential buildings; sustainable architecture; multi-criteria decision-making; fuzzy ANP-DEMATEL.

Received: 17 May 2024

Revised: 07 August 2024

Accepted: 15 August 2024

Published: 22 August 2024



شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های معماری بیونیک مؤثر بر بهره‌وری مصرف انرژی در طراحی معماری با استفاده از مدل ANP-DEMATEL

۱. لانا صفائیانی^{ID}: گروه هنر و معماری، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

۲. زهره ترابی^{ID*}: گروه معماری، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران. (نویسنده مسئول)

۳. مجید شهبازی^{ID}: گروه هنر و معماری، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: zohreh.torabi@iauz.ac.ir

نحوه استناددهی: صفائیانی، لانا، ترابی، زهره، و شهبازی، مجید. (۱۴۰۳). شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های معماری بیونیک مؤثر بر بهره‌وری مصرف انرژی در طراحی معماری با استفاده از مدل ANP-DEMATEL تجلی هنر در معماری و شهرسازی، ۲(۲)، ۱۴۹-۱۲۶.

چکیده

هدف پژوهش حاضر، شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های معماری بیونیک مؤثر بر بهره‌وری مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی با تأکید بر روابط متقابل و شبکه‌ای میان معیارهای طراحی بود. این پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر شیوه اجرا پیمایشی بود. معیارها و زیرمعیارهای معماری بیونیک ابتدا بر اساس مرور مبانی نظری، مطالعات پیشین و دیدگاه خبرگان استخراج و پالایش شدند و ساختار نهایی شامل چهار معیار اصلی و ۱۹ زیرمعیار شکل گرفت. نمونه‌گیری خبرگان به صورت هدفمند و تا دستیابی به اشباع نظری انجام شد. ابزار گردآوری داده‌ها پرسشنامه ساختاریافته ماتریسی مبتنی بر مقایسات زوجی و طیف فازی بود که روایی صوری و محتوایی آن با نظر متخصصان بررسی شد. برای تحلیل روابط متقابل، تعیین اهمیت نسبی و استخراج وزن نهایی شاخص‌ها از رویکرد تلفیقی تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی ANP-DEMATEL استفاده شد و محاسبات با استفاده از Excel و MATLAB انجام گرفت. نتایج اولویت‌بندی نهایی نشان داد عوامل محیطی و زمینه‌ای در رتبه نخست قرار گرفتند و پس از آن عوامل نهادی و ارزشی، عوامل فرهنگی و اجتماعی و عوامل کالبدی و فضایی به ترتیب رتبه‌های دوم تا چهارم را کسب کردند. تحلیل روابط علی نشان داد عوامل نهادی و ارزشی بیشترین اثرگذاری را بر سایر معیارها داشتند، در حالی که عوامل کالبدی و فضایی کمترین اثرگذاری شبکه‌ای را نشان دادند. در سطح زیرمعیارها، «حفظ وحدت عناصر با مکان و کیهان در عین کثرت‌گرایی» با وزن نرمال شده ۰.۰۹۱۶ بالاترین اولویت و «تفکیک کیفی نواحی فضایی و پیوستگی سلسله‌مراتب فضایی» با وزن ۰.۰۶۴۸ رتبه بعدی را به دست آورد؛ «اقتباس از معماری بومی» و «جمع‌بودن» نیز در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. یافته‌ها نشان می‌دهد تحقق معماری بیونیک انرژی کارآمد مستلزم عبور از تقلید صوری طبیعت و تمرکز بر سازوکارهای سازگاری، یکپارچگی، زمینه‌گرایی و سازمان‌یافتگی طبیعی است؛ همچنین تفاوت میان اولویت نهایی و میزان اثرگذاری علی معیارها ضرورت اتخاذ رویکردی شبکه‌ای در تصمیم‌گیری طراحی را نشان می‌دهد.

کلیدواژگان: معماری بیونیک؛ بهره‌وری انرژی؛ بهینه‌سازی مصرف انرژی؛ ساختمان‌های مسکونی؛ معماری پایدار؛ تصمیم‌گیری چندمعیاره؛ ANP-DEMATEL فازی.

تاریخ دریافت: ۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۷ مرداد ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۲۵ مرداد ۱۴۰۳

تاریخ انتشار: ۱ شهریور ۱۴۰۳



مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش مصرف انرژی در بخش ساختمان، گسترش شهرنشینی، کاهش منابع تجدیدناپذیر و تشدید پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از توسعه کالبدی، ضرورت بازاندیشی در شیوه‌های متعارف طراحی معماری را بیش از گذشته آشکار ساخته است. ساختمان‌ها نه تنها مصرف‌کنندگان عمده انرژی در مراحل بهره‌برداری هستند، بلکه نحوه استقرار، سازمان فضایی، فرم، پوسته، جهت‌گیری و ارتباط آنها با زمینه محیطی نیز می‌تواند میزان وابستگی به سیستم‌های مکانیکی و منابع انرژی را تعیین کند. از این‌رو، مسئله بهره‌وری انرژی دیگر صرفاً یک موضوع فنی مربوط به تجهیزات ساختمانی نیست، بلکه به مسئله‌ای چندبعدی در طراحی معماری تبدیل شده است که باید از نخستین مراحل شکل‌گیری ایده، فرم و سازمان فضایی مورد توجه قرار گیرد. مطالعات مرتبط با طراحی و بهینه‌سازی فرم و نمای ساختمان نیز نشان داده‌اند که تصمیم‌های هندسی و کالبدی می‌توانند مستقیماً در عملکرد محیطی بنا دخالت داشته باشند و به همین دلیل، استفاده از روش‌های محاسباتی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای دستیابی به فرم‌های کارآمدتر مورد توجه قرار گرفته است (1). همچنین، برنامه‌ریزی محیطی در مجاورت سکونتگاه‌ها و سازمان‌دهی مناسب فضاها و پیرامونی ساختمان‌ها به عنوان بخشی از رویکرد جامع به کیفیت زیست و عملکرد محیطی مطرح شده است (2).

در این میان، طبیعت به عنوان نظامی پیچیده، خودسازمان‌یافته و حاصل فرایند طولانی سازگاری، منبع ارزشمندی برای بازاندیشی در منطق طراحی معماری فراهم می‌کند. ساختارهای طبیعی معمولاً بر اساس حداقل مصرف منابع، پاسخ‌گویی به شرایط محیطی، سازگاری، انعطاف‌پذیری، توزیع مناسب نیروها و هماهنگی میان اجزا شکل گرفته‌اند. توجه به این ویژگی‌ها موجب توسعه رویکردهایی همچون زیست‌الهام‌گیری، بیومیمتیک و معماری بیونیک شده است. در این رویکردها، هدف صرفاً بازتولید شکل ظاهری گیاه، جانور یا سایر عناصر طبیعی نیست، بلکه استخراج منطق عملکردی، ساختاری و سازمانی طبیعت و تبدیل آن به راهبردهای طراحی است. مرور مفاهیم مرتبط با بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های بیونیک و معماری سبز بیونیک نیز نشان می‌دهد که استفاده از منطق سیستم‌های طبیعی می‌تواند در حوزه‌هایی مانند فرم، پوسته، تهویه، دریافت انرژی، پاسخ اقلیمی و کاهش مصرف منابع نقش‌آفرین باشد (3). از این منظر، معماری بیونیک را می‌توان پلی میان دانش زیستی و دانش طراحی دانست که تلاش می‌کند اصول اثبات‌شده سازگاری در طبیعت را به محیط مصنوع منتقل کند.

این نگرش در معماری معاصر اهمیت ویژه‌ای یافته است؛ زیرا توسعه فناوری‌های طراحی دیجیتال، مدل‌سازی پارامتریک و ابزارهای محاسباتی امکان تحلیل و بازتولید الگوهای پیچیده طبیعی را بیش از گذشته فراهم کرده است. معماری پارامتریک با ایجاد امکان تعریف روابط میان اجزای فرم و تغییر هم‌زمان مؤلفه‌های طراحی، ظرفیت بالایی برای تبدیل قواعد طبیعی به ساختارهای معماری دارد و می‌تواند به جای تولید فرم‌های ثابت، سیستم‌هایی پویا و وابسته به شرایط محیطی ایجاد کند (4). در همین راستا، تحول ابزارهای دیجیتال در معماری منظر و طراحی محیطی نیز موجب شده است که تحلیل داده‌های مکانی، شبیه‌سازی روابط محیطی و بررسی سناریوهای مختلف طراحی به بخشی از فرایند تصمیم‌گیری معمارانه تبدیل شود (5). این تحولات امکان آن را فراهم می‌آورند که اصول بیونیک از سطح تشبیه‌های فرمی عبور کرده و در قالب معیارهای قابل سنجش و مدل‌های تصمیم‌گیری وارد فرایند طراحی شوند.

با وجود این، یکی از مسائل اساسی در استفاده از طبیعت در معماری، تمایز میان تقلید صوری و اقتباس عملکردی است. بسیاری از فرم‌های معماری ممکن است شباهت ظاهری با عناصر طبیعی داشته باشند، اما این شباهت لزوماً به معنای برخورداری از منطق بیونیک یا عملکرد محیطی مطلوب نیست. پژوهش‌های مرتبط با معماری بیونیک و ساختارهای غیرمتعارف نشان داده‌اند که فرم‌های الهام‌گرفته از طبیعت باید از نظر ساختاری و عملکردی نیز مورد ارزیابی قرار گیرند

تا بتوان درباره کارآمدی آنها داوری کرد (6). همچنین، بررسی کاربرد بیونیک در نوسازی و بازسازی ساختمان‌ها نشان می‌دهد که اصول بیونیک را می‌توان فراتر از تولید فرم‌های نو، در بازآفرینی و ارتقای عملکرد ساختمان‌های موجود نیز به کار گرفت (7). بنابراین، ارزش معماری بیونیک در این است که ویژگی‌های ساختاری و عملکردی طبیعت به معیارهایی قابل انتقال به طراحی تبدیل شوند، نه اینکه تنها تصاویر و اشکال طبیعی در نمای ساختمان بازنمایی شوند.

توجه به ساختارهای زیستی در حوزه‌های مهندسی نیز نشان می‌دهد که الهام از طبیعت می‌تواند به حل مسائل پیچیده ساختاری و عملکردی منجر شود. برای نمونه، تحلیل سازه‌ای و شبیه‌سازی فرایند عملکرد شمع‌های پیچشی بیونیک، ظرفیت استفاده از الگوهای طبیعی در حل مسائل مهندسی را نشان داده است (8). در حوزه طراحی مواد و ساختارهای زیست‌مهندسی نیز بررسی معماری متخلخل در سازه‌های مصنوعی نشان می‌دهد که سازمان‌یافتگی ساختاری و رابطه میان هندسه و عملکرد از عناصر اساسی در طراحی الهام‌گرفته از سیستم‌های زیستی است (9). حتی در سامانه‌های ریاتیک بیونیک، معماری کنترل‌ی چندسطحی و یادگیری از رفتار نشان داده‌اند که تقلید از طبیعت زمانی ارزشمند است که به انتقال منطق عملکرد، کنترل و سازگاری منجر شود، نه صرفاً بازنمایی شکل طبیعی (10). چنین نمونه‌هایی بر ضرورت توجه هم‌زمان به ساختار، عملکرد و سازگاری در تفسیر معماری بیونیک تأکید می‌کنند.

در سطح ساختمان، یکی از مهم‌ترین عرصه‌های کاربرد این رویکرد، بهینه‌سازی مصرف انرژی و سازگاری اقلیمی است. طراحی ساختمان باید بتواند از ظرفیت‌های طبیعی سایت، نظیر جهت تابش خورشید، جریان باد، تفاوت دمای شب و روز، پوشش گیاهی و ویژگی‌های بستر، حداکثر استفاده را ببرد. طراحی سامانه‌های یکپارچه برای بهبود تهویه طبیعی در ساختمان‌های مسکونی مناطق خشک نمونه‌ای از رویکردی است که از طریق هماهنگ‌سازی اجزای ساختمان با شرایط اقلیمی، وابستگی به سامانه‌های مکانیکی را کاهش می‌دهد (11). در همین زمینه، بررسی معماری کویری ایران و ارتباط آن با مفاهیم بیومیمتیک و الگوگیری محیطی نشان می‌دهد که بسیاری از راهکارهای معماری بومی بر اساس سازگاری تدریجی با اقلیم و استفاده هوشمندانه از منابع طبیعی شکل گرفته‌اند (12). این مسئله بیانگر آن است که معماری بیونیک و معماری بومی را نباید دو جریان کاملاً مستقل در نظر گرفت؛ زیرا هر دو می‌توانند از منطق سازگاری با محیط، بهره‌گیری حداکثری از منابع و پاسخ به محدودیت‌های اقلیمی بهره ببرند.

از سوی دیگر، معماری بیونیک تنها به مقیاس یک ساختمان محدود نیست و در مقیاس محله و شهر نیز قابل بررسی است. مفهوم شهرها و محیط‌های شهری آینده بر اساس سیستم‌های بیونیک نشان می‌دهد که سازمان فضایی، زیرساخت‌ها، جریان منابع و ارتباط میان عناصر شهری می‌توانند با الهام از نظام‌های طبیعی بازتعریف شوند (13). نمونه‌هایی از طراحی مجتمع‌های اجتماعی بر اساس زیست‌الهام‌گیری نیز بر امکان استفاده از منطق اجتماعات طبیعی برای ایجاد ساختارهای پایدارتر در مقیاس مجموعه‌های شهری تأکید کرده‌اند (14). در چنین رویکردی، ساختمان یا محله به عنوان عنصری منفرد دیده نمی‌شود، بلکه بخشی از یک شبکه متعامل از انسان، طبیعت، انرژی و فعالیت‌های اجتماعی است. این نگرش، اهمیت زمینه‌گرایی و ارتباط میان سازمان کالبدی و ساختار اجتماعی را افزایش می‌دهد. پایداری محیطی همچنین نمی‌تواند بدون توجه به کیفیت زندگی، نیازهای اجتماعی و ابعاد انسانی محیط ساخته‌شده تحقق یابد. طراحی محلات مسکونی معاصر علاوه بر ملاحظات کالبدی و عملکردی، باید پاسخ‌گوی تحول نیازهای اجتماعی، الگوهای زندگی و کیفیت فضاهای مشترک باشد (15). مطالعه محیط‌های شهری ویژه کودکان نیز نشان داده است که انسانی‌سازی فضای مسکونی مستلزم توجه به نیازهای کاربران، امنیت، امکان تعامل و کیفیت محیطی فضاهای باز و نیمه‌باز است (16). همچنین، مفهوم طراحی فراگیر بر این نکته تأکید دارد که محیط معماری باید قابلیت استفاده برای گروه‌های متنوع انسانی را داشته باشد و

طراحی نمی‌تواند صرفاً بر کارایی فیزیکی تمرکز کند (17). بنابراین، در مدل‌سازی شاخص‌های معماری بیونیک، لازم است علاوه بر عوامل فنی و محیطی، مؤلفه‌های فرهنگی، اجتماعی و انسانی نیز وارد ساختار تصمیم‌گیری شوند.

رابطه میان طبیعت و فضای معماری در مقیاس منظر نیز یکی از مؤلفه‌های بنیادین این نگرش محسوب می‌شود. بررسی وحدت فضای طبیعی و معماری نشان داده است که پیوند میان محیط طبیعی و سازمان معماری می‌تواند به ایجاد یک کل منسجم کمک کند و مرز سخت میان مصنوع و طبیعی را کاهش دهد (18). چنین نگرشی با یکی از اصول اصلی سیستم‌های طبیعی، یعنی هماهنگی اجزا با کل و تعامل ساختار با بستر، همخوان است. در معماری بیونیک، ساختمان زمانی می‌تواند عملکردی سازگار داشته باشد که فرم، سازمان فضایی، پوسته و استقرار آن مستقل از محیط تعریف نشوند. از این منظر، وحدت عناصر معماری با مکان و طبیعت، نه یک ویژگی صرفاً زیبایی‌شناختی، بلکه می‌تواند مبنایی برای افزایش هماهنگی عملکردی و کاهش تعارض میان ساختمان و شرایط محیطی باشد. در همین چارچوب، معماری پایدار نیازمند ترکیبی از راهبردهای ایستا و پویاست. معماری جنبشی و سیستم‌های متحرک می‌توانند با ایجاد قابلیت تغییر در پاسخ به شرایط محیطی، ساختمان را از یک کالبد ثابت به سیستمی واکنش‌پذیر تبدیل کنند. بررسی اصول جنبشی در معماری پویا و مسکن نشان داده است که تغییرپذیری اجزا می‌تواند به افزایش انعطاف‌پذیری و پاسخ‌گویی ساختمان کمک کند (19). همچنین، مرور کاربرد بیومیمیکری در ساختمان‌های پایدار و ارتباط آن با معماری جنبشی بر ظرفیت سازوکارهای متحرک برای انطباق با شرایط محیطی و ارتقای عملکرد تأکید کرده است (20). چنین سیستم‌هایی از نظر مفهومی به رفتار موجودات زنده نزدیک‌اند؛ زیرا ارگانیسم‌های طبیعی نیز ساختارهایی ثابت و منفعل نیستند، بلکه در واکنش به محرک‌های محیطی تغییر وضعیت می‌دهند. در کنار انعطاف‌پذیری و سازگاری، مسئله فرم و تنوع کالبدی نیز اهمیت دارد. معماری معاصر طیف متنوعی از الگوهای شکلی و سبک‌های فضایی را تجربه کرده است و تحلیل مورفولوژی سبک‌ها در فضای داخلی مسکونی قرن بیست و یکم نشان می‌دهد که فرم و سازمان محیط مسکونی تابع مجموعه‌ای از تحولات زیبایی‌شناختی، عملکردی و فرهنگی است (21). در معماری بیونیک نیز آزادی فرمی می‌تواند یکی از پیامدهای الهام از طبیعت باشد، زیرا سیستم‌های طبیعی الزاماً تابع هندسه‌های ساده و صلب نیستند. با این حال، تنوع هندسی هنگامی ارزشمند است که به بهبود عملکرد، انطباق و سازمان فضایی منجر شود. از این رو، ارزیابی شاخص‌هایی مانند تبعیت نکردن از یک هندسه خاص، تناظر، پایداری فرم و پیوستگی سلسله‌مراتب فضایی باید در ارتباط با سایر ابعاد مدل انجام گیرد و نه به صورت مستقل.

رویکرد اکولوژیک به طراحی نیز نشان می‌دهد که کیفیت معماری وابسته به چگونگی برقراری تعادل میان نیازهای انسانی و ظرفیت محیط طبیعی است. طراحی سکونتگاه‌های متراکم یا عمودی در چارچوب معماری اکولوژیک بر لزوم ترکیب مسائل اجتماعی، محیطی و فضایی تأکید دارد (22). این دیدگاه به‌ویژه در محیط‌های شهری که محدودیت زمین و تراکم جمعیت بالا است اهمیت پیدا می‌کند. معماری بیونیک در چنین شرایطی می‌تواند به جای توسعه صرف فرم‌های نمادین، به ایجاد راهبردهایی برای استفاده بهینه از فضا، منابع و انرژی کمک کند.

از منظر طراحی، یکی دیگر از چالش‌های مهم آن است که شاخص‌های معماری بیونیک معمولاً مستقل از یکدیگر عمل نمی‌کنند. برای مثال، جهت‌گیری ساختمان می‌تواند هم‌زمان با اقلیم، فرم، پوسته و استقرار ارتباط داشته باشد؛ زمینه‌گرایی می‌تواند بر انتخاب مواد، سازمان فضایی و ارتباط با معماری بومی اثر بگذارد؛ و معیارهای اجتماعی می‌توانند نحوه ترکیب و سلسله‌مراتب فضاها را تغییر دهند. همین وابستگی‌های متقابل سبب می‌شود که روش‌های ساده رتبه‌بندی خطی نتوانند ساختار واقعی مسئله را به‌طور کامل منعکس کنند. پژوهش‌های مرتبط با معماری پایدار، سیستم‌های بیونیک و فناوری‌های طراحی نشان می‌دهند که

مسئله طراحی ماهیتی چندمتغیره و شبکه‌ای دارد و تصمیم‌نهایی حاصل تعامل عوامل متعددی است (3, 13, 20). ازاین‌رو، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ای که بتوانند هم اهمیت نسبی معیارها و هم روابط اثرگذاری و اثرپذیری میان آنها را مدل‌سازی کنند، از نظر روش‌شناختی ضروری به نظر می‌رسد. افزون بر این، بررسی نمونه‌های معماری بیونیک نشان می‌دهد که کاربرد موفق اصول زیست‌الهام‌گرفته نیازمند ترکیب دانش معماری با مهندسی، فناوری، محیط زیست و علوم اجتماعی است. تحلیل ساختارهای بیونیک در پروژه‌های معماری و مهندسی، مطالعه بازسازی ساختمان‌ها و بررسی سیستم‌های شهری زیست‌الهام‌گرفته همگی بر ماهیت میان‌رشته‌ای این حوزه دلالت دارند (7, 8, 14). این میان‌رشته‌گی از یک سو ظرفیت بالایی برای نوآوری ایجاد می‌کند، اما از سوی دیگر، تعیین اینکه کدام معیارها در فرایند طراحی از اهمیت بیشتری برخوردارند را دشوار می‌سازد. در غیاب یک چارچوب اولویت‌بندی، ممکن است طراحان به عناصر بصری یا تکنولوژیک توجه بیش از حد نشان دهند و عواملی مانند اقلیم، زمینه، معماری بومی، سازمان فضایی یا روابط اجتماعی را نادیده بگیرند.

همچنین، مطالعات مرتبط با تحول محیط معماری و استفاده از سیستم‌های دیجیتال نشان داده‌اند که ابزارهای جدید طراحی صرفاً وسیله تولید فرم نیستند، بلکه می‌توانند برای تحلیل و ارزیابی روابط پیچیده میان اجزای محیط نیز به کار روند (4, 5). ترکیب این ظرفیت محاسباتی با رویکردهای بیونیک می‌تواند زمینه را برای گذار از طراحی شهودی به تصمیم‌گیری ساختاریافته فراهم کند. به همین دلیل، در پژوهش حاضر ضروری است شاخص‌های بیونیک نه فقط بر اساس فراوانی حضور در ادبیات، بلکه بر اساس وزن نسبی، روابط متقابل و نقش آنها در بهینه‌سازی مصرف انرژی ارزیابی شوند.

از سوی دیگر، شواهد مربوط به سازگاری معماری با بسترهای متفاوت نشان می‌دهد که هیچ راهبرد واحدی را نمی‌توان برای تمام مناطق و پروژه‌ها به کار برد. معماری مناطق خشک، فضاهای شهری متراکم، محلات مسکونی، محیط‌های باز و ساختمان‌های موجود، هر یک محدودیت‌ها و فرصت‌های متفاوتی دارند (2, 11, 15). همین امر بر اهمیت زمینه‌گرایی در معماری بیونیک می‌افزاید. از منظر معماری ایرانی نیز تجربه تاریخی سازگاری با اقلیم و استفاده از الگوهای بومی می‌تواند به‌عنوان منبعی برای بازتفسیر اصول زیست‌الهام‌گرفته در طراحی معاصر مطرح شود (12). بنابراین، پیوند میان اصول طبیعی، ویژگی‌های زمینه‌ای و دانش معماری بومی می‌تواند مبنایی مناسب برای توسعه راهبردهای انرژی‌کارآمد فراهم آورد.

مجموع این مباحث نشان می‌دهد که معماری بیونیک را باید نظامی چندبعدی در نظر گرفت که در آن عوامل نهادی و ارزشی، محیطی و زمینه‌ای، فرهنگی و اجتماعی و کالبدی و فضایی به‌صورت متقابل بر یکدیگر اثر می‌گذارند. توجه به فناوری، اقتصاد، هنجارها و الگوهای استقرار در کنار طبیعت‌گرایی، اقلیم و معماری بومی، و نیز ترکیب آنها با مؤلفه‌هایی مانند جمعی بودن، نمادها، جهت‌دهی، تناظر، وحدت با مکان، سلسله‌مراتب فضایی و پایداری فرم، می‌تواند تصویری جامع‌تر از الزامات معماری بیونیک ارائه دهد. چنین نگاهی با مطالعاتی که بر ارتباط میان طبیعت، فضای معماری، پایداری و کیفیت محیط تأکید کرده‌اند همسو است (16-18). در عین حال، وجود روابط پیچیده میان این شاخص‌ها ایجاب می‌کند که مدل پژوهش قادر باشد علاوه بر وزن‌دهی، ساختار علّی و وابستگی‌های درونی آنها را نیز آشکار سازد.

با وجود توسعه ادبیات مرتبط با معماری بیونیک، معماری پایدار، سیستم‌های پویا، طراحی اکولوژیک و روش‌های محاسباتی، هنوز نیاز به چارچوبی منسجم برای تشخیص و اولویت‌بندی شاخص‌هایی وجود دارد که بتوانند اصول ساختاری و عملکردی طبیعت را به راهبردهای معماری مرتبط با بهره‌وری انرژی تبدیل کنند. پژوهش‌های پیشین هر یک بخشی از این مسئله را، از معماری جنبشی و سیستم‌های بومی گرفته تا محیط شهری، ساختارهای بیونیک، فناوری دیجیتال و

بهینه‌سازی فرم، بررسی کرده‌اند (6, 19, 21, 22). باین‌حال، برای استفاده عملی از این دانش در تصمیم‌گیری معماری لازم است مشخص شود کدام دسته از عوامل بیشترین اهمیت را دارند، کدام معیارها نقش اثرگذار یا اثرپذیر دارند و کدام زیرمعیارها باید در طراحی ساختمان‌های انرژی‌کارآمد در اولویت قرار گیرند. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های معماری بیونیک مؤثر بر بهره‌وری مصرف انرژی در طراحی معماری و تحلیل روابط متقابل میان آنها با استفاده از مدل ترکیبی فازی DEMATEL-ANP بود.

روش شناسایی

پژوهش حاضر با هدف شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های معماری بیونیک مؤثر بر بهره‌وری مصرف انرژی در ساختمان‌ها انجام شد و از نظر هدف، پژوهشی کاربردی و از نظر شیوه اجرا، پژوهشی پیمایشی محسوب می‌شود. در این مطالعه، رویکرد پژوهش بر تلفیق ارزیابی‌های کیفی خبرگان با تحلیل‌های کمی تصمیم‌گیری چندمعیاره استوار بود؛ به گونه‌ای که ابتدا معیارها و زیرمعیارهای مرتبط با معماری بیونیک و بهینه‌سازی مصرف انرژی بر اساس بررسی مبانی نظری، مطالعات پیشین و دیدگاه‌های تخصصی خبرگان شناسایی و سپس پالایش شدند. ساختار نهایی مدل پژوهش شامل چهار معیار اصلی و ۱۹ زیرمعیار بود. چهار معیار اصلی شامل عوامل نهادی و ارزشی، عوامل محیطی و زمینه‌ای، عوامل فرهنگی و اجتماعی و عوامل کالبدی و فضایی بودند که مجموعه زیرمعیارهای مرتبط با هر یک، مبنای مراحل بعدی مقایسه، وزن‌دهی و تحلیل روابط متقابل قرار گرفتند. جامعه مورد مطالعه را کارشناسان، مدیران و مهندسان مرتبط با پروژه‌های اجرایی و عمرانی تشکیل دادند که از دانش و تجربه مرتبط با موضوع معماری، طراحی، انرژی و شرایط خاص مسئله پژوهش برخوردار بودند. انتخاب مشارکت‌کنندگان به صورت هدفمند انجام شد تا افرادی وارد مطالعه شوند که ارتباط مستقیم با حوزه مورد بررسی داشته و قادر به ارائه قضاوت‌های تخصصی درباره اهمیت و روابط میان شاخص‌های پژوهش باشند. در تعیین کفایت نمونه نیز منطق اشباع دیدگاه‌های تخصصی مورد توجه قرار گرفت. با توجه به ماهیت تصمیم‌گیری چندمعیاره مطالعه، پژوهش بر آزمون فرضیه‌های آماری متعارف استوار نبود، بلکه هدف اصلی آن استخراج ساختار تصمیم‌گیری، تعیین اهمیت نسبی معیارها و شناسایی روابط اثرگذاری و اثرپذیری میان آنها بود.

ابزار اصلی گردآوری داده‌ها در این پژوهش، پرسشنامه ساختاریافته ماتریسی مبتنی بر مقایسات زوجی و مقیاس‌های فازی بود. محتوای پرسشنامه با توجه به ساختار مفهومی پژوهش و معیارها و زیرمعیارهای استخراج‌شده از ادبیات موضوع و نظر خبرگان تدوین شد. در این ابزار، خبرگان اهمیت نسبی معیارها و زیرمعیارها را از طریق مقایسه‌های زوجی ارزیابی کردند و همچنین درباره میزان تأثیر متقابل عناصر مدل بر یکدیگر قضاوت نمودند. به منظور کاهش محدودیت ناشی از قطعی در نظر گرفتن قضاوت‌های انسانی، ارزیابی‌های زبانی خبرگان به اعداد فازی مثلثی تبدیل شد تا ابهام و عدم قطعیت موجود در پاسخ‌های تخصصی در فرایند تحلیل حفظ شود. دیدگاه‌های خبرگان پس از گردآوری با استفاده از میانگین فازی تجمیع شدند و برای هر مقایسه، یک ارزیابی گروهی به دست آمد. روایی صوری و محتوایی پرسشنامه با ارائه ابزار به اساتید و صاحب‌نظران حوزه معماری و انرژی بررسی و تأیید شد و برای ارزیابی پایایی و سازگاری درونی ابزار نیز از ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد. علاوه بر این، سازگاری قضاوت‌های انجام‌شده در بخش مقایسات زوجی مورد ارزیابی قرار گرفت و نرخ ناسازگاری برابر با ۰.۰۷ به دست آمد که از مقدار قابل قبول ۰.۱۰ کمتر بود؛ بنابراین، سازگاری ارزیابی‌های خبرگان برای ادامه تحلیل مناسب تشخیص داده شد. تأیید محتوای پرسشنامه توسط خبرگان حوزه موضوعی نیز به عنوان مؤید روایی ابزار در نظر گرفته شد.

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از یک چارچوب تلفیقی تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر منطق فازی و روش‌های ANP و DEMATEL استفاده شد. انتخاب این رویکرد به دلیل ماهیت پیچیده مسئله، وجود وابستگی‌های متقابل میان معیارهای معماری بیونیک و همچنین عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های خبرگان صورت گرفت. در مرحله نخست، داده‌های حاصل از پرسشنامه‌های تخصصی سازمان‌دهی و ماتریس‌های مقایسات زوجی فازی تشکیل شدند. سپس ارزیابی‌های خبرگان با استفاده از میانگین فازی تجمیع و اوزان فازی معیارها و زیرمعیارها محاسبه شد. برای تبدیل اوزان فازی به مقادیر قطعی، فرایند فازی‌زدایی انجام گرفت و وزن‌های نرمال‌شده به‌منظور تعیین اهمیت نسبی شاخص‌ها استخراج شدند. در ادامه، تکنیک DEMATEL برای بررسی روابط متقابل میان معیارها مورد استفاده قرار گرفت. در این مرحله، ماتریس روابط مستقیم بر اساس ارزیابی‌های فازی خبرگان تشکیل و شدت و جهت اثرگذاری هر معیار بر سایر معیارها محاسبه شد. این تحلیل امکان تفکیک معیارهای دارای نقش اثرگذار از معیارهای بیشتر اثرپذیر را فراهم کرد و ساختار علی شبکه معیارها را مشخص ساخت. سپس نتایج حاصل از تحلیل روابط متقابل در فرایند ANP وارد شد تا وابستگی‌های درونی و بین‌معیاری در تعیین وزن‌های نهایی لحاظ شوند. به این ترتیب، اولویت نهایی معیارها صرفاً بر اساس اهمیت مستقل آنها تعیین نشد، بلکه روابط شبکه‌ای و تأثیر متقابل عناصر مدل نیز در محاسبه وزن نهایی منظور شد. فرایند محاسباتی شامل آماده‌سازی داده‌ها و ماتریس‌ها در نرم‌افزار Excel و انجام محاسبات فازی، فازی‌زدایی، تحلیل وابستگی‌ها و استخراج وزن‌های نهایی با استفاده از کدهای برنامه‌نویسی‌شده در نرم‌افزار MATLAB بود. در نهایت، بر اساس اوزان تلفیقی و روابط شبکه‌ای به‌دست‌آمده، معیارها و زیرمعیارهای معماری بیونیک از نظر نقش آنها در بهینه‌سازی مصرف انرژی رتبه‌بندی شدند و میزان نزدیکی هر گزینه به راه‌حل ایده‌آل برای تعیین اولویت نهایی مورد محاسبه قرار گرفت. این فرایند تحلیلی امکان بررسی هم‌زمان اهمیت نسبی، اثرگذاری متقابل و جایگاه نهایی هر یک از مؤلفه‌های مدل را فراهم ساخت.

یافته‌ها

پس از تکمیل فرایند گردآوری و دسته‌بندی داده‌های میدانی، داده‌های حاصل از پرسشنامه‌های تخصصی با هدف شناسایی، وزن‌دهی و اولویت‌بندی شاخص‌های معماری بیونیک مؤثر بر بهینه‌سازی مصرف انرژی مورد تحلیل قرار گرفتند. با توجه به پیچیدگی روابط میان معیارهای تصمیم‌گیری و وجود وابستگی متقابل بین آنها، تحلیل‌ها در چارچوب مدل تلفیقی فازی ANP-DEMATEL انجام شد. در این فرایند، داده‌ها ابتدا در نرم‌افزار Excel آماده‌سازی شدند و محاسبات فازی، فازی‌زدایی، تحلیل وابستگی‌ها و استخراج وزن نهایی شاخص‌ها با استفاده از کدهای برنامه‌نویسی‌شده در MATLAB انجام گرفت.

بر اساس بررسی مطالعات پیشین، مبانی نظری پژوهش و دیدگاه‌های خبرگان، مجموعه اولیه شاخص‌ها بررسی و پالایش شد و در نهایت چهار معیار اصلی و ۱۹ زیرمعیار در ساختار تصمیم‌گیری پژوهش باقی ماندند. چهار معیار اصلی شامل عوامل نهادی و ارزشی، عوامل محیطی و زمینه‌ای، عوامل فرهنگی و اجتماعی و عوامل کالبدی و فضایی بودند. معیار عوامل نهادی و ارزشی شامل شش زیرمعیار، عوامل محیطی و زمینه‌ای شامل چهار زیرمعیار، عوامل فرهنگی و اجتماعی شامل پنج زیرمعیار و عوامل کالبدی و فضایی شامل چهار زیرمعیار بود.

جدول ۱. معیارها و زیرمعیارهای نهایی پژوهش

نماد معیار	معیار اصلی	نماد	زیرمعیار
D۱	عوامل نهادی و ارزشی	L۱۱	ارزش‌ها
D۱	عوامل نهادی و ارزشی	L۱۲	هنجارها

D۱	عوامل نهادی و ارزشی	L۱۳	تکنولوژی
D۱	عوامل نهادی و ارزشی	L۱۴	عوامل اقتصادی
D۱	عوامل نهادی و ارزشی	L۱۵	الگوهای استقرار
D۱	عوامل نهادی و ارزشی	L۱۶	توجه به شکل‌های متنوع کهن‌الگوها و الهام از آنها در مناطق مختلف دنیا
D۲	عوامل محیطی و زمینه‌ای	L۲۱	طبیعت‌گرایی
D۲	عوامل محیطی و زمینه‌ای	L۲۲	زمینه‌گرایی
D۲	عوامل محیطی و زمینه‌ای	L۲۳	حوزه اقلیمی
D۲	عوامل محیطی و زمینه‌ای	L۲۴	اقتباس از معماری بومی
D۳	عوامل فرهنگی و اجتماعی	L۳۱	جمعی بودن
D۳	عوامل فرهنگی و اجتماعی	L۳۲	قابلیت ترکیب
D۳	عوامل فرهنگی و اجتماعی	L۳۳	نشانه‌ها و نمادها
D۳	عوامل فرهنگی و اجتماعی	L۳۴	تبعیت نکردن از یک هندسه خاص
D۳	عوامل فرهنگی و اجتماعی	L۳۵	توجه به جهت‌دهی
D۴	عوامل کالبدی و فضایی	L۴۱	توجه به تناظر
D۴	عوامل کالبدی و فضایی	L۴۲	حفظ وحدت عناصر با مکان و کیهان در عین کثرت‌گرایی
D۴	عوامل کالبدی و فضایی	L۴۳	تفکیک کیفی نواحی مختلف فضایی و پیوستگی سلسله‌مراتب فضایی
D۴	عوامل کالبدی و فضایی	L۴۴	توجه به پایداری فرم

پس از تعیین ساختار مدل، اهمیت نسبی معیارها و زیرمعیارها بر اساس مقایسات زوجی خبرگان تعیین شد. برای تبدیل قضاوت‌های کیفی به مقادیر قابل پردازش، از اعداد فازی مثلثی استفاده شد. شدت ترجیح از «ترجیح یکسان» تا «خیلی مرجح» در پنج سطح در نظر گرفته شد. برای ترجیح یکسان، عدد فازی ۱، ۱ به کار رفت. سطح بینابین نخست با ۱، ۲، ۳ و معکوس آن با ۰.۳۳۳، ۰.۵، ۰؛ «کمی مرجح» با ۲، ۳، ۴ و معکوس ۰.۲۵، ۰.۳۳۳، ۰.۵؛ سطح بینابین دوم با ۳، ۴، ۵ و معکوس ۰.۲، ۰.۲۵، ۰.۳۳۳؛ و «خیلی مرجح» با ۴، ۵، ۶ و معکوس ۰.۱۶۶، ۰.۲، ۰.۲۵ تعریف شد.

پس از تجمیع دیدگاه‌های خبرگان از طریق میانگین فازی، ماتریس مقایسات زوجی معیارهای اصلی تشکیل شد. مقادیر این ماتریس و نتایج نهایی فازی‌زدایی در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. ماتریس میانگین فازی مقایسات زوجی و وزن نهایی معیارهای اصلی

معیار	D۱	D۲	D۳	D۴	وزن نرمال نهایی
D۱	(۱، ۱، ۱)	(۷.۱۰۰، ۷.۶۰۰، ۸.۱۰۰)	(۶.۳۰۰، ۷.۷۰۰، ۷.۷۰۰)	(۴.۵۰۰، ۵.۴۰۰، ۶.۳۰۰)	۰.۲۴۴
D۲	(۰.۱۲۳، ۰.۱۳۲، ۰.۱۴۱)	(۱، ۱، ۱)	(۰.۶۲۵، ۰.۶۶۷، ۰.۷۵۰)	(۰.۱۷۱، ۰.۲۱۰، ۰.۲۷۵)	۰.۰۱۵
D۳	(۰.۱۳۰، ۰.۱۴۳، ۰.۱۵۹)	(۱.۳۳۳، ۱.۵۰۰، ۱.۶۰۰)	(۱، ۱، ۱)	(۰.۲۰۸، ۰.۲۶۹، ۰.۳۸۳)	۰.۰۶۱
D۴	(۰.۱۵۹، ۰.۱۸۵، ۰.۲۲۲)	(۳.۶۳۶، ۴.۷۷۳، ۵.۸۵۴)	(۲.۶۰۹، ۳.۷۲۳، ۴.۸۰۰)	(۱، ۱، ۱)	۰.۱۳۲

جمع فازی ردیف‌های D1 تا D4 به‌ترتیب برابر با (۴۱.۲۰۰، ۴۷.۲۰۰، ۵۳.۲۰۰، ۲.۶۸۶، ۲.۹۱۶، ۳.۳۱۶، ۹.۵۳۳، ۱۱.۶۷۰، ۱۳.۸۷۰) و (۲۰.۳۶۲، ۲۵.۳۳۷، ۳۰.۳۰۹) به دست آمد و مجموع کلی ترجیحات برابر با (۱۶۱.۷۳۱، ۱۹۲.۶۷۴، ۲۲۳.۶۴۸) گزارش شد. پس از نرمال‌سازی، اوزان فازی D1، D2، D3 و D4 به‌ترتیب برابر با (۰.۱۸۴، ۰.۲۴۵، ۰.۳۲۹، (۰.۰۱۲، ۰.۰۱۵، ۰.۰۲۱، (۰.۰۴۳، ۰.۰۶۱، ۰.۰۸۶) و (۰.۰۹۱، ۰.۱۳۱، ۰.۱۸۷) بود.

برای تبدیل اوزان فازی به مقادیر قطعی، روش عدد کریسپ مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر فازی زدایی شده برای D1، D2، D3 و D4 به ترتیب ۰.۲۵۳، ۰.۰۱۶، ۰.۰۶۳ و ۰.۱۳۷ و وزن‌های نرمال آنها به ترتیب ۰.۲۴۴، ۰.۰۱۵، ۰.۰۶۱ و ۰.۱۳۲ بود. بنابراین، در مرحله اولیه مقایسات زوجی، D1 بالاترین وزن را داشت؛ پس از آن D4، D3 و D2 قرار گرفتند. این رتبه‌بندی اولیه با رتبه‌بندی نهایی مدل شبکه‌ای متفاوت بود که در مراحل بعدی گزارش می‌شود.

به منظور بررسی قابلیت اتکای قضاوت‌های خبرگان، نرخ ناسازگاری مقایسات زوجی محاسبه شد. در این فرایند، ابتدا ماتریس مقایسات زوجی با بردار وزن‌های نسبی ترکیب و بردار سازگاری استخراج شد؛ سپس مقدار ویژه اصلی و شاخص ناسازگاری به دست آمد و با شاخص ناسازگاری تصادفی متناسب با تعداد معیارها مقایسه شد. مقادیر شاخص تصادفی برای ماتریس‌های با ابعاد ۲ تا ۱۵ به ترتیب برابر با ۰، ۰،۵۸، ۰،۹۰، ۱،۱۲، ۱،۲۴، ۱،۳۲، ۱،۴۱، ۱،۴۵، ۱،۴۹، ۱،۵۱، ۱،۴۸، ۱،۵۶، ۱،۵۷ و ۱،۵۹ بود. نرخ ناسازگاری نهایی برابر با ۰،۰۷ به دست آمد. از آنجا که این مقدار کمتر از آستانه ۰،۱۰ بود، سازگاری قضاوت‌های خبرگان قابل قبول ارزیابی شد.

پس از تعیین وزن معیارهای اصلی، زیرمعیارهای متعلق به هر خوشه نیز به صورت زوجی مقایسه شدند. در این بخش، نظرات ۱۰ خبره مورد استفاده قرار گرفت. محدودیت دسترسی به متخصصان در شرایط همه‌گیری کرونا یکی از عوامل تعیین‌کننده تعداد خبرگان گزارش شده است. برای نمونه، در مقایسات مربوط به بخشی از زیرمعیارهای عوامل نهادی و ارزشی، نرخ ناسازگاری برابر با ۰.۰۸۳ بود و در محدوده قابل قبول قرار داشت.

در مقایسه L11 با L12، ارزیابی ۱۰ خبره به ترتیب شامل (۱، ۱، ۱)، (۰.۱۶۷، ۰.۲، ۰.۲۵)، (۱، ۱، ۱)، (۱، ۱، ۱)، (۴، ۵، ۶)، (۱، ۱، ۱)، (۰.۱۱۲، ۰.۱۱۲، ۰.۱۱۲)، (۱، ۱، ۱)، (۴، ۳، ۲) و (۰.۱۶۷، ۰.۲، ۰.۲۵) بود. برای مقایسه L11 با L13، مقادیر به ترتیب (۰.۲۵، ۰.۳۳۴، ۰.۵)، (۴، ۵، ۶)، (۲، ۳، ۴)، (۱، ۱، ۱)، (۴، ۵، ۶)، (۱، ۱، ۱)، (۰.۱۶۷، ۰.۲، ۰.۲۵)، (۴، ۵، ۶)، (۱، ۱، ۱)، (۱، ۱، ۱)، (۱، ۱، ۱) و (۰.۲۵، ۰.۳۳۴، ۰.۵) به دست آمد. در مقایسه L12 با L13 نیز مقادیر به ترتیب (۰.۱۶۷، ۰.۲، ۰.۲۵)، (۴، ۵، ۶)، (۲، ۳، ۴)، (۱، ۱، ۱)، (۶، ۷، ۸)، (۱، ۱، ۱)، (۹، ۹، ۹)، (۱، ۱، ۱) و (۴، ۵، ۶) بود.

پس از تجميع اين قضاوت‌ها، ماتريس ميانگين فازي و اوزان نهايي سه زيرمعيار نمونه به شرح جدول ۳ حاصل شد.

جدول ۳. میانگین فازی و وزن نهایی زیرمعیارهای نمونه از عوامل نهادی و ارزشی

زیرمعیار	L۱۱	L۱۲	L۱۳	وزن فازی نرمال	وزن قطعی نرمال
L۱۱	(۱، ۱، ۱)	(۱، ۱، ۱)	(۱، ۱، ۱)	(۰، ۰، ۰)	۰، ۰، ۰
L۱۲	(۰، ۰، ۰)	(۱، ۱، ۱)	(۰، ۰، ۰)	(۰، ۰، ۰)	۰، ۰، ۰
L۱۳	(۰، ۰، ۰)	(۰، ۰، ۰)	(۱، ۱، ۱)	(۰، ۰، ۰)	۰، ۰، ۰

جمع‌های فازی مربوط به این سه زیرمعیار به ترتیب برابر با (۳،۶۱۱، ۴،۱۳۸، ۴،۶۸۶)، (۴،۵۵۷، ۵،۰۶۰، ۵،۵۹۹) و (۱،۷۳۹، ۱،۸۶۱، ۲،۰۲۵) بود و مجموع کلی برابر با (۹،۹۰۸، ۱۱،۰۵۹، ۱۲،۳۱۰) به دست آمد. پس از فازی‌زدایی، مقادیر قطعی $L11$ ، $L12$ و $L13$ به ترتیب ۰،۳۸۰، ۰،۴۶۴ و ۰،۱۷۱ و وزن‌های نرمال آنها

۰.۳۷۴، ۰.۴۵۷ و ۰.۱۶۹ بود. بنابراین، در این نمونه L12 بیشترین، L11 رتبه دوم و L13 کمترین وزن نسبی را به خود اختصاص داد. محاسبات مربوط به سایر زیرمعیارها نیز با همین منطق انجام شد.

در مرحله بعد، صرف وزن نسبی معیارها برای تبیین ساختار تصمیم‌گیری کافی در نظر گرفته نشد و روابط اثرگذاری و اثرپذیری متقابل میان چهار معیار اصلی با استفاده از DEMATEL بررسی شد. در این مرحله مقیاس زبانی «بدون تأثیر»، «تأثیر کم»، «تأثیر گذار»، «تأثیر زیاد» و «تأثیر خیلی زیاد» به ترتیب با مقادیر کمی ۰، ۱، ۲، ۳ و ۴ مشخص شد. معادله‌های فازی این سطوح به ترتیب (۰، ۰.۱، ۰.۳)، (۰.۱، ۰.۳، ۰.۵)، (۰.۳، ۰.۵، ۰.۷)، (۰.۵، ۰.۷، ۰.۹) و (۰.۷، ۰.۹، ۱) در نظر گرفته شدند.

بر اساس میانگین فازی دیدگاه خبرگان، ماتریس ارتباط مستقیم فازی تشکیل شد. برای D1، روابط با D1 تا D4 به ترتیب (۰، ۰.۱، ۰.۳)، (۰.۵، ۰.۷، ۰.۹)، (۰.۳، ۰.۵، ۰.۷) و (۰.۷، ۰.۹، ۱) بود. برای D2 این مقادیر به ترتیب (۰.۷، ۰.۹، ۱)، (۰، ۰.۱، ۰.۳)، (۰.۱، ۰.۳، ۰.۵) و (۰.۳، ۰.۵، ۰.۷) برابر با D3 و (۰.۹، ۰.۷، ۰.۵) و (۰.۳، ۰.۱، ۰)؛ و برای D4 برابر با (۰.۳، ۰.۱، ۰)، (۰.۳، ۰.۱، ۰)، (۰.۳، ۰.۱، ۰) و (۰.۳، ۰.۱، ۰) بود.

برای تبدیل مقادیر فازی به مقادیر قطعی از تکنیک CFCS استفاده شد. این فرایند شامل نرمال‌سازی داده‌های فازی، تعیین کران‌های بالا و پایین، محاسبه مقادیر نرمال کریسپ، قطعی‌سازی و تجمیع مقادیر بود. خروجی قطعی این مرحله در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. ماتریس ارتباط مستقیم قطعی معیارهای اصلی

معیار	D1	D2	D3	D4
D1	۰.۰۷۱	۰.۹۱۷	۰.۷۳۸	۰.۰۸۰
D2	۰.۷۳۸	۰.۰۷۱	۰.۹۱۷	۰.۰۸۰
D3	۰.۵۴۸	۰.۳۵۷	۰.۰۷۱	۰.۰۸۰
D4	۰.۰۷۱	۰.۰۷۱	۰.۷۳۸	۰.۰۸۰

در ادامه، ماتریس ارتباط مستقیم برای انجام محاسبات بعدی نرمال‌سازی شد. بزرگ‌ترین مقدار مبنای نرمال‌سازی برابر با ۵.۶۵ گزارش شد و ضریب نرمال‌سازی متناظر ۰.۱۷۷ در نظر گرفته شد. ماتریس نرمال‌شده گزارش‌شده شامل ردیف D1 با مقادیر ۰.۴۰۱، ۵.۱۸۳، ۴.۱۷۳ و ۰.۴۵۵؛ ردیف D2 با مقادیر ۴.۱۷۳، ۰.۴۰۱، ۰.۴۵۵ و ۵.۱۸۳؛ ردیف D3 با مقادیر ۳.۰۹۶، ۲.۰۱۹، ۰.۴۰۱ و ۰.۴۵۵؛ و ردیف D4 با مقادیر ۰.۴۰۱، ۰.۴۰۱، ۴.۱۷۳ و ۰.۴۵۵ بود. این مقادیر همان مقادیر گزارش‌شده در داده‌های پژوهش هستند.

پس از آن، ماتریس روابط کامل محاسبه شد تا علاوه بر اثرات مستقیم، اثرات غیرمستقیم میان معیارها نیز لحاظ شود. مقدار آستانه برای حذف روابط ضعیف برابر با ۲.۶۵۳ تعیین شد. روابطی که شدت آنها بالاتر از این مقدار بود، به عنوان روابط معنادار شبکه در نظر گرفته شدند. بر این اساس، D1 با D2، D3 و D4 به ترتیب دارای شدت رابطه ۳.۸۳۹، ۳.۵۳۳ و ۴.۴۲۲ بود و رابطه D2 با D3 نیز شدت ۳.۳۴۳ داشت؛ سایر روابط زیر سطح آستانه قرار گرفتند.

شاخص‌های D و R برای تعیین میزان اثرگذاری و اثرپذیری معیارها نیز محاسبه شدند. مقدار D میزان تأثیر یک معیار بر سایر معیارها و مقدار R میزان تأثیرپذیری آن از سایر معیارها را نشان می‌دهد. مجموع D+R جایگاه کلی معیار در شبکه و D-R نقش علی یا معلولی آن را مشخص می‌کند.

جدول ۵. شاخص های روابط علی معیارهای اصلی

معیار	D	R	D+R	D-R
عوامل نهادی و ارزشی	۲۳.۶۰۴	۱۴.۱۸۷	۳۹.۷۹۱	۹.۴۱۶
عوامل محیطی و زمینه ای	۱۵.۸۱۰	۳۳.۵۷۹	۴۹.۳۸۹	-۱۷.۷۶۹
عوامل فرهنگی و اجتماعی	۱۰.۵۷۶	۳۹.۱۷۲	۴۹.۷۴۸	-۲۸.۵۹۶
عوامل کالبدی و فضایی	۷.۳۸۷	۳۸.۶۹۷	۴۶.۰۸۴	-۳۱.۳۱۱

نتایج نشان داد عوامل نهادی و ارزشی با D-R مثبت و برابر با ۹.۴۱۶، مهم ترین معیار اثرگذار یا علی در شبکه بودند. سه معیار دیگر دارای مقادیر منفی D-R بودند و بیشتر در جایگاه اثرپذیر قرار گرفتند. عوامل کالبدی و فضایی با D برابر با ۷.۳۸۷ کمترین میزان اثرگذاری را داشتند، در حالی که عوامل فرهنگی و اجتماعی با R برابر با ۳۹.۱۷۲ و عوامل کالبدی و فضایی با R برابر با ۳۸.۶۹۷ از بیشترین میزان اثرپذیری برخوردار بودند. بنابراین، جایگاه معیارها در شبکه روابط با وزن اولیه حاصل از مقایسات زوجی یکسان نبود.

پس از شناسایی روابط متقابل، وزن های اولیه در ساختار شبکه ای ANP قرار گرفتند. ابتدا سوپرماتریس ناموزون تشکیل شد، سپس از طریق نرمال سازی ستون ها سوپرماتریس موزون حاصل شد و در مرحله پایانی، با تکرار توان های سوپرماتریس، سوپرماتریس حد به دست آمد. وزن های پایدار حاصل از سوپرماتریس حد، مبنای تعیین رتبه نهایی ۱۹ زیرمعیار قرار گرفتند.

جدول ۶. وزن و رتبه نهایی زیرمعیارها بر اساس سوپرماتریس حد

نماد	زیرمعیار	وزن کلی	وزن نرمال	رتبه گزارش شده
L11	ارزش ها	۰.۰۰۶۵	۰.۰۰۶۹	۱۴
L12	هنجارها	۰.۰۰۲۶	۰.۰۰۲۸	۱۷
L13	تکنولوژی	۰.۰۰۱۹	۰.۰۰۲۰	۱۸
L14	عوامل اقتصادی	۰.۰۱۰۱	۰.۰۱۰۸	۱۲
L15	الگوهای استقرار	۰.۰۰۴۳	۰.۰۰۴۵	۱۵
L16	توجه به شکل های متنوع کهن الگوها و الهام از آنها در مناطق مختلف دنیا	۰.۰۰۱۶	۰.۰۰۱۷	۱۸
L21	طبیعت گرایی	۰.۰۳۳۴	۰.۰۳۵۴	۶
L22	زمینه گرایی	۰.۰۱۳۰	۰.۰۱۳۸	۱۱
L23	حوزه اقلیمی	۰.۰۱۵۳	۰.۰۱۶۳	۱۰
L24	اقتباس از معماری بومی	۰.۰۴۴۹	۰.۰۴۷۶	۳
L31	جمعیت بودن	۰.۰۴۴۵	۰.۰۴۷۲	۴
L32	قابلیت ترکیب	۰.۰۰۹۵	۰.۰۱۰۱	۱۳
L33	نشانه ها و نمادها	۰.۰۲۸۵	۰.۰۳۰۳	۷
L34	تبعیت نکردن از یک هندسه خاص	۰.۰۲۶۸	۰.۰۲۸۴	۸
L35	توجه به جهت دهی	۰.۰۰۳۱	۰.۰۰۳۳	۱۶
L41	توجه به تناظر	۰.۰۴۰۶	۰.۰۴۳۱	۵
L42	حفظ وحدت عناصر با مکان و کیهان در عین کثرت گرایی	۰.۰۰۶۳	۰.۰۰۹۱۶	۱
L43	تفکیک کیفی نواحی مختلف فضایی و پیوستگی سلسله مراتب فضایی	۰.۰۰۶۱۰	۰.۰۰۶۴۸	۲
L44	توجه به پایداری فرم	۰.۰۱۶۳	۰.۰۱۷۳	۹

بر اساس وزن‌های سوپر ماتریس حد، L42 با وزن نرمال ۰.۰۹۱۶ بالاترین اولویت را به دست آورد. L43 با وزن ۰.۰۶۴۸ در رتبه دوم، L24 با وزن ۰.۰۴۷۶ در رتبه سوم، L31 با وزن ۰.۰۴۷۲ در رتبه چهارم و L41 با وزن ۰.۰۴۳۱ در رتبه پنجم قرار گرفتند. پس از آنها طبیعت‌گرایی، نشانه‌ها و نمادها، تبعیت نکردن از یک هندسه خاص، پایداری فرم و حوزه اقلیمی قرار داشتند. کمترین وزن‌های نرمال مربوط به L16 با ۰.۰۰۱۷، L13 با ۰.۰۰۲۰ و L12 با ۰.۰۰۲۸ بود. در داده اولیه، برای L13 و L16 هر دو رتبه ۱۸ گزارش شده است؛ از این رو رتبه‌ها در جدول بر اساس همان گزارش اولیه حفظ شده‌اند.

برای مرحله نهایی ارزیابی، پنج سطح «خیلی کم»، «کم»، «متوسط»، «زیاد» و «خیلی زیاد» به ترتیب با اعداد فازی مثلثی (۰، ۰.۲۵، ۰.۵)، (۰.۲۵، ۰.۵، ۰.۷۵)، (۰.۵، ۰.۷۵، ۱)، (۰.۷۵، ۱، ۱) و (۱، ۱، ۱) کدگذاری شدند. در متن محاسبات اولیه تعداد شاخص‌های تصمیم‌گیری ۴۴ و تعداد گزینه‌ها ۹ و در نتیجه ماتریس D9.44 گزارش شده است؛ با این حال، جداول ارائه‌شده در همین بخش عملاً چهار گزینه D1 تا D4 و ۱۹ شاخص L11 تا L44 را نشان می‌دهند. این ناهمخوانی در داده ارائه‌شده وجود دارد و در این بازنویسی بدون تغییر مفهومی گزارش می‌شود.

ماتریس ارزیابی قبل از فازی‌سازی برای D1 در شاخص‌های L11 تا L24 به ترتیب شامل ۲، ۵، ۳، ۴، ۱، ۳، ۲ و ۳ بود. برای D2 این مقادیر ۴، ۳، ۱، ۴، ۲، ۳ و ۱ بود. برای D3 برابر با ۴، ۳، ۱، ۳، ۵، ۳، ۱ و ۴ بود. در بخش شاخص‌های L31 تا L44 نیز برای D2 مقادیر ۴، ۱، ۴، ۱، ۴، ۱ و ۴؛ برای D3 مقادیر ۴، ۱، ۴، ۲، ۲، ۴، ۳ و ۵؛ و برای D4 مقادیر ۴، ۱، ۴، ۲، ۱، ۴ و ۲ گزارش شد. پس از تبدیل این ارزیابی‌ها به اعداد فازی و انجام بی‌مقیاس‌سازی، ماتریس بی‌مقیاس موزون تشکیل و سپس فازی‌زدایی شد. خروجی نهایی این مرحله در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. ماتریس بی‌مقیاس موزون فازی‌زدایی‌شده

	L44	L43	L42	L41	L35	L34	L33	L32	L31	L24	L23	L22	L21	L16	L15	L14	L13	L12	L11	
D1	۰.۰۰۳	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۲	۰.۰۰۳	۰.۰۰۰	۰.۰۰۳	۰.۰۰۲	۰.۰۰۲	۰.۰۰۵	۰.۰۰۰	۰.۰۰۶	۰.۰۳۳	۰.۰۱۱	۰.۰۱۲	۰.۰۴۸	۰.۰۲۱	D1
D2	۰.۰۰۷	۰.۰۲۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۴	۰.۰۰۳	۰.۰۰۲	۰.۰۰۷	۰.۰۰۵	۰.۰۰۰	۰.۰۰۲	۰.۰۱۰	۰.۰۰۵	۰.۰۱۲	۰.۰۰۱	۰.۰۶۶	۰.۰۰۳	۰.۰۱۲	۰.۰۲۵	۰.۰۳۱	D2
D3	۰.۰۰۳	۰.۰۰۳	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۵	۰.۰۰۱	۰.۰۰۰	۰.۰۰۳	۰.۰۰۳	۰.۰۰۳	۰.۰۰۵	۰.۰۰۰	۰.۰۱۱	۰.۰۰۴	۰.۰۲۲	۰.۰۰۳	۰.۰۱۲	۰.۰۴۸	۰.۰۳۱	D3
D4	۰.۰۰۱	۰.۰۴۱	۰.۰۰۶	۰.۰۰۶	۰.۰۱۴	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۰۳	۰.۰۰۴	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱	۰.۰۳۹	۰.۰۱۲	۰.۰۰۸	۰.۱۳۲	۰.۰۱۲	۰.۰۱۲	۰.۰۰۸	۰.۰۰۷	D4

در ماتریس بی‌مقیاس گزارش‌شده پیش از وزن‌دهی، برای مثال مقادیر D1 در L11 تا L14 به ترتیب (۰.۰۰۰، ۰.۰۵۰، ۱.۰۰، ۱.۰۰)، (۰.۰۰، ۰.۷۵، ۱.۰۰، ۱.۰۰)، (۰.۳۳، ۰.۶۷، ۱.۰۰) و (۰.۳۳، ۰.۶۷، ۱.۰۰) بود و همین فرایند برای تمامی ۱۹ شاخص و چهار گزینه انجام شد. پس از اعمال وزن شاخص‌ها، مقادیر جدول ۷ به دست آمدند و مبنای محاسبه ایده‌آل‌های مثبت و منفی قرار گرفتند.

بردار ایده‌آل مثبت برای ۱۹ شاخص برابر با ۰.۰۳۱، ۰.۰۴۸، ۰.۰۱۴، ۰.۰۱۲، ۰.۱۳۲، ۰.۰۰۸، ۰.۰۱۲، ۰.۰۳۹، ۰.۰۱۰، ۰.۰۰۳، ۰.۰۰۴، ۰.۰۰۵، ۰.۰۰۷، ۰.۰۰۲، ۰.۰۰۱، ۰.۰۰۶، ۰.۰۰۶، ۰.۰۰۷، ۰.۰۰۶ و ۰.۰۰۷ بود. بردار ایده‌آل منفی نیز به ترتیب برابر با ۰.۰۰۷، ۰.۰۰۸، ۰.۰۰۳، ۰.۰۰۳، ۰.۰۱۱، ۰.۰۰۱، ۰.۰۰۰، ۰.۰۰۰، ۰.۰۰۱، ۰.۰۰۱، ۰.۰۰۱، ۰.۰۰۰، ۰.۰۰۰، ۰.۰۰۰، ۰.۰۰۰، ۰.۰۰۰، ۰.۰۰۰، ۰.۰۰۰، ۰.۰۰۰ و ۰.۰۰۰ به دست آمد. سپس فاصله هر گزینه از ایده‌آل مثبت و منفی محاسبه و ضریب نزدیکی نسبی تعیین شد. هرچه ضریب CL به ۱ نزدیک‌تر باشد، گزینه از نظر مدل به راه‌حل ایده‌آل نزدیک‌تر تلقی می‌شود.

جدول ۸. فاصله از راه‌حل ایده‌آل، ضریب نزدیکی و رتبه‌بندی نهایی معیارهای اصلی

نماد	معیار اصلی	d+	d-	CL	رتبه نهایی
D1	عوامل نهادی و ارزشی	۰.۱۱۴	۰.۳۰۴	۰.۷۲۸	۲
D2	عوامل محیطی و زمینه‌ای	۰.۳۷۲	۰.۱۰۸	۰.۲۲۸	۱
D3	عوامل فرهنگی و اجتماعی	۰.۲۷۷	۰.۰۹۲	۰.۲۴۸	۳
D4	عوامل کالبدی و فضایی	۰.۲۶۰	۰.۱۴۹	۰.۳۶۴	۴

در خروجی محاسبات، ضرایب نزدیکی برای D1، D2، D3 و D4 به ترتیب ۰.۷۲۸، ۰.۲۲۸، ۰.۲۴۸ و ۰.۳۶۴ گزارش شده است. با این حال، رتبه‌بندی نهایی ارائه شده در پژوهش بر اساس میانگین وزنی مجموعه خروجی‌های مدل انجام شده و عوامل محیطی و زمینه‌ای در رتبه نخست، عوامل نهادی و ارزشی در رتبه دوم، عوامل فرهنگی و اجتماعی در رتبه سوم و عوامل کالبدی و فضایی در رتبه چهارم قرار گرفته‌اند. بنابراین، رتبه‌بندی نهایی صرفاً از مقدار منفرد CL استخراج نشده، بلکه حاصل تلفیق خروجی‌های مراحل مختلف تحلیل گزارش شده است.

در مجموع، یافته‌های مطالعه دو سطح متفاوت از اهمیت معیارها را آشکار کرد. در مرحله مقایسات زوجی اولیه، عوامل نهادی و ارزشی بالاترین وزن را داشتند و تحلیل DEMATEL نیز نشان داد این معیار با D-R برابر با ۹.۴۱۶ بیشترین نقش اثرگذار را در شبکه دارد. با این حال، پس از لحاظ روابط متقابل و اجرای فرایند شبکه‌ای، عوامل محیطی و زمینه‌ای به رتبه نخست نهایی رسیدند. در سطح زیرمعیارها نیز «حفظ وحدت عناصر با مکان و کیهان در عین کثرت‌گرایی» با وزن نرمال ۰.۰۹۱۶ مهم‌ترین شاخص بود و «تفکیک کیفی نواحی مختلف فضایی و پیوستگی سلسله‌مراتب فضایی» با وزن ۰.۰۶۴۸ در جایگاه دوم قرار گرفت. پس از آنها «اقتباس از معماری بومی» با وزن ۰.۰۴۷۶، «جمعی بودن» با وزن ۰.۰۴۷۲ و «توجه به تناظر» با وزن ۰.۰۴۳۱ بیشترین اهمیت را داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که لحاظ روابط متقابل میان معیارها می‌تواند ترتیب اهمیت حاصل از وزن‌دهی اولیه را تغییر دهد و در ارزیابی معماری بیونیک، توجه هم‌زمان به وزن مستقل شاخص‌ها و موقعیت آنها در شبکه روابط ضروری است.

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف شناسایی و اولویت‌بندی شاخص‌های معماری بیونیک مؤثر بر بهره‌وری مصرف انرژی و تبیین روابط متقابل میان آنها انجام شد. نتایج نشان داد که در رتبه‌بندی نهایی معیارهای اصلی، «عوامل محیطی و زمینه‌ای» در جایگاه نخست قرار گرفتند و پس از آن «عوامل نهادی و ارزشی»، «عوامل فرهنگی و اجتماعی» و «عوامل کالبدی و فضایی» به ترتیب رتبه‌های دوم تا چهارم را به خود اختصاص دادند. این نتیجه نشان می‌دهد که در معماری بیونیک انرژی کارآمد، کیفیت ارتباط ساختمان با اقلیم، بستر، طبیعت و تجربه‌های معماری بومی بیش از تمرکز مستقل بر شکل و کالبد اهمیت دارد. این یافته با دیدگاه‌هایی همسو است که معماری بیونیک را نه صرفاً تقلید از فرم طبیعت، بلکه فرایندی برای انتقال سازوکارهای سازگاری، پاسخ محیطی و بهره‌گیری بهینه از منابع طبیعی به طراحی ساختمان می‌داند (3، 7). همچنین، مطالعات مربوط به معماری بومی و اقلیم نشان داده‌اند که پاسخ‌گویی معماری به محدودیت‌ها و ظرفیت‌های محیطی می‌تواند زمینه کاهش وابستگی به سامانه‌های فعال انرژی را فراهم آورد (11، 12).

برتری عوامل محیطی و زمینه‌ای را می‌توان از ماهیت بنیادین سازگاری در سیستم‌های زیستی توضیح داد. موجودات زنده در طول فرایند تکامل، ساختار و عملکرد خود را متناسب با شرایط محیطی سامان می‌دهند و بقای آنها تا حد زیادی به توانایی پاسخ‌گویی به اقلیم، منابع، محدودیت‌ها و تغییرات محیط وابسته است. هنگامی که این منطق به معماری منتقل می‌شود، زمینه‌گرایی، طبیعت‌گرایی، شناخت حوزه اقلیمی و بهره‌گیری از معماری بومی به عناصر اساسی طراحی تبدیل می‌شوند. مرور ادبیات مربوط به ساختمان‌های بیونیک نیز نشان می‌دهد که یکی از مهم‌ترین ظرفیت‌های بیونیک در معماری، ایجاد ارتباط مؤثر میان بنا و محیط برای دستیابی به بهره‌وری بالاتر انرژی است (3). در مطالعات طراحی سیستم‌های تهویه طبیعی نیز نشان داده شده است که انطباق ساختمان با شرایط اقلیمی و استفاده از نیروهای طبیعی می‌تواند نقش مستقیمی در کاهش نیاز به مصرف انرژی داشته باشد (11). بنابراین، قرار گرفتن عوامل محیطی و زمینه‌ای در رتبه نخست را می‌توان بازتاب این اصل دانست که معماری بیونیک زمانی می‌تواند از نظر انرژی موفق باشد که ابتدا روابط ساختمان با محیط پیرامون خود را بهینه کند.

یافته مهم دیگر پژوهش آن بود که تحلیل روابط علی با استفاده از DEMATEL، تصویری متفاوت اما مکمل از ساختار مدل ارائه کرد. اگرچه عوامل محیطی و زمینه‌ای در اولویت‌بندی نهایی رتبه نخست را کسب کردند، عوامل نهادی و ارزشی بیشترین میزان اثرگذاری بر سایر معیارها را داشتند و مقدار D-R آنها برابر با ۹.۴۱۶ بود. این امر نشان می‌دهد که «اهمیت نهایی» یک معیار لزوماً با «قدرت اثرگذاری» آن در شبکه یکسان نیست. عوامل نهادی و ارزشی، شامل ارزش‌ها، هنجارها، فناوری، ملاحظات اقتصادی، الگوهای استقرار و کهن‌الگوها، می‌توانند شرایطی ایجاد کنند که سایر ابعاد طراحی در چارچوب آنها تعریف و اجرا شوند. نقش فناوری و شیوه‌های نوین طراحی در ایجاد چنین ظرفیت‌هایی در پژوهش‌های مرتبط با معماری پارامتریک و محیط‌های طراحی دیجیتال نیز مورد تأکید قرار گرفته است (4، 5). در واقع، حتی در صورتی که یک راهبرد محیطی یا کالبدی از نظر فنی مطلوب باشد، تحقق آن بدون وجود ارزش‌های پشتیبان، فناوری مناسب، منطق اقتصادی و نظام تصمیم‌گیری سازگار با پایداری دشوار خواهد بود.

این یافته همچنین با دیدگاه‌های مرتبط با طراحی پایدار و بیومیمیکری همخوانی دارد که بر ضرورت ایجاد زمینه سازمانی و فناوریانه برای انتقال اصول طبیعت به ساختمان تأکید دارند. بررسی بیومیمیکری در پروژه‌های ساختمانی پایدار نشان داده است که کاربرد موفق راهکارهای زیست‌الهام‌گرفته به تعامل میان فناوری، تصمیم‌های طراحی، قابلیت اجرایی و اهداف پایداری وابسته است (20). همچنین، توسعه ابزارهای محاسباتی برای بهینه‌سازی فرم و نما بیانگر آن است که فناوری می‌تواند نقش واسطه‌ای مهم در تبدیل اهداف محیطی به تصمیم‌های کالبدی ایفا کند (1). بنابراین، اثرگذاری بالای عوامل نهادی و ارزشی در مدل حاضر را می‌توان نشان‌دهنده نقش «توانمندساز» این عوامل دانست؛ بدین معنا که آنها الزاماً مهم‌ترین خروجی طراحی نیستند، اما می‌توانند مسیر تحقق سایر شاخص‌ها را تسهیل یا محدود کنند.

در سطح زیرمعیارها، «حفظ وحدت عناصر با مکان و کیهان در عین کثرت‌گرایی» با وزن نرمال شده ۰.۰۹۱۶ بالاترین اولویت را کسب کرد. این نتیجه از نظر مفهومی اهمیت زیادی دارد، زیرا بیانگر آن است که طراحی بیونیک موفق مستلزم ایجاد یکپارچگی میان اجزای معماری، ساختار فضایی، زمینه و طبیعت است، در حالی که تنوع و تکرار عناصر نیز حفظ می‌شود. چنین نتیجه‌ای با مطالعاتی همسو است که بر وحدت فضای طبیعی و معماری تأکید کرده‌اند و ارتباط میان بنا و منظر را به‌عنوان یکی از عوامل اساسی در شکل‌گیری محیطی منسجم در نظر گرفته‌اند (18). همچنین، بررسی معماری بیونیک در بازسازی ساختمان‌ها نشان می‌دهد که اصول طبیعی هنگامی ارزشمند هستند که بتوانند در ساختار کلی بنا ادغام شوند و رابطه‌ای منسجم میان فرم، عملکرد و محیط ایجاد کنند (7). از این

منظر، «وحدت در عین کثرت» می‌تواند معادل معماری یکی از ویژگی‌های سیستم‌های طبیعی باشد؛ سیستم‌هایی که از اجزای متعدد و متفاوت تشکیل شده‌اند، اما این اجزا در چارچوب یک کل منظم و سازگار عمل می‌کنند.

دومین زیرمعیار مهم، «تفکیک کیفی نواحی مختلف فضایی و پیوستگی سلسله‌مراتب فضایی» با وزن ۰.۰۶۴۸ بود. اهمیت این شاخص نشان می‌دهد که معماری بیونیک تنها به فرم خارجی یا پوسته ساختمان محدود نمی‌شود و نحوه سازمان‌دهی درونی فضا نیز بخش مهمی از عملکرد انرژی و محیطی بنا را تشکیل می‌دهد. در سیستم‌های زیستی، اجزا دارای عملکردهای متفاوت اما مرتبط هستند و این تفاوت عملکردی از طریق سازمان‌یافتگی و سلسله‌مراتب ساختاری کنترل می‌شود. انتقال این اصل به معماری می‌تواند به زون‌بندی مناسب، تفکیک فضاها بر اساس نیازهای حرارتی و عملکردی و ایجاد ارتباط منطقی میان نواحی مختلف منجر شود. مطالعات مربوط به روندهای طراحی محلات شهری نیز بر اهمیت سازمان فضایی، روابط عملکردی و کیفیت پیوند میان فضاهای مختلف تأکید کرده‌اند (15). همچنین، پژوهش‌های مرتبط با طراحی محیط‌های مسکونی و فضاهای پیرامونی نشان داده‌اند که کیفیت سازمان‌دهی فضایی در شکل‌گیری محیطی کارآمد و قابل استفاده نقش اساسی دارد (2).

«اقتباس از معماری بومی» با وزن ۰.۰۴۷۶ رتبه سوم زیرمعیارها را کسب کرد. این نتیجه یکی از مهم‌ترین یافته‌های کاربردی پژوهش محسوب می‌شود، زیرا نشان می‌دهد اصول معماری بیونیک را می‌توان با دانش انباشته‌شده در معماری بومی پیوند داد. معماری بومی در بسیاری از مناطق نتیجه فرایند طولانی آزمون، سازگاری و پاسخ‌گویی به محدودیت‌های اقلیمی، منابع محلی و نیازهای اجتماعی بوده است. از این منظر، معماری بومی همانند یک سیستم تکامل‌یافته می‌تواند حامل راهکارهایی باشد که با منطق بیونیک سازگاری دارند. بررسی رابطه میان بیومیمیکری و معماری کویری ایران نیز به شباهت میان راهبردهای سازگارانه طبیعت و برخی راه‌حل‌های تاریخی معماری ایران اشاره کرده است (12). همچنین، طراحی طبیعی تهویه در ساختمان‌های مناطق خشک نشان می‌دهد که استفاده از راهکارهای سازگار با اقلیم می‌تواند مستقیماً به عملکرد بهتر انرژی منجر شود (11). بنابراین، معماری بیونیک نباید الزاماً به‌عنوان رویکردی بیگانه با سنت‌های معماری تلقی شود، بلکه می‌تواند چارچوبی برای بازخوانی علمی و عملکردی تجربه‌های بومی فراهم کند.

«جمعی بودن» نیز با وزن ۰.۰۴۷۲ در جایگاه چهارم قرار گرفت و اهمیت ابعاد فرهنگی و اجتماعی در مدل را تأیید کرد. این نتیجه نشان می‌دهد که پایداری معماری تنها از طریق افزایش عملکرد فنی ساختمان حاصل نمی‌شود، بلکه محیط ساخته‌شده باید امکان تعامل، مشارکت و پاسخ‌گویی به الگوهای اجتماعی کاربران را نیز فراهم کند. مطالعات مربوط به طراحی مجتمع‌های اجتماعی بر اساس اصول بیونیک نشان داده‌اند که سازمان‌های طبیعی می‌توانند الهام‌بخش ایجاد ساختارهای اجتماعی و فضایی پیوسته و پایدار باشند (14). همچنین، پژوهش‌های مربوط به انسانی‌سازی محیط شهری و طراحی فراگیر بر ضرورت توجه به گروه‌های مختلف کاربران، تعاملات اجتماعی و کیفیت تجربه انسانی در فضا تأکید کرده‌اند (16، 17). بنابراین، حضور شاخص «جمعی بودن» در میان اولویت‌های بالایی مدل نشان می‌دهد که معماری بیونیک را نباید تنها در چارچوب ارتباط ساختمان و طبیعت تفسیر کرد، بلکه رابطه انسان‌ها با یکدیگر در بستر معماری نیز بخشی از منطق پایداری است.

«توجه به تناظر» با وزن ۰.۰۴۳۱ در رتبه پنجم قرار گرفت. اهمیت این شاخص را می‌توان با نقش تناسبات و روابط سازمان‌یافته در سیستم‌های طبیعی مرتبط دانست. طبیعت از الگوهای هندسی و ساختاری متعددی بهره می‌گیرد، اما این الگوها معمولاً در ارتباط با عملکرد و شرایط محیطی شکل می‌گیرند. پژوهش‌های مربوط به معماری غیرمتعارف مبتنی بر اصول بیونیک نیز نشان داده‌اند که هندسه زیست‌الهام‌گرفته باید از نظر عملکرد سازه‌ای و ارتباط میان اجزای ساختار ارزیابی

شود (6). از سوی دیگر، توسعه ساختارهای متخلخل با الهام از معماری زیستی در حوزه مهندسی نیز بیانگر اهمیت رابطه میان سازمان هندسی و عملکرد است (9). بنابراین، تناظر و تناسب در معماری بیونیک هنگامی اهمیت می‌یابد که به سازمان‌یافتگی و عملکرد بهتر اجزای بنا کمک کند، نه آنکه صرفاً به عنوان ویژگی صوری در نظر گرفته شود.

یکی دیگر از یافته‌های قابل توجه آن بود که عوامل کالبدی و فضایی در سطح معیارهای اصلی پایین‌ترین رتبه نهایی را به خود اختصاص دادند و در تحلیل علی نیز کمترین میزان اثرگذاری را داشتند، اما دو زیرمعیار دارای بیشترین وزن کل، یعنی L42 و L43، در همین گروه قرار داشتند. این وضعیت در نگاه نخست متناقض به نظر می‌رسد، اما در واقع یکی از مزیت‌های تحلیل شبکه‌ای را نشان می‌دهد. پایین بودن اهمیت کلی یک خوشه به معنای کم‌اهمیت بودن تمام عناصر آن نیست؛ بلکه برخی عناصر یک گروه ممکن است در ساختار کل سیستم نقش بسیار برجسته‌ای داشته باشند. به عبارت دیگر، فرم و سازمان فضایی هنگامی اهمیت پیدا می‌کنند که به صورت یکپارچه با زمینه، اقلیم، ارزش‌ها و نیازهای اجتماعی عمل کنند. این برداشت با دیدگاهی سازگار است که در معماری بیونیک بر انتقال قواعد عملکردی طبیعت به جای تقلید مستقیم از فرم تأکید دارد (3، 20).

یافته‌های حاضر همچنین با ادبیات معماری پویا و سیستم‌های پاسخ‌گو قابل تبیین است. در طبیعت، ساختارها اغلب قابلیت تغییر و سازگاری با محرک‌های محیطی دارند. مطالعات مربوط به اصول جنبشی در معماری و سکونت نشان داده‌اند که انعطاف‌پذیری و تغییرپذیری می‌توانند در پاسخ‌گویی بهتر بنا به شرایط مختلف مؤثر باشند (19). از سوی دیگر، ابزارهای دیجیتال و پارامتریک امکان تعریف چنین روابط پویایی را در فرایند طراحی فراهم ساخته‌اند (4، 5). از این رو، شاخص‌هایی همچون پایداری فرم، قابلیت ترکیب، عدم تبعیت از یک هندسه خاص و جهت‌دهی را می‌توان نه به عنوان اهداف مستقل، بلکه به عنوان اجزایی از یک سیستم پاسخ‌گو در نظر گرفت.

در سطح وسیع‌تر، نتایج پژوهش از ضرورت عبور از نگاه تک‌بعدی به معماری بیونیک حمایت می‌کند. برخی مطالعات، سیستم‌های بیونیک را در مقیاس شهر و محیط شهری بررسی کرده و نشان داده‌اند که اصول طبیعت می‌توانند در سازمان‌دهی شبکه‌های شهری، کاربری‌ها و سیستم‌های محیطی نیز به کار گرفته شوند (13). مطالعات معماری اکولوژیک نیز بر پیوند میان تراکم، کیفیت محیط، نیازهای کاربران و ساختار کالبدی تأکید دارند (22). حتی بررسی تحول سبک‌ها و مورفولوژی فضای مسکونی نشان می‌دهد که محیط معماری محصول تعامل عوامل عملکردی، فرهنگی و کالبدی است و نمی‌توان آن را تنها از طریق شکل ظاهری تبیین کرد (21). بنابراین، ساختار چندمعیاره پژوهش حاضر که عوامل محیطی، نهادی، اجتماعی و کالبدی را هم‌زمان در نظر گرفته است، با ماهیت چندبعدی معماری پایدار و بیونیک سازگاری دارد.

در مجموع، نتایج نشان داد که مهم‌ترین پیام معماری بیونیک برای بهره‌وری انرژی، «کپی کردن طبیعت» نیست، بلکه «یادگیری نحوه سازمان‌یافتگی و سازگاری طبیعت» است. نمونه‌های کاربرد اصول بیونیک در سازه‌ها و سیستم‌های مهندسی نیز نشان می‌دهند که موفقیت این رویکرد وابسته به استخراج اصول عملکردی از سیستم طبیعی و بازتفسیر آنها متناسب با مسئله طراحی است (8، 10). بر همین اساس، اولویت عوامل محیطی و زمینه‌ای، اثرگذاری عوامل نهادی و ارزشی و برتری زیرمعیارهایی مانند وحدت با مکان، سلسله‌مراتب فضایی، معماری بومی و جمعی بودن، همگی بیانگر آن هستند که معماری بیونیک انرژی کارآمد باید به صورت یک سیستم یکپارچه، زمینه‌محور، شبکه‌ای و انسان‌محور تعریف شود.

پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی همراه بود که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. نخست، داده‌های اصلی بر قضاوت گروهی از خبرگان استوار بود و اگرچه انتخاب هدفمند متخصصان و استفاده از منطق فازی امکان مدیریت بخشی از عدم قطعیت را فراهم کرد، قضاوت‌های تخصصی همچنان می‌توانند تحت تأثیر تجربه حرفه‌ای، حوزه تخصص و ترجیحات فردی قرار گیرند. دوم، تعداد خبرگان محدود بود و دسترسی به متخصصان، به‌ویژه تحت تأثیر شرایط همه‌گیری کرونا، دامنه مشارکت را محدود کرد. سوم، معیارها بر اساس چارچوب نظری و نظر خبرگان انتخاب شدند و ممکن است برخی شاخص‌های مرتبط با فناوری‌های جدید، مصالح هوشمند، عملکرد چرخه عمر یا رفتار واقعی کاربران در مدل حاضر حضور نداشته باشند. چهارم، پژوهش عمدتاً بر اولویت‌بندی و روابط بین معیارها تمرکز داشت و نتایج با داده‌های واقعی مصرف انرژی ساختمان‌های ساخته‌شده یا شبیه‌سازی گسترده انرژی برای سناریوهای مختلف طراحی اعتبارسنجی نشد. همچنین، زمینه اقلیمی، فرهنگی و اقتصادی پروژه‌های معماری می‌تواند موجب تغییر اهمیت نسبی شاخص‌ها شود؛ بنابراین تعمیم مستقیم ترتیب اولویت‌ها به همه مناطق و انواع ساختمان‌ها باید با احتیاط انجام گیرد.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده مدل حاضر در مناطق اقلیمی مختلف، انواع متفاوت ساختمان‌ها و با نمونه‌های بزرگ‌تر و متنوع‌تری از خبرگان آزمون شود تا میزان پایداری وزن‌ها و رتبه‌بندی شاخص‌ها مشخص گردد. همچنین، می‌توان نتایج مدل تصمیم‌گیری را با شبیه‌سازی انرژی ساختمان، تحلیل تابش خورشیدی، تهویه طبیعی، عملکرد حرارتی پوسته و داده‌های واقعی مصرف انرژی ترکیب کرد تا ارتباط میان اولویت ادراکی شاخص‌ها و عملکرد واقعی آنها بررسی شود. انجام مطالعات مقایسه‌ای میان معماری بومی مناطق مختلف و اصول بیونیک نیز می‌تواند به استخراج الگوهای مشترک سازگاری منجر شود. پژوهش‌های آینده می‌توانند از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره دیگر، تحلیل حساسیت، مدل‌سازی سناریو، الگوریتم‌های بهینه‌سازی و روش‌های یادگیری ماشین برای ارزیابی پایداری نتایج بهره بگیرند. همچنین، بررسی جداگانه دیدگاه معماران، مهندسان انرژی، برنامه‌ریزان شهری، کاربران و مدیران پروژه می‌تواند تفاوت در ادراک اهمیت شاخص‌ها را آشکار سازد. اعتبارسنجی تجربی زیرمعیارهای دارای بالاترین رتبه، به‌ویژه وحدت با مکان و طبیعت، سلسله‌مراتب فضایی، اقتباس از معماری بومی و جمعی بودن، نیز می‌تواند مسیر مهمی برای پژوهش‌های بعدی باشد.

در حوزه کاربرد، پیشنهاد می‌شود معماران و طراحان اصول بیونیک را از مراحل اولیه شکل‌گیری کانسپت وارد فرایند طراحی کنند و آن را به انتخاب فرم یا عناصر تزئینی محدود نسازند. تحلیل اقلیم، جهت تابش، جریان باد، ویژگی‌های سایت، پوشش گیاهی و الگوهای معماری بومی باید پیش از تثبیت فرم ساختمان انجام شود و نتایج این تحلیل‌ها در استقرار، زون‌بندی، سازمان فضایی، پوسته و بازشوها انعکاس یابد. همچنین، با توجه به نقش اثرگذار عوامل نهادی و ارزشی، لازم است کارفرمایان، مدیران پروژه و نهادهای تنظیم‌گر، الزامات بهره‌وری انرژی و طراحی زیست‌الهام‌گرفته را در دستورالعمل‌های طراحی و ارزیابی پروژه‌ها وارد کنند. در طراحی ساختمان‌های مسکونی، توجه ویژه به یکپارچگی ساختمان با مکان، تفکیک هوشمند نواحی فضایی، سلسله‌مراتب عملکردی، استفاده بازتفسیرشده از راهکارهای معماری بومی و ایجاد فضاهای جمعی توصیه می‌شود. همچنین، استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد باید به بخشی از فرایند طراحی تبدیل شود تا هر راهبرد بیونیک پیش از اجرا از نظر تأثیر واقعی بر مصرف انرژی مورد سنجش قرار گیرد.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

تشکر و قدردانی

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

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

موازن اخلاقی

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

خلاصه مبسوط

Extended Abstract

Introduction

The building sector is one of the principal domains in which environmental sustainability, energy efficiency, technological innovation, and architectural quality intersect. Increasing energy demand, the depletion of non-renewable resources, environmental degradation, and the rapid expansion of urban and residential development have intensified the need to reconsider conventional approaches to architectural design. Energy efficiency in buildings can no longer be understood merely as a matter of installing efficient mechanical equipment; rather, it is fundamentally influenced by decisions regarding building form, orientation, spatial organization, envelope configuration, site placement, natural ventilation, and the relationship between architecture and its climatic context. Research on the optimization of building form and façades has demonstrated that computational approaches can substantially contribute to the development of environmentally responsive architectural configurations (1). Likewise, environmental planning of residential areas has highlighted the importance of integrating spatial organization and environmental conditions when seeking to improve the performance and livability of the built environment (2).

Within this context, bionic and bio-inspired architecture have emerged as important approaches to sustainable design. Nature consists of complex systems that have evolved through long-term processes of adaptation, optimization, self-organization, and efficient resource utilization. Biological systems generally achieve functional efficiency while minimizing unnecessary energy and material consumption. Bionic architecture seeks to identify these underlying principles and translate them into architectural strategies. Accordingly, the objective is not simply to imitate the external appearance of natural organisms but to understand their structural, functional, adaptive, and organizational logic. Reviews of bionic building energy efficiency and bionic green

architecture have emphasized the potential of biological principles to inform building envelopes, structural systems, climatic adaptation, resource utilization, and energy-saving strategies (3).

Recent advances in digital design have further expanded the applicability of bionic principles. Parametric design enables architects to define relationships among multiple variables and to generate forms that can adapt to changes in environmental or functional parameters (4). Digital landscape architecture has similarly developed from simple representation toward data-driven modeling, simulation, and analysis of relationships between designed environments and natural systems (5). These technological developments provide a foundation for transforming bio-inspired principles into measurable and analyzable design criteria rather than treating bionics as a primarily aesthetic concept.

A central challenge, however, is distinguishing genuine functional bio-inspiration from superficial formal imitation. Structural investigations of non-canonical shells generated through bionic architecture demonstrate that bio-inspired geometry must also be evaluated according to structural and functional performance (6). Similarly, applications of architectural bionics in building renovation and reconstruction indicate that natural principles can contribute to improving existing buildings when they are incorporated into structural and functional design decisions (7). Evidence from other engineering fields reinforces this distinction. Bionic screw-pile systems have demonstrated how biological principles can be translated into structural engineering applications (8), while research on bio-inspired porous architectures and bionic robotic control systems illustrates how biological organization can inform engineered structures and adaptive systems (9, 10).

Climate responsiveness constitutes one of the most important intersections between bionic architecture and energy efficiency. Buildings that make effective use of natural ventilation, solar orientation, climatic conditions, and local environmental resources can reduce their dependence on active energy systems. Research on integrated natural ventilation systems for residential buildings in arid regions demonstrates the importance of coordinating architectural components with local climatic conditions (11). Iranian desert architecture similarly illustrates how locally evolved architectural solutions can embody principles comparable to biomimicry through climatic responsiveness, resource efficiency, and adaptation to environmental constraints (12). These findings suggest that bionic architecture and vernacular architecture can be considered complementary rather than competing approaches to environmentally responsive design.

Bio-inspired thinking can also extend beyond individual buildings. Bionic systems have been proposed as models for future urban environments in which spatial, ecological, and infrastructural components operate as interconnected systems (13). Community-scale applications of design bionics have likewise demonstrated the possibility of translating organizational patterns found in nature into sustainable community complexes (14). At the same time, sustainable architecture must remain responsive to human and social requirements. Contemporary neighborhood design increasingly emphasizes social interaction, adaptability, and the quality of shared spaces (15). Humanization of residential environments and universal design further underscore that sustainable environments must address diverse users, accessibility, social participation, and quality of experience (16, 17).

The relationship between architecture and nature is therefore both environmental and spatial. The integration of natural and architectural space has been identified as a means of creating greater coherence between built form and landscape (18). Ecological approaches to residential development similarly emphasize the need to coordinate density, spatial organization, environmental quality, and human needs (22). At the level of architectural morphology, contemporary residential environments demonstrate considerable formal diversity, indicating that geometry and spatial organization are influenced simultaneously by functional, cultural, and aesthetic considerations (21). Dynamic and kinetic architecture provides another dimension of

adaptation by enabling architectural components to respond to changing environmental conditions (19). The potential relationship between biomimicry and kinetic architecture has consequently received increasing attention in sustainable building research (20).

These studies collectively indicate that bionic architecture is inherently multidimensional. Energy-efficient bio-inspired design may depend simultaneously on environmental conditions, institutional and technological capacities, social and cultural characteristics, and physical-spatial organization. Consequently, evaluating bionic architectural indicators through isolated or linear criteria may fail to represent the interdependencies that characterize real architectural decision-making. A systematic model is required to identify the relevant criteria, determine their relative weights, and distinguish between criteria that are intrinsically important and those that exert substantial influence on other components of the design system. **Accordingly, this study aimed to identify and prioritize bionic architectural indicators affecting energy consumption efficiency and to analyze their interrelationships using an integrated fuzzy DEMATEL-ANP approach.**

Methods and Materials

This applied study employed a survey-based, expert-oriented multi-criteria decision-making design. The initial indicators were identified through a review of the theoretical foundations and previous studies and were subsequently refined using expert judgments. The final conceptual framework consisted of four major criteria and 19 subcriteria. The main criteria were institutional and value-related factors, environmental and contextual factors, cultural and social factors, and physical and spatial factors. Experts, managers, and engineers with relevant professional knowledge of architecture, construction, environmental design, and energy-related issues constituted the study population. Participants were selected purposively to ensure that judgments were obtained from individuals directly familiar with the research problem. Ten experts contributed to the detailed pairwise evaluation of the subcriteria.

Data were collected using a structured matrix questionnaire based on pairwise comparisons and fuzzy linguistic scales. Face and content validity were assessed by specialists in architecture and energy. The consistency of pairwise judgments was also evaluated. Qualitative judgments were converted into triangular fuzzy numbers so that uncertainty inherent in expert assessment could be retained during computation. Expert judgments were aggregated using fuzzy averaging.

Data analysis was conducted using an integrated fuzzy DEMATEL-ANP framework. Initial pairwise comparisons were used to estimate the relative importance of criteria and subcriteria. Fuzzy weights were normalized and subsequently defuzzified using crisp values. DEMATEL was then employed to determine the direction and strength of causal relationships among the four principal criteria. The CFCS procedure was used to transform the fuzzy direct-relation matrix into crisp values. After determining direct and indirect relations, influential and dependent criteria were distinguished through the D and R indices. The identified network relationships were incorporated into the ANP structure. An unweighted supermatrix, weighted supermatrix, and finally a limit supermatrix were generated to obtain stable final weights for the 19 subcriteria. Excel was used for data preparation, whereas MATLAB-based programmed routines were used for fuzzy calculations, defuzzification, dependency analysis, and derivation of final weights.

Findings

The final model comprised four main criteria and 19 subcriteria. The initial fuzzy pairwise comparison produced normalized weights of 0.244 for institutional and value-related factors, 0.015 for environmental and contextual factors, 0.061 for cultural and social factors, and 0.132 for physical and spatial factors. The inconsistency ratio was 0.07, which was below the acceptable threshold of 0.10 and therefore indicated satisfactory consistency among expert judgments.

The DEMATEL analysis revealed a different but complementary pattern. Institutional and value-related factors demonstrated the greatest causal influence on the other dimensions, with $D = 23.604$, $R = 14.187$, and $D-R = 9.416$, making this the only clearly causal main criterion. Environmental and contextual factors had $D = 15.810$ and $R = 33.579$, cultural and social factors had $D = 10.576$ and $R = 39.172$, and physical and spatial factors had $D = 7.387$ and $R = 38.697$. Their respective $D-R$ values were -17.769 , -28.596 , and -31.311 , indicating predominantly dependent positions within the network. Cultural and social factors showed the highest overall network prominence, with $D+R = 49.748$, closely followed by environmental and contextual factors with 49.389 .

The limit-supermatrix results showed that “maintaining the unity of elements with place and the cosmos while preserving plurality” was the highest-priority subcriterion, with a normalized weight of 0.0916 . “Qualitative differentiation of spatial zones and continuity of spatial hierarchy” ranked second with 0.0648 . “Inspiration from vernacular architecture” ranked third with 0.0476 , followed by “collectivity” with 0.0472 and “attention to correspondence” with 0.0431 . Nature orientation, signs and symbols, freedom from a single geometric system, form stability, and climatic domain occupied the subsequent positions. The lowest normalized weights were obtained for inspiration from diverse archetypal forms, technology, and norms.

After integrating the outputs of the analytical stages, the final ranking of the four principal criteria placed environmental and contextual factors first, institutional and value-related factors second, cultural and social factors third, and physical and spatial factors fourth. Thus, the criterion with the highest causal influence was not identical to the criterion with the highest final priority.

Discussion and Conclusion

The results indicate that energy-efficient bionic architecture should be understood primarily as a context-responsive system rather than as a formal imitation of biological shapes. The final predominance of environmental and contextual factors suggests that climatic adaptation, relationship with the site, integration with nature, and reinterpretation of vernacular architectural knowledge constitute the most consequential dimensions of bio-inspired energy-conscious design.

At the same time, the causal analysis demonstrates that institutional and value-related factors act as enabling forces within the system. Their high causal influence suggests that values, technological capacities, economic conditions, settlement patterns, and institutional priorities can determine whether environmental, social, and spatial strategies are actually implemented. This distinction between final priority and causal influence is one of the most important outcomes of the study. It demonstrates that a criterion may not achieve the highest final rank yet may still exert considerable control over the functioning of the entire network.

The prominence of spatial unity, continuity of spatial hierarchy, vernacular inspiration, and collectivity also shows that bionic architecture cannot be reduced to envelope technology or unconventional geometry. The most highly weighted subcriteria reflect integration, organization, adaptation, and relationship. In biological systems, efficiency is typically produced through coordinated interactions among components rather than through the optimization of isolated parts. The same principle appears relevant to architectural design: form, spatial hierarchy, cultural context, climatic response, and social use should operate as an integrated system.

The relatively low overall ranking of the physical-spatial criterion should therefore not be interpreted as evidence that physical form is unimportant. Two of its subcriteria received the highest individual weights in the entire model. Rather, the findings suggest that physical and spatial characteristics acquire their significance when they are connected to environmental, social, and contextual requirements. A visually biomorphic form that lacks climatic responsiveness or contextual integration would consequently represent only a limited application of bionic principles.

Overall, the integrated fuzzy DEMATEL-ANP model demonstrated that the evaluation of bionic architecture requires attention to both priority and interdependence. Environmental and contextual responsiveness emerged as the dominant final criterion, whereas institutional and value-related factors constituted the major causal driver. At the subcriterion level, unity with place and nature, coherent spatial hierarchy, vernacular architectural inspiration, and collective spatial qualities were particularly important. The study therefore concludes that effective bionic architecture for energy efficiency should move beyond direct formal imitation of nature toward the systematic translation of natural principles of adaptation, integration, hierarchy, resource efficiency, and contextual responsiveness into architectural decision-making.

References

1. Jalali Z, Noorzai E, Heidari S. Design and Optimization of Form and Façade of an Office Building Using the Genetic Algorithm. *Science and Technology for the Built Environment*. 2020;26(2):128-40.
2. Melkumov VN, Chuykin SV, Melnikova AA. Territorial Planning of Recreational Areas Adjacent to a Residential Development Area. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture & Civil Engineering*. 2016;31(3).
3. Yuan Y, Yu X, Yang X, Xiao Y, Xiang B, Wang Y. Bionic Building Energy Efficiency and Bionic Green Architecture: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;74:771-87.
4. Sopov D, Protsenko E, Mironenko V. Thesaurus of Parametric Formation Paradigm Architectural Space. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*: IOP Publishing; 2020. p. 012009.
5. Ervin SM. A Brief History and Tentative Taxonomy of Digital Landscape Architecture. *Journal of Digital Landscape Architecture*. 2020;2-11.
6. Zúñiga DC, Alyoshina O. Análisis estructural numérico del modelo a escala 1:10 del cascarón no-canónico "Yasuni" generado sobre la base de la arquitectura biónica / Numerical Structural Analysis of the 1:10 Scale Model of the "Yasuni" Non-Canonical Shell Generated on the Basis of Bionic Architecture. *Revista Killkana Técnica*. 2019;3(1).
7. Rozhkov PV, Prokopenko VI, Purikova IA, Tertitsa SV, Dimitryuk YS. General Analysis of the Application of the Architectural Bionics in the Renovation and Reconstruction of Building Objects. *Journal of Environmental Treatment Techniques*. 2020;8(2):839-42.
8. Jia F, Tang Y, Hu K, Wang Y. Simulation Analysis on Pile-Driving Process of Anti-Flood Bionic Screw Pile. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*: IOP Publishing; 2019. p. 012048.
9. Kumaresan T, Gandhinathan R, Ramu M, Gunaseelan M. Biomechanical Analysis of Implantation of Polyamide/Hydroxyapatite Shifted Architecture Porous Scaffold in an Injured Femur Bone. *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*. 2019;30(1):16-30.
10. Malekzadeh MS, Queißer JF, Steil JJ. Multi-Level Control Architecture for Bionic Handling Assistant Robot Augmented by Learning from Demonstration for Apple-Picking. *Advanced Robotics*. 2019;33(9):469-85.
11. Abaeian H, Madani R, Bahramian A. Design of an Integrated System for the Improvement of Natural Ventilation in Residential Buildings of Arid Areas. *Environmental Planning and Management*. 2019;364.
12. Yousefi K, Rad ER. Biomimicry and Echomimicry in Iranian Architecture and Its Similarity with the Iranian Desert Architecture. 2016.
13. Krzemińska AE, Zaręba AD, Dzikowska A, Jarosz KR. Cities of the Future—Bionic Systems of New Urban Environment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26(9):8362-70.
14. Xu L, Liao Q, Liu Y, Rosselló MP, Wang L. "Ant Community": Community Complex Sustainable Design Based on Design Bionics — Case Study of the Can Batlló Community in Barcelona. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*: IOP Publishing; 2019. p. 012038.
15. Meseneva NV. Current Trends in the Design of Urban Neighborhoods. *MS&E*. 2020;753(3):032066.
16. Maslovskaja O, Kopeva A, Srikauskas L, Ivanova O, Khrapko O. Humanization of the Urban Environment for Children (on Example of the Residential Yards in City of Vladivostok). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*: IOP Publishing; 2020. p. 012001.
17. Isachenko VI, Kurochkin VA. Universal Design as a Tool for the Humanization of Social Consciousness in Design Practice. *KnE Social Sciences*. 2020;247-55.
18. Galkina H, Grinkrug N. Unity of Natural and Architectural Space in Landscape Design of Komsomolsk-on-Amur. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*: IOP Publishing; 2020. p. 032081.
19. Krundyshev K, Haezrahi E, Krundyshev B. Kinetic Principles of Dynamic Architecture and Housing. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*. 2017;17:929-36.
20. Bayhan HG, Karaca E. SWOT Analysis of Biomimicry for Sustainable Buildings—A Literature Review of the Importance of Kinetic Architecture Applications in Sustainable Construction Projects. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*: IOP Publishing; 2019. p. 082047.
21. Olshak YA, Khimukhina TS. Morphology of Styles in a Residential Interior of the XXI Century. *Professional English in Use* 2018. p. 160-5.

22. Zahrah W, Putra MHS. Design of Vertical Village in Pantai Burung Village Medan City (Ecology Architecture). International Journal of Architecture and Urbanism. 2018;2(1):1-10.