مقاله پژوهشی

فصلنامه انسان و محیط زیست، شماره ۷۲، بهار ۱۴۰۴ (۴۴-۲۳)

بررسی روند تکامل معماری برگرفته از طبیعت براساس تحولات فناوری در دوره مدرن و پست مدرن

محبوبه نقابی [۱*]

Negabi.m@ubonab.ac.ir

پریسا هاشم‌پور [۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۹ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۱۹**

چکیده

زمینه و هدف: امروزه الهام از طبیعت در راستای پاسخ به مسائلی که بشر از حل آن ناتوان است در علوم مختلف کاربرد یافته است. مطالعات مربوط به معماری برگرفته از طبیعت اغلب به معرفی روشـــهای الهام از طبیعت و معرفی نمونه‌های موردی پرداخته‌اند ولی مطالعه جامعی در زمینه عوامل تاثیرگذار بر سیر تحول معماری برگرفته از طبیعت انجام نپذیرفته است. پژوهش حاضر برای آگاهی از اینکه بیونیک در معماری در راستای حل مسائل مطرح و منطبق با پیشرفت علوم و فناوریها در معماری تکامل یافته و یا صرفا به یک سبک فرمال تبدیل شده است انجام پذیرفت.

روش بررســـی: عوامل موثر بر روند معماری برگرفته از طبیعت با روش تحلیل محتوای متون بیونیک در معماری به دســـت آمدند و برای بررسی سیر تحول معماری برگرفته از طبیعت ۵۸ اثر از ۱۰۰ اثر معماری بیونیک که به روش کتابخانه‌ای گرداوری شده بودند با روش دلفی جهت مطالعه انتخاب شدند.

یافته‌ها: تحلیل محتوای متون نشان دادند که در دو دهه گذشته، معماری برگرفته از طبیعت تحت تاثیر علوم مختلفی از جمله ارتقای دانش زیست‌شناسی، توجه به مخاطرات زیست‌محیطی و پیشرفت فناوری‌ها تکامل یافته است. دغدغه معماری برگرفته از طبیعت در آثار منتخب تا سال ۱۹۷۲ بهینه‌سازی سازه‌ای و فرمی و بعد از سال ۱۹۷۲، حل مشکلات زیست‌محیطی بوده است.

بحث و نتیجه گیری: طراحی بناهای با حداقل مصرف انرژی و سازگار با محیط زیست و دستیابی به تکنیکهای چرخه ماده و انرژی، ازجمله اهداف معماری برگرفته از طبیعت است و این امر نشان‌دهنده قابلیت معماری بیونیک در حل مشکلات زیست‌محیطی در آینده است.

واژه‌های کلیدی: بیونیک، بیومیمتیک، بیومیمیکری، فناوری، مدرن، پست مدرن.

۱- استادیار، گروه معماری، دانشگاه بناب، بناب، ایران. * (مسوول مکاتبات)

۲- استاد، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.

Human and Environment, No. 72, Spring 2025

Investigating the evolution of architecture derived from nature Based on technological developments in the modern and postmodern period

Mahboobe Neghabi [1*]
negabi.m@ubonab.ac.ir
Parisa Hashempour[2]

Date of Acceptance: October 11, 2023 Date of Submission: March 10, 2023

Abstract

Background and Objective: Inspiration from nature has been used in various sciences to answer problems that humans cannot solve. Studies related to architecture derived from nature have often introduced methods inspired by nature and presented case examples, but there is no comprehensive study on the factors influencing the evolution of architecture derived from nature. This research aimed to know whether bionics in architecture has evolved in line with the solution of the problems raised and in accordance with the progress of science and technology in architecture or has become just a formal style.

Material and Methodology: Factors affecting the process of architecture derived from nature were obtained by analyzing the content of bionic texts in architecture. Fifty-eight of the 100 works of bionic architecture collected by the library method were selected for study using the Delphi method to investigate the evolution of architecture derived from nature.

Findings: The content analysis of the texts showed that in the last two decades, architecture derived from nature has evolved due to various sciences, including the promotion of biological knowledge, attention to environmental hazards, and the advancement of technologies. The concern of architecture derived from nature in selected works until 1972 has been the structural optimization and formal aspects. After 1972, it has focused on addressing environmental issues.

Discussion and Conclusion: The goals of architecture derived from nature include the design of buildings with minimal energy consumption and compatibility with the environment and achieving material and energy cycle techniques, which shows the ability of bionic architecture to solve environmental problems in the future.

Key words: Bionic, Biomimetic, Biomimicry, Technology, Modern, Postmodern.

1- Assistant Professor, Department of Architecture, University of Bonab, Bonab, Iran. * (*Corresponding Author*)
2- Professor, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.

مقدمه

در گذشته اشکال مختلف الهام از طبیعت در تزیینات معماری، بیان نمادین، باورهای معنوی و زیبایی شناسی کاربرد داشته است (۱). الهام از طبیعت از ابتدای تاریخ زندگی انسان وجود داشت ولی از دوره رنسانس بعد علمی‌تری به خود گرفت. در دوره رنسانس افرادی همچون داوینچی به مطالعه ساختارهای طبیعی و تقلید از آنها می‌پردازند، از این دوره به بعد دیدگاه جدیدی نسبت به طبیعت مطرح شد. حیوانات، گیاهان و موجودات تک سلولی مهندسین خبره‌ای هستند که با محیط پیرامون خویش سازگاری پیدا کرده و به ما نحوه تعامل با طبیعت را نشان می‌دهند (۲). امروزه در زمینه‌های مختلف الهام از طبیعت فراتر از فرم پیش رفته و کاربرد تکنولوژیک طبیعت با نامهای بیونیک[1]، بیومیمتیک[2] و بیومیمیکری[3] مطرح شده است که همگی به مقوله الهام از طبیعت در ارتقای فناوری می‌پردازند (۳). بیونیک از ترکیب بیولوژی به معنی زیست شناسی و تکنولوژی به وجود آمده است. بیومیمتیک به معنی لغوی تقلید از طبیعت (زیست تقلید) بوده و در واژه بیومیمیکری، میمیکری کلمه مخصوصی است که در زیست شناسی برای مطالعه رفتار حیوانات به کار می‌رود (۴). بیومیمیکری تمرکز خود را بر روی اثر متقابل بین ارگانیسمها و محیط پیرامون آنها می‌گذارد. شمار بسیاری از فناوریهای نیمه دوم قرن گذشته را می‌توان زیر بیرق بیونیک جای داد، الهام از نقش پولکها و ساختار پوست کوسه در هواپیما برای کاهش اصطکاک هوا، ساختار نانوگونه آبگریزی نیلوفر آبی، ساختار نانوگونه چسبندگی پای مارمولک و ... (۵). در معماری، کاربرد این اصطلاح به حدود سال ۲۰۰۰ باز می‌گردد (۶). در معماری مدرن (سال ۱۹۰۰ تا ۱۹۷۲) الهام از طبیعت در فناوری‌های معماری را در ستونهای قارچی شکل ساختمان جانسون اثر فرانک لوید رایت، ستونهای کلیسای ساگرادا فامیلیا آثر آنتونیوگائودی، استادیوم المپیک مونیخ اثر فرای‌اوتو و بسیاری از آثار دیگر می‌توان یافت. در دوره پست مدرن نیز روند الهام از طبیعت ادامه داشته است. مساله‌ای که منجر به شکل‌گیری پژوهش حاضر شد این بود که مشخص شود آیا معماری برگرفته از طبیعت توانسته همچون علم بیونیک در سایر رشته‌ها در راستای حل مشکلات و همگام با پیشرفت فناوری تکامل یابد یا صرفا به یک معماری نمادین تبدیل شده است؟ برای دست یافتن به پاسخ، سوالات زیر طرح گردید:

۱- دغدغه‌ها، علوم و فناوریهای تاثیر گذار بر معماری بیونیک در دهه‌های اخیر چه بوده است؟

۲-سیر تحول معماری برگرفته از طبیعت (بیونیک) در آثار دوره مدرن و پست‌مدرن تحت تاثیر علوم و فناوریهای ذکر شده چگونه بوده است؟

فرضیه پژوهش حاضر این است که معماری برگرفته از طبیعت از مرحله فرم‌گرایی دوره مدرن عبور نموده است و می‌تواند به عنوان راهکاری در حل مشکلات مطرح در معماری بکار رود.

نوآوری پژوهش حاضر ارزیابی روند تکامل معماری برگرفته از طبیعت متناسب با تحول علوم، فناوریها و مسائل مطرح در معماری است.

پیشینه پژوهش

برای مطالعه روند معماری بیونیک در ابتدا مطالعات گسترده‌ای در زمینه مقالات علم بیونیک در معماری در نشریات معتبر دو دهه اخیر صورت پذیرفت که بر اساس رویکرد مقالات در پنج گروه زیر طبقه‌بندی گردیدند (جدول ۱).

مطالعات پیشینه پژوهش نشان داد حدود نیمی از مطالعات در زمینه کاربرد بیونیک در مباحث محیطی، کارایی انرژی، پوسته‌های تطبیق‌پذیر با محیط و سایر عناوین مرتبط است. مابقی مطالعات در زمینه‌های کاربرد بیونیک در سازه، نقش الگوریتمهای برگرفته از طبیعت در طراحی سازه و پوسته‌های معماری، اثرگذاری مصالح جدید نظیر آلیاژها و کامپوزیتها، فناوری‌های ساخت نظیر چاپ سه‌بعدی و نرم‌افزارهای محاسباتی پیشرفته در معماری بیونیک است. با توجه به پیشینه پژوهش سیر تحول روشهای الهام از طبیعت در بناهای ساخته شده با

1- Bionic
2- Biomimetic
3- Biomimicry

رویکرد بیونیک بر اساس تکامل فناوریها و دانشهای دو دوره مدرن و پسامدرن مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱- مطالعه پیشینه پژوهش

Table 1. Research background study

مضامین	نمونه پژوهشهای انجام شده در دو دهه اخیر
بیومیمتیک و مباحث محیطی	تقلید از عملکرد گیاهان در تطابق با محیط (۷)، (۸) تقلید از عملکرد موجودات در ساخت لانه (۹)، درسهایی از طبیعت برای پایداری (۱۰)، ایجاد معماری داخلی پایدار با الهام از بیومیمیکری (۱۱)، بایومیمیکری و روشهای کارایی انرژی (۱۲)، (۱۳)، نماهای متحرک الهام گرفته از طبیعت (۱۴)، بررسی نمونه های کارامدی مصرف انرژی در موجودات (۱۵)، ایجاد راهکارهای ایستا در ساختمان جهت دستیابی به الگوهای کربن صفر (۱۶)، طراحی پوسته های انعطاف پذیر با الهام از طبیعت (۱۷)، روشهای بیومیمیکری برای افزایش پایداری در فضای داخلی (۱۸)، افزایش کارایی نورگیرهای سقفی با الهام از طبیعت (۱۹)، معماری بیونیک راهی به سوی معماری پایدار (۲۰)، راهکارهای بیومیمتیک برای افزایش پایداری (۲۱)، کپی کردن طبیعت در راستای کارایی انرژی (۱)، بررسی چالشها و فرصتهای بیومیمیکری در ایجاد معماری پایدار(۲۲)، معماری بیومیمتیک به عنوان راه حلی برای ساختمانهای با کارامد از لحاظ انرژی (۲۳)، بیومیمیکری به عنوان راهکار طراحی پایدار در معماری (۲۴)، رویکردهای بیومیمیکری به عنوان جایگزینی برای مقابله با چالش‌های مربوط به انرژی (۲۵)
کاربرد فناوریهای جدید در معماری بیونیک	**بیومیمتیک و الگوریتمهای طراحی:** معماری پارامتریک و نور روز (۲۶)، بررسی کارایی الگوریتمهای برگرفته از طبیعت در طراحی آسمانخراش (۲۷)، کاربرد الگوریتمها در نماهای متحرک (۲۸)، الگوریتم در طبیعت و معماری (۲۹)، فرمهای بدست آمده از الگوریتمهای تکاملی در فرمیابی (۳۰)، مطالعه طراحی پارامتریک بیومیمتیک در ساختمانهای بلند مرتبه (۲۸)، کاوش در بیومیمیکری و کاربرد آن در معماری دیجیتال و پارامتریک (۲۹)، سازه های بیومیمتیک فناوریهای پیشرفته به سمت طراحی زیست محیطی (۳۰)، طراحی پارامتریک نمای ساختمان بلندمرتبه بیونیک برای بهره‌گیری حداکثر از تهویه طبیعی (۳۱)، سیری در بیونیک و کاربرد آن در طراحی پارامتریک (۳۲)، استفاده از هندسه فرکتال در تحلیلهای جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری (۳۳)
	بیومیمتیک و نرم افزارهای محاسباتی: محاسبات کامپیوتری راهکاری جهت تقلید از ساختارهای پیچیده طبیعت در معماری (۳۴)، الگوهای رشد - بیومیمتیک و طراحی معماری (۳۵)
	مصالح و ساخت: بهره‌گیری از الگوهای طبیعت برای طراحی ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو در معماری با کمک پلاستیکهای مسلح (۳۶)، روشهای یکپارچه طراحی و ساخت برای سطوح تاشو در معماری (۳۷)، تکنولوژیهای ساخت ساختارهای تاشوی برگرفته از طبیعت (۳۸)، نقش چاپ پرینتری ماسه و پلیمر فایبر گلاس در ساخت سازه‌های بیونیک (۳۹)، محصولات نانو بیومیمیکری (۴۰)، کامپوزیتهای چاپ سه بعدی شده با الهام از طبیعت (۴۱)
کاربرد بیونیک در سازه معماری	بررسی الهام از طبیعت در سازه، کارایی سازه‌ای و زیبایی فرمهای برگرفته از طبیعت (۴۲)، الهام گیری از فرم درختان برای طراحی فرم ستون و سقف برای پوشش دهانه‌های وسیع با استفاده از سیستم لیندن مایر (۴۳)، نقش سازه‌های طبیعت در شکل گیری بناهای ماندگار (۴۴)، بهره‌گیری از طبیعت در آموزش طراحی سازه در معماری (۵، ۴۵)، طراحی سازه با الهام از طبیعت (۴۶)

روش کار

پژوهش حاضر از دو قسمت تشکیل شده است. در مرحله اول (مبانی نظری)، عوامل تاثیرگذار در سیر تکامل معماری برگرفته از طبیعت، با مطالعات کتابخانه‌ای متون دو دهه اخیر در زمینه بیونیک به دست آمد و در مرحله دوم پژوهش، سیر تحول معماری برگرفته از طبیعت (بیونیک) تحت تاثیر یافته‌های مرحله اول مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفت. عوامل بسیاری بر سیر تحول معماری بیونیک تاثیرگذار است. با تحلیل محتوای کتابها، مقالات و پایاننامه‌های دانشجویی در زمینه معماری بیونیک و کدگذاری عوامل موثر، علوم و فناوری‌های تاثیرگذار بر روند

جهت‌گیری بیونیک در معماری در دو دهه اخیر به دست آمد که عبارتند از:

- ارتقای دانش زیست‌شناسی
- دغدغه‌های زیست‌محیطی و شکل‌گیری مباحث پایداری محیطی
- توسعه فناوری‌ها در قرن ۲۱ (پیدایش نرم‌افزارهای طراحی و محاسباتی پیچیده، الگوریتمهای برگرفته از طبیعت، توسعه سازه‌های تغییرفرم‌پذیر، توسعه علم مواد و شکل‌گیری آلیاژها و کامپوزیتها).

برای افزایش پایایی تحلیل متون، کدگذاری توسط دو نفر از نویسندگان انجام پذیرفت. برای بررسی میزان روایی تحلیل از روش CVR[1] بهره‌گرفته شد (۴۷). طی پرسشنامه‌ای از ده نفر از متخصصین خواسته شد که میزان ضرورت مطالعه عوامل به دست آمده را در بررسی روند تحول معماری بیونیک با انتخاب یکی از گزینه‌های «ضروری است»، «مفید است ولی ضرورتی ندارد» و «ضرورتی ندارد» بررسی نمایند. سپس امتیاز پاسخها مطابق فرمول زیر محاسبه گردید:

CVR= (NE-N/2)/N/2 در این رابطه NE تعداد متخصصانی است که به گزینه «ضروری است» پاسخ داده‌اند و N تعداد کل متخصصان و CVR میزان روایی گزینه‌ها است. طبق جدول استاندارد حداقل روایی برای ده نفر متخصص۰/۶۲ می‌باشد (۴۷). بعد از امتیازدهی جوابها، همه گزینه‌ها اعتبار لازم را طبق نظر متخصصین بدست آوردند (جدول ۲).

جدول ۲- بررسی روایی گزینه های مورد مطالعه

Table 2. Validity of the studied options

گزینه‌های مورد مطالعه	نتیجه به دست آمده
تحولات دانش زیست‌شناسی	۱
توجه به مخاطرات زیست‌محیطی و مباحث پایداری محیطی	۰/۸
پیدایش نرم افزارهای طراحی و محاسباتی پیچیده و الگوریتمهای برگرفته از طبیعت	۱
توسعه سازه‌های تغییرفرم‌پذیر	۰/۸
توسعه علم مواد و شکل‌گیری آلیاژها و کامپوزیتها	۱

در مرحله دوم ۱۰۰ اثر ساخته شده و یا طراحی شده متاثر از دانش بیونیک (موجود در منابع مرتبط) توسط نویسندگان از متون مربوط به معماری بیونیک انتخاب شدند و طی پرسشنامه‌ای همراه با عکس و توضیحات لازم به ۱۰ نفر از متخصصین در زمینه معماری بیونیک ارسال شدند، یک سوال برای هر بنا تحت عنوان «آیا مطالعه بنای .... در بررسی سیر تحول معماری بیونیک می‌تواند مفید واقع شود؟» و با جواب دو گزینه‌ای بله و خیر طراحی شده بود. از ۱۰ نفر ۷ نفر به پرسشنامه پاسخ دادند و بناهایی که از ۷ امتیاز حداقل ۶ امتیاز بله گرفته بودند برای مطالعه انتخاب شدند که تعداد آنها ۵۸ بنا بود. نمونه‌های موردی منتخب بر اساس زمان ساخت و نحوه الهام از طبیعت کدگذاری و دسته‌بندی گردیدند. تقسیم‌بندی زمان ساخت در دو بازه انجام پذیرفت؛ گروه اول بناهای دوره مدرن ساخته‌شده از سال ۱۹۰۰ تا ۱۹۷۲ و گروه دوم بناهای دوره پسامدرن ساخته‌شده از سال ۱۹۷۲ تا زمان حال. دلیل انتخاب سال ۱۹۷۲ به‌عنوان جداکننده دو دوره مدرن و پسامدرن به‌این‌علت بود که چارلز جنکس تاریخ‌نگار و منتقد معماری تاریخ دقیق مرگ معماری مدرن را روز ۱۵ ژولای ۱۹۷۲ در ساعت ۳/۳۲ بعدازظهر، زمان و تاریخ انهدام آپارتمان‌های مسکونی پروت ایکو در شهر سنت لوییس آمریکا اعلام کرده بود (۴۸). علاوه بر آن، نوع دیدگاه نسبت به طبیعت در دو دوره تفاوت‌های زیادی با یکدیگر دارند و مباحث مربوط به پایداری که پایداری اکولوژیکی نیز جزئی از

1- Content Validity Ratio

آن است از زمان تشکیل کنفرانس بین‌المللی استکهلم در سال ۱۹۷۲ با جدیت بیشتری دنبال شد.

مبانی نظری مقاله براساس عوامل تاثیرگذار بر معماری بیونیک که از تحلیل محتوای متون بدست آمده بودند تنظیم گردید.

۴- علوم و فناوریهای تاثیرگذار بر جهت‌گیری علم بیونیک در معماری

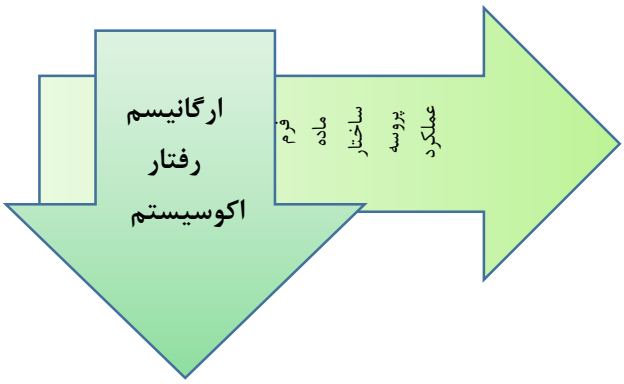
عوامل مختلفی در نحوه الهام از طبیعت در معماری دوره مدرن و پست مدرن تاثیرگذار بوده‌اند که با مطالعات کتابخانه‌ای و تحلیل محتوای متون در سه گروه اصلی دسته بندی شدند که عبارتند از: توجه گسترده به دانش زیست‌شناسی، توجه به مخاطرات زیست‌محیطی و شکل‌گیری مباحث پایداری محیطی، رشد فناوریهایی که موجب ارتقای علوم بیونیک گردید همچون پیدایش نرم افزارهای طراحی و محاسباتی پیچیده و الگوریتمها، توسعه علم مواد و تولید پلیمرها و ... .

۴-۱- دانش زیست‌شناسی و شکل‌گیری علوم بیونیک، بیومیمتیک و بیومیمیکری

بسیاری از اندیشمندان قرن ۲۰ را عصر انقلاب فیزیک و قرن ۲۱ را عصر انقلاب زیست‌شناسی توصیف نموده‌اند (۴۹). تعدادی از نویسندگان علوم زیست‌شناختی مانند جنیین بنیوس (۵۰)، استاد زیست‌شناسی استیون وگل (۵۱) و جولیان وینسنت (۵۲)، در این زمینه به‌صورت گسترده به مطالعه پرداخته‌اند. جولیان وینسنت (۵۲) آن را "انتزاع خوب از طراحی طبیعت" تعریف می‌کند، درحالی‌که بنیوس آن را "الهام آگاهانه از نبوغ طبیعت" نامیده است. معماری بیونیک و بیومیمتیک حاصل این نوع از کاربرد طبیعت در معماری است.

واژه بیومیمیکری، درساده‌ترین حالت، شبیه‌سازی اشکال و فرآیندهای بیولوژیکی است. ازنظر ریشه‌شناسی برگرفته از کلمات یونانی"bios" است، به معنی زندگی و"mimesis" به معنای تقلید. بااین‌حال بیومیمیکری صرفاً مستلزم الهام مستقیم اشکال و فرآیندهای طبیعی نیست بلکه مفهوم انتزاع از راه‌حل‌های طبیعی را با خود به همراه دارد. فناوری‌های بیومیمکری به معنای کپی دقیق نیستند، بلکه انتزاع کاهنده فرم یا فرایندی مفید است که در طبیعت یافت می‌شود (۲۱).

زری با بهره‌گیری از تقسیم بندی بنیوس (۵۰) بیونیک را در سه سطح ارگانیسم[1]، رفتاری[2] و اکوسیستم[3] تقسیم بندی نموده است. سطح ارگانیسم (ساختار و اندامهای موجود زنده) به یک ارگانیسم خاص مانند گیاه یا حیوان اشاره دارد و ممکن است تقلید به بخشی از ارگانیسم یا کل آن مربوط باشد. سطح دوم به تقلید رفتار (رفتار انفرادی موجود زنده) اشاره دارد و ممکن است شامل ترجمه جنبه‌ای از رفتار ارگانیسم باشد یا به یک زمینه بزرگتر مربوط شود. سطح سوم تقلید از اکوسیستمها (اکوسیستمها و رفتار گروهی موجودات زنده) و اصول مشترکی است که اجازه می‌دهد کل سیستم با موفقیت کار کند. تقلید در هر سه سطح در پنج زمینه فرم، ماده، ساختار، پروسه و عملکرد امکانپذیر است (۲۱ و ۵۰) (نمودار۱).



نمودار ۱- مراحل بیومیمیکری (۱۹)

Figure 1. Levels of Biomimicry

1-The Organism Level
2- The Behaviour Level
3- The Ecosystem Level

۴-۲-اهمیت یافتن مباحث زیست محیطی

از سال ۱۹۳۳ تا ۱۹۷۲ کنوانسیون‌هایی در جهت حفاظت از حیوانات، آبها و سایر زمینه‌های محیط زیست تشکیل شده بود. در سال ۱۹۷۲ بزرگترین کنفرانس بین‌المللی در استکهلم در حمایت از محیط‌زیست تشکیل‌شد (۵۳). از سال ۱۹۷۲ به بعد همایشها و کنفرانس‌های علمی بی‌شماری با مباحث حفاظت از کره‌زمین، محیط‌زیست و نهایتا پایداری و توسعه پایدار ارائه گردیده‌اند. طبیعت و اکوسیستهای موجود در آن منابعی ارزشمند برای مهندسانی هستند که در پی یافتن حداکثر بازدهی، اقتصادی‌بودن، قابلیت‌تغییر و انعطاف‌پذیری در پاسخ به مشکلات تکنولوژیکی طرح‌های خود می‌باشند (۵۴) زیرا موجودات زنده از نظر بازدهی انرژی باید دارای بازدهی بالا باشند تا زنده بمانند. آنها انرژی را هدر نمی‌دهند و با راندمان بالا از انرژی استفاده می‌کنند. ورنر ناختیگال ده قانون را برای ساختارهای طبیعی بیان می‌کند (۵۵) که عبارتند از:

- تلفیق شدن به جای اضافه کردن ساختاری جدید
- بهینه‌سازی تمامی ساختار به جای بیشینه‌کردن تنها یک ساختار
- ساختارهای چندعملکردی به جای ساختارهایی با یک عملکرد
- سازگاری مطلوب با محیط پیرامون
- استفاده مستقیم یا غیرمستقیم از انرژی خورشیدی
- توقف موقت به جای تداوم بی فایده
- بازیافت کامل به جای انباشتن ضایعات
- تلفیق مجموعه به جای سیستم خطی
- تکامل یافتن به وسیله آزمون و خطا

قوانین ذکرشده با اصول مطرح‌شده در توسعه پایدار هماهنگ هستند. بنابراین تقلید از ساختارهای موجود در طبیعت در فناوریهای معماری توان دستیابی به بهره‌وری ماده و انرژی و دستیابی به محیط زیست پایدار را فراهم می‌کنند. به دلیل راه‌حلهای علم بیومیمیکری که توانایی سازگاری با محیط به منظور آسایش حرارتی را دارند این راه‌حلها بهترین گزینه برای دستیابی به راه‌حلهای پایدار هستند (۵۶). در قرن ۲۱ زیست‌شناسی یک شاخه مهم از علوم درحال‌توسعه محسوب می‌شود. در دومین بیانیه مهندسی یونسکو، که اهداف توسعه پایدار مدنظر قرار گرفت و در چهارم مارچ ۲۰۲۱ منتشر شد، نیاز به دیدگاه کل‌نگر در توسعه پایدار مطرح شد که بر پایه دیدگاه بیومیمتیک تکنولوژی و مهندسی را با کمک‌گرفتن از سازه‌ها و سیستمهای طبیعی به هم مرتبط می‌کند و این امر بدون بهره‌گیری از دانش کامپیوتر، تکنولوژی و متریالهای جدید امکان-پذیر نیست (۳۹) (۵۷). درواقع توسعه مواد جدید، ابزارهای طراحی پارامتریک و حتی چاپ سه‌بعدی از جمله فناوریهای قرن ۲۱ هستند که رویای دستیابی به محیط‌زیست پایدار با الهام از اکوسیستمهای طبیعی و الهام عملکردی از طبیعت را فراهم می-کنند.

۴-۳-بیونیک و فناوریهای جدید قرن ۲۱

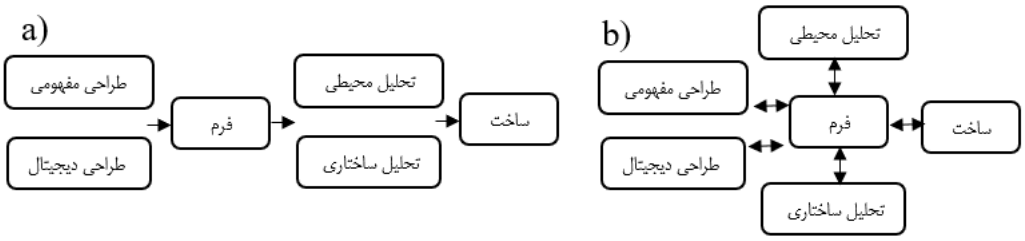
در قرن ۲۱ پاره‌ای از فناوریها بوجود آمدند که در توسعه علم بیونیک در معماری تاثیرگذار بودند.

۴-۳-۱- نرم افزارهای معماری و الگوریتمها: ارتقای نرم‌افزارهای معماری امکان بهره‌مندی از خصوصیات طبیعت در طراحی را فراهم نموده است (۳۰). از سال ۱۹۶۰ دانشمندان کامپیوتر شروع به جستجوی راههایی در خلق الگوریتم ژنتیک[1] و تقلید از آن در نحوه کاربرد تکامل و انتخابهای طبیعت برای حل مشکلات طراحی و ایجاد نرم‌افزارهای نیمه اتوماتیک نمودند. در سال ۱۹۹۰ این الگوریتمها به نرم‌افزارهای معماری معرفی شدند. امروزه نقش رایانه‌ها از طراحی و مدلسازی به پردازش هوشمندانه مبتنی بر دانش معماری تغییر نموده است، امروزه نرم‌افزاری چون (CAD) علاوه بر طراحی در بهینه‌سازی سازه نیز کاربرد دارد (34). افزایش علاقه به کاربرد طراحی بیونیک در قرن ۲۱ با کاربرد نرم‌افزارهایی مانند (CAD) و (CAM) امکان‌پذیر شده که در نوآوری و سرعت ساخت دیجیتال قطعات مفید می‌باشند (۵۸). نرم افزار CAD در طراحی و تجزیه و تحلیل هندسه کاربرد دارد و نرم افزار (CAM) که به منظور

1- Genetic aigorithm

تولید طراحی شده است و در آن کاربر به تشریح نحوه تبدیل مدل دیجیتال به دستورالعمل ماشین می‌پردازد. علاوه بر نرم‌افزار (CAD) نرم‌افزارهای دیگری همچون (CATIA) که برای طراحی هواپیما طراحی شده بود، نیز کاربرد دارد (۵۹). آشنایی با الگوریتمهای تکاملی و مورفولوژیک که از طبیعت گرفته شده‌اند نیز در روند طراحی تغییرات شگرفی را ایجاد نمودند (۵۸). دیگر هندسه‌های منحنی و پیچیده مانند گذشته در نوآوری و ساخت و ساز غیرممکن نیستند (۳۸) و با تغییر دیدگاهها در طراحی فرم، فرمهای مناسب با اتکا به کامپیوتر و محاسبات سازه‌ای پیشرفته و مدلهای مبتنی بر الگوریتم بدون دخالت انسان و بر اساس مدلهای رشد و با تغییر پارامترها ایجاد می‌شوند (۳۹). تکنیکهایی نظیر تغییرشکل‌های زنجیره‌ای[1] میانیابی هندسی[2] فرایندهای اتفاقی[3] و فراکتالها از جمله تکنیکهای مورد استفاده در طراحی الگوریتمی توسط معماران هستند (۵۹) که از طبیعت گرفته شده‌اند. در طراحی پارامتریک محدودیتهای ماده، زمان و بودجه در کنار سایر پارامترها در دستیابی به فرم نهایی بهینه تاثیرگذار هستند (۳۹). نمودار۲ (a و b) تفاوت پروسه طراحی سنتی و طراحی پارامتریک را نشان می‌دهد. تحقیقات در زمینه کاربرد الگوهای بیومیمتیک نشان می‌دهد که بهینه‌سازی سازه‌ها باید به موازات بهینه‌سازی متریالها (۶۰) و بهبود عملکرد آنها و روشهای تولید جدید (۶۱) همراه باشد.

در طراحی پارامتریک مبتنی بر متریالها کلیه پارامترها در ایجاد فرم نهایی دخالت دارند؛ تنظیمات پارامتریک به گونه‌ای انجام می‌شود که بهره‌گیری از نور خورشید در بنا در بهینه‌ترین فرم ممکن امکان‌پذیر باشد (۲۶)؛ در حالیکه در روش سنتی بعد از ایجاد فرم تحلیلهای محیطی و سازه‌ای انجام می‌پذیرد. روشها و ابزارهای جدید طراحی و ساخت در معماری در ارتقای علم بیونیک و تحقق فرمهای نرم همچون طبیعت بسیار موثر بوده است. علم بیونیک در تکامل ساختارهای تغییرپذیر نیز موثر بوده است. ساختارهای تغییرپذیر در ابتدا در طراحی سازه‌های قابل‌حمل مورد استفاده قرار گرفتند ولی امروزه با اهمیت یافتن مباحث محیطی در کنترل نور و سایر عوامل محیطی در نمای ساختمانها مورد توجه قرار گرفته‌اند.



نمودار۲- a) پروسه طراحی سنتی b) پروسه طراحی پارامتریک مبتنی بر متریال (۳۹)

Figure. 2. a) current designing process, b) material-based design process (39)

۴-۳-۲-تکامل ساختارهای تغییرپذیر

بهره‌گیری از ساختارهای تغییرفرم‌پذیر در معماری از گذشته‌های دور سابقه داشته است و در قالب کاربریها و فرمهای مختلف مورد استفاده بوده است. معماران در الهام از طبیعت در سازه‌های تغییرفرم‌پذیر، حیوانات و گیاهان را الگو قرار داده‌اند. از نحوه باز و بسته شدن بال حشرات و پرندگان گرفته تا باز و بسته شدن و حرکت برگها و سایر اندامهای گیاهان و درختان. الهام از طبیعت در سازه‌های باز و بسته شونده در استفاده و طراحی مصالح، اتصالات بین اعضای سازه‌ای و ساخت جزییات همواره مطرح بوده است (۶۲). در گذشته تغییرشکل جهت‌دار توسط عناصری مانند لولا، غلتک و ریل امکان‌پذیر بوده است، به عبارت دیگر سایر اجزای ساختاری که عناصری سخت یا نرم بودند نقشی در تغییرشکل سازه تغییرپذیر ایفا نمی‌کردند و تغییر شکل به صورت

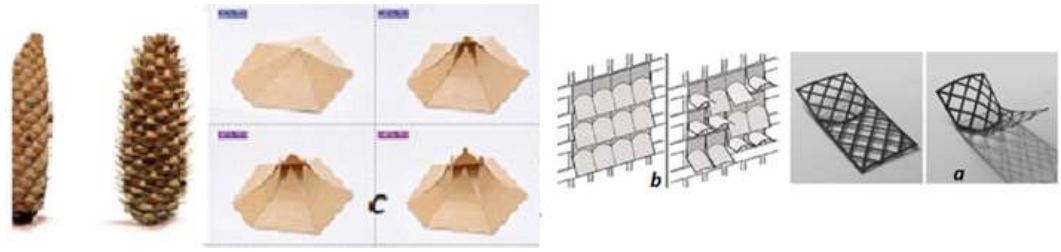
1- Sequential Transformation
2- Geometrical Interpolation
3- Stochastic Proccesses

مکانیکی و یا اتوماتیک انجام می‌شد. استفاده از سازه‌های خم‌شو که دارای مکانیسم حرکتی غیرفعال بوده و قابلیت تغییرشکل و بازگشت به حالت اولیه را دارند باعث می‌شود نیاز به عناصر غلتکی و لولایی کاهش یافته و یا حذف شود. همچنین انرژی‌ای که هنگام بسته شدن ساختار در سیستم ذخیره می‌شود به گسترده شدن و بازگشت به فرم اولیه کمک می‌کند و تغییرپذیری با قابلیتهای هندسی جدید و متنوع‌تری امکان‌پذیر می‌شود (۶۳) توسعه پلیمرهای صنعتی و آلیاژهای ترکیبی دستیابی به ساختارهای تغییرفرم‌پذیر خم‌شو بدون نیاز به لولا را امکان‌پذیر نموده است.

۳-۳-۴- ارتقای مواد و مصالح جدید

قبل از انقلاب صنعتی ساختارهای منعطف با مواد نرم مانند نی یا بامبو ساخته می‌شدند؛ که در عین قابلیت خم‌پذیری مناسب از ایستایی کافی و همچنین مقاومت بالا در برابر شکستن برخوردار بوده‌اند (۳۶) پس از انقلاب صنعتی و به طور خاص در قرن بیستم، فولاد و بتن مسلح، سازه ساختمانها را متحول نموده و به مصالح اصلی در معماری تبدیل گردیدند. رواج بتن مسلح برای معماران امکان الهام از فرمهای طبیعت را فراهم آورد. در این میان فقط افراد محدودی مانند ولادیمیر شوکوف و آنتونیو گائودی مسیری متفاوت را تجربه نموده و راه‌کارهای تعیین فرم سازه بر اساس مواد و نیروها را توسعه دادند. کار این افراد در محدوده دهه پنجاه میلادی به علاقه و جهت‌گیری جدیدی توسط افرادی مانند باکمینستر فولر ، فلیکس کاندلا، هاینس ایزرل و فرای اتو منتهی گردید که متمرکز قوانین سازه‌های سبک بودند. گروههای معمار و مهندسین سازه تحت مدیریت این افراد، با پژوهشهای میان رشته‌ای خود در توسعه مبانی مربوط به یافتن شکل سازه بر اساس نیرو و نوع مصالح کوشیدند که حاصل این پژوهشها، دستیابی به روش‌هایی برای فرم‌یابی سازه گردید. به این ترتیب بهره‌گیری از مصالح سنتی خمشو مانند چوب نرم و بامبو معنای جدیدی در معماری پیدا نمود (۶۴، ۳۶) به موازات توسعه سازه‌های سبک در محدوده دهه پنجاه میلادی، پلیمرها یا پلاستیکهای تقویت شده با الیاف به صورت گسترده شناخته شده و قابلیتهای منحصر به فرد آنها در برخورداری از مقاومت بالا در عین انعطاف‌پذیری مورد توجه بسیاری قرارگرفت.

پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف و به طور عمده فایبرگلاس و فایبرکربن در شکل‌گیری و تکامل ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو نقش مهمی داشته است. البته باید توجه کرد که بعضی از این نوع پلیمرها، به خاطر هزینه مواد اولیه یا فرایند صنعتی خاص تولیدشان از قیمت بالایی برخوردار می‌باشند. این پلیمرها قابلیت جمع‌شوندگی و بازگشت به حالت اولیه را دارند. درواقع مواد جدید امکان تقلید از ساختارهای خم‌شوی موجود در طبیعت را امکان‌پذیر نموده‌اند (تصویریکa وb) (۳۶).



تصویر۱.a) مکانیزم انتزائی شده ساختار گل میمون با کمک نوارهای خم‌شو از جنس پلیمر فیبردار و کابل جمع‌شونده میانی (۳۶)، b) سایبانهای طراحی‌شده با الهام از ساختار باز و بسته شونده گل میمون با پلیمرها (۶۳) (c، طراحی پوسته های پاسخگو با ساخت آلیاژهای حساس به رطوبت توسط مگنز

Figure 1. a) The abstracted mechanism of the monkey flower structure with the help of flexible strips made of fibrous polymer and middle retractable cable, b) Awnings designed inspired by the open and closed structure of monkey flower with polymers (63) c) Responsive shell design by manufacturing moisture sensitive alloys by Magnes

امروزه به مصالحی که می‌توانند تغییرات محیطی را حس کرده و به آن واکنش نشان دهند مصالح هوشمند می‌گویند (۶۱). منگز در دانشکده فرم‌شناسی و مصالح با الهام از حرکت هیگروسکوپیک میوه درخت کاج، آلیاژی با دو ماده که به تغییرات رطوبت افزایش طول متفاوتی نشان می‌دهند (تصویر یک C) ساخت که در ساخت پوسته‌های تطبیق‌پذیر مورد استفاده قرار گرفت (۲۳). افزایش ساخت و کاربرد آلیاژها و پلیمرهای فیبردار در آینده نزدیک معماری بیونیک را تحت‌تاثیر قرار خواهد داد.

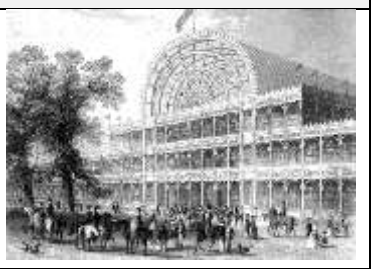
یافته‌ها

برای بررسی روند تکامل معماری بیونیک، تحت تاثیر علوم و فناوریهای به دست آمده در پژوهش، بناهای منتخب ساخته‌شده با فناوریهای بیونیک از سال ۱۹۰۰ به بعد بر اساس سال ساخت طبقه‌بندی شده و بر اساس نحوه تقلید از طبیعت (تقلید از ارگانیسم، تقلید از عملکرد و اکوسیستم) تفکیک گردیدند. برای هر دوره ۵۰ بنا برگزیده شده بود، که ۳۲ بنا از دوره مدرن و ۲۶ بنا از دوره پست مدرن توسط متخصصین جهت مطالعه انتخاب شدند. نتیجه نشان داد که تا سال ۱۹۷۲ حدود هشتاد و دو درصد بناهای منتخب با تقلید از ارگانیسمهای موجود در طبیعت در راستای بهینه‌سازی سازه‌ای و تقلید فرمی طراحی و ساخته شده‌اند و در هیجده درصد بناها صرفا تقلید فرمی صورت گرفته است. بعد از سال ۱۹۷۲، در ۱۳٪ از بناهای منتخب تقلید صرفا فرمی صورت‌پذیرفته است . ۲۷٪ از بناها با تقلید از ارگانیسمهای طبیعی با هدف بهینه‌سازی سازه‌ای و فرمی، ۱۸٪ از بناها با تقلید از ارگانیسمهای طبیعت با هدف بهینه‌سازی انرژی و ۱۳٪ درصد بناها با تقلید از عملکرد موجودات در برابر شرایط محیطی با هدف بهینه سازی انرژی، طراحی و اجرا شده اند و ۲۵٪ از بناها با تقلید از اکوسیستمهای طبیعی به منظور بهینه‌سازی انرژی، دستیابی به بازیافت انرژی، زباله و آب طراحی شده‌اند که برخی از آنها به مرحله اجرا نرسیده‌اند. در مجموع ۵۶ درصد از نمونه‌های منتخب دوره پسامدرن جهت بهینه‌سازی انرژی طراحی شده‌اند. نتایج به طور واضح نشان می‌دهند که قبل از سال ۱۹۷۲ بهینه‌سازی سازه‌ای و دستیابی به فرمهای آوانگارد معماری مدنظر معماران بوده‌است ولی از سال ۱۹۷۲ به بعد دستیابی به بهینه‌سازی انرژی در اولویت بوده است و یا بهینه‌سازی سازه و انرژی همزمان مدنظر معماران بوده است. در ادامه برخی از بناهای مطالعه شده در جداول بر اساس دوران ساخت (مدرن و پست مدرن) و عوامل تاثیرگذار به دست آمده در مبانی نظری در جدولهای ۲ تا ۷ معرفی گردیده‌اند.

آغاز قرن بیستم دورانی مهیج برای معماران بود زیرا به دلیل اختراع و کاربرد بتن مسلح توانستند به رویای دیرینه خود که تقلید از فرمهای طبیعت در احجام معماری بود دست یابند. یکی از این معماران فیلیکس کاندلا بود که به مطالعه هندسه پوسته‌های طبیعت و کاربرد آنها در معماری پرداخت (۳۴). یورن اوتزون، آنتونیو گائودی و بسیاری از معماران دیگر در این زمینه فعالیت نمودند. همچنین در این دوره در محدوده دهه پنجاه میلادی افرادی مانند باکمینستر فولر، فلیکس کاندلا، هاینس ایزرل و فرای اتو در زمینه سازه‌های سبک در تقلید از طبیعت فعالیت نمودند و خرپاها و سازه‌های ژئودزیک و سازه‌های کابلی را گسترش‌دادند. در دوره مدرن تقلید از طبیعت بیشتر حالت فرمال و سازه‌ای به خود می‌گیرد و هدف ایجاد نوآوریهای معماری است (۲۲) (جدول ۲). برخی از فناوری‌های برگرفته از طبیعت در دوره مدرن نظیر خرپاها، سازه‌های ژئودزیک، پوسته‌ها و سازه‌های کابلی به دلیل بهینه بودن و کارایی بالا در مقیاس گسترده بکار رفته‌اند.

جدول ۲- الهام فرمی و سازه‌ای از طبیعت در دوره مدرن (بناهای ساخته شده از سال ۱۹۰۰ تا ۱۹۷۲)

Table 2. Inspiration from the Form and structure of nature in the modern period (buildings built from 1900 to 1972)

قصر بلورین- ۱۹۰۵	**ستونهای قارچی‌شکل ساختمان جانسون - ۱۹۵۰**	**مرکز گیاه‌شناسی ویس - ۱۹۶۱**
		
تقلید از ارگانیسمها (فرمی- سازه‌ای) اثر پاکستون	تقلید از ارگانیسم (فرمی- سازه‌ای) اثر فرانک لوید رایت	تقلید از ارگانیسمها (سازه‌ای - فرمی)
فرودگاه TWA - ۱۹۶۱	**برج مارینا‌سیتی شیکاگو- ۱۹۶۴**	**اکسپو ۶۷ مونترآل**
تقلید فرمی	تقلید از ارگانیسمها (سازه‌ای- فرمی)	تقلید از ارگانیسمها (سازه‌ای – فرمی)
سازه های متکی به هوا- نمایِ شگاه اکسپو ۱۹۷۰	**استادیوم المپیک مونیخ -۱۹۷۲**	**سالن اپرای سیدنی -۱۹۷۳**
تقلید از ارگانیسمها (الهام از نیروی کششی حباب صابون)	تقلید از ارگانیسمها (سازه‌ای- فرمی)	تقلید فرمی

الهام مفهومی، فرمی و سازه‌ای از طبیعت با سازه‌های فولادی و بتنی در دوران پسامدرن نیز دنبال گردید. یکی از معماران بنام در زمینه تقلید فرمی از طبیعت سانتیاگو کالاتراوا است که آثار بدیعی خلق نموده است (جدول۳) در این دوره نیز برخی سازه‌ها مانند سازه‌های درختی به دلیل کارایی، سبکی و زیبایی در بناهای متعدد تکرار شدند.

جدول ۳- الهام فرمی و سازه‌ای از طبیعت در دوره پست‌مدرن (بعد از ۱۹۷۲)

Table 3. Inspiration from the Form and structure of nature in the postmodern period (after 1972)

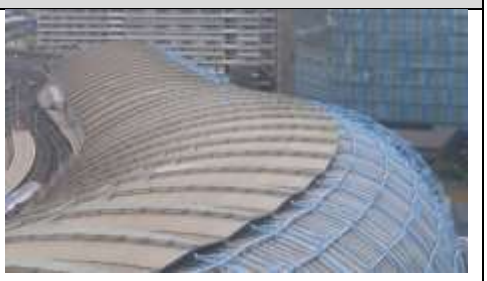
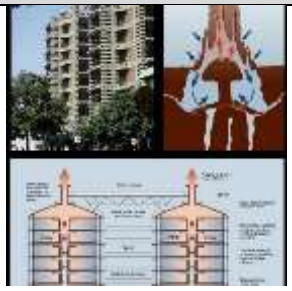
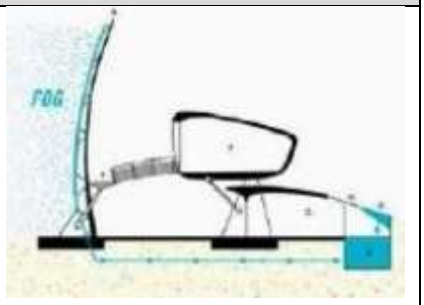
معبد لوتوس در دهلی -۱۹۸۶	**TGV Station- 1994**	**موزه بیلبائو اثر فرانک گری- ۱۹۹۷**
تقلید فرمی از گل نیلوفر	تقلید از ارگانیسم (سازه و فرم)	تقلید فرمی – هندسه فراکتال
ایستگاه لیبسون- ۱۹۹۸	**سازه‌های درختی فرودگاه اشتوتگارت- ۲۰۰۴**	**موزه علم و هنر سنگاپور- ۲۰۱۱**
تقلید از ارگانیسم (فرمی- سازه‌ای)	تقلید از ارگانیسم (بهینه‌سازی و فرم)	تقلید فرمی (بیومورفیزم)

پس از سال ۱۹۷۲ به دلیل تغییری که در دیدگاه انسان نسبت طبیعت صورت گرفت، اهداف جدیدی در علم بیونیک ایجاد گردید. در این دوره بحثهای مربوط به نابودی محیط‌زیست او را ملزم به جستجو در یافتن راهکارهای مناسب در تعامل فناوری و طبیعت می‌نماید. یکی از اهداف علم بیونیک در این دوره بازگشت به طبیعت و یادگیری از آن با هدف همزیستی با جهان است (۶۶ و ۶۷). الگوواره جدید با عنوان توسعه پایدار به مقابله با الگوهای تولید، توزیع و مصرف ناسازگار با محیط زیست می‌پردازد (۶۹) تقلید از ارگانیسم، تقلید از عملکرد و تقلید از اکوسیستم می‌تواند در راستای دستیابی به بهره‌وری انرژی و مباحث محیطی انجام-پذیرد. در جدول ۴ نمونه‌هایی از تقلید از طبیعت در راستای مباحث زیست‌محیطی نشان داده شده است. در ترمینال بین‌المللی واترلو و برج گرکین از ارگانیسمهای موجودات زنده در نحوه بهره‌برداری از انرژیهای تجدیدپذیر جهت افزایش کارایی انرژی تقلید شده است (۷۰). در ساختمان هلیوتروپ از عملکرد گیاهان در بهره‌برداری بهتر از نور خورشید تقلید شده است.

مسیری طولانی در تقلید از اکوسیستمها در مجموعه‌های زیستی و شهرسازی وجود دارد. در اکوسیستمهای طبیعت هر جاندار نقشی در تعادل اکوسیستم دارد. همچون وجود کرمهای خاکی که در تشکیل خاک و چرخه عناصر غذایی نقش مهمی دارند (۷۱) امروزه تلاشهای زیادی در راستای ایجادچرخه انرژی انجام می‌شود؛ همچون تولید انرژیهای تجدیدپذیر از پسماندهای ناشی از تولید و فراوری مواد غذایی (۷۲) در معماری، موریانه و تپه مورچگان از جمله مظاهر طبیعت است که مورد توجه قرار گرفته-اند. یک مرکز خرید بزرگ در زیمباوه به نام ایستگیت و ساختمان (ENR2) در دانشگاه آریزونا برای تنظیم دما و تهویه و بهره-گیری مناسب از نور طبیعی با تقلید ازساختار تپه‌های بزرگ زندگی موریانه درزیمباوه طراحی شده‌اند (۵۲). با وجود موفقیت بناهای ذکرشده در کاهش مصرف انرژی، چنین ساختمانهایی به تعداد انگشت شمار ساخته شده‌اند و در مقیاس گسترده کاربرد نیافته‌اند.

جدول ۴- تکامل روشهای الهام از طبیعت در راستای حل مشکلات زیست‌محیطی (دستیابی به پایداری محیطی) - بناهای ساخته شده در دوره پست مدرن (بعد از ۱۹۷۲)

Table 4. Evolution of methods of nature inspiration in order to solve environmental problems (achieving environmental sustainability) - buildings built in the post-modern period (after 1972)

ترمینال بین المللی واترلو-۱۹۹۴	Heliotrope House- ۱۹۹۴	مرکز تجاری ایستگیت-۱۹۹۶
		
تقلید از ارگانیسمها- الهام از پوست پنگولین جهت تهویه ساختمان	تقلید عملکردی از گیاهان در حرکت به سوی نور- بهینه‌سازی انرژی و چرخه آب	تقلید از ارگانیسم و عملکرد لانه موریانه- (بهینه‌سازی انرژی)
Matthew Parkes' Hydrological ۲۰۰۱-۲۰۰۷	Gherkin tower – 2011	در دانشگاه ENR2ساختمان آریزونا-۲۰۱۷
		
تقلید از ارگانیسم – نحوه جمع‌آوری آب باران با الهام از سوسک نامیب	تقلید از ارگانیسم و اکوسیستم (تقلید از کیسه های هوا در گل ونوس)- بهینه‌سازی انرژی	تقلید از اکوسیستم لانه موریانه- بهینه‌سازی انرژی و چرخه آب

در دوره پسامدرن ا ستفاده از الگوریتم در نرم‌افزارها به معماران و مهندســـان این امکان را داد که همزمان با طراحی حجم به بهینه‌ســـازی ســـازه‌ای و انرژی دســـت یابند (جدول۵). چنین سازه‌هایی در طی ساخت و بهره‌برداری به دلیل نیاز به دقت بالا در اتصالات و اندازه قطعات، در کارخانه تولید می شوند و نیاز به فناوری پیشرفته دارند.

جدول ۵- تکامل روشهای الهام از طبیعت در بهینه سازی سازه و انرژی با ارتقای فناوریهای طراحی (استفاده از الگوریتم در طراحی معماری در دوره پست مدرن)

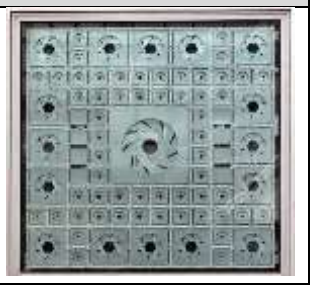
Table 5. The evolution of methods of nature inspiration in structure and energy optimization by improving design technologies (using algorithms in architectural design in the post-modern period)

سایبان متروپل- ۲۰۰۷	خانه اپرای تایچینگ ۲۰۰۵-۲۰۰۹	مکعب آبی-۲۰۰۸	برج سینو استیل ۲۰۱۶
طراحی پارامتریک (فرمی)	طراحی پارامتریک (بهینه-سازی سازه‌ای) (*Fathy & Fahmi, 2018*)	الگوریتم ورونئی (بهینه-سازی سازه و انرژی)	الگوریتم جذب‌کننده (بهینه‌سازی سازه و انرژی)

طراحی نماهای تعاملی یا پاسخگو در سال‌های اخیر به خاطر اهمیت کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها گسترش یافته است. میزان کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌هایی که از این سیستمها در پوسته بیرونی خود استفاده می‌نمایند بسیار قابل‌توجه است. روشهای مختلفی در مکانیسم باز و بسته شدن این نماها بکار رفته است که اکثر آنها از طبیعت الهام گرفته‌اند. در نمای بیرونی موسسه فرهنگی جهان عرب (جدول ۶) از ۲۴۰ دیافراگم استفاده شده که کنترل میزان نور ورودی به ساختمان را بر عهده دارند. این دیافراگم‌ها مانند لنز دوربین هریک به‌طور مستقل میزان ورود نور به بنا را تنظیم می‌نمایند. یکی دیگر از نمونه‌های ساختار متحرک مربوط به نمای برجهای دوقلوی البحر است. ساختار لانه‌زنبوری نمای این ساختمانها که یاداور مشربیه‌های سنتی است (۶۸) با بیش از ۱۰۰۰ قطعه، در پاسخ به چگونگی تابش خورشید با بازوبسته شدن خود میزان و شدت نور دریافتی را تنظیم می‌کنند، این نمای تاشو به صورت هوشمند کنترل می‌شود (۶۲). با کشف پلیمرهای مسلح که امکان ساخت مصالح خم‌شو بدون نیاز به مفصل و غلتک را میسر نموده است دانشمندان به سمت ساخت نماهایی پیش می‌روند که نیاز به کنترل‌کننده مرکزی نداشته باشند و قابلیت تغییر شکل در اثر تغییرات محیطی و بازگشت به حالت اولیه را داشته باشند. پاویون هایگرو اسکین نمونه‌ای از این تکنولوژی را به نمایش می‌گذارد. بازشوهای این پاویون با کامپوزیت چوبی طراحی شده و طراحان از خاصیت الاستیسیته و واکنش آن به رطوبت برای باز و بسته شدن در برابر تغییرات محیطی استفاده می‌کنند. متریالهای خودتنظیم‌شونده در نمونه‌های آزمایشی و در ابعاد محدود تولید شده‌اند و به تولید انبوه نرسیده‌اند. در صورت موفقیت در ساخت نماها با متریالهای خودتنظیم‌شونده، در مقیاس وسیع، تحول عظیمی در صنعت ساختمان ایجاد خواهد شد. استفاده از متریالهای پاسخگو در آینده امکان طراحی ساختمانهای ایستا را فراهم خواهد نمود، در این ساختمانها نیاز به مصرف انرژی به حداقل خواهد رسید (جدول۶).

جدول ۶- تکامل روشهای الهام از طبیعت با شکل‌گیری ساختارهای تغییر فرم‌پذیر در دوره پست‌مدرن

Table 6. The evolution of methods of nature inspiration with the formation of changable structures in the postmodern period

موسسه جهان عرب-۱۹۸۷	برجهای دوقلوی البحر-2012	پاویون Hygroskin -۲۰۱۲
		
تقلید عملکردی از مردمک چشم– تنظیم ورود نور به ساختمان (کنترل با دیافراگم)	تقلید عملکردی- بهینه‌سازی انرژی (کنترل مرکزی)	تقلید عملکردی از طبیعت (باز و بسته شدن فلسهای میوه کاج) – بهینه‌سازی انرژی (با استفاده از خاصیت الاستیک مصالح)

فناوری های ساخت نیز با الهام از طبیعت در حال تحول می‌باشند. نری آکسمن در دانشگاه ام.آی. تی در سال ۲۰۱۳ با ایجاد بستر مناسب روش جدیدی برای ساخت پاویون به کار برد و آن استفاده از خود کرم ابریشم برای ساخت پاویون بود. پاویون دیگری که در دانشگاه اشتوتگارت توسط شرکت پلانکتون تک طراحی شده و معروف به پاویون COCOON_FS است ترکیبی هنرمندانه از دانشهای بیومیمیکری و مجسمه‌سازی است که با بکارگیری پلیمرهای مسلح امکان‌پذیر شده است و با مطالعه ساختار هندسی دیاتومها به دست آمده است (۲۹).

امروزه از رفتار حیوانات در لانه سازی نیز الهام گرفته می شود و از سویی چاپ سه‌بعدی در سالهای اخیر معماری بیونیک را تحت‌تاثیر قرار داده است. از ترکیب این دو فناوری در ساخت پاویون اشتوتگارت بهره‌گیری شده است (جدول۷). در سال ۲۰۱۴ در دانشگاه اشتوتگارت رفتار عنکبوت آبی در لانه سازی مورد مطالعه قرار گرفته و در طراحی رباتی که با تقلید از رفتار عنکبوت آبی و مصالح کامپوزیت دارای الیاف کربن با روش چاپ سه‌بعدی ساختمان‌سازی می‌کند؛ مورد استفاده قرار گرفت (۹).

جدول۷-تکامل روشهای الهام از طبیعت با فناوریهای جدید ساخت و مصالح جدید در دوره پستمدرن

Table 7. The evolution of inspiration methods of nature with new construction technologies and new materials in the postmodern period

غرفه ابریشم در دانشگاه MIT	غرفه COCOON_FS	غرفه دانشگاه اشتوتگارت
استفاده از کرم ابریشم در ساخت پاویون	تقلید از ارگانیسم دیاتومها (هندسه کلی و نحوه اتصال قطعات)	تقلید از عملکرد عنکبوت آبی در طراحی رباتهای ساختمان‌ساز

نتیجه

در پژوهش حاضر برای ارزیابی روند تحول معماری برگرفته از طبیعت (بیونیک)، مطالعات کتابخانه‌ای گسترده‌ای انجام گرفت. با بهره‌گیری از تحلیل محتوای منابع عوامل تاثیرگذار در روند معماری بیونیک در سه گروه کلی دسته بندی گردید که عبارتند از: ارتقای دانش زیست‌شناسی، توجه به مخاطرات زیست‌محیطی و شکل‌گیری مباحث پایداری محیطی، پیشرفت فناوری‌ها (پیدایش نرم افزارهای طراحی و محاسباتی پیچیده و الگوریتمها، ارتقای دانش مواد و تکامل ساختارهای تغییرپذیر). ارایه راه‌حلهای مناسب در حل مشکلات مطرح جهان و همگامی با فناوریها و علوم روز در تحلیل معماری برگرفته از طبیعت مدنظر قرار گرفت. تحلیل محتوای مطالعات کتابخانه‌ای نشان داد که مقابله با مخاطرات زیست‌محیطی و توجه به کارایی انرژی از جمله مهمترین دغدغه‌های متون نگاشته شده در زمینه معماری بیونیک در دو دهه اخیر بوده است و از سویی گسترش علوم و فناوریها همچون ارتقای دانش زیست‌شناسی و شکل‌گیری علوم بیونیک، بیومیمتیک و بیومیمیکری و نیز ارتقای فناوریهای طراحی و ساخت در معماری و تولید آلیاژها و کامپوزیتهای مسلح بر روند تکامل معماری برگرفته از طبیعت تاثیرگذار بوده است. مطالعه تحلیلی بناهای بیونیک دوره مدرن و پسامدرن نشان داد که قبل از سال ۱۹۷۲ بهینه‌سازی سازه‌ای و دستیابی به فرمهای آوانگارد معماری مدنظر معماران بوده است ولی از سال ۱۹۷۲ به بعد دستیابی به بهینه‌سازی انرژی و یا بهینه سازی سازه و انرژی همزمان مدنظر معماران قرار گرفته است. تعداد بناهای بیونیک طراحی شده نشان از علاقه معماران و مهندسان به بهره‌گیری از تمامیت طبیعت در معماری دارند. مطالعه بناهای بیونیک نشان دادند که معماری بیونیک در آینده پتانسیل پاسخگویی به مسائل زیست محیطی را با بهره‌گیری از فناوریهای روز دنیا خواهند داشت. مقایسه بناهای منتخب نشان می‌دهد برخی تکنیکهای بهینه‌سازی برگرفته از طبیعت قبل از سال ۱۹۷۲ همچون خرپاها، سازه‌های ژئودزیک، سازه‌های درختی و پوسته‌ها قابلیت گسترش در مقیاس انبوه را یافته‌اند ولی بسیاری از راه‌حلهای زیست‌محیطی بکار رفته در بناهای بیونیک در دهه‌های اخیر منحصر بفرد بوده و احتمالا به دلایلی ازجمله هزینه‌های اولیه بالا و ضعف فناوری امکان تولید انبوه را نیافته‌اند. به همین دلیل مطالعات بیشتر در زمینه موانع رشد و اجرایی شدن راه‌حلهای بیونیک در پژوهشهای آینده توصیه می‌گردد.

References

1. Chayaamor-Heil, N. 2023. From Bioinspiration to Biomimicry in Architecture: Opportunities and

Challenges. Encyclopedia, vol 3, 202–223. https://doi.org/10.3390/

2. Golabchi, Mahmood. Khorsand Nikoo, Morteza. 2014. Bionic Architecture. 1th Edition. Tehran, University of Tehran Press: 54-56 (In Persian)
3. Imani, Negin. Brenda Vale. 2023. Biomimetic Buildings: Copying Nature for Energy Efficiency. MDPI. ISBN 978-3-0365-5402-0 (PDF)
4. Gérardin, L. 2012. Bionics: Technology is inspired by living things, Sorosh Publication
5. Rouhizadeh, Amir Reza. Hafezi, Mohammad Reza. Farrokhzad, Mohammad.Panahi, Siamak. 2019. Inspiration from Nature in the Training of Structural Design in Architecture. Bagh e Nazar. Vol 15, Issue (68):59-72 https://dx.doi.org/10.22034/bagh.2019.81658. (In Persian)
6. Mazzoleni, I., 2013, Architecture Follows Nature: Biomimetic Principles for Innovative Design, CRC Press, London.
7. Nour ElDin. N, Abdou. A, Abd ElGawad. I. 2016. Biomimetic Potentials for Building Envلope Adaptation in Egypt. Improving Sustainability Concept in Developing Countries.
8. López Marlén, Ramón Rubio, Santiago Martín, Ben Croxford. 2016. How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes. Renewable and Sustainable Energy Reviews 67 (2017) 692–703. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.018
9. D. El-Mahdy & H.S. Gabr, 2017. BEHAVIOR OF NATURAL ORGANISMS AS A MIMICKING TOOL IN ARCHITECTURE. Int. J. of Design & Nature and Ecodynamics. Vol. 12, No. 2 214-224.DOI: 10.2495/DNE-V12-N2-214-224
10. Derek J. Cleme nts-Croo me. 2009. Lessons from Nature for sustainable architecture. First Issue of Intelligent Buildings International Journal, Earthscanhttp://dx.doi .org/10.1680/ib. 57 340.025
11. Rasha Mahmoud Ali El-Zeiny. 2012. Biomimicry as a Problem-Solving Methodology in Interior Architecture. AcE-Bs 2012 Bangkok ASEAN Conference on Environment-Behaviour Studies, Bangkok, Thailand. Procedia – Social and Behavioral Sciences 50 502 – 512. Doi: 10.1016/j.sbspro.2012.08.054
12. Gehan.A.N. Radwan & Arch. Nouran Osama. 2016. BIOMIMICRY, AN APPROACH, FOR ENERGY EFFECIENT BUILDING SKIN DESIGN. Procedia Environmental Sciences.Volume 34. Improving Sustainability Concept in Developing Countries. Doi: 10.1016/j.proenv.2016.04.017
13. Yuan Yanping. Xiaoping Yu. Xiaojiao Yang. Yimin Xiao. Bo Xiang. Yi Wang. 2017. Bionic building energy efficiency and bionic green architecture: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 74 (2017) 771–787. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.004
14. Hosseini Seyed Morteza. Masi Mohammadi.Torsten Schro¨der. Olivia Guerra-Santin. 2021. Bio-inspired interactive kinetic facade: Using

dynamic transitory-sensitive area to improve multiple occupants' visual comfort. Frontiers of Architectural Research 10 (2021) 821 e83. https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.07.004

15. Kheradmand, Saba. Sattari Sarbangholi, Hassan. 2018. Architecture Follows Nature (Biotechnology A smart approach to energy conservation in building skins). Quarterly Geographical Journal of Territory. Volume 15, Issue 57: Pages 69-87 (in persian)
16. Yousef Mohamed, Abeer Samy. 2018. BIOMIMETIC ARCHITECTURE: CREATING A PASSIVE DEFENSE SYSTEM IN BUILDING SKIN TO SOLVE ZERO CARBON CONSTRUCTION DILEMMA. EQA – Environmental quality / Qualité de l'Environnement / Qualità ambientale, 29 (2018) 1-28. DOI: 10.6092/issn.2281 -4485/7855
17. Razzazi, Samira. Mozaffari, Fateme. 2018. Compatible and adaptable shells of the building with imitation of plants in nature. Specialized scientific quarterly of green architecture. 4 th year. Issue 11. (In Persian)
18. Hosny Ibrahim Anous Inas. 2015. Biomimicry" Innovative Approach in Interior Design for Increased Sustainability. International Association of Scientific Innovation and Research (IASIR), USA
19. Ghiabagloo, Zahra.2013. Ceiling skylight design inspired by nature (biomimetic). Gournal of Architectural thought. 1th year. Issue 1: 71-78 (In Persian)
20. Zahedinia, Seyyed Saeed. 2016. The role of Bionic architecture in achieving sustainability (Case study: Mashhad metropolitan). International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 7, Issue 11, November-2016 211
21. Zari, M.P. 2018. Regenerative Urban Design and Ecosystem Biomimicry; Routledge: London, UK,
22. Buttn, Thmas. 2016. Biomimicry: A Source for Architectural Innovation in Existing Buildings. ROCHESTER INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Golisano Institute for Sustainability, Thesis for Master of Architecture, Department of Architecture
23. AZMY NESSIM, MARIAN. 2016. BIOMIMETIC ARCHITECTURE AS A NEW APPROACH FOR ENERGY EFFICIENT BUILDINGS. A Thesis Submitted to the Faculty of Engineering at Cairo University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY In ARCHITECTURE University Faculty of Engineering-Ein Shams University, FACULTY OF ENGINEERING, CAIRO UNIVERSITY GIZA, EGYPT
24. Aamer, H.S.; Hamza, A.F.; Khairy, M.; Ghonimi, I.2020. Biomimicry as a Sustainable Design Methodology for Building Behaviour. Eng. Res. J.-Fac. Eng. vol 46, 191–201. [CrossRef]
25. Delgado, N.; Jiménez, J.U.; Mora, D.2020. Inspection of Biomimicry Approaches as an Alternative to Address Climate-Related Energy Building Challenges: A Framework for Application in Panama. Biomimetics vol 5, 40
26. Eltaweel, Ahmad. Yuehong SU .2017. Parametric design and daylighting: A literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 73, June 2017, Pages 1086-1103

https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.011

27. E. Mele, Massimiliano Fraldi, Gian Maria Montuori, Gianpaolo Perrella, Vincenzo Della Vista. 2019. Hexagrid-Voronoi transition in structural patterns for tall buildings. Frattura ed Integrità Strutturale, 47 (2019) 186-208; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.47.15
28. Mahmoud, A. khoshazi, Y. 2016, Parametric-based designs for kinetic facades to optimize daylight performance: Comparing rotation and translation kinetic motion for hexagonal facade patterns. Solar energy 126, 111-127 https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.039
29. Redolfi, Giuseppe. Shiva khoshtinat. Algorithms In Nature & Architecture (Biomimetic Architecture). https://www.researchgate.net/publication/293178740_Biomimetic_Architecture
30. Ashraf Saad El Ahmar, salma. 2011. BIOMIMICRY AS A TOOL FOR SUSTAINABLE ARCHITECTURAL DESIGN TOWARDS MORPHOGENETIC ARCHITECTURE. A THESIS Presented to the Graduate School Faculty of Engineering, Alexandria University In Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree
31. Biswajit Debnath, Kumar. 2014. PARAMETRIC STUDY OF BIOMIMETIC DESIGN OF HIGH RISE OFFICE BUILDING FAÇADES IN VIEW OF OPTIMIZING NATURAL VENTILATION POTENTIAL IN THE HUMID TROPICS. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirement for the degree of MASTER OF ARCHITECTURE. Department of Architecture
Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET)
32. Panchuk, Neal. 2006. An Exploration into Biomimicry and its Application in Digital & Parametric [Architectural]Design. A thesis presented to the University of Waterloo in fulf llment of the thesis requirement for the degree of Master of Architecture in Architecture Waterloo, Ontario, Canada
33. Mir Katooli, Jafar. Barghahi, Reza. Aghili, Seyyede Zahra. 2015. Using fractal geometry in geography analysis and urban planning. Journal of Geographical Survey of Space. Scientific - research quarterly of Golestan University. 4th year. Issue 14 (In Persian)
34. Sabry Aziz, Moheb, EL sheriff. 2016. Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation. Alexandria Enjineering Journal. Volume 55, Issue 1. Pages 707-714, https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.015
35. Gruber Petra, Barbara Imhof. 2017. Patterns of Growth. Biomimetics and Architectural Design. Buildings 2017, 7, 32; doi:10.3390/buildings7020032
36. Matini, Mohammad Reza. 2015. Pliable Convertible Structures in Architecture Inspired by Natural Role Models. Journal of Fine Arts: Architecture and Urban Planning. Volume 20, Issue 1 - Serial Number 1: 67-80. Doi: 10.22059/JFAUP.2015.56372 (In Persian)

37. Schleicher Simon. Julian Lienhard. Simon Poppinga. Thomas Speck. Jan Knippers.2014. A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture. Computer-Aided Design. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/cad. https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.01.005
38. Körner, Axel. Larissa Born. Oliver Bucklin. Seiichi Suzuki. Lauren Vasey.Götz T. Gresser. Achim Menges. Jan Knippers. 2021. Integrative design and fabrication methodology for bio-inspired folding mechanisms for architectural applications. Computer-Aided Design 133 (2021) 102988. https://doi.org/10.1016/j.cad.2020.102988
39. Dixit Saurav. Anna Stefan´ska. 2022. Io-logic, a review on the biomimetic application in architectural and structural design. Ain Shams Engineering Journal. https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101822
40. Deyaa Abdul Jalil, D.W.; Ali Hasan Kahachi, H.2019. The Implementation of Nano-Biomimicry for Sustainability in Architecture. J. Eng. Sustain. Dev. vol 23, 25–41
41. Gu, G.X.; Su, I.; Sharma, S; Voros, J.L.; Qin, Z.; Buehler, M.J. Three-Dimensional-Printing of Bio-Inspired Composites. J. Biomech. Eng. 2016, 138, 021006.
42. Karshenas, Zahra. Zare, Leila. Methods of imitating nature. 2017. The first national technology conference in applied engineering of the club of young researchers and elites of Islamic Azad University. (In Persian)
43. Soltanzade, Alireza. Masnavi, Mohammadreza. 2015. Inspiration from the form of trees to design the column and roof form to cover wide openings using the Lindenmeyer system. The fourth national conference of applied research in civil engineering, architecture and urban management. (In Persian)
44. Feizabadi, Mahmood. 2012. Theoretical Foundations of the Role of Natural Structures in Architectural Design. PhD Thesis.Tarbiat-Modarres University.
45. Shahroodi, Abbasali. Golabchi, Homayoon. 2016. Utilizing nature for effective teaching of static lessons in the field of architecture in Iran. Journal of Fine Arts. No. 31. Pages 56-47. (In Persian)
46. Arciszewski, T. and Kicinger, R.,2005. invited chapter, "Structural design inspired by nature," Innovation in Civil and Structural Engineering Computing, B. H. V. Topping, (Editor), Saxe-Coburg Publications, Stirling, Scotland, pp. 25-48, 2005.
47. Hajizade, Ebrahim. 2011. Statistical methods and analyzes with a view to research methods in biological and health sciences (with SPSS guide). Academic Jihad Publications. First edition.
48. Gobadian, Vahid. 2003.Western contemporary architecture. Tehran. Cultural Research Press (In Persian)
49. Dyson. F, Our biotech future, 2007. The New York Review of Books.
50. Benyus JM. 2002. Biomimicry. Harper Perennial, New York, NY, USA.
Benyus, J.M.1997. Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. New York: HarperCollins Publishers, Inc.

Beynus, Janine. (http://www.cnn.com/2008/TECH/science/07/04/beynus.interview/index.html) Accessed Feb 5, 2010

51. Vogel,Steven. James B. Duke Professor Emeritus".2015. Duke Department of Biology.
52. Vincent , Julian F.V , Olga A Bogatyreva, Nikolaj R Bogatyrev, Adrian Bowyer, Anja-Karina Pahl. 2006. Biomimetics: its practice and theory. Journal of the royal society interface.
53. Kiss, Alexandre Charles. Shelton, Dinah (2007). A Guide to International Environmental Law. Brill. ISBN: 1571053441, 9781571053442 (In Persian)
54. Bashardust, Mohammadreza. 2015. An overview of sustainable architecture and its impact on the environment International Conference on Architecture, Urban Planning, Civil Engineering, Art and Environment. (In Persian)
55. Pohl, G; Nachtigall,W. Biomimetics for Architecture & Design: 2015.Nature-Analogies-Technology; Springer: Cham, Switzerland.
56. McGovern, Joseph wiliam. 2009. Biomimicry: how learning from nature can restore sustainability in architecture 2009
57. UNESCO, 2010. "Engineering: issue, challenges and opportunities for development" Paris.
58. ElBatran RM, Ismaeel WSE. 2021. Applying a parametric design approach forptimizing daylighting and visual 4 comfort in office buildings. Ain Shams Eng J Sep. 2021;12(3):3275–84. Doi: https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.02.014.
59. Golabchi, Mahmood. Andaji Garmaroodi, Ali. Bastani, Hossein. 2012. Digital Architectue. Tehran, University of Tehran Press.
60. Abdullah YS, Al-Alwan HAS. 2019. Smart material systems and adaptiveness in architecture. Ain Shams Eng J Sep. 2019;10(3):623–38. Doi: https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.02.002
61. Pawlyn. M, 2016. Biomimicry in Architecture, 2nd ed. London: RIBA Publishing; 2016.
62. Taghizade, Katayoon. Golabchi, Mahmood. Vojdanzade, Ladan. 2019. Changeable Architecture. Tehran. Third edition. University of Tehran Press.
63. Matini, M.R .2007, Biegsame Konstruktionen in der Architektur auf der Basis bionischer Prinzipien, Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE); Doctoral Dissertations, University of Stuttgar, Stuttgart
64. Gaβ, S; Druesedau, H; Hennike, J .1985, IL31, Bambus-Bamboo, Institute for Lightweight Structures (IL), University of Stuttgart, Stuttgart
65. Pawlyn, M., 2011, "Biomimicry in Architecture", RIBA Publishing, London
66. Pioz, J., & Maria Rosa, C. 2000. Architecture and Bionic. Architecture and bionic I, II, III, IV. International Workshopes, Spain: Sinu University.
67. Vahedi, Arash. 2009. Eastern Mediterranean University Gazimağusa, North Cyprus ،Master of Science in Architecture
68. BabilioE Enrico, Miranda Raffaele, Fernando Fraternali. 2019. On the

Kinematics and Actuation of Dynamic Sunscreens with Tensegrity Architecture. Frontiers in Materials, https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00007

69. Safai Poor, Masoud. Tahmasebi, Siamak. Qareqani, Masomeh. 2019. Eco Village. Human and Enviroment. Iran society of Enviromantalists. Vol 14, Issue 4 (39): 53-66
70. Chayaamor-Heil, N. 2023. From Bioinspiration to Biomimicry in Architecture: Opportunities and Challenges. Encyclopedia 2023, 3, 202–223. https://doi.org/10.3390/
71. Moslehi, Maryam. Nazari, Jamile. 2012. Reciprocal relationship of earthworms and forests and its Effects on forest soil. Human and Environment. Volume 10, Issue 34: 108-113. (In Persian)
72. Didar, Zohreh. 2018. Producing Renewable Energy from Food Processing Wastes. Human and Environment. Vol 16, Issue 1 (44): 105-118.