صفحات ۳۳ - ۴۵ (مقالهٔ پژوهشی)
نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی ● دوره ۲۷ ● شماره ۲ ● تابستان ۱۴۰۱
DOI: 10.22059/JFAUP.2022.345545.672782 شناسه دیجیتال

دسته‌بندی انواع الگوهای باربری در سازه‌های معماری مبتنی بر رویکرد بیونیک؛ مورد مطالعه: سازه‌های خمشی

یاسر گلدوست[۱]، مجید احمدنژاد کریمی[۲*]

[۱] استادیار گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.
[۲] دکتری معماری اسلامی، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۷، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۱)

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی

چکیده

الهام از طبیعت برای پاسخگویی به مسائل علمی در حوزه‌های گوناگون دانش، هدف بیونیک در رشته‌های مختلف است که در طراحی و ساخت سازه‌های معماری نیز نقش‌های مختلفی را پذیرفته است. در این میان، به منظور افزایش شناخت رابطهٔ میان سازه در طبیعت و معماری، راه‌کار و نگرش طبیعت در برابر نیروهای محیطی از طریق کارآمدترین ترتیبات سازه‌ای می‌تواند در معرفی الگوهای باربری برای سازه‌های معماری گسترش یابد. در این راستا، هدف اصلی این پژوهش دسته‌بندی وجوه گوناگون الگوهای باربری با بررسی نمونه‌های گوناگونی از ساختارهای موجود از سازه‌های طبیعی خمش محور است. در این نوشتار با تکیه بر یک روش توصیفی و تحلیلی و با استفاده از ادبیات حوزه‌های اصلی پژوهش، الگوهای باربری در این نوع سازه‌ها در قالب بررسی دو وجه، شامل رویکرد راه‌حل‌های باربری و ماهیت راه‌حل‌های باربری تبیین شده است. در وجه اول، چگونگی پاسخ سازه و در وجه دوم، ویژگی پاسخ سازه در برابر نیروهای محیطی مورد بحث است. نتیجهٔ اصلی پژوهش آن است که سازه‌های طبیعی به‌جای مقاومت در برابر نیروها، به‌طور عمده از روش مدیریت نیروها استفاده می‌کنند. در بحث ارائه شده، لزوم توجه دقیق به فرایند پیچیدهٔ انتقال این الگوهای باربری از طبیعت به حوزهٔ سازه‌های معماری نیز مدنظر است.

واژه‌های کلیدی

معماری بیونیک، سازه‌های معماری، سازه‌های طبیعی، الگوهای باربری، زیست‌تقلیدی، سازه‌های خمشی.

* نویسنده مسئول: تلفن: ۰۹۱۱۲۱۱۰۸۸۶، نمابر: ۰۳۱۳۲۲۱۸۱۴۶ -۰۳۱، E-mail: majid_ahmadnejad@yahoo.com.

مقدمه

بشر همواره در بسیاری از موضوعات گوناگون شامل هنر، فلسفه، فناوری، فیزیک، پزشکی و معماری و مهندسی از طبیعت الهام گرفته و از آن دانش کسب کرده است. الگوبرداری به‌طور خاص در زمینهٔ سازه‌های معماری در مقایسهٔ با بسیاری از موضوعات دیگر رویکردی جدیدتر است؛ به نحوی که در قرن بیستم میلادی، مهندسان و معماران توانستند با الهام از طبیعت سازه‌های سبک‌وزن با کارایی بالا را گسترش دهند (Garcia and Martinez, 2009, 893). امروزه تأثیر طبیعت بر فناوری‌های نوین بیشتر مشهود است. متخصصان به‌طور فزاینده‌ای به دنبال فرآیندها و عملکردهایی هستند که می‌توان آن‌ها را در موجودات زنده مشاهده کرد. بنابراین، بیونیک به‌عنوان یک موضوع میان‌رشته‌ای که به مطالعهٔ عملکرد و رفتار موجودات زنده می‌پردازد، می‌تواند نقش مهمی را در جست‌وجوی فناوری‌های جدید، به‌ویژه در رفتار سازه‌های معماری ایفا کند. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش معرفی و دسته‌بندی الگوهای باربری بر اساس رفتار سازه‌های موجود در طبیعت است که با توجه به دو جنبهٔ «ماهیت راه‌حل‌ها» و «رویکرد راه‌حل‌ها» استخراج می‌گردد (تصویر ۱). در پژوهش حاضر، مراد از اصطلاح «رویکرد راه‌حل» همان نوع راه‌کار، چاره و چگونگی پاسخ سازه‌های طبیعی در شرایط گوناگون باربری است. همچنین اصطلاح «ماهیت راه‌حل» به ویژگی این راه‌حل‌ها و نگرش مواجه‌شدن این راه‌حل‌ها در برابر نیروهای محیطی اشاره دارد. با توجه به مفاهیم فوق، سؤالات پژوهش شامل موارد زیر است:

۱. ویژگی‌های سازه طبیعی با توجه به ماهیت راه‌حل‌های آن کدام‌اند؟

۲. ویژگی‌های سازه طبیعی با توجه به رویکرد راه‌حل‌های آن کدام‌اند؟

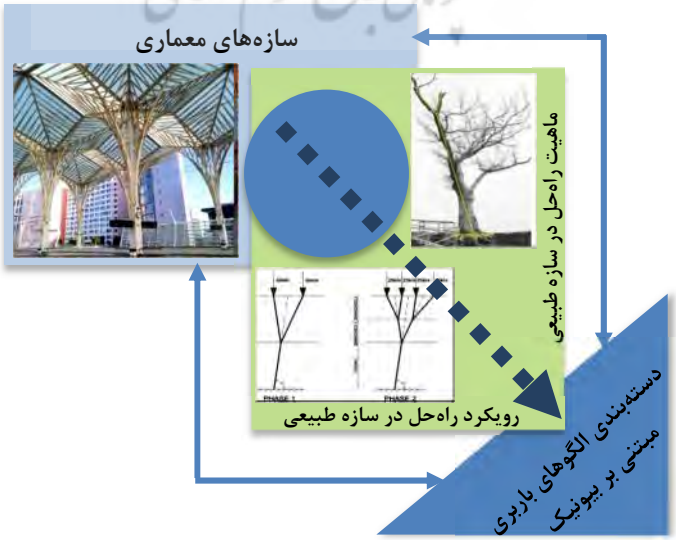
۳. الگوی عمدهٔ باربری در سازه‌های طبیعی کدام‌اند؟

روش پژوهش

روش پژوهش مورد استفاده در تحقیق حاضر به‌صورت توصیفی-تحلیلی است که در قالب بررسی و ارزیابی نمونه‌های موجود از سازه‌های طبیعی و همچنین روش‌های طبیعت در رویارویی با نیروهای محیطی انجام می‌شود. در بخش‌های گوناگون تحقیق به تطبیق رفتار سازه‌های طبیعی با سازه‌های معماری و تعیین الگوهای مختلف باربری پرداخته می‌شود. داده‌ها و اطلاعات با تأمل بر ادبیات موضوع و پژوهش‌های مرتبط در حوزه‌های مشترک معماری، سازه و بیونیک استخراج و تحلیل می‌شود.

پیشینهٔ پژوهش

تاکنون پژوهش‌های گوناگونی با موضوعات مختلف در زمینهٔ حوزه‌های مشترک میان دانش سازه، معماری و بیونیک انجام شده است. برای نمونه، شاهرودی و همکاران با بررسی مفاهیم باربری و ایستایی در ساختار موجودات زنده، به‌کارگیری آن را در آموزش معماری مورد ارزیابی قرار دادند (شاهرودی و همکاران، ۱۳۸۶). تقی‌زاده در یک نوشتار مشابه، به قابلیت سازه‌های طبیعی و رفتار طبیعت در برابر بارهای وارده برای آموزش دانش سازه به دانشجویان معماری اشاره داشت (تقی‌زاده، ۱۳۸۵). همچنین تقی‌زاده و همکارانش در نوشتاری دیگر به راه‌حل‌های طبیعت دربارهٔ ساختارهای متحرک و مکانیزم مکانیکی آن پرداختند (تقی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸). مددی و ایمانی با بررسی مشخصهٔ عملکردگرایی بایومیمیک، ضمن انجام یک مطالعهٔ تطبیقی، آثار کالاتراوا و گاودی را در معرض مقایسه قرار دادند (مددی و ایمانی، ۱۳۹۷). جلالی و گلابچی به بررسی و تحلیل چگونگی طراحی سازه‌های پیش‌ساخته و پایدار با رسوب نمک و الهام از الگوی بهینه‌سازی مصرف مصالح در استخوان ترابکولار انسان پرداختند (جلالی و گلابچی، ۱۳۹۷). ارسلان و سورگوک در تحقیقی، شباهت‌های سازه‌های طبیعی و سازه‌های معماری را به لحاظ فرم سازه‌ای و ویژگی‌های بصری آن‌ها بررسی کردند (Arslan and Sorguc, 2004). نجاتی و شاهچراغی به بررسی نسبت و پیوند میان فرم‌های معماری و سازه با استفاده از



تصویر ۱- محدوده و حوزه‌های پژوهش.

مبانی موجود در فرم‌های سازه‌های طبیعی پرداختند؛ موضوعاتی از جمله فرآیند پیدایش طبیعت، دلایل بهره‌مندی از الهام از طبیعت برای طراحان و روش‌های الهام از طبیعت در این نوشتار مورد بحث قرار گرفتند (Nejati and Shahcheraghi, 2018). جان رِی در نوشتار خود با عنوان «طبیعت به‌عنوان منبع الهام برای سازهٔ خانه اپرای سیدنی» به بررسی پیچیدگی‌های موجود در نحوهٔ انتخاب فرم‌های سازه‌ای مناسب از طبیعت پرداخته است. این تحقیق، در قالب بررسی سازهٔ ساختمان اپرای سیدنی به‌عنوان نمونهٔ موردی از مراحل طرح اولیه تا ساخت آن انجام گرفت (Rey-Rey, 2022). همچنین نوواک و روکیکی در مقاله‌ای با عنوان «فرم‌های بیونیک در جست‌وجوی مدل‌های سازه‌ای در معماری» به امکان استفاده از مدل‌های ریاضی در معماری زیست تقلیدی و تحلیل کارایی فرم‌های بیونیک و هندسی با توجه به معیار حداقل وزن ارائه پرداختند (Nowak and Rokicki, 2018).

مبانی نظری پژوهش

۱- بیونیک و سازه‌های معماری

۱-۱.تعریف

کاربرد رسمی «بیومیمتیک» به معنای «زیست‌تقلیدی» به‌عنوان یک دانش، به دهه‌های اخیر برمی‌گردد. به‌طور خاص،اصطلاح «زیست‌تقلیدی» در دهه ۱۹۵۰ توسط بیوفیزیک‌دان و مهندس، اوتو اسمیت برای تعیین حوزهٔ جدیدی از دانش در مهندسی زیست‌پزشکی پیشنهاد شد. همچنین در سال ۱۹۶۰، اصطلاح «بیونیک» به‌عنوان ترکیبی از اصطلاحات «زیست‌شناسی» و «تکنولوژی» در ایالات متحده توسط جک استیل، در کنفرانسی با عنوان «سمپوزیوم بیونیک: الگوهای زنده، کلید فناوری جدید» استفاده شد (Gruber, 2011). این اصطلاح به مطالعهٔ عملکردها و ساختارهای سیستم‌های بیولوژیکی به‌عنوان مدل‌های مرجع برای طراحی در زمینهٔ مهندسی اشاره دارد. همچنین اصطلاح «بیومیمیکری» در دهه ۱۹۸۰ توسط زیست‌شناس جانین بنیوس، نویسنده کتاب *نوآوری الهام‌گرفته از طبیعت* پیشنهاد شد (Otto, 1982). بیومیمیکری در این کتاب به‌عنوان یک علم جدید تعریف شده است که طبیعت را به منظور تقلید یا الهام گرفتن از آن برای حل مسائل انسانی مطالعه می‌کند (Chayaamor-Heil, 2018).

۱-۲. گونه‌شناسی

یکی از دسته‌بندی‌های موجود از سازه‌های طبیعی، بر پایه ظرفیت‌های باربری آن‌ها است. ساختارهای طبیعی یک‌بُعدی، معمولاً عناصر سبک‌وزنی مانند الیاف، موها، ماهیچه‌ها و ساقه‌های فشاری و خمشی هستند. غشای سلول‌ها، پوست‌ها و تارعنکبوت را می‌توان به‌عنوان ساختارهای دوبُعدی مقاوم در برابر کشش و با ویژگی‌های غشایی در نظر گرفت که قادر به انتقال نیرو از طریق سطوح خود هستند. همچنین سازه‌های متشکل از عناصر تحت کشش و فشار مانند بال‌های حشرات و پرندگان دوبُعدی هستند. از سوی دیگر، بیشتر ساختارهای موجود در طبیعت زنده سه‌بُعدی هستند، شامل سلول‌ها، ساختارهای مجوّف و نرم‌تنان. همچنین بسیاری از ساختارهای تحت فشار مانند استخوان‌های مهره‌ای و اسکلت‌های رادیولاریان نیز در این دسته‌بندی گنجانده شده‌اند (Arslan and Sorguc, 2004, 46).

ارسلان و سورگاک در دسته‌بندی دیگر مبتنی بر ویژگی‌های فرمی و بصری، سازه‌های طبیعی را در پنج گروه اصلی قرار دادند: اولین گروه، سازه‌های درختی هستند. مشاهدات ساختار درختان، بشر را به آموختن روش‌های جدید ساختمانی سوق داد. ساختار درختی را می‌توان برای اولین بار در سازه‌های دندانه‌دار معماری گوتیک مشاهده کرد. گروه دوم، سازه‌های قابی هستند. هنگامی که به ساختار اکثر حیوانات و انسان‌ها مشاهده می‌شود، هر استخوان از اسکلت بدن بیانگر ساختارهای سبک و سخت است. ستون فقرات و دنده‌ها در ارتباط و هماهنگ با یکدیگر برای حمل بارها کار می‌کنند. دسته سوم، پوسته‌ها هستند که به دلیل مقاومت بالا و حداقل مصرف مواد، از رایج‌ترین و کارآمدترین عناصر سازه‌ای در طبیعت به شمار می‌روند. نمونه‌هایی از پوسته‌ها شامل تخم‌مرغ، صدف، لاک‌پشت و جمجمه در ریخت‌شناسی طبیعت به‌وفور یافت می‌شوند. در گروه دیگر از سازه‌های طبیعی، سازه‌های شبکه‌ای جای دارند که علاوه بر ظرفیت حمل بار که از مواد ابریشم مانند آن‌ها ناشی می‌شود، اهمیت دیگری نیز دارند. ساختارهای شبکه‌ای، دارای ویژگی غشایی و ظرفیت حمل بار بسیار بالا و درعین‌حال وزن ناچیزی می‌باشند. در این دسته‌بندی، سازه‌های پنوماتیک، در گروه آخر جای دارند. به‌سادگی می‌توان انواع گوناگونی از ساختارهای گیاهان، حیوانات و انسان‌ها را یافت که فرآیندها و شرایط مختلف زندگی آن‌ها به‌طور خارق‌العاده‌ای از یک اصل ساختمانی واحد، یعنی اصل «Pneu» توسعه یافته و شکل گرفته‌اند (Arslan and Sorguc, 2004, 52). ساختار پنوماتیک، روشی است که در آن، یک پوشش انعطاف‌پذیر و مقاوم در برابر کشش، پرکننده‌ای را احاطه می‌کند.

۱-۳. الگوگیری از سازه‌های طبیعی

رویکردهای طراحی زیست‌تقلیدی معمولاً به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند (Vincent, 2001; Vincent et al., 2006; Panchuk, 2006): رویکرد مستقیم که در آن، طراح به‌طور مستقیم تدابیر یک موجود زنده، یک الگوی رفتاری یا یک اکوسیستم در طبیعت را به‌صورت قیاسی تقلید می‌کند؛ درحالی‌که با رویکرد غیرمستقیم، طراح، ایده‌ها و مفاهیم را به‌عنوان اصولی از طرح‌های طبیعت (و نظام طبیعی) انتزاع می‌کند. در نگاهی دیگر، زیست‌تقلیدی به‌عنوان یک رویکرد طراحی می‌تواند به مثابهٔ یک رویکرد مسئله‌محور و یا راه‌حل‌محور نیز بررسی شود. در رویکرد مسئله‌محور، طراح کارش را با طرح یک مسئله آغاز می‌کند که به دنبال توسعهٔ راه‌حل است. رویکرد راه‌حل‌محور شامل یک شیوهٔ مهندسی معکوس در حل یک مسئلهٔ طراحی است (Wilson, 2008). همچنین به منظور الهام‌گیری یا تقلید از سازه‌های موجود در طبیعت، سطوح گوناگونی تعریف شده است. سطوح الهام‌گیری یا تقلید از طبیعت در قالب فرم، ساختار، فرایند، مصالح و عملکرد تجلّی می‌یابد (Elmeligy, 2016, 45). انتقال الگوها از طبیعت به حوزهٔ سازه منطقی است، زیرا آن‌ها نتیجهٔ یک فرآیند تکاملی بسیار پیچیده هستند. از سوی دیگر، این پیچیدگی زیاد همان چیزی است که کاربرد مستقیم آن‌ها، یعنی تقلید صرف، در مسائل مهندسی سازه را بسیار دشوار می‌کند (Rey-Rey., 2022, 4). لذا، انتقال الگوهای طبیعی به حوزهٔ معماری و سازه، فرآیند دشواری است که در آن مرزهای بین حوزه‌های دانش زیست‌شناسی و مهندسی باید به‌دقت بررسی شوند (MacKinnon et al., 2020). طراحی در طبیعت مبتنی بر روند تدریجی و پایان‌ناپذیر از پالایش و بهینه‌سازی است. مراحل این تکامل پیچیده است که هیچ نقطه

عطف عمده‌ای در این فرآیند، به جزء انباشت عظیمی از پیشرفت‌های کوچک وجود ندارد (Vogel, 2000). می‌توان یک نقطهٔ مشترک میان جست‌وجوی طبیعت و سازه تعریف کرد: حداقل مصرف انرژی برای تکامل به سمت کارآمدترین سیستم‌های ممکن. از این نظر، اندیشه‌های بیکرز و همکاران (۱۹۹۸) بسیار جالب است: «بین مهندسی و طبیعت، دوگانگی وجود دارد که مبتنی بر حداقل استفاده از انرژی است. زیرا حیوانات و گیاهان برای بقای خود در رقابت با یکدیگر، روش‌های زندگی و تولید مثل را با استفاده از کمترین منابع تکامل داده‌اند. این مهم شامل کارایی در متابولیسم و تقسیم بهینهٔ انرژی بین عملکردهای مختلف زندگی است. وضعیت مشابهی در مهندسی وجود دارد، جایی که هزینه، معمولاً مهم‌ترین مؤلفه است. بنابراین، به نظر محتمل است که ایده‌های طبیعت، که به‌طور مناسب تفسیر و اجرا شوند، می‌توانند کارایی مهندسی را در سطوح مختلف بهبود بخشند. این انتقال فناوری که با نام‌های مختلف بیونیک، زیست‌تقلیدی یا بیوگنوزیس نامیده می‌شود، نباید بیش‌ازاندازه به‌عنوان راه‌حلی برای مسائل مهندسی در نظر گرفته شود» (Beukers et al., 1998). نوآوری در مهندسی سازه کاملاً متفاوت است. پیشرفت‌ها از ایده‌هایی می‌آیند که شامل تغییرات عمده هستند. در بسیاری از موارد، آن‌ها برخاسته از یک گذشتهٔ روشن نیستند و مولفهٔ بیشتری از خلاقیت و ابتکار را دارند. در واقع، نوآوری در مهندسی از همان ابتدا امکان‌پذیر است (Gruber, 2011).

برخی از متخصصین معتقد به برتری طراحی توسط طبیعت بر طراحی توسط انسان هستند. کولانی معتقد است: «هر زمان که در مورد طراحی زیستی صحبت می‌کنیم، باید به خاطر داشته باشیم که تار عنکبوت چه برتری شگفت‌انگیزی نسبت به هر سازهٔ باربر ساخته‌شده توسط انسان دارد و سپس از این بینش برداشت کنیم که باید به دنبال برتری طبیعت برای راه‌حل‌ها باشیم. اگر می‌خواهیم کار جدیدی را در آتلیه‌ها انجام دهیم، بهتر است ابتدا به بیرون برویم و ببینیم چه پاسخ‌های هزارساله‌ای ممکن است برای این مسئله وجود داشته باشد» (Rey-Rey, 2022, 3).

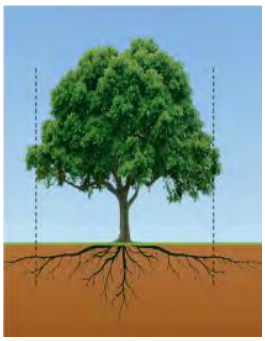
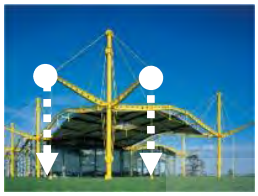
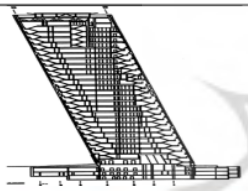
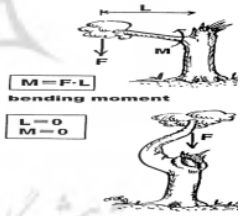
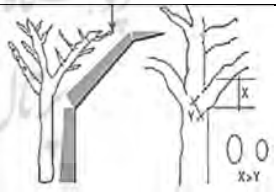
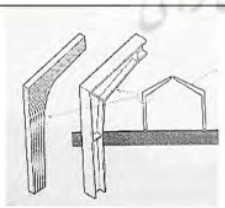
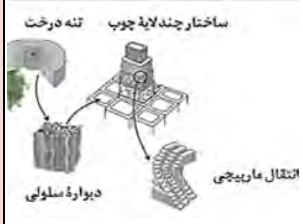
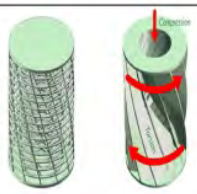
همواره انحرافاتی در فرم سازه‌های طبیعی وجود دارد که آن‌ها را به روش‌های خاصی برای رویارویی در برابر نیروها سازگار می‌سازد. در این زمینه گروبر (۲۰۱۱) بیان می‌کند: «ساختارهای بیولوژیکی معمولاً اجازه انحرافات بزرگ را می‌دهند، که در معماری قابل قبول نیست. انعطاف‌پذیری و نرمی بخش‌های مختلف گیاهان از آن‌ها در برابر نیروهای بزرگ محافظت می‌کنند» (Gruber, 2011). چالش واقعی زیست‌تقلیدی در زمینهٔ طراحی سازه، تلاش برای به‌کارگیری دانش انبوهی است که در اثر تکامل طولانی و بدون تقلید یا ترجمهٔ مستقیم فرم‌ها بهینه شده است. قیاس را می‌توان ساده‌ترین تدبیر برای الگوبرداری از طبیعت دانست. می‌توان آن را به‌عنوان یک مرحلهٔ مقدماتی و منشأ تحقیقات عمیق‌تر و نه به‌عنوان یک نتیجهٔ نهایی در نظر گرفت (Gruber, 2011).

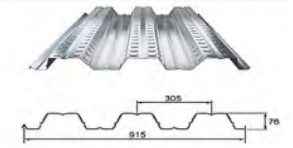
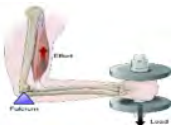
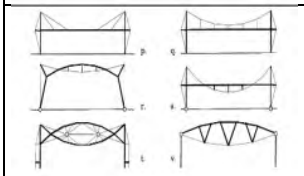
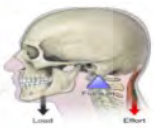
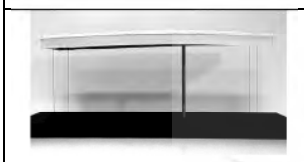
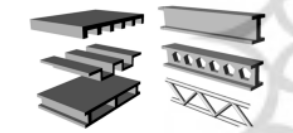
۲- بررسی راه‌حل‌های طبیعت در برابر خمش

در گذشته، انسان‌ها اغلب به‌صورت آگاهانه یا شهودی به دنبال الهام از طبیعت برای فعالیت‌های معماری بودند. پس از هزاران سال آزمایش و تأثیر بارهای مختلف و ترکیب آن‌ها، فرم‌های طبیعی کاملاً با محیط خود سازگار می‌شوند. احتمالاً به همین دلیل است که خانه‌های انسان‌های باستانی شبیه به لانهٔ موریانه‌ها یا پرندگان بوده است (Su-mec et al.,2010:33). هر چه طبیعت با مسائل چالش‌برانگیزتری روبرو می‌شود، به همان میزان، تدابیر و راه‌حل‌های سازه‌های بیونیک، زیبا، دقیق و پیچیده هستند (Rouhizadeh et al., 2019,62). با توجه به رویکرد بیونیک، مزایای باربری که مشخصهٔ سازه‌های طبیعی است، قابلیت انتقال به طراحی معماری و بهبود رفتار سازه‌های ساختمانی را دارد. لذا، با توجه به کیفیت پایداریِ سازه‌های طبیعی، می‌توان خواص آن‌ها را برای انطباق با الزامات فنی و فیزیکی سازه‌های معماری انتقال داد. در طبیعت سازه‌هایی وجود دارند که دارای پیکربندی قابی با رفتار باربری غیرفعال یا نیمه‌فعال هستند و در اثر بارهای وارده به‌طور عمده تحت تنش خمشی قرار می‌گیرند. از آن جمله می‌توان به گیاهان و سازه‌های درختی، ساختار بدن انسان و حشرات و تخته‌های سنگی اشاره داشت. هر یک از این سازه‌ها با توجه به نوع و ویژگی راه‌حل‌هایشان، رفتار بهینه در برابر تنش‌های خمشی دارند. لذا در این بخش سعی شده است که نمونه‌های گوناگونی از سازه‌های طبیعی با ویژگی‌های فیزیکی و باربری خمشی انتخاب شود. در این راستا، نمونه‌های مورد مطالعه در این بخش به‌طور خلاصه در قالب متن و تصویر در (جدول ۱) نیز ارائه شده است.

ساختار درخت: ساختار سازه‌های طبیعی به گونه‌ای است که در برابر نیروها و تغییر شکل‌های نامتعارف ناشی از آن رفتار بهینه از خود نشان می‌دهند. برای مثال، روش خنثی‌سازی نیروها به‌طور گسترده‌ای در سازه‌های درختی مشاهده می‌شود. بسیاری از پرندگان ترجیح می‌دهند روی شاخه‌های نرم و نازک درختان لانه بسازند؛ زیرا این شاخه‌ها، انعطاف‌پذیری بیشتری دارند و احتمال شکستگی ناشی از خمش در آن‌ها کمتر خواهد بود (Nejati et al.,2018,1255). چنین رویه‌ای باعث می‌شود که یک سازهٔ کارا با نسبت مقاومت به مصالح بالا، رفتاری بهینه در برابر نیروهای خارجی داشته باشد. در درختان می‌توان چنین رویکرد کاهشی را توسط راه‌حل‌های چندگانه به‌طور هم‌زمان مشاهده کرد. درختان با خم‌شدن می‌توانند مقداری از نیروهای بادهای سنگین را از فضای متخلخل فوقانی عبور دهند و در نتیجه میزان نیروی وارد بر تنهٔ آن‌ها کاهش می‌یابد (جدول۱، ردیف۱). علاوه بر این فرم منحنی و آئرودینامیک تنهٔ درختان بر کاهش جذب نیروهای باد مؤثر است (جدول۱، ردیف۲). از سوی دیگر، درختی که بر اثر نیروی باد به حرکت درمی‌آید شروع به نوسان می‌کند؛ با دامنه و فرکانسی که توسط ویژگی‌های فیزیکی، اندازه و شکل آن و همچنین قدرت و آهنگ باد تعیین می‌شود. تاب خوردن، روش طبیعی درخت برای اتلاف انرژی است که توسط باد به آن وارد می‌شود. بااین‌حال، امکان رسیدن به دامنهٔ نوسانیِ بیشتر از ظرفیت کشسانی درخت، برای بازگشت به حالت قائم وجود ندارد. در این لحظه است که درختان سقوط می‌کنند. برخی از درختان (مانند کاج سفید و بید) می‌توانند با روش کاهشی از طریق ساختار خودمتعادل در مقابل بار باد واکنش نشان دهند. روش خودمتعادل فرآیندی است که میزان مکش و فشار ناشی از بار باد بر روی تاج درخت را اغلب با تخصیص شاخه‌های سنگین‌تر در جهت مخالف بادِ غالب کاهش می‌دهد. درختان هنگام وزش باد خم می‌شوند و مقداری از نیروی باد را به‌صورت انرژی پتانسیل ذخیره می‌کنند و با حرکات رفت و برگشتی، بخشی از این نیرو را در برابر جریان باد

جدول ۱- نمونه‌هایی از راه‌حل‌های سازه‌های طبیعی در برابر خمش و الگوبرداری از آن‌ها در سازه‌های مصنوعی.

	سازه‌های طبیعی خمشی		سازه‌های مصنوعی
	نمونه	راه‌حل	
۱	درخت: 	فضاهای پر و خالی برای جاخالی‌دادن و فرارکردن در برابر باد	
۲		هندسه آئرودینامیکی در برابر باد	
۳		ایجاد ساختار خودمتعادل برای کاهش تنش و افزایش سختی	
۴		استفاده از ریشهٔ عمیق (عمودی) یا ریشه پراکنده (افقی) برای نزدیک‌کردن مرکز ثقل به ریشه (پی)	
۵		رشد بخش فوقانی متناسب با قرارگیری مرکز ثقل در راستای تنه و ریشه حذف یا کاهش بازوی اهرم (L=0)	
۶		شاخه شیب‌دار با عمق سازه‌ای مؤثر بیشتر نسبت به شاخه افقی (**X>Y**)	
۷		هندسهٔ باریک‌شونده	
۸		ساختار سلسله‌مراتبی، چندلایه و مارپیچیدر تنهٔ چوب درخت	
۹	لانه پرندگان:	خم کردن شاخه‌های صاف و مهار آن‌ها توسط اصطکاک	

۱۰	ساختار حشره:	جذب تکان‌های بدن و کاهش خمش توسط شاخک‌های طره‌ای	
۱۱		وجود ساختار دندانه‌ای، موجدار و تحدب جزئی در بال‌ها جهت افزایش سختی	
۱۲	ساختار دست: 	حمل بخش طره‌ای بازو توسط ماهیچه‌های کششی	
۱۳	ساختار گردن: 	حمل وزن سر و فک توسط ماهیچه کششی پشت گردن	
۱۴	استخوان انسان:	ساختار مشبک و در عین حال مقاوم	

تخلیه می‌کنند. موقعیت شاخه‌های درخت به گونه‌ای است که وزن شاخه‌های هر سمت درخت، سمت دیگر آن را نگه می‌دارد. این رفتار سبب کاهش هر دو مولفهٔ اندازهٔ بازوی اهرم و جابجایی بیش از حد مرکز ثقل (گرانیگاه) درخت در هنگام تکان‌های شدید باد می‌شود (جدول ۱، ردیف ۳). مشابه این رفتار در معماری را می‌توان در سازه‌های کششی با ساختار خودمتعادل مشاهده کرد. جهت افزایش سختی سازه و کاهش تغییر شکل بدون کاهش دهانه و ارتفاع از عناصر مختلفی که می‌توانند نیروهای داخلی را متعادل کنند، استفاده می‌شود. با توجه به درنظرگرفتن این ایده که عناصر سازه‌ای به نحوی طراحی شوند که فقط در کشش کار کنند، کابل‌ها کارآمدترین عنصر در دستیابی به این هدف می‌باشند (آصفی و احمدنژاد، ۱۳۹۷، ۱۵۸).

عامل دیگر در کنترل این مؤلفه‌ها، نقش ریشهٔ درختان است. سیستم‌های ریشه درختان به لنگر انداختن آن‌ها کمک می‌کند و اجازه می‌دهد بدون واژگونی، تغییر شکل برگشت‌پذیری داشته باشند. رشد ریشهٔ درختان به‌صورت عمودی (و عمیق) یا افقی (و افشان) در دل زمین، مرکز ثقل درخت را نزدیک به ریشه نگه می‌دارد. هر چه مرکز ثقل، پایین‌تر و نزدیک‌تر به ریشه قرار بگیرد، آن ساختار تمایل کمتری به واژگونی، به‌ویژه در برابر بارهای جانبی دارد. همچنین افزایش مساحت پایه توسط ریشه‌های افشان می‌تواند در پایداری درخت کمک کند (جدول ۱، ردیف ۴). با رویکردی مشابه، معماران در طراحی ساختمان‌های بلند با در نظر گرفتن چندین طبقه در زیرزمین و همچنین افزایش مساحت طبقات پایینی، به بخشی از این چالش پاسخ می‌دهند.

گاهی اوقات اصل حداقل بازوی اهرم با تغییر جهت رشد شاخه‌های درخت از حالت جانبی به حالت عمودی و صاف در رأس کنترل می‌شود. این تغییرات هندسی به‌طور مداوم متعادل می‌شوند تا به یک زاویهٔ بهینه نسبت به بردار گرانش دست یابد. بنابراین بار خمشی را که بر روی اتصال شاخه و ساقه عمل می‌کند، به حداقل می‌رسد (جدول۱، ردیف ۵). به این واکنش و قابلیت درخت در تعیین جهت رشد خود بر اساس پاسخ به نیروی گرانش زمین را «زمین‌گرایی» می‌نامند (Kon-stantinova et al., 2021). در نمونهٔ فوق مسیر رشد شاخه در خلاف جهت بردار گرانش می‌باشد، که به آن زمین‌گرایی منفی گفته می‌شود. همچنین رفتاری مشابه در زمینهٔ کاهش بازوی اهرم نیرو را می‌توان در رشد شاخه‌های قطور و طره‌ای درخت به‌صورت یک هندسهٔ طولی باریک‌شونده و شیب‌دار مشاهده کرد. همچنین یک شاخهٔ شیب‌دار در مقایسه با یک شاخهٔ افقی مشابه، دارای عمق سازه‌ای (و ممان اینرسی) بیشتری در ناحیه اتصال به ساقه در برخورد با نیروی وارده است (جدول ۱، ردیف ۶ و ۷). امروزه راه‌حل‌های مبتکرانه‌ای برای رویارویی با بارهای پیچشی در طبیعت جست‌وجو شده است (Shama, 2010, 1; Libonati et al., 2016, 18). بسیاری از سازه‌های طبیعی از جمله تنهٔ درختان و

سلول‌های چوبی، بال پرندگان و ساختار بندپایان، تحت بارهای پیچشی و خمشی قرار دارند. طبیعت از بدو تولد با این مسائل سروکار دارد و در نتیجه سیستم‌های زیادی در طبیعت وجود دارد که مقاومت پیچشی و خمشی را از طریق مکانیسم‌های خاص و یا ترتیبات ساختاری ایجاد می‌کنند. ساختار پیچیده و سلسله‌مراتبی در چوب در (جدول۱، ردیف۸) نشان داده شده است. ساختار استوانه‌ای متحدالمرکز و سلول‌های چوبی چندلایه، مقاومت پیچشی را در برابر باد ایجاد می‌کنند (Zorzetto and Ruffoni,, 2019). به‌طور معمول، این ساختار می‌تواند از نظر هندسی همانند بخش مورب ساختار لایه‌ای و پیچ‌خورده تختهٔ چندلا که در آن لایه‌های متوالی دارای زاویه چرخش ثابت هستند، تفسیر شود (Nev-ille, et al., 1969). امروزه از این راه‌حل‌ها در طراحی و ساخت عناصری با قابلیت مقاومت پیچشی بالا از جمله فرم ساختمان‌های بلند و تولید مصالح چندلایه (و مرکب) استفاده می‌شود.

لانهٔ پرندگان: طبیعت در مواقعی به‌جای حذف یا کاهش نیرو از آن به‌طور مؤثری استفاده می‌کند. این عوامل شامل نیروها یا تغییر شکل‌هایی است که به‌صورت آگاهانه و عمدی بر سازه تحمیل می‌شود. در مقایسه با نیروهای غیرعمدی مانند باد، زلزله و باران که باید با تمهیدات سازه‌ای از تغییر شکل‌های ناشی از آن‌ها جلوگیری شود، عناصر طبیعی از نیروهای عمدی جهت بهینه‌سازی و فرم‌یابی خود استفاده می‌کند. برای مثال، برخی از پرندگان با خم کردن شاخه‌ها و مهار آن‌ها توسط اصطکاک و فرم‌دهی به آن‌ها به ساخت لانه‌های مستحکم با هندسه‌های متنوع و پیچیده می‌پردازند (جدول ۱، ردیف۹). در واقع پرندگان با به‌کارگیری اصل پیش‌تنیدگی در عناصر خمشی و با ایجاد تنش ذخیره‌شده در شاخه‌ها چنین شاهکار سازه‌ای را خلق می‌کنند.

ساختار حشرات: نوع دیگری از پدیده اعمال آگاهانه نیرو را می‌توان در ساختار بدن برخی از حشرات مشاهده کرد. شاخک‌های متحرک و تغییر شکل‌پذیر یک حشره که به شکل طره‌ای در بخش جلوی آن قرار دارد، ارتعاشات موجود در بدن حشره را در حین راه رفتن کاهش می‌دهد. این ویژگی سبب کاهش تغییر شکل بیش از حد بدن حشره و همچنین تنش خمشی در آن می‌شود؛ لذا شاخک‌های طره‌ای حشره می‌تواند در زمان‌های مختلف، میزان صلبیت و تغییرشکل‌پذیری بدن حشره را کنترل کند (جدول۱، ردیف۱۰). در سازه‌های معماری نیز بر خلاف آنچه معمولاً تصور می‌شود، گاهی اوقات با اضافه کردن بارگذاری بر روی سازه‌ها، می‌توان حالت بحرانی در سازه‌ها را کاهش داد. یکی از این موارد می‌تواند در طراحی یک تیر آویخته در نظر گرفته شود. برای مثال، در طراحی پارکینگ طبقاتی می‌توان با استفاده از تیرهای آویخته و اعمال بار بر روی آن توسط کابل‌های کششی، یک گشتاور خمشی منفی در اطراف ستون‌ها ایجاد کرد و گشتاور خمشی مثبت ناشی از تیرها را تا حدود زیادی خنثی کرد. نتیجهٔ چنین رویکردی کاهش تغییر شکل حداکثر سازهٔ کف و همچنین کاهش ارتعاشات لرزه‌ای ناشی از حرکت ماشین‌ها است (آصفی و احمدنژاد، ۱۳۹۷، ۱۹۵).

همچنین در بررسی کنترل میزان سختی خمشی بال ظریف حشرات (مانند ملخ و سنجاقک) می‌توان به دو ویژگی هندسی در مقطع آن اشاره کرد: ۱. تحدب جزئی از یک‌سویه یا دوسویه، و ۲. فرم f موج‌دار (Wootton, 2020). بال‌های حشرات مستطیل نیستند. موج‌دار شدن بال‌ها توسط رگه‌های عرضی و طولی، سختی بال را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند و مانند اسکلتی هستند که به افزایش استحکام و مقاومت بال کمک می‌کنند. همچنین رگه‌ها به‌صورت موانعی در برابر رشد ترک در بال حشره ایفای نقش می‌کنند (درویزه و همکاران، ۱۳۹۳). رگه‌های طولی و طره‌ای در پایه بال که نیروهای خمشی بیشتری به بال وارد می‌شود قطورتر و در لبه‌ها که مقدار این نیروها کاهش می‌یابد ظریف‌تر هستند (جدول ۱، ردیف ۱۱).

ساختار بدن انسان: برای رشد و بهبود شکستگی‌های موجود در استخوان‌ها اثرات فشاری، سلول‌ها را برای تولید استخوان در ناحیهٔ فشاری تحریک می‌کند و اثرات کششی باعث حذف استخوان (در ناحیه کششی) می‌شود. بنابراین، هندسهٔ استخوان در جهت نیرو تشکیل می‌شود. به عبارت دیگر، استخوان به قدری فرم خود را تغییر می‌دهد که لنگر خمشی آن کاهش می‌یابد و در امتداد نیروی تحت فشار قرار می‌گیرد (Nejati et al., 2018, 1253). در این حالت، ساختار اسکلت بدن انسان مقاومت خود را بر اساس جداسازی عناصر فشاری (یعنی استخوان) و کششی (یعنی ماهیچه) کسب می‌کنند (Silver and et al., 2013). این ترکیب سبب می‌شود که عناصر سازه به‌طور عمده، بارهای وارده را به‌صورت کششی یا فشاری تحمل کنند و میزان تأثیر تنش خمشی کاهش یابد. لذا اصل جداسازی عناصر می‌تواند منجر به توزیع یکنواخت تنش و حداکثر استفاده از مواد شود (جدول ۱، ردیف ۱۲ و ۱۳). در این زمینه می‌توان به ایدهٔ جداسازی عناصر فشاری و کششی در طراحی تیرهای خمشی به‌صورت سازه‌های تیر کابل و متکی بر کابل اشاره کرد. این نوع سازه‌ها رفتاری مانند خرپا داشته و اگر درست بارگذاری شوند، معمولاً از طریق نیروهای محوری بار وارده را به تکیه‌گاه‌ها منتقل می‌کنند. این شیوه سبب افزایش بهینهٔ ممان اینرسی سازه با حداکثر استفاده از مصالح می‌گردد و از تغییر شکل‌های خمشی تا حد زیادی جلوگیری می‌کند. همچنین این امکان همیشه وجود دارد که از طریق سبک‌سازی مواد، یک ساختار ممتد یکپارچه تبدیل به یک ساختار با تخلخل بالا گردد. تودهٔ مصالح از قسمت‌هایی از بافت استخوان که تأثیر چندانی در مقاومت و سختی سازه ندارند، برداشته می‌شوند و به‌صورت تیغه‌های نامنظم قرار می‌گیرند (جدول۱، ردیف ۱۴). از این اصل در طراحی مقاطع سازه‌ای مشبک استفاده می‌شود که مک‌دونالد از آن به‌عنوان مقاطع بهبودیافته یاد می‌کند (Macdonald, 2019).

۳- یافته‌های پژوهش

مفهوم راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت را می‌توان دربرگیرندهٔ مفاهیم رایج مانند «مداخلات مبتنی بر طبیعت»، «راه‌حل‌های مبتنی بر اکوسیستم» و «انطباق مبتنی بر اکوسیستم» دانست (Potschin and et al., 2015). این مفهوم به یادگیری از طبیعت می‌پردازد که به‌طور خاص در این پژوهش به مباحث مرتبط با پیوند سازه‌های معماری و طبیعت و رویکردهای باربری آن اشاره دارد. نمونه‌های گوناگونی از ساختارهای طبیعی وجود دارد که در طول زمان به‌عنوان منبع الهام برای بسیاری از سازه‌ها عمل کرده‌اند. طراحی سازه بر اساس قوانین فیزیک مشابه طبیعت است و به همین دلیل مسائل، قیاس‌ها و نمونه‌های مشابهی وجود دارد. با توجه به بررسی و ارزیابی نمونه‌های مطالعاتی موردنظر، به‌طورکلی می‌توان برای هر یک از موارد «رویکرد راه‌حل‌ها» و «ماهیت راه‌حل‌ها» چهار مولفهٔ عمده را ذکر کرد که در ادامه به آن‌ها پرداخته

می‌شود. همچنین تعمیم رویکرد و ماهیت راه‌حل‌ها برای نمونه‌های مورد مطالعه در (جدول۲) نیز ارائه شده است.

۳-۱. رویکرد راه‌حل‌ها

طبیعت در برخورد با نیروها همواره سعی دارد تا حد امکان از رفتار حداقلی در برابر نیروهای محیطی بهره گیرد. در واقع اساس این رفتار «کاهش یا حذف» شدت و خطای نیرو است. در طبیعت رویکرد کاهشی با تنظیم هم‌زمان هر دو مولفهٔ موقعیت سازه و نیروی وارده اتفاق می‌افتد. این رویکرد برخلاف جذب حداکثری است که تنها با در نظر گرفتن موقعیت سازه (و بدون کنترل نیرو) به نیروهای وارده پاسخ می‌دهد. بنابراین کاهش خطای نیرو (یا افزایش دقت نیرو) لازمهٔ نگاشت دقیق رابطهٔ نیرو در مقابل موقعیت است. عناصر طبیعت با افزایش کنترل دقیق نیرو موجب افزایش کارایی خود با حداقل تلاش (یا حداقل صرف انرژی) می‌شوند. به‌کارگیری راه‌حل‌های متنوع از جمله فرار کردن و جاخالی دادن در برابر نیروی باد و رفتارهای ناشی از ساختارهای خودمتعادل بیانگر رویکرد کاهش و حذف در طبیعت است. اصل کاهش خطای نیرو می‌تواند منجر به کاهش تأثیر رفتار برون‌محوری و تبدیل آن به محوری شود. در برخی از شرایط، سازه‌های طبیعی برای کاهش میزان تنش‌های برون‌محور از رویکرد «تبدیل و تغییر» بهره می‌گیرند که بیانگر نحوهٔ تبدیل تنش خمشی به تنش‌های کششی یا فشاری است. تنش نیروی تداعی‌کننده است. این بدان معناست که مولکول‌ها و موجودات زنده به دلیل ماهیت کششی پیوندهای بین‌اتمی در کنار هم نگه داشته می‌شوند. در مقایسه با تنش‌های کششی، حمل بارهای فشاری در فواصل زیاد به مواد بیشتر و متراکم‌تری نیاز دارد. اصل جداسازی در سازه‌های طبیعی به افزایش عناصر کششی و کاهش عناصر فشاری منجر می‌شود. در سازهٔ پیچیدهٔ طبیعی، گاهی اوقات برای حمل خمش، تنش‌های فشاری توسط تنش‌های کششی متعادل می‌شوند. برای اینکه یک عنصر کششی بتواند در اطراف یک ساختار فشاری و خمشی به یک سمت کشیده شود و سپس دوباره به عقب برگردد، منطقی است که بخشی از آن را در یک طرف و بخشی در طرف دیگر قرار گیرد. برای مثال، این یک روشی کم مواد برای انتقال نیرو است که با توجه به پیوندهای متنوع از استخوان‌ها و ماهیچه‌ها (یا الیاف کششی مارپیچی) در برابر تنش خمشیِ مقاومت می‌کند. به دلیل نسبت بالای طول به قطر، استخوان‌ها عملاً توانایی مقاومت در برابر نیروهای فشاری در امتداد محور خود را ندارد. بااین‌حال با کشش آمدن ماهیچه‌های اطراف استخوان‌ها، می‌توانند در برابر نیروهای فشاری مقاومت کنند.

در شرایط محیطی مختلف، واکنش‌ها و مسیرهای متفاوتی از جریان نیرو در درون ساختارهای طبیعی برانگیخته می‌شود که بازتابی از تغییر در میزان و جهت نیروهای وارده است. رویکرد «هدایت و توزیع» روشی دیگر در ارائه حل مسئله سازه‌های خمشی توسط طبیعت است که به انتخاب مسیر بهینه از طریق کوتاه‌ترین و سخت‌ترین مسیر یا گزینش مسیر جایگزین از طریق انتخاب‌های مختلف اشاره دارد. مسیر بهینه بیانگر شرایط ظرفیت بارگذاری قابل تحمل و مسیر جایگزین بیانگر شرایط بارگذاری فراتر از حد ظرفیت است. ساده‌ترین رویکرد بهینه‌سازی، تراز کردن الیاف (برای مثال در چوب) و دندانه‌های تقویت‌کننده (برای مثال رگه‌های موجود در بال حشرات) با جهت انتقال بار است. توزیع و مسیر اصلی توسط میدان خمشی با توجه به جهت‌گیری فیبر و دندانه‌ها تعیین می‌شود. مسیرهای فرعی (اغلب عمود بر جهت اصلی) برای تقویت و یکپارچگی مسیرهای اصلی و همچنین توزیع نیرو در سطحی گسترده‌تر و یکنواخت‌تر، آن‌ها را به یکدیگر متصل می‌کنند. ازاین‌رو، این رویکرد به کاهش تمرکز تنش کمک می‌کند.

در نمونه دیگر، روش هدایت و توزیع نیروهای پیچشی و خمشی در بسیاری از سازه‌های طبیعی به دلیل رویکرد «کوچک‌سازی» است که ناشی از ساختار لایه‌ای و مارپیچی آن‌ها می‌باشد. ساختار طبیعت به دلیل ویژگی لایه‌ای بودن آن، همواره سعی می‌کند تا حد امکان از تنش‌های محوری به‌جای تنش‌های خمشی در سازه‌های خود استفاده کند (لفافچی و جهاندار، ۱۴۰۰). ساختارهای طبیعی با بهره‌گیری از پیکربندی سلسله‌مراتبی (در مقایسه با ساختارهای حجیم) دارای سختی مطلوبی است و مقاومت خمشی و پیچشی مطلوبی را با استفاده از این ساختار ایجاد می‌کند. ساختارهای حجیم، از ظرفیت باربری مواد به بهترین نحو استفاده نمی‌کنند؛ زیرا تنها بخش کوچکی از مواد در هر لحظه از تغییر شکل، تحت تنش حداکثری قرار می‌گیرد. رفتار باربری این ساختارها به اندازه، زاویه و نحوهٔ توزیع لایه‌های تشکیل‌دهندهٔ آن بستگی دارد. برای مثال، چیدمان این لایه‌ها برای درختان جوان با ساقه‌های باریک به گونه‌ای است که برای انعطاف‌پذیری در برابر بار باد بهینه باشند؛ درحالی‌که ساقهٔ ضخیم درختان پیر برای سختی خمشی ناشی از وزن زیاد بهینه می‌شوند (Fratzl and Weinkamer, 2007, 1294). این تفاوت در رویکردها ناشی از سازگاری میان مقاومت در برابر کمانش برای درخت پیر (که نیاز به سختی دارد) و انعطاف‌پذیری در خمش (برای مقاومت در برابر شکست) است.

۳-۲. ماهیت راه‌حل‌ها

در این زمینه، یکی از ویژگی‌های راه‌حل‌های طبیعت در برابر نیروهای محیطی، «چندگانه و چندمؤلفه‌بودن» آن‌ها است. ویژگیِ راه‌حلِ چندگانه اشاره به استفاده از چند راه‌حل مختلف برای پاسخ به یک مسئلهٔ منحصربه‌فرد دارد. به عبارت دیگر، سازه‌های طبیعی در بسیاری از شرایط برای رویارویی با عوامل محیطی و پاسخ به آن از راه‌حل‌های متعددی به‌صورت هم‌زمان استفاده می‌کنند. هم‌سازی و هم‌زمانی راه‌حل‌ها که می‌توان از آن با عنوان سازه‌های اضافی نیز یاد کرد به افزایش ضریب اطمینان منجر می‌شود.

گاهی اوقات راه‌حل‌های طبیعت برای پاسخ به نیروهای محیطی دارای کیفیات «متناقضی» هستند. تناقض در این راه‌حل‌ها به انعطاف‌پذیری و سازش‌پذیری در رفتار سازه‌های طبیعی منجر می‌شود. برای مثال، با تأمل در سازه‌های طبیعی می‌توان به دو کیفیت متناقض اشاره داشت: صلبیت و کارایی. صلبیت به این معناست که اعضای سازه به گونه‌ای بهینه شوند که به راحتی خم نشوند و اعضا در ساختارهای کاملی که غیرقابل‌انعطاف هستند چیده شوند؛ درحالی‌که کارایی حالتی ترجیحی برای دستیابی به سختی سازه با حداقل مقدار مواد (یا مصالح) و انرژی را مشخص می‌کند (Hensel, 2004). در نمونه‌ای دیگر، ویژگی‌های صلب و تغییرشکل‌پذیر، دو نوع رفتار سازه‌ای متمایز در طبیعت هستند. ویژگی صلبیت اشاره به مقاومت در برابر بارهای وارده بدون تغییر قابل ملاحظه‌ای در هندسه اشاره دارد. از طرف دیگر، سازه‌های تغییرشکل‌پذیر، با هندسهٔ اولیه خود، نمی‌توانند بار وارده را تحمل کنند؛

بلکه آن‌ها شکل خود را برای تطابق با بار وارده تغییر می‌دهند. با این وجود، تغییر شکل‌های ایجادشده همچنان در یک محدودهٔ مشخص قرار دارند که در نتیجه، سبب پایداری این سازه‌ها می‌شوند (آصفی و احمدنژاد، ۱۳۹۷،۱۴۵).

دو ویژگی فوق باعث می‌شود که راه‌حل‌های سازه‌های طبیعی در برابر بارهای محیطی فراتر از پاسخ‌های متعارف باشد. از سوی دیگر، در اغلب موارد «راه‌حل‌های نامتعارف» به تولید فرم‌های نامتعارف و خاصی می‌انجامد. درحالی‌که، یک فرم متعارف (شامل هندسهٔ اقلیدسی) سقفی از محدودیت‌ها را در نظر می‌گیرد که عمدتاً به‌صورت راه‌حل سازه‌ای تک‌بُعدی محقق می‌شود که از یک رابطهٔ علّی یک‌سویه تشکیل می‌شود (Hensel, 2004). فرم‌های سازه‌ای متناقض و نامتعارف، در طبیعت به‌صورت ویژگی‌های گوناگونی ظاهر می‌شوند که در آن‌ها هندسهٔ غیراقلیدسی و عناصر و ویژگی‌های غیرمتعامد غالب هستند که از آن جمله می‌توان به هندسهٔ فراکتال در سازه‌های درختی، مقاطع هندسی پیچیده و همچنین سطوح انحنای مضاعفِ یک‌طرفه و دوطرفه اشاره داشت. در این زمینه، امروزه با مطالعهٔ دقیق در ساختار سازه‌های طبیعی و اصول باربری آن‌ها، تکامل و بهبود فرم‌های سازه‌ای در معماری ساختمان‌های بلند مشهود است. از دهه۱۹۸۰، نسل جدید ساختمان‌های بلند، یکنواختی فرم بیرونی را شکستند و مفاهیم جدیدی از بلندمرتبه‌سازی را به وجود آوردند. این جهش بعدها در تکامل فرم‌های سازه‌ای به‌صورت فرم‌های نامتعارف و نااقلیدسی شناخته شد که در تقابل با سیستم‌های رایج صفحات دال و تیرها است که هستهٔ مرکزی را به ستون‌های بیرونی اطراف متصل می‌کند (Hensel, 2004). معماران و مهندسان در اعصار مختلف برای پاسخ به سؤالات پیچیده دربارهٔ مناسب‌ترین فرم‌های سازه‌ای برای ساختمان‌ها به طبیعت نگاه کرده‌اند. می‌توان تدابیر گوناگونی را برای کاربرد زیست‌تقلیدی در طراحی ساختمان‌ها و به‌ویژه در ساختار باربر آن‌ها فهرست کرد: بررسی و کاربرد مصالح، انتقال نمادین یا فرمی و ارتباط متقابل سازه ساختمان با عوامل محیطی (Gruber, 2011). در مقایسهٔ با فرم‌های متعارف و اقلیدسی، سازه‌های طبیعی متشکل از فرم‌های نامتعارف، تعریف خاصی از راه‌حل‌های باربری ارائه می‌دهند. در اینجا، ساختار سازه‌های طبیعی در «تعامل حداکثری» با نیروهای محیطی قرار دارد. اصل تعامل بر ایجاد بهینهٔ فرم مؤثر است. تحقّق یک فرم سازه‌ای با این کیفیت، انعطاف‌پذیری خاصی را برای مقابلهٔ آزادانه با این نیروها فراهم می‌کند. به عبارت دیگر، نسبت میان جریان نیروها، آغازگر اصلی تبدیل راه‌حل‌های طبیعی به یک فرم سازه‌ای است. با چنین رویکردی، امروزه در معماری ساختمان‌های بلند مشاهده می‌شود که فرآیند طراحی سازه تنها نه با ستون‌ها و تیرها (تصویر متعارف فرم سازه)، بلکه با درک شهودی از رابطهٔ متقابل میان نیروهای جاری که یک فرم را به یک بخش اساسی از سازه تبدیل می‌کند، آغاز می‌شود (Sarkisian, 2012). ازاین‌رو، برای مثال، در طراحی برج خلیفه، راه‌حل سازه‌ای، در قالب یک فرم تلسکوپی و مارپیچی برای پاسخ به مسائل ضروری شامل بار باد، نوسان باد و جریان باد، به‌طور مؤثری مشارکت می‌کند (Al-Sehail, 2014).

۴- جمع‌بندی: الگوی مدیریت نیرو

با تأمل بر چگونگی رفتار طبیعت در برابر نیروهای وارده و همچنین با توجه به «رویکرد راه‌حل‌ها» و «ماهیت راه‌حل‌ها» در سازه‌های طبیعی، می‌توان الگوی «مدیریت نیرو» را به‌جای الگوی «مقابله با نیرو» تعریف کرد (تصویر ۲). مقابله در برابر نیروها به معنای رویارویی اجزاء و عکس‌العمل‌های سازه‌ای در برابر نیروهای وارده است. روش مقاومت و تقابل به پاسخی برابر به بارهای محیطی در قالب یک برهمکنش سازه‌ای اشاره دارد. در این حالت، مقاومت در برابر نیروها به جذب و انتقال حداکثری بارها می‌انجامد. این روش مبتنی بر اندیشهٔ تقابل حداکثری و مستقیم در برابر نیروها تعریف می‌شود. لذا، تأثیر میدان خمشی در بالاترین میزان قرار دارد و چندان قابل تبدیل به میدان نیروهای محوری نیست. در مقابل، الگوی مدیریت نیروها اشاره به فن به‌کارگیری و سامان‌دهی اثربخش سازه با حداکثر کارایی برای کنترل دقیق نیرو دارد. طبیعت و سازه‌های طبیعی به‌صورت گسترده از روش مدیریت نیروها (به‌جای تقابل حداکثری) در شرایط محیطی مختلف بهره می‌گیرند. در این حالت، به‌جای مقابلهٔ حداکثری، تعامل با آن‌ها در اولویت است. ازاین‌رو، نیروها در فرم‌یابی و فرم‌دهی به سازه‌ها نقش اساسی دارند. این تعامل می‌تواند گاهی با کاهش میزان تأثیر نیرو و گاهی با تسلیم‌شدن در برابر آن در تولید فرم سازه‌ای تجلّی یابد. استفاده از تعدد راه‌حل‌ها

جدول ۲- دسته‌بندی راه‌حل‌های سازه‌های خمشی در طبیعت براساس رویکرد و ماهیت آن‌ها (تکمیل جدول ۱).

برخی از راه‌حل‌های طبیعت در برابر خمش		رویکرد راه‌حل‌های خمشی	ماهیت راه‌حل‌های خمشی
درخت	۱. فضاهای پر و خالی برای گریز از باد ۲. هندسه آئرودینامیکی در برابر بار باد ۳. ایجاد ساختار خودمتعادل برای کاهش تنش خمشی ۴. استفاده از ریشهٔ عمیق یا پراکنده برای نزدیک کردن مرکز ثقل به ریشه (پی)	**حذف و کاهش:** ▪ کاهش تاثیر نیروی باد ▪ کاهش بازوی اهرم (ناشی از بار ثقلی) **هدایت و توزیع:** ▪ هدایت و کنترل مرکز ثقل با توجه به موقعیت سازه و نیرو	**چندگانه:** ▪ همسازی و همزمانی راه‌حل‌ها **تعاملی:** ▪ تعامل فرم سازه و نیرو **نامتعارف:** ▪ فرم خاص (پیچیدگی هندسی)
	۵. رشد بخش فوقانی درخت متناسب با قرارگیری مرکز ثقل در راستای تنه و ریشه	**حذف و کاهش:** ▪ کاهش بازوی اهرم **هدایت و توزیع:** ▪ هدایت و کنترل مرکز ثقل با توجه به موقعیت سازه و نیروی گرانش **تبدیل و تغییر:** ▪ تبدیل بخشی از تنش خمشی به محوری	**نامتعارف:** ▪ هندسه نامتعارف و پیچیده **تعاملی:** ▪ تعامل فرم و گرانش زمین

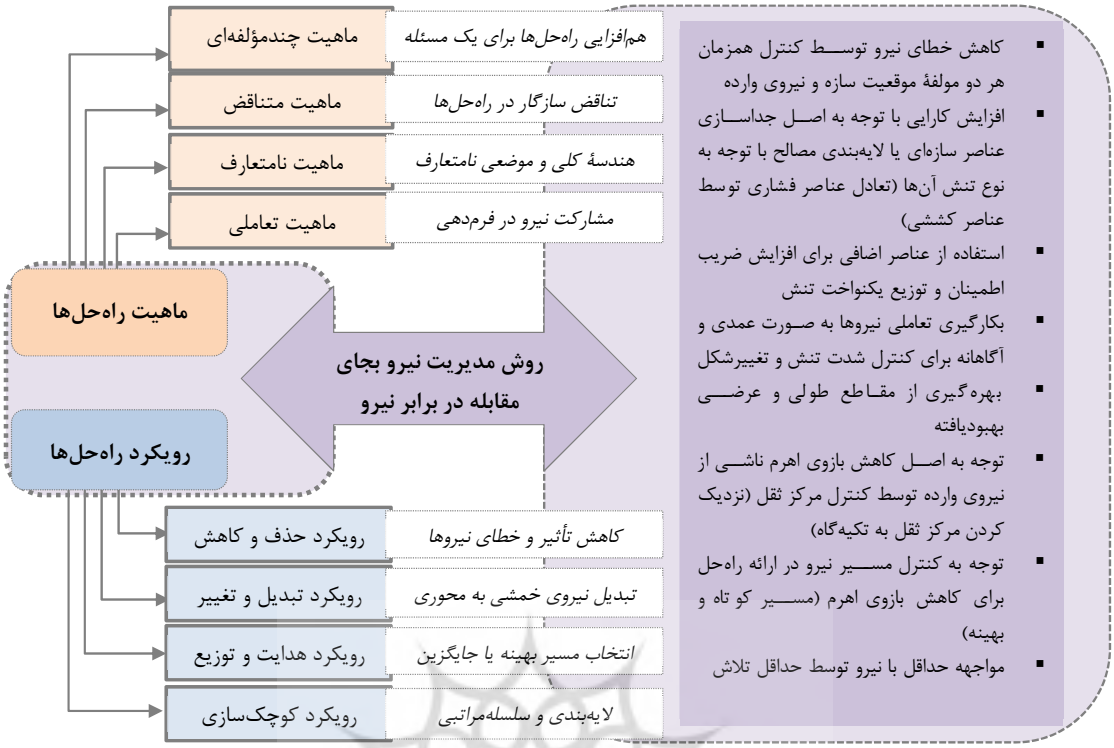
درخت	۶. رشد شاخه به صورت شیب‌دار (مورب)	**تبدیل و تغییر:** ▪ تبدیل فرم غیرفعال (خمشی) به نیمه‌فعال (خمشی و محوری) از طریق بهبود هندسهٔ مقطع **حذف و کاهش:** ▪ کاهش بازوی اهرم نسبت به شاخه افقی	**چندگانه:** ▪ همسازی و همزمانی راه‌حل‌ها **تعاملی:** ▪ هندسه مقاطع افقی و عمودی متناسب با نیرو **نامتعارف:** ▪ مقطع هندسی خاص
	۷. هندسهٔ باریک‌شوندهٔ شاخه‌ها		
	۸. ساختار سلسله مراتبی، چندلایه و مارپیچی	**هدایت و توزیع:** ▪ توزیع یکنواخت نیرو **کوچک‌سازی:** ▪ توزیع یکنواخت نیرو (استفاده بهینه از مواد)	**چندگانه:** ▪ استفاده از ویژگی‌های گوناگون هندسی **نامتعارف:** ▪ هندسهٔ خاص و پیچیده **تعاملی:** ▪ هندسه متناسب با نیرو
لانه پرنده	۹. خم‌کردن شاخه‌ها و مهار آن‌ها توسط اصطکاک	**تبدیل و تغییر:** ▪ تبدیل تنش خمشی به محوری از طریق ذخیره‌سازی نیرو **کوچک‌سازی:** ▪ ساختار چندلایه و مارپیچی لانه	**نامتعارف:** ▪ هندسهٔ پیچیده **تعاملی:** ▪ فرم‌دهی از طریق پیش‌تنیدگی **متناقض:** ▪ اعمال عمدی نیرو برای فرم‌یابی بهینه
حشره	۱۰. وجود ساختار دندانه‌ای (موجدار) و تحدب جزئی در بال‌ها	**هدایت و توزیع:** ▪ هدایت نیرو توسط رگه‌های بال (چین و شکن در بال) **کوچک‌سازی:** ▪ ساختار سلسله‌مراتبی در رگه‌های طره‌ای	**نامتعارف:** ▪ هندسهٔ موضعی پیچیده **چندگانه:** ▪ استفاده همزمان از هندسه موجدار و محدب
	۱۱. کاهش تکان‌ها و خمش بخش میانی بدن توسط شاخک‌های طره‌ای	**هدایت و توزیع:** ▪ به‌کارگیری ممان منفی در کاهش خمش و تغییرشکل بخش میانی	**متناقض:** ▪ اعمال عمدی نیرو برای کاهش تنش خمشی
ساختار بدن انسان	۱۲. حمل بخش طره‌ای دست توسط ماهیچه‌های بازو	**تبدیل و تغییر:** ▪ تبدیل تنش خمشی به محوری **هدایت و توزیع:** ▪ توزیع نیرو از طریق جداسازی عناصر کششی و فشاری ▪ توزیع بهینهٔ نیروها از طریق حذف مصالح **کوچک‌سازی:** ▪ تعادل عناصر فشاری توسط عناصر کششی	**نامتعارف:** ▪ هندسهٔ پیچیده **تعاملی:** ▪ فرم‌دهی توسط نیرو **متناقض:** ▪ افزایش سختی با کاهش وزن (مواد)
	۱۳. حمل وزن سر و فک توسط ماهیچه کششی پشت گردن		
	۱۴. ساختار مشبک و در عین حال مقاوم استخوان‌ها		

به‌جای راه‌حل یگانه و تعامل میان آن‌ها، به توزیع و انتقال سریع نیرو، کاهش تمرکز تنش و انتخاب مسیرهای جایگزین و بهینه در شرایط گوناگون منجر می‌شود. هم‌زمانی استفاده از راه‌حل‌های چندگانه در برخی از موارد با ماهیتی متناقض از آن‌ها صورت می‌گیرد. برخی از راه‌حل‌ها بر افزایش سختی تأثیر دارند و برخی بر افزایش انعطاف‌پذیری. ازاین‌رو، استفاده از راه‌حل‌های نامتعارف ولی سازش‌پذیر از ویژگی‌های روش مدیریت نیروها در طبیعت است. راه‌حل‌های نامتعارف به تولید فرم‌های هندسی خاص و پیچیده منجر می‌شود که به‌طور عمده با جداسازی عناصر و چندلایه‌بودن، سعی در کاهش میزان تنش خمشی دارند. این ویژگی‌ها به‌طور عمده خود را در فرم‌های سازه‌ای به شکل هندسه‌هایی با مقاطع بهبودیافته نمایش می‌دهند.

نتیجه

رویکرد بیونیک همواره شامل جذابیت‌های گوناگون و منبع الهام در زمینهٔ طراحی سازه‌های معماری بوده است. در اختیار داشتن طرح‌های سازه‌ای که حاصل میلیون‌ها سال تکامل در طبیعت است، فرصت مناسبی را برای مطالعهٔ رفتارهای باربری آن‌ها فراهم می‌کند. با این رویکرد، هدف از این پژوهش، یافتن الگوهای باربری در سازه‌های طبیعی و کاربرد آن در سازه‌های معماری می‌باشد. بر این اساس، رفتارهای باربری در طبیعت با توجه به الگوی مدیریت نیروها، از دو جنبهٔ گوناگون مورد بحث قرار گرفت: ۱. رویکرد راه‌حل‌های باربری به

تصویر۲- نمودار شماتیک از الگوی مدیریت نیرو در سازه‌های طبیعی مبتنی بر ماهیت و رویکرد راه‌حل‌ها و برخی از راه‌کارهای آن.



نوع راه‌کار و برخورد سازه‌های طبیعی با نیروها اشاره داشت. در بسیاری از شرایط، سازه‌های طبیعی به‌جای رویکرد مقاومت و جلوگیری، از رویکرد تقابل حداقلی در برابر بارهای وارده استفاده می‌کنند. رویکرد کاهشی، به تقلیل تأثیر نیروهای وارده بر فرم سازه‌های طبیعی اشاره دارد. این رویکرد با استفاده از ویژگی گریز از نیرو به کاهش جذب نیروها و در نتیجه کاهش تنش و تغییر شکل می‌انجامد. یکی دیگر از روش‌های طبیعت در کاهش میزان تقابل با نیروها، بهره‌گیری از افزایش باربری به‌صورت محوری است. این رویکرد از ماهیت باربری که از آن می‌توان به‌عنوان رویکرد تبدیل و تغییر و کوچک‌سازی یاد کرد، میزان تنش خمشی را کاهش می‌دهد. روش جداسازی عناصر فشاری و کششی و مقاطع هندسی بهینه (به‌صورت چندلایه، سلسله‌مراتبی) و استفاده از فرم‌های شبه‌فعّال شامل این رویکرد هستند. همچنین سازه‌های طبیعی برای کاهش رویارویی با تمرکز تنش، در برخی از شرایط، با تعریف مسیرهای بهینه یا جایگزین، به هدایت و توزیع نیروها به‌صورت یکنواخت کمک می‌کنند که از آن جمله می‌توان به استفاده از ساختارهای دندانه‌ای و مشبک جهت افزایش سختی خمشی اشاره کرد. نتایج نشان می‌دهد که طبیعت همواره سعی می‌کند که به‌جای تقابل حداکثری، انتقال حداکثری نیروها و دریافت حداکثری تنش خمشی، تمام یا بخشی از آن‌ها را خنثی یا دفع کند؛ ۲. ماهیت راه‌حل‌های باربری به بررسی ویژگی این راه‌حل‌های سازه‌های طبیعی در برابر نیروهای وارده می‌پردازد. در این زمینه، یافته‌ها نشان می‌دهد که گاهی اوقات، طبیعت از راه‌حل‌های چندگانه برای پاسخ به یک مسئلهٔ خاص بهره می‌گیرد. چنین کیفیتی به تعدد راه‌حل‌ها به‌صورت هم‌زمان اشاره دارد. تناقض راه‌حل‌ها همراه با سازش‌پذیری، یکی دیگر از ماهیت پاسخ‌های طبیعت است که بیانگر رفتارهایی با کیفیتی متناقض ولی منعطف از سازه‌های طبیعی است. به عبارت دیگر، وجود ویژگی‌های گوناگون با کیفیاتی متناقض در راه‌حل‌های باربری، قابلیت اتخاذ رفتارهای سازه‌ای گوناگون را در شرایط متفاوت فراهم می‌کند؛ به نحوی که در برابر تغییرشکل‌ها یا بارها به ترتیب میزانی از رفتارهای متفاوت را داشته باشد. نتیجهٔ دو ویژگی بالا می‌تواند به ماهیت نامتعارف بودن این راه‌حل‌ها نیز منجر شود. ماهیت نامتعارف به فرآیند شکل‌گیری یا تولید راه‌حل‌هایی پیچیده یا خاص اشاره دارد که معمولاً به‌صورت فرم‌های سازه‌ای پیچیده یا خاص ظاهر می‌شود. در اینجا نقش هندسه‌های کلی و موضعی در تعیین فرم سازه‌های طبیعی برای پاسخ به نیروهای وارده اهمیت پیدا می‌کند. در نهایت، می‌توان به ماهیت تعاملی در راه‌حل‌های طبیعت اشاره داشت. در بسیاری از شرایط، سازه‌های طبیعی و نیروهای محیطی، یک فرایند مشارکتی با یکدیگر دارند. نیرو در فرم‌دهی به هندسه‌های کلی و موضعی سازه‌های طبیعی نقش اساسی دارد؛ لذا، سعی در ایجاد رفتارهای محوری به‌جای خمشی دارد.

فهرست منابع

آصفی، مازیار؛ احمدنژاد کریمی، مجید (۱۳۹۷)، *جایگاه سازه در فرایند طراحی معماری*، تبریز: انتشارات دانشگاه هنر اسلامی تبریز.

تقی‌زاده، کتایون؛ متینی، محمدرضا، و کاکوئی، الناز (۱۳۹۸)، ساختارهای انعطاف‌پذیر؛ راه‌کاری در جهت کاهش معضلات عملکردی پوسته‌های متحرک، نشریه علمی-پژوهشی *هنرهای زیبا*، دوره بیست و چهارم، شماره ۲، صص۳۹-۴۸.

تقی‌زاده، کتایون (۱۳۸۵)، آموزه‌هایی از سازه‌های طبیعی، درس‌هایی برای معماران، نشریه علمی-پژوهشی *هنرهای زیبا*، دوره یازدهم، شماره ۲۸، صص ۷۵-۸۴.

جلالی، آذین؛ گلابچی، محمود (۱۳۹۷)، طراحی سازه‌های پیش‌ساخته و پایدار با رسوب نمک با الهام از الگوی بهینه‌سازی مصرف مصالح در استخوان ترابکولار انسان، نشریه *هویت شهر*، دوره دوازدهم، شماره ۳۳. صص ۵-۱۲.

درویزه، ابوالفضل؛ شفیعی، ندا؛ درویزه، منصور؛ حبیب‌الهی، حمیدرضا، و رجبی، حامد (۱۳۹۳)، بررسی تأثیر اجزای ساختاری بر رفتار بیومکانیکی بال عقب ملخ صحرایی، نشریه مهندسی *مکانیک مدرس*، دوره چهاردهم، شماره۱۴. صص ۲۳۵- ۲۴۴.

شاهرودی، عباسعلی؛ گلابچی، محمود، و اربابیان، همایون (۱۳۸۶)، بهره‌گیری از طبیعت برای آموزش مؤثر درس ایستایی در رشتهٔ معماری در ایران، نشریه علمی-پژوهشی *هنرهای زیبا*. دوره سی‌ویکم، شماره ۵، صص ۴۷-۵۶.

لفافچی، مینو؛ جهاندار، نسیم (۱۴۰۰)، *انسان، طبیعت، معماری*، تهران: انتشارات عصر کنکاش.

مددی، حسین؛ ایمانی، مرضیه (۱۳۹۷)، فناوری بایومیمیک و الهام از طبیعت، *نقش جهان، مطالعات نظری و فناوری‌های نوین معماری و شهرسازی*. دوره هشتم، شماره ۱، صص ۴۷-۵۵.

Al-Sehail, O. (2014), *Burj Khalifa as a Technical Object*: *Revisualizing the Technological Innovation of the World's Tallest Building through Simondon's Philosophy*, master's thesis, McGill University.

Arslan, S. Sorguc, A. G. (2004), Similarities between structures in nature and man-made structures: biomimesis in architecture, *Journal of Design and Nature II*, Vol. 180, pp. 45-54.

Beukers, A. Hinte, E. Vincent, J. (1998), *Lightness*: *The Inevitable Renaissance of Minimum Energy Structure*, The Netherlands: 010 Publishers: Rotterdam.

Chayaamor-Heil, N. (2018), The Impact of Nature inspired algorithms on Biomimetic approach in Architectural and Urban design. *In Proceedings of the Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems*, *Living Machines*, Paris, France, 17–20 July 2018.

Elmeligy, D.A. (2016), Biomimicry for ecologically sustainable design in architecture: a proposed methodological study, *Proceedings of the* 6th *International Conference on Harmonisation between Architecture and Nature* (*ARC* 2016), Spain, pp. 45-57.

Fratzl, P. Weinkamer, R. (2007). Nature's hierarchical materials, *elsevier* (*Materials Science*), Vol.52, No.8, PP. 1263-1334.

Garcia, A.p. Martínez, F.G. (2009), Natural structures: Strategies for geometric and morphological optimization, *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures* (*IASS*) *Symposium* 2009, Valencia Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures. Pp. 892-906.

Gruber P. (2011), *Biomimetics in Architecture*: *Architecture of Life and Buildings*, New York: Springer Wien.

Hensel, M. Menges, A. Weinstock, M. (2004), Fit Fabric: Versatility through Redundancy and Differentiation, *Architectural Design*: *Emergence*: *Morphogenetic Design Strategies*, Vol. 40, pp. 40-48.

Konstantinova, N. Barbara K. Luschnig, CH. (2021). Auxin and Root Gravitropism: Addressing Basic Cellular Processes by Exploiting a Defined Growth Response. *International Journal of Molecular Sciences* 22, no. 5: 2749. https://doi.org/10.3390/ijms22052749

Libonati, F. Grace, X. Gu. Qin, Z.; Vergani, L.; Buehler, M.J. (2016), Bone-Inspired Materials by Design: Toughness Amplification Observed Using 3D Printing and Testing. Adv. *Eng. Mater*, Vol. 18, pp. 1354–1363.

Macdonald, A.J. (2019). *Structure and Architecture*. Third Edition. New York: Routledge Press.

MacKinnon, R.B. Oomen, J. Pedersen Zari, M. (2020), Promises and Presuppositions of Biomimicry, *Biomimetics*, Vol. 5, No. 3, 33.

Nejati, F. Habib, F. Shahcheraghi, A. (2018), Conceptual Model of Effect and Form of Architecture and Structures, *Journal of Appl. Sci. Environ. Manage*, Vol. 22, No. 8, pp. 1251-1256.

Neville, A.C. Thomas, M.G. Zelazny, B. (1969), Pore canal shape related to molecular architecture of arthropod cuticle. *Tissue Cell*, Vol.1, pp. 183–200.

Nowak, A. Rokicki, W. (2018), Bionic forms in search of structural models in architecture, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 174, 03020. 10.1051/matecconf/201817403020.

Otto, F. (1982), *Natürliche Konstruktionen*: *Formen und Konstruktionen in Natur und Technik und Prozesse Ihrer Entstehung*; Munich: Deutsche Verlags-Anstalt.

Panchuk, N. (2006), *An exploration into biomimicry and its application in digital & parametric*, Master thesis, Waterloo, Ontario, Canada.

Potschin, M. Kretsch, C. Haines-Young, R., E. Furman. (2015), Nature-based solutions. *OpenNESS Ecosystem Service Reference Book*, EC FP7 Grant Agreement no. 308428.

Rey-Rey, J. (2022), Nature as a Source of Inspiration for the Structure of the Sydney Opera House. *Biomimetics*, Vol. 7, 24.

Rouhizadeh, A.R. Hafezi, M.R. Farokhzad, M. Panahi, M. (2019), Inspiration from Nature in the Training of Structural Design in Architecture, *Bagh-e Nazar*, Vol. 15, No. 68, PP. 59-64.

Sarkisian, M. (2012), *Designing Tall Buildings*: *Structure as Architecture*, New York: Routledge.

Shama, M. (2010), *Torsion and shear stresses in ships*, NewYork: Springer Heidelberg.

Silver, P. McLean, w. Evans, P. (2013), *Structural Engineering for Architects*: *A Handbook*. London: Laurence King Publishing.

Sumec, J. Jendželovský, N. Kormaníková, E. Kotrasová, E.K. (2010), Architectural Bionics in Civil Engineering. *Media4u Magazine*, Vol. 7, No. 2, pp. 122-131.

Vincent, J. (2001), *Deployable structures in nature*, centre for biomimetic, Part of the International Centre for Mechanical Sciences book Series, University of Reading, UK, pp. 37-50.

Vincent, J., Bogatyreva, O.A, Bogatyrev, N.R., Bowyer, A. Pahl, A. (2006), Biomimitics – its practice and theory, *Journal of the Royal Society Interface*, Vol. 3, pp. 9471–482, 2006.

Vogel, S. (2000), *Cats*' *Paws and Catapults*: *Mechanical Worlds of Nature and People*, New York: W. W. NORTON & CO.

Wilson J.O. (2008), *A systematic approach to bio-inspired conceptual design*, Phd Thesis, Georgia Institute of Technology, p. 7.

Wootton R. (2020), The Geometry and Mechanics of Insect Wing Deformations in Flight: A Modelling Approach, *Insects*, Vol. 11, No. 7, 446. https://doi.org/10.3390/insects11070446

Zorzetto, L. Ruffoni, D. (2019), Wood-Inspired 3D-Printed Helical Composites with Tunable and Enhanced Mechanical Performance.*Adv*. *Funct*. *Mater*, Vol. 29, pp. 1805888.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Abstract of Research Article
DOI: 10.22059/JFAUP.2022.345545.672782

Classification of Load Bearing Patterns in Architectural Structures Based on a Bionic Approach; Case Study: Bending Structures

*Yaser Goldust[1], Majid Ahmadnejad Karimi[*2]*

[1]Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.
[2]Ph.D. Candidate of Islamic Architecture, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran.

(Received: 3 Oct 2020, Accepted: 20 Apri 2022)

As a scientific discipline, Bionics deals with the technical implementation and application of construction, process and development principles of biological systems. Also Bionics is the link between biology (with technical biology) and technology. The most sensible way of introducing suggestions from nature via the medium of bionics is the interface between evaluation and implementation. This procedure means a targeted search for possible solutions from nature for an existing technical problem. Inspiration from nature to respond to scientific issues in various fields of knowledge is the goal of bionics in various disciplines, which has also accepted various roles in the design and construction of architectural structures. The bionic approach has always included various attractions and has been a source of inspiration in the field of architectural and structural design and construction. Having structural designs that are the result of millions of years of evolution in nature provides a good opportunity to study their load bearing behavior. In the meantime, in order to increase the understanding of the relationship between structures in nature and structures in architecture, the solution and attitude of nature against environmental forces through the most efficient structural arrangements can be expanded in the introduction of load bearing patterns for architectural structures. In this regard, the main goal of this research is to determine the various aspects of load patterns by surveying various examples of existing structures from natural and architectural structures. Interfaces must be developed that enable the architect to move easily and safely in this extremely complex subject area of natural systems. The architects is used to being firm in his everyday work in different subject areas and to acting as a moderator between the specialist disciplines. In the presented discussion, it is necessary to pay close attention to the complex process of transferring these load patterns from nature to the domain of architectural structures. It is logical to transfer patterns from nature to the structural domain, because they are the result of a very complex evolutionary process. On the other hand, this high complexity is what makes their direct application, i.e. mere imitation, in structural engineering problems very difficult. In this article, by relying on a descriptive and analytical method and using the literature of the main areas of research, load bearing patterns in these types of structures have been explained in the form of a two-aspect investigation, including the structural solution approach and the nature of the structure solution. In the first aspect, the structural response type and in the second aspect, the characteristics of the structure's response to environmental forces are discussed. Research findings and results indicate that instead of maximum resistance to force, natural structures mainly use force management and control methods. Nature always tries to neutralize or repel all or part of them, instead of maximum resistance against the applied loads, increasing the transfer of forces and receiving the maximum tension, according to the nature of approaches and load solutions. Therefore, in nature, the force management method is always considered along with force resistance.

Keywords

Bionic Architecture, Architectural Structures, Natural Structures, Load Bearing Patterns, Biomimetic, Bending Structures.

:

[*]Corresponding Author: Tel: (+98-911) 2110886, Fax: (+98-31) 32218146, E-mail: majid_ahmadnejad@yahoo.com