فرهنگ و زیست فناوری معماری

نشریه علمی فرهنگ و زیست‌فناوری معماری

پاییز ۱۴۰۲، سال ۳، پیاپی ۱۰

تحلیل بیومکانیک و مکانیسم سازگار در گیاهان در معماری با روش عناصر محدود (FEM) موردپژوهی: ونوس مگس‌خوار

زمان دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۱، زمان پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۳۰، زمان انتشار: ۱۴۰۲/۵/۲۸

دکتر شهاب ایلکا[1]- گروه معماری، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

دکتر شاهین ایلکا- گروه معماری، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

«بیومکانیک» (به انگلیسی) استفاده از اصول مکانیک در سیستم‌های بیولوژیکی مانند انسان، جانوران، گیاه، اندام، یاخته (سلول) است. واژه بیومکانیک در ابتدای دهه ۱۹۷۰ توسعه یافت، که توصیف‌کننده استفاده از مهندسی مکانیک در سامانه‌های زیست‌شناسی و مهندسی پزشکیو امروزه درحال کاربست در معماری است. حرکات و بیومکانیک گیاهان می‌توانند سیستم‌های قابل انعطاف را برای اهداف معماری الهام بخشند که می‌توانند به عنوان راه‌حل‌های ایده‌آل با قابلیت عملکرد بیولوژیک مقاوم با حرکت طبیعی ظریف شناخته شوند. در این مقاله، مروری مختصر از مکانیزم‌های مختلف سازگار موجود در بیومکانیک معماری و در گیاهان ارائه و سپس شرح داده می‌شود. در این پژوهش رابطه معماری و بیومکانیک گیاهی بین زیست‌شناسان، معماران و مهندسان عمران که در آن جنبش‌های زیبایی‌شناختی یا الگوی الهام‌گرفته از گیاهان وجود داشته، تجزیه و تحلیل شده و در ساختارهای فنی بیولوژیک برای معماری پایدار به کار گرفته شده است. روش تحقیق «توصیفی- تحلیلی» و روش شبیه‌سازی و آنالیز کامپیوتری گیاهان گوشت‌خوار و دراینجا «ونوس مگس‌خوار» است. نتایج تحقیق، اصول حرکتی به دست‌آمده از تجزیه و تحلیل‌های بیومکانیک و عملکردی- مورفولوژیکی کمی و همچنین شبیه‌سازی و انتزاع آن‌ها با استفاده از مثال روش‌های عنصر محدود بوده و در پایان نوعی از الگوبرداری از گیاهان مورد اشاره قرار گرفته است که قابلیت کاربردی در پوسته‌های ساختمانی و طراحی آن‌ها دارد.

واژگان کلیدی: بیومکانیک، سازگاری در گیاهان، تحلیل سینماتیک و مورفولوژیک، ونوس مگس-خوار.

[1] مسئول مکاتبات، شماره تماس: ۰۹۱۲۶۱۳۰۵۳۰، رایانامه: shahabilka@gmail.com

۱. مقدمه و بیان مساله

«بیومکانیک»[1] عبارت است از تحلیل مکانیکی ارگان‌های موجودات زنده و درواقع بیومکانیک، کاربرد علم مکانیک در سیستم‌های بیولوژیکی است. در بیومکانیک می‌توان نگاهی در مقیاس سلولی داشت و به بررسی مکانیزم‌های سلولی و یا اثر نیروهای مکانیکی بر شکل‌دهی سلول‌ها پرداخت. همچنین می‌توان به مدل‌سازی رشد، ترمیم و بازسازی بافت‌های زنده و بررسی عوامل موثر بر آن پرداخت (محمودی‌نژاد، ۱۳۹۹، ص ۸). مکانیسم‌های سازگار در طبیعت در همه‌جا وجود دارد و تاکنون اغلب برای دستگاه‌های کوچک فنی استفاده می شود، برای مثال در صنایع پزشکی یا بسته‌بندی و یا در سیستم میکروالکترومکانیکی اما به‌طور گسترده ساخت‌وساز در مقیاس بزرگ شناخته شده نیست. تقاضای شدید برای معماری با انرژی کارآمد و پایدار منجر به افزایش علاقه به بسته‌های ساختاری سازگار شده است که می‌تواند خود را با تغییر نیازهای خارجی یا شرایط راحتی داخلی تنظیم کند که برای سیستم‌های جنبشی در ساخت‌وساز ساختمان، معیارهای استحکام و سازگاری معمولاً اهمیت زیادی دارند (Cross 2012)، درحالی‌که جنبه‌های دیگر مانند دقت و یا سرعت ارتباط کمتری دارند. گونه‌های بسیاری از سطوح گیاهان این معیارها را برآورده می‌کردند و به‌دلیل الگوی حرکت اغلب زیبایشان جالب هستند. گلبرگ و برگ نه تنها در اطراف محورهای استاتیک چرخانده می‌شدند (همانطور که در حرکات فنی کاربرد دارند)، بلکه پیچیده‌تر و سه بعدی‌تر حرکت می‌کردند و بر اساس اصول بی‌شماری که برای بسیاری از توابع حیاتی مهم است (Bailey, McPherson 2012). این حرکات بر اساس سختی موضعی اجزای سازنده می‌باشد و از تمرکز تنش و تنش و کرنش جلوگیری می‌کند. در این مقاله به بررسی اصول بیومکانیکی و تحلیل سینماتیک گیاهان و قابلیت کاربست آن‌ها در معماری پرداخته شده است.

۲. روش‌شناسی و پیشینه تحقیق

با وجود آن‌که بیومکانیک از لحاظ انجمن‌های رسمی بین‌المللی دانش نوینی به‌حساب می‌آید، اما تاریخچه پیدایش و ادامه حیات آن چیز دیگری را نشان می‌دهد:

۱. در بررسی‌هایی که در مطالعات «ارسطو» در قرن ۱۴ پیش از میلاد صورت گرفته است، مشخص شده که وی قصد داشته تا با استفاده از تحلیل‌های هندسی، کارکرد ماهیچه‌ها را در تولید حرکت حیوانات توصیف کند.

۲. حدود ۲۰۰۰ سال بعد، «لئوناردو داوینچی» (۱۵۱۹–۱۴۲۵ بعد از میلاد) در نقاشی‌های آناتومیکی معروفش، مکانیک ایستادن، راه رفتن و پریدن را تشریح کرد.

---

[1] تقریباً در اوایل دهۀ ۷۰ میلادی، جامعۀ بین‌المللی واژه بیومکانیک را برای دانش مطالعه سیستم‌های حیاتی از دید مکانیکی انتخاب نمود. بیومکانیک از ابزار مکانیک برای مطالعات آناتومیکی و بررسی کارکرد اندام حیاتی استفاده می‌کند. این علم طیف گسترده‌ای را از مطالعه تئوری تا کاربردهای عملی می‌پوشاند. مطالعه کامل مکانیک شامل دو موضوع اساسی می‌باشد: استاتیک، که مطالعه اجسامی است که در اثر نیرویی که بر آن‌ها اعمال می‌شود، در حال سکونی یا وضعیت تعادل باقی می‌مانند و دینامیک، که مطالعه اجسام متحرک است.

۳. «گالیله» (۱۶۴۳-۱۵۶۴بعد میلاد) حدود صد سال بعد اولین تلاش‌ها را برای آنالیز ریاضی کارکردهای فیزیولوژیکی انجام داد.
۴. به خاطر تلاش‌های پیشگامانه «ویلیام هاروی» (۱۵۷۸- ۱۶۵۷) در تعریف آناتومیکی سیرکولاسیون خون در بدن، او را پدر مکانیک سیالات زیستی(biofluid) مدرن می‌دانند.
۵. «آلفونسو بورلی» را نیز به خاطر فعالیت‌های گسترده اش در زمینه تفسیر و توضیح نیروهایی که توسط ماهیچه تولید می‌شود، نقش استخوان‌ها به عنوان محور و ارتباط تنگاتنگ سیستم استخوانی با ماهیچه‌ها، پدر مکانیک جامدات زیستی (biosolid) قلمداد می‌کنند.
۶. از اولین متونی که به بررسی کمی بیومکانیک راه رفتن و آنالیز گیت (gait) می‌پرداخت، می‌توان به کتاب De Muto Animalum نوشتهٔ Borelli اشاره کرد. وی شاگرد گالیله بود و در کارهایش از نتایجی که گالیله در مطالعات خود به دست آورده بود برای پیشبرد اهدافش در زمینه مطالعه بیومکانیک استفاده نمود. کارهای این پیشگامان در زمینه بیومکانیک توسط افراد بزرگی نظیر «نیوتن» و «بورلی» و بسیاری دیگر پیگیری شد. بررسی تمام فعالیت‌ها و اقدامات این افراد در زمینه بیومکانیک نیاز به فضایی بسیار زیاد برای توضیح دارد که در این بحث نمی گنجد.

به‌منظور ادراک و تشریح این حرکات از لحاظ کمی و انتقال به راه‌حل‌های الهام گرفته شده از زیست‌شناسی[۱]، موضوع توضیح الگوهای حرکتی و اصول بکارگیری، و فعل و انفعال آن‌ها با ساختار سازنده مکانیسم از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا ویژگی‌های هندسی و پارامترهای مواد بطور جدایی‌ناپذیری بهم مرتبط بوده و بطور مشابه بر روی رفتار حرکتی مکانیسم‌های سازگار تاثیر می-گذارند. علاوه بر مطالعات کمی بروی بیومکانیک‌های حرکات گیاهی و سازه‌های اساسی، شبیه‌سازی حرکات و مکانیسم‌های بکاراندازی با مدل‌های جنبشی FE کمک‌های ارزشمندی بویژه به چنین تحلیل‌های ارائه می‌دهد. ترکیبی از این رویکردهای روش‌شناختی، نه‌تنها برای انتقال بیومتریک موفقیت آمیز الزامی است، بلکه درک بهتری از الگوهای نقش بیولوژیکی در فرآیند بیومیمتیک معکوس را میسر می‌کند. با وجود درک فزاینده‌ای از جنبه‌های عملکردی حرکات گیاهان از زمان ظهور آثار کلاسیک «چارلز داروین» (داروین ۱۸۶۵، ۱۸۷۵)، بسیاری از سوالات مربوط به روابط شکل، ساختار و عملکرد همچنان باید حل شوند که علاوه بر علاقه بیولوژیکی آن‌ها نیز برای انتقال موفق به محصولات بیومیمتیک اهمیت زیادی دارد. این ایده که حرکات گیاهان مدل‌های مناسب نقش را برای پاکت‌های ساختمان سازگار با محیط زیست الهام می‌گیرند. مطالعه موردی، مکانیزم

---

[۱] ارسطو اولین کتاب بیومکانیک را با عنوان حرکت حیوانات یونانی *Περὶ ζῴων κινήσεως*، ترجمه *De Motu Animalium* نوشت. او نه‌تنها بدن حیوانات را به شکل یک سیستم مکانیکی دید بلکه سوالاتی در زمینه تفاوت فیزیولوژیکی در تصوری که از انجام یک عمل می‌شود و خود آن عمل در واقعیت مطرح کرد.

لغزش را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد که بر اساس اصل تغییرشکل یافته در طول تغییر شکل‌دهنده گرده-افشانی ایجاد می‌شود. بر اساس تجربیات این اختراع موفق بیومیمتیک، مطالعات بیشتری درباره مدل‌های انتخابی به‌ویژه پروژهٔ بیولوژیکی انتخاب شده است.

۳. ادبیات تحقیق

۳-۱ بیومکانیک

واژه «بیومکانیک» از دو بخش «بیو» و «مکانیک» تشکیل شده و به معنی کاربرد اصول مکانیکی در موجودات زنده می‌باشد[۱]. به زبان دیگر بیومکانیک مطالعه ساختار و عملکرد یک سیستم زنده با استفاده از قوانین مکانیکی می‌باشد. لذا می‌توان علم بیومکانیک را در شاخه‌های مختلف انسانی، حیوانی و حتی گیاهی مورد بررسی قرار داد. در بیومکانیک ورزشی تنها افراد درگیر در فعالیت‌های ورزشی مورد بررسی قرار می‌گیرند (محمودی نژاد، ۱۳۹۹، ص ۲۶). «بیومکانیک» (به انگلیسی)[۲] استفاده از اصول مکانیک در سیستم‌های بیولوژیکی مانند انسان، جانوران، گیاه، اندام، یاخته (سلول) است. شاید یکی از بهترین تعاریف از بیومکانیک را «هربرت هتزه» در سال ۱۹۷۴ میلادی بیان کرده است: بیومکانیک مطالعه ساختار و عملکرد سیستم‌های بیولوژیکی با استفاده از روش‌های مکانیک است. واژه بیومکانیک در ابتدای دهه ۱۹۷۰ توسعه یافت، که توصیف‌کننده استفاده از مهندسی مکانیک در سامانه‌های زیست‌شناسی و مهندسی پزشکی است. در یونان مدرن از آن به عنوان εμβιομηχανική یاد می‌شود (والا و گنجعلی‌صفار، ۱۴۰۱، ص ۱۵).

۳-۱ لایه‌های انعطاف‌پذیر حرکتی در گیاهان

حرکت‌شناسی یا «کینزیولوژی» عبارت است از علم شناخت و بررسی حرکات و همچنین علل آن در موجودات زنده (به‌ویژه انسان). ازنظر تاریخچه، این علم را به یونان باستان نسبت می‌دهند. ارسطو به عنوان پدر علم کینزیولوژی شناخته می‌شود. ازجمله کاربردهای این علم در فیزیوتراپی، علوم ورزشی، کاردرمانی، مهندسی پزشکی و ارتوپدی فنی است. کینزیولوژی شامل علوم زیر است (محمودی‌نژاد، ۱۴۰۱، ص۳۸): کالبدشناسی (آناتومی)؛ فیزیولوژی؛ مفصل‌شناسی یا آرترولوژی. مفصل‌شناسی یعنی مطالعه علمی مفاصل، بیماری‌های مفصلی و درمان آن‌ها؛ بیومکانیک. این علم یعنی کاربرد مفاهیم علم مکانیک برای بررسی حرکات موجودات زنده (به‌خصوص انسان)؛ نورولوژی، انسان‌شناسی یا آنتروپولوژی. انسان شناسی، دانش مربوط به نژاد انسانی است.

---

[۱] شاید لئوناردو داوینچی اولین دانشمند به معنای واقعی در «بیومکانیک» نام برد، چرا که او برای اولین بار به مطالعه آناتومی در زمینه مکانیک پرداخت. او نیروهای عضلات، منشأ و پایان آن‌ها و چگونگی عملکرد مفاصل را بررسی کرد. او همچنین تلاش کرد که خصوصیات برخی از جانوران را در ماشین خود تقلید کند. برای مثال او پرواز پرندگان را مورد مطالعه قرار داد تا به وسایل لازم برای پرواز انسان را دست یابد. از آنجا که اسب منبع اصلی قدرت مکانیکی در آن زمان بود، او با مطالعه سیستم عضلات ماشینی را طراحی کند که بازدهی بهتری نسبت به این حیوان بدهد.

[۲] Biomechanics

استقرار در ساختارهای فنی به‌طور معمول با پیوستن به عناصر کششی ارگانیسم است که توانایی لغزش در برابر یکدیگر را دارند. نوع خاصی از مکانیسم‌هایی که در ساخت‌وساز امروز مورد استفاده قرار می‌گیرند و طبقه‌بندی شده اند، به‌عنوان مثال، سازه‌های قابل انعطاف (کوره‌های تاشو، تلسکوپی، و سازه‌های تنش، صفحات تاشو و سیستم‌های پنوماتیک)، انواع مختلف تحولات فیزیکی (تغییر شکل، استقرار، عقب‌نشینی، کشویی و چرخش) و جابجایی حرکتی (حرکت کروی، حرکت مماس دایره‌ای، حرکت شعاعی، حرکت حرکتی، حرکت یک طرفه، حرکت دوجنسی و حرکت چندضلعی). اکثر سیستم‌های سازه‌ای ساختمان مانند سیستم‌های نما در مقابل عناصر سفت و سخت یا غشایی هدایت شده در اطراف محور خطی و موازی یا محورهای چرخش خطی که به‌عنوان عناصر استاندارد ساخته می‌شوند. این اصل ساخت‌وساز، در بسیاری از موارد، تنظیمات ارزان و ساده را اجازه می‌دهد اما ساختارهای حاصل نیز دارای معایب سایش، تعداد زیاد قطعات و همچنین هزینه‌های مونتاژ و هزینه زمان است (Poppinga, Joyeux 2011).

علاوه براین، سازگاری آن‌ها با هندسه‌های ساختمانی غیرمسطح محدود است. در مقابل، مکانیزم‌های سازگار، به‌دلیل تغییر شکل الاستیک خود، قابلیت انکشاف را نشان می‌دهند و بر انعطاف‌پذیری اجزاء آن‌ها تأکید دارند. چنین اصل مکانیکی می‌تواند به طور کامل از مفاصل معمولی آزاد باشد؛ از این‌رو، به‌طور قابل توجهی کاهش میزان تعمیر و نگهداری مورد نیاز است و کل ساختار را می‌توان با روش‌های بسیار سبک‌تر و پیچیده‌تر ساخت که مقدار اجزای ساختاری (اتصال‌دهنده‌ها، چشمه‌ها، و غیره) به‌میزان قابل توجهی کاهش می یابد؛ همانطور که سلول‌های گیاهی دارای دیواره‌های سلول-های سفت هستند. پروتئین‌های انقباضی که اساس حرکت جنبش‌های عضلانی در حیوانات است، بنابراین، گیاهان نمی‌توانند برای راه‌اندازی مکانیسم‌های سفت و محکم انتخاب شوند اما به‌جای آن، بسیاری از اصول حرکت انعطاف‌پذیر را توسعه داده‌اند (Cross 2012). از نظر کلاسیک، حرکت نوستالژیک که به دنبال مدل‌های حرکتی از پیش تعیین شده مورفولوژیک است، و تروپیمیسم‌هایی که از چنین الگوهایی پیروی نمی‌کنند متمایز هستند، اما در جهت حرکت و الگوی توسط یک محرک تعیین می‌شوند. حرکات ناودانی یک رابطه ساختاری مشخص را نشان می‌دهد و بنابراین برای رویکردهای بیومیمتیک بسیار جالب است. از سوی دیگر، کشش‌ها یک سازگاری بالاتری از حرکت-های انجام شده را از لحاظ تغییر شکل ساختاری به‌عنوان یک واکنش به تحریک محرک نشان می‌دهند. حرکات گیاهی می‌تواند به‌صورت هیدرولیکی عمل کند که شامل فرآیندهای تورم و انقباض سلول‌ها و بافت‌ها و یا تکیه بر انتشار انرژی ذخیره الاستیک است. هر دو اصل می‌توانند برگشت‌پذیر باشند (تغییرات سلول در سلول‌ها، تغییر شکل ارگان‌های کششی) یا غیرقابل برگشت (رشد و شکست انفجاری). علاوه براین، حرکات کاملاً غیرفعال رخ می‌دهد که توسط نیروهای مکانیکی خارجی فعال می‌شوند. لذا، هیچگونه آنالوگی از مکانیزم‌های بدن سازی موجود در گیاه، جز در

قارچ‌ها وجود ندارد و در نتیجه یک حرکت لغزنده خطی بین دو جسم سفت و سخت ایجاد می‌کند. عملکرد این ویژگی ساختاری گیاهان مورد بررسی بسیاری از اندیشمندان قرار گرفته است (Bailey, McPherson 2012).

۳-۲ سازگاری با انطباق متمرکز

مکانیزم‌هایی با انطباق متمرکز (انطباق توزیع شده) با تغییر شکل الاستیک در هنگام حرکت، فقط با یک جزء ساختاری کوچک و نه کل آن ساختار مشخص می‌شود. چنین مکانیسم‌هایی مشابه مکانیسم سفت و محکم رفتار می‌کنند، اما با لولای سفت و سخت توسط یک مفصل خمشی جایگزین می‌شود. لوله‌ای کوچک خمشی گاهی اوقات به‌عنوان «لولای زندگی» نامیده می‌شوند، درحالی‌که از مواد مشابه با دو قسمت سفت و سخت که اتصال می‌دهند، تشکیل شده است. در گیاهان، جاذبه اغلب توسط سازه‌های باریک امکان‌پذیر است که به حرکت یک عضو «سفت و سخت» متصل به یک بدن گیاهی سفت تبدیل می‌شود. به‌عنوان مثال، پیلینوس مفصل کوچکی از برگ و حرکت فعال در حال حرکت است که از طریق تحریک و فرایندهای کاهش‌دهنده سلول‌های حرکتی آنتاگونیستی تحت‌تاثیر قرار گرفتند. در برخی از گیاهان، به‌عنوان مثال درخت ابریشم این فرآیند اتفاق می‌افتد. یکی دیگر از لولای گیاه یکپارچه متحرک، که به جای آن به شیوه ای کاملاً منفعل عمل می‌کند، در لک گل (ارغوانی) فریبنده وجود دارد. اگرچه این تعامل حشرات در یک محیط زیست مورد بررسی قرار گرفته‌است، مورفولوژی عملکرد مفصل لولایی که به گرده افشانی کمک می‌کند، هنوز ناشناخته است. گیاهان دیگر دارای سیلندرهای حیاط یا برگه‌هایی هستند که می توانند حرکتی پیچیده‌تر انجام دهند. این در مقایسه با سایر حرکات گیاه غیرفعال است که در آن اندام‌ها با توقف نیروی انحرافی می‌شود، حرکت می‌کنند تا موقعیت اصلی خود را بیابند.

۳-۳ مکانیسم سازگاری با توزیع

ساختار انعطاف‌پذیر که در تمام طول آن تغییر شکل می‌یابد و نه تنها در مفاصل انعطاف‌پذیر کوچک مجهز به مکانیسم با تطابق توزیع است که در طول حرکات هم متمرکز نیست و روی تمام بدن گیاهان توزیع می‌شوند. چنین مکانیزمی را می‌توان در بسیاری از اندام‌های درحال حرکت گیاه یافت. بسیاری از حرکات خمشی یک‌طرفه به سمت بالا و پایین به‌وسیله تمام اعضای بدن انجام می‌شود. بعنوان مثال، دانه‌های مخروطی کاج به‌عنوان واکنش‌های غیرفعال به تغییرات رطوبت هوا خم می‌شود. از این‌رو، مقیاس همانند یک نوار دو فلزی واکنش نشان می‌دهد اما به تغییر رطوبت و گرما پاسخ نمی‌دهد. به این معنی، کل مخروط کاج هنگامی که خشک می‌شود، باز شدن دانه را فعال می‌کند و هنگامی که خیس می‌شود، خنثی می‌شود. خم‌شدن چند عاملی از کلیه سازه‌های میله‌ای نشان‌دهنده حرکات خمشی ناشی از شکار شاخساره‌ها در گیاهان گوشتی است. موارد دیگری از حرکت‌های یک طرفه در ساختارهای گیاهی قابل تمدید است. به‌عنوان مثال، رشد و رشد طولی

می‌تواند با گسترش یک تلسکوپ تنگه مقایسه شود. جالب توجه است که گیاهان بسیاری از ساختارهای توزیع را نشان می‌دهند. پس از تماس با شکار، حرکات خمشی منجر به بسته شدن برگ در اطراف حیوان و تشکیل یک معده بیرونی برای جلوگیری از فرار قرار می‌گیرد. حرکات سریع و برگشت‌پذیر اغلب بر روی فرایندهای ضربه محکم و ناگهانی متشکل از سازه‌های شبیه دوطرفه منحنی استوار است. به‌علت انحنای دوگانه، تنش و فشار هنگامی رخ می‌دهد که اندام تغییر شکل داده و انرژی الاستیک ذخیره شده و درنهایت آزاد می‌شود، زمانی‌که منحنی به طور ناگهانی تبدیل می‌شود. از این‌رو، ارگان‌های گیاهی که ازجمله اجزای الاستیک آن‌ها را تشکیل می‌دهند، ابتدا انرژی الاستیسیونی را به‌صورت منفرد یا به‌طور فعال تغییر شکل داده‌اند و به یک واکنش مکانیکی منفرد بسیار سریع و قوی دست می‌یابند. این اصل حرکتی مقیاس‌پذیر است.

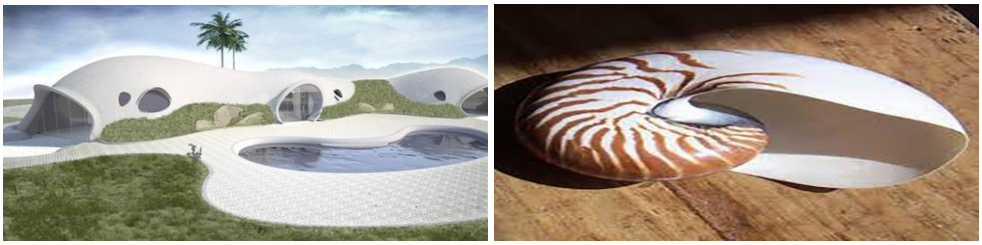
۴-۳ ساختار پنوماتیک، و بیومکانیک معماری

در طبیعت فرم‌های بسیاری از گوی‌های کوچک (ساختارهای پنوماتیک) ساخته شده‌اند. ریزگوی‌ها مانند حباب صابون در آب عمل می‌کند، با لایه انعطاف‌پذیر سازگار و مقاومی حول یک محتوای آبی یا گازی. هر سلول حیوانی یا گیاهی ساختاری پنوماتیک است که از غشاء پروتوپلاسم ساخته شده است. یکی از ویژگی‌های اساسی مایع‌ها کشش سطحی است، که قدرت آن به حباب‌های معمولی شکل می‌دهد. وقتی حباب سطح حداقلی را دارد، شکل آن حاصل دارای حداقل مقدار ماده می‌باشد. به‌جز مقاوم بودن، این ساختارهای سبک و انعطاف‌پذیر به قالب پذیری زیادی می‌رسند. مطابق گفته سنوشیاین، ما می‌توانیم خودمان را ساختارهای پنوماتیکی در نظر بگیریم که نسبت به سوراخ شدن توسط اشیاء تیز آسیب پذیریم. نمونه‌های دیگر چنین ساختارهایی در سیستم‌های هدایتی گیاهان یافت می‌شود: در احشا به طور کلی (مشیمیه، روده‌ها، قلب، معده، شش‌ها)؛ در میوه‌های نرم مانند انگور، گوجه فرنگی، دانه‌های ذرت، سفیده تخم مرغ یا تخم های نرم خزندگان و حشرات. در قورباغه‌هایی که گلویشان را باد می‌کنند، هوا به‌عنوان عنصری از فشار عمل می‌کند که درون غشاء با کشش عمل می‌کند. پس استفاده از هوا به‌عنوان یک متریال ساختاری تازه نیست. در زندگی روزمره ساختارهای پنومتیکی وجود دارند که در آن‌ها هوا درون یک پوسته‌ی مقاوم و محافظ مانند یک پوشش، وزن سنگینی را نگه می‌دارد. بادکنک‌ها، توپ‌ها و سایر مواردی که با هوا باد می‌شوند از این دسته‌اند. پوشش پنومتیک، پنوما [pneuma] واژه یونانی به معنای ریه- همیشه نرم است. سلول‌های اصلی چوب و استخوان در واقع نرم هستند اما در برگیرنده متریال سفتی مانند مواد استخوانی یا سلولزی هستند، که تبدیل به ساختارهای پنوماتیک سفتی می‌شوند که می‌توانند خود را تحت فشارهای معینی نگه دارند. در حوزه معماری مصالح خلاقانه و دانش جدید سبب کسب تجارب بیشتر در طراحی و سازه شده است. ریچارد باکمینستر فولر در سال های ۱۹۵۰نسل جدیدی از معماران و مهندسین را در عصر جدید پرورش داد. حباب‌هایی که در دلالت های ضمنی

متعددشان (سبکی، شفافیت، کاربرد، برابری، تفاوت) از مشخصات دهه ۱۹۶۰ است محیطی که در آن تفکر آزاد ترویج داده شده و سبب کاربرد سازه‌های پنوماتیک (بادی) برای شکل دادن به محیط شده است. با این‌حال در این دوران به سبب محدودیت‌های مالی و موانع فنی زیرساخت‌های سازه بادی به تدریج رو به زوال رفت. ازجمله کسانی که در دهه‌های شصت و هفتاد به دنبال کشف معماری پنوماتیک بودند، «آنت فارم» یکی از چهره‌های مشهور بود که پروژه‌های بسیاری پیرامون باد و پلاستیک ارایه کرد. همکار آمریکایی وی، «جرسی دویل» در اوایل دهه هفتاد به جستجوی سازه‌های معماری پنوماتیک پرداخت که در بافت شهری آزادانه برجسته بودند همانند سفینه فضایی افراد بیگانه که بر روی شن، شیشه و چمن فرود آمدند.

۳-۵ پوسته‌ها و سازه‌های پوسته‌ای

سازه‌های پوسته‌ای یکی از فرم‌های زیبائی است که انواع مختلف آن در طبیعت به‌وفور یافت می‌شود و به جرات می‌توان گفت پوسته یکی از عالی‌ترین انواع سازه در علم مهندسی به‌شمار می‌روند و بسیاری از عناصر موجود در طبیعت دارای سازه پوسته‌ای است؛ مانند جمجمه و تخم مرغ و اسکلت حیوانات سیلوها و بدنه هواپیماها و کشتی‌ها و قایق‌ها از انواع دیکر پوسته‌ها بشمار می‌روند.



تصویر ۱. الهام از فرم پوسته حلزون در طراحی معماری ساختمان؛ ماخذ: آرشیو نگارنده.

پوسته از نظر هندسی به دو دسته تقسیم می شوند(Xu L., 2002, p. 32):

۱. «**پوسته‌های گسترش‌پذیر**»: به پوسته‌هایی اطلاق می‌شود که بدون ایجاد بریدگی بتوانیم انرا بصورت صفحه در آوریم مانند پوسته استوانه و مخروط. این پوسته‌ها در یک جهت دارای انحنا و در جهت دیگر داری خطوط مستقیم هستند؛

۲. «**پوسته گسترش‌ناپذیر**»: که مانند حالت اول نیستنند این نوع پوسته دارای تاب زیادی هستند بنابراین در مقابل بارهای وارده بسیار مقاوم هستند پوسته‌های کروی از این پوسته ها بشمار میروند.

در رابطه با تنش در پوسته‌ها می‌توان اشاره کرد (Fathi, Daneshjoo, Melchers, 2006):

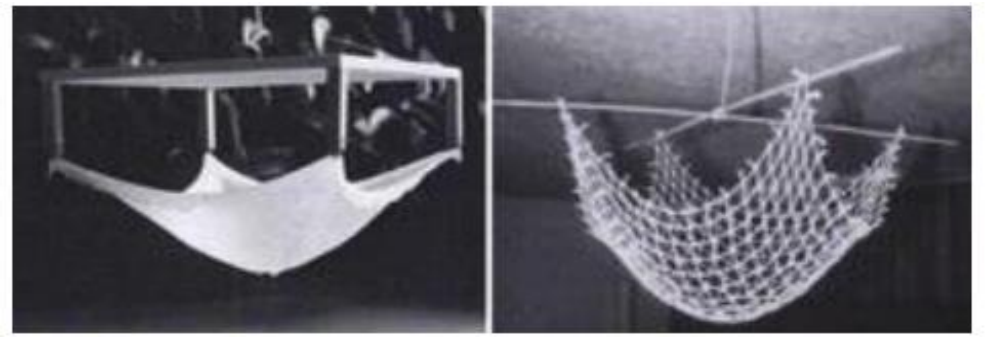
۱. «تنش در پوسته‌ها»: درموقع محاسبات باید نیروهای برشی و لنگر خمشی و نیروی پیچشی را منظور نمود علاوه بر آن باید نیروی غشائی را درنظر گرفت. نکته قابل توجه این است که در تیرها و قوس‌ها نیروهای برشی و لنگر خمشی تا فاصله دوری درتیر نفوذ می‌کند در صورتی‌که

در سقف‌های پوسته‌ای نیروی برشی و لنگر خمشی کاملاً موضعی است و هرچه قدر از تکیه گاه و ناحیه زیر بار دور شویم اثر این نیروها بیشتر خواهد شد؛

۲. «تنش برش باد درپوسته‌ها»: فرض می‌کنیم بادی با سرعت ۱۶۰ کیلومتر در ساعت بر سطع گنبدی که قطر آن ۳۰ متر با ضخامت ۷,۵ سانتیمتر وارد شود تنش برشی ایجاد شده معادل یک کیلوگرم بر سانتیمتر مربع است و با توجه به‌این‌که تنش برشی مجاز ۵,۴ کیلو گرم بر سانتیمتر مربع است به‌این نتیجه می‌رسیم گنبدها با وجود ضخامت کم در مقابل نیروهای باد بسیار مقاومند.

سقف‌های پوسته‌ای سقف‌های هستنند منحی و ممکن است در یک و یا دو جهت انحنا داشته باشند با ترکیب این سقف ها میتوان حجم زیبای را خلق نمود و ازطرفی این سقف‌ها قادر به تحمل بارهای سنگین هستنند بنابراین امکان پوشش دهنه‌های بزرگ وجود دارد. با توجه به خمیری بودن آن‌ها می‌توان فرم دلخواه را طراحی و اجرا نمود. امروزه با پیشرفت تکنولوژی در تمام علوم و بوجود آمدن نرم‌افزارهای کامپیوتری قادریم طراحی و محاسبات این سقف‌ها را بدقت انجام دهیم. از طرفی امکان شبیه‌سازی این سقف‌ها قبل از ساخت وجود دارد. فرودگاه بین‌المللی جان اف کندی که بین سال‌های ۱۹۵۶ و ۱۹۶۲ ساخته شد یکی از کارهای موفق ارو سارینن است. این سقف پوسته‌ای یکی از شاهکارهای معماری است که در نوع خود بی‌نظیر است. حجم تندیس‌گونه این فرودگاه نه تنها مورد استقبال بازدیدکنندگان قرار گرفت بلکه مورد تحسین صاحبنظران واقع گردید. یکی دیگر از شاهکارهای سقف‌های پوسته‌ای ساختمان اپرا سیدنی است که نماد استرالیا بشمار می‌رود و پوشش‌های قطاعی سقف اپرا قطعاتی از یک کره هستند. یکی از بنیان‌گذاران سقف‌های پوسته‌ای «هاینس ایسلر» است. این مهندس که در سوئیس متولد شده، اولین فرم پوسته را بوجود آورد. این مهندس مبتکر پارچه‌ها را به شکل منحنی خم می‌کرد و سپس این پارچه‌های خم شده را مرطوب نموده و آن‌را در فصل زمستان آویزان می‌کرد تا کاملاً یخ بزنند و با وارونه کردن آنها توانست مطالعاتی در مورد سقف‌های پوسته‌ای انجام دهد. وی دریافت اشکالی که از هندسه ساده تشکیل شده باشند، نسبت به اشکال غیر هندسی مقاوم‌ترند (G. Rocha, 2000).

تصویر ۲. نمونه‌ای از سازه‌های پوسته‌ای توسط نروی و همکاران؛ ماخذ: آرشیو شخصی



تصویر ۳. نمونه کارهای هاینس ایسلر؛ ماخذ: آرشیو شخصی

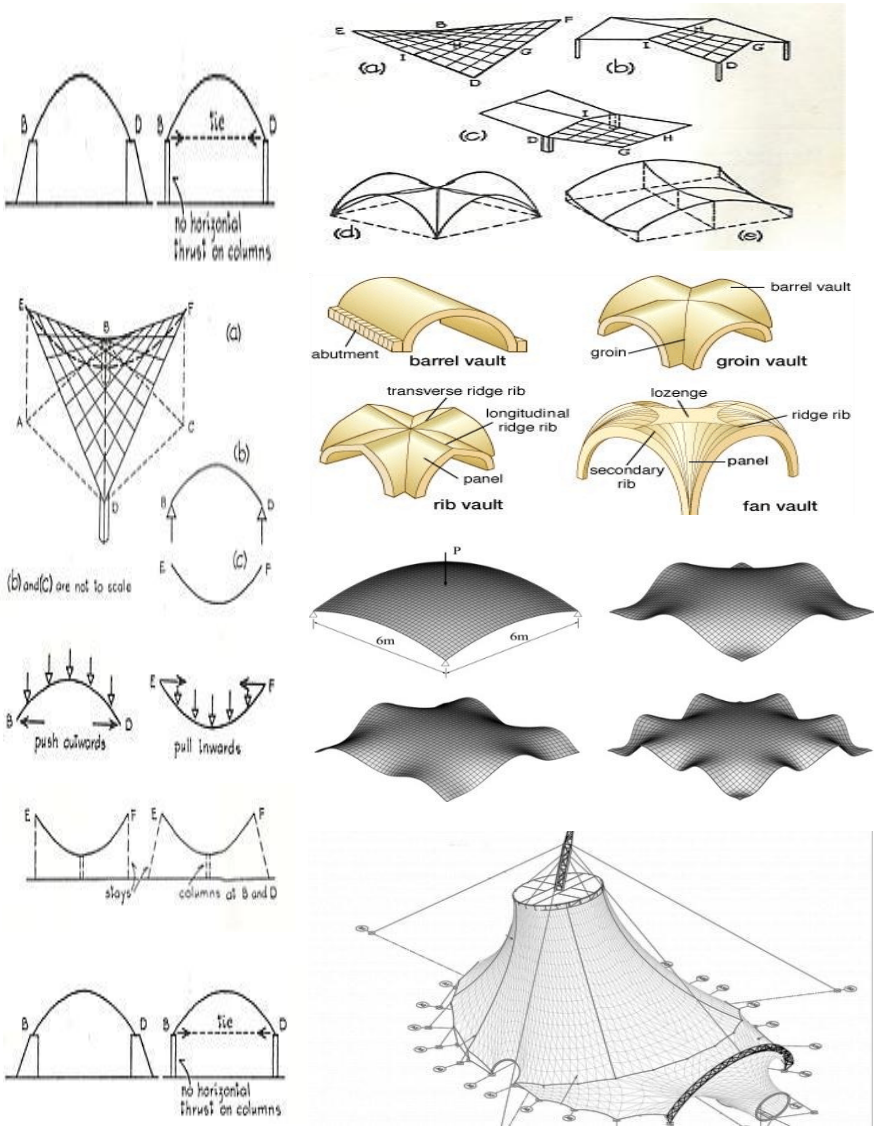
سقف‌های پوسته‌ای ممکن است از ترکیب «هیپربولیک» و «پارابولیک» باشند. در شکل بالا یک سقف پوسته‌ای معمولی و یک سقف پوسته‌ای که وزن سقف را به چهار قوس منتقل می‌شود و یک سقف زین‌اسبی نشان داده شده است. انواع پوسته‌ها عبارتند از:

۱. پوسته سین کلاسیتیک. این پوسته‌ها داری دو منحنی هستند و خطوط انحنا در دو جهت مشابه است مانند گنبدها.
۲. اشکال قابل توسعه. این پوسته‌ها در یک جهت دارای انحنا و در جهت دیگر دارای خطوط مستقیم هستند شامل مخروط و استوانه؛
۳. اشکال آنتی کلاسیک. شامل مخروطی سهموی شبه هذلولی این پوسته در دو جهت انحنا دارند.

همانطوری‌که قوس‌ها دارای نیروی رانشی بیرونی هستند گنبدها نیز همین خاصیت را دارند. نکته قابل توجه این است که هر چه قدر ارتفاع گنبد بیشتر باشد میزان نیروی رانشی آن کمتر خواهد بود و در گنبدهای مرتفع مقاومت حلقه‌ای کششی پوسته کافی است در صورتی‌که در گنبدهای کم ارتفاع معمولاً یک حلقه کششی بوسیله افزایش ضخامت گنبد در آن ایجاد می‌شود و این حلقه از نیروی برشی جلوگیری می‌کند (W.F. Chen, 1987).

تصویر ۴. نمونه‌هایی از سقف پوسته‌ای چوبی؛ ماخذ: نگارنده.

تصویر ۵. معماری سقف اپرای سیدنی و بکارگیری از سازه پوسته ای در آن؛ ماخذ: اینترنت.



تصویر ۶ الی ۷. تحلیل سازه‌ای معماری سقف‌های پوسته‌ای؛ ماخذ: نگارنده

تصویر ۸ الی ۹. نمونه‌های از کاربرد سقف‌های پوسته‌ای در ساختمان‌های شهری؛ ماخذ: اینترنت.

۴. بیان یافته‌های تحقیق

۴,۱ ونوس مگس‌خوار

این گیاه معروف و پرطرفدار همان‌طور که از نام آن مشخص است از حشرات و گوشت تغذیه می‌کند. قسمتی از گیاه که به شکل تله عمل می‌کند، درواقع قسمت انتهایی برگ گیاه است که در سطح داخلی خود موهایی ریز و بسیار حساس دارند. زمانی‌که حشرات و یا هر جسم خارجی دیگری با این موها برخورد می‌کند، برگ‌ها سریعاً بسته می‌شوند و اگر در همان زمان حشره‌ای در این مکان قرار داشته باشد به تله می‌افتد و گیاه آن‌را به عنوان غذا مصرف می‌کند. قسمت تله ونوس دارای رنگ‌ها و شکل‌های جذابی برای گیاهان می‌باشد که آن‌ها را به طرف خود می‌کشد. گیاه ونوس بومی آمریکا می‌باشد. نام علمی ونوس مگس‌خوار *Dionaea muscipula* می‌باشد. در کشورهای انگلیسی زبان به نام *Venus's flytrap* معروف می‌باشد.

تصویر ۱۰. گیاه انعطاف‌پذیر ونوس مگس‌خوار؛ ماخذ: آرشیو نگارنده.

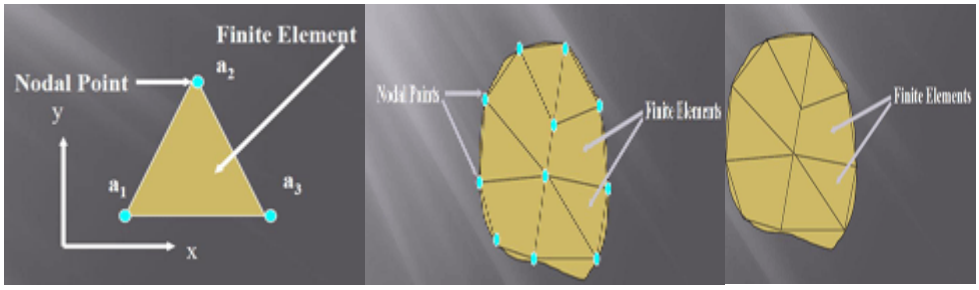
۴-۲ تحلیل سینماتیک و مورفولوژیک

با توجه به تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی سینماتیک حرکت بسته شدن تله از جهش‌های متنوع ونوس مگس‌خوار، قصد تحقیق این است که یک «فضای مورفوس و ساختاریافتهِ» نشان‌دهنده محدودیت-های مورفولوژیکی نشان داده شود. علاوه بر درک بهتر در مورد ساختارهای بیولوژیکی و محدودیت-های ساختاری که باید در طی تکامل دامنه‌های بیومکانیکی به انجام برسد، این فضا نیز به تعریف درجه‌های آزادی در یافتن شکل برای سیستم‌های «فلاپینگ بیومیتیک» الهام گرفته از مکانیزم لرزش

ضربه محکم و ناگهانی کمک خواهد کرد. گسترش برنامه‌ریزی شده از نمونه‌های آزمایشی شامل ارقام با انحنای لبه‌های متوسط و با شکل‌های تله‌ای ونوس مگس‌خوار که به شدت با نوع معمولی آن متفاوت است، منجر به درک بیشتری از نیازهای سازه‌ای برای تله‌های ضربه‌گیر می‌شود.

۳-۴ شبیه‌سازی مدل بیومکانیکی برای معماری

روش عناصر محدود در بیومکانیک که یک روش عددی که مبنای مدل‌سازی در بیومکانیک است، روش «عناصر محدود (FEM) نامیده می‌شود. به این صورت با خطوط و نقاط فرضی فضای سطح یا حجم را به المان‌هایی گسسته‌سازی می‌کنند (شکل الف و ب). سپس با معادلات، معادله حرکتی را برای هر یک از عناصر محدود می‌نویسند. شرایط مرزی هم در معادلات لحاظ می‌گردد. در نهایت یک «ماتریکس حل» خواهیم داشت (شکل پ).



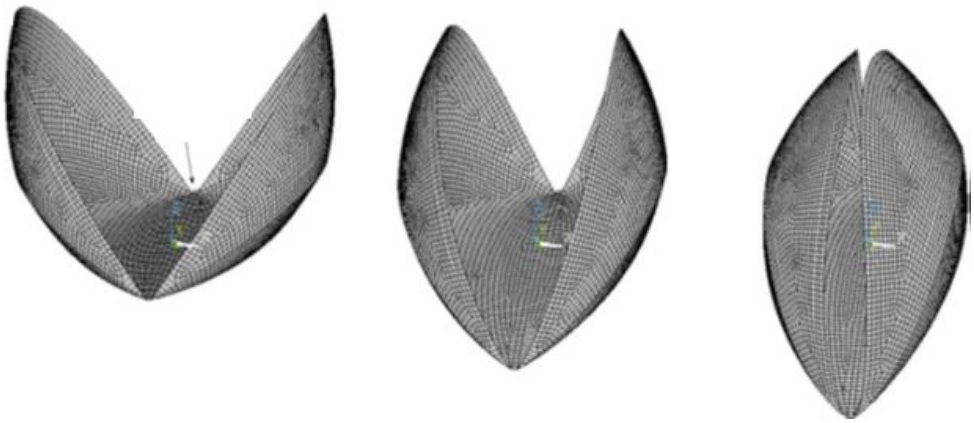
تصویر ۱۱. شکل الف و شکل ب و شکل پ (از راست به چپ)؛ ماخذ: محمودی نژاد، ۱۳۹۹، ص ۱۳۸.

مسائل زیستی، هندسه پیچیده‌ای دارند و حل آنالیتیک آن‌ها دشوار است. استفاده از FEM این شکل‌های پیچیده را هم پوشش می‌دهد و با یک راه‌حل می‌تواند تعداد زیادی پارامترها را بر روی سیستم اعمال کند و مسائل چندبعدی و چندفازی را در کنار هم بررسی می‌کند. مسائل استاتیکی و وابسته به زمان به راحتی با این روش شبیه‌سازی می‌شود، در حل مسائلی که به روش‌های دیگر غیرقابل حل و یا پرهزینه هستند، موثر و سریع عمل می‌کند. با این روش می‌توان مسائلی از قبیل هدایت گرمایی، پتانسیل الکتریکی و مغناطیسی، اتصالات الاستیک، جریان سیالات، لرزش و ... و یا ترکیبی از این مسائل را شبیه‌سازی کرد. خروجی فرایند در این روش معمولاً تنش، جابه‌جایی، انرژی و غیره است. مدلسازی بیومکانیکی مدل‌های بیولوژیکی هدف، به‌منظور فراهم آوردن درک عمیق‌تر از اصول حرکت آن‌ها است و بنابراین ممکن است در زمینه معکوس الگوبرداری کمک کند. «روش عنصر محدود» (FEM) فرصت‌های جدیدی را برای تعیین پارامترهای مختلفی که تأثیر قابل‌توجهی در کل دارد فراهم می‌کند. حتی اگر برخی از اطلاعات در مورد مواد و ژئوماتیک و تاثیر محیط زیست هنوز هم ممکن است فاقد باشد، می‌توان پیش‌بینی‌هایی انجام داد که شبیه‌سازی کیفی مکانیسم اصلی را امکان‌پذیر می‌سازد. علاوه بر این، تکنیک‌های مختلف شبیه‌سازی، مکانیسم‌های سینتیکی کشف شده را به‌کار می‌گیرند و اصول هندسی را با روش‌های مختلف به کار می‌گیرند. روند مدل-سازی و شبیه‌سازی سازه‌ها به سه دسته اصلی تقسیم می‌شود:

- مدل هندسی ارائه‌دهنده پارامتری از ویژگی‌های هندسی اصلی مسئول حرکات گیاه است و اجازه می‌دهد تا توسعه تغییرات از لحاظ توپولوژیکی یکسان باشد.
- مدل سینماتیک به طور کیفی برای ارزیابی نحوه تغییر پارامترهای هندسی بر حرکت واقعی استفاده می‌شود.
- تجزیه و تحلیل عنصر محدود که در مدل جنبشی استفاده می‌شود، نه تنها ارزیابی تغییرات هندسی بلکه تعیین شیوه‌ای که توزیع مواد خاص و شیوه‌های سختی بر انرژی مورد نیاز و نیروهای مربوطه در آن تأثیر می‌گذارد.

۴-۳-۱ شبیه‌سازی دام ونوس مگس‌خوار

دو لبه تله با یک میترید متصل شده و هر دو به دو قسمت متفاوت با ضخامت و عملکرد تقسیم می‌شوند. قسمت مرکزی در کنار میترید قرار دارد و به شکلی فعال و هیدرولیکی حرکت می‌کند. بخش لوب خارجی تنها از دو لایه سلولی نازک تشکیل شده است که منجر به سفتی بسیار کوچکتر نسبت به قسمت مرکزی متشکل از سه لایه سلولی می‌شود. شبیه‌سازی جنبش دامداری به عنوان یک مدل سینتیکی با استفاده از FEM توسط اشلیدر (۲۰۱۵) انجام شده است.



تصویر ۱۲. شبیه‌سازی دام ونوس مگس‌خوار؛ ماخذ: ترسیم نگارندگان.

۴-۴ مکانیسم سازگار در گیاهان و معماری

هدف تحقیق این است که مکانیزم را به‌طور دقیق‌تر و مقادیر مهم یا محدودیت‌هایی که مکانیسم بسته شدن را تعیین می‌کنند، شبیه‌سازی کند. برای این منظور یک مدل عنصر محدودی ساخته شده است. از آنجایی که بسیاری از داده‌های ورودی برای آزمودن (به عنوان مثال پارامترهای مکانیکی بافت‌ها) سخت است، فرضیه‌های مختلف مدل‌سازی برای هندسه، مواد و حتی موارد بارگیری باید ساخته شود. اگرچه این مدل سینماتیکی یک مرور کلی از تغییرات هندسی را ارائه می دهد، اما دقت و توجهی به خواص مواد ندارد و با اطلاعات منحنی و مرز انعکاس، هندسه تاشو را می‌توان بازسازی

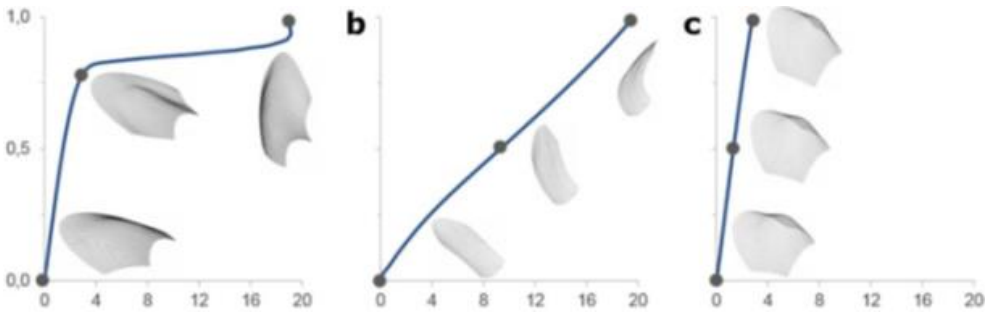
کرد. این روش نه تنها اجازه می‌دهد دستکاری پارامترهای زمان واقعی را فراهم کند، بلکه اطلاعات فوری در مورد ارتباط بین جابجایی نقاط پشتیبانی، زاویه تاشو و حساسیت مکانیزم را فراهم می‌کند و تلاش‌های محاسباتی را نسبت به روش‌های دیگر بیشتر کاهش می‌دهد، شبیه‌سازی مجموعه‌ای از تعداد زیادی عناصر را هم به همراه دارد.

۵-۴ شبیه‌سازی تله ونوس مگس‌خوار

شبیه‌سازی باعث ایجاد خواسته‌های مختلف می‌شود زیرا آن را با مکانیک متفاوت از تله کار می‌کند. بسته شدن تله ونوس مگسخوار را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد:

۱. اولین حرکت آهسته رانده شده توسط فشار هیدرولیک،
۲. فاز دوم با سرعت تغییر شکل بالا در طول ضربه محکم و ناگهانی و
۳. یک مرحله سوم بسته شدن آهسته است. فرایند دوم با تغییر علامت در انحنای گاوس و با دور زدن مسیر ناپایدار با سفتی منفی مشخص می‌شود. این پارامترها می‌توانند به طور مستقیم به شبیه‌سازی عنصر محدود منتقل شوند .از آنجا که لوب‌ها به صورت مستقل عمل می‌کنند، از لحاظ حرکات پس از تحریک، و به‌منظور صرفه جویی در زمان محاسبه، تنها یک لوب و توسط یک اسکن سه بعدی شبیه سازی شده است.

برای نشان دادن تقریبی مقطع واقعی، ضخامت بین ۱ میلیمتر در اتصال به میترید و ۰,۷۵ میلی متر در انتهای بیرونی لبه متفاوت است. فشار هیدرولیکی به تدریج از صفر تا کل بار (عامل بار) افزایش می‌یابد.



تصویر ۱۳. منحنی‌های جابجایی بار از نقطه میانی لبه بیرونی؛ ماخذ: نگارنده.

این تغییر جهت انحنای می‌تواند در مورد سازگاری با هندسه‌های منحنی دوگانه سودمند باشد. مرحله انتقال برای کنترل دشوار است و شامل انتشار ناگهانی انرژی ذخیره الاستیک است که ممکن است برای برنامه‌های کاربردی در مقیاس بزرگ مشکل‌ساز باشد. بررسی تغییرات هندسی منجر به این فرض شده است که انرژی آزاد شده وابسته به ضخامت و انحنای اولیه لوب است.

۵. نتیجه گیری و جمعبندی

«بیومکانیک» واژه‌ای مرکب از bio به معنی زیست و زندگانی و mechanic به معنی (افزارگر) یا کارکننده یا ابزار یا به عبارتی تعمیرکار است که به معنی: (توان‌مندی بدنی در جهت نشان دادن هستی چیزهاست. یا به عبارتی «بیومکانیک» واژه‌ای مرکب، تشکیل یافته از دو کلمهٔ: (بیو) به معنی: طبیعت و (مکانیک) به معنی: عمل و کارکرد یک ماشین است. این واژه در جمع به معنی (طبیعت عمل) است. می‌توان بیومکانیک را از دیدگاه هنری نوعی «ریاضت و زیبایی‌شناسی فیزیکی» دانست که سعی دارد تا به طبیعت عمل یا در واقع همان «ریشهٔ چیزها» دست یابد. بیومکانیک یعنی عمل نهفته و خلاصه‌شده برگرفته از هستی «چیزها». هر پدیده‌ای در هستی، یک «چیز» محسوب می‌شود؛ پس می‌توان به کمک تلاشی ریاضت‌گونه و بدنی «چیستی» یا «ماهیت» آن را متجلی کرد. بیومکانیک اعمالی است؛ خلاصه‌شده و درنهایت دقت و کنترل که هدفش «انتقال معنی یک احساس» یا «بیان احساسی نهفته در صحنه» است.

جنبش و حرکت در گیاهان به‌عنوان مثال، باز کردن و بسته شدن گل، برگرداندن برگ‌ها یا حرکات جذب طغیان در گیاهان گوشت‌خوار، بسیار کاربردی، قوی و قابل اعتماد است. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که جنبش‌های گیاهی نه تنها برای یک گروه جدید از ساختارهای متحرک در معماری بلکه برای بسیاری از کاربردهای دیگر در زمینه‌های مختلف فناوری برای مثال خودرو، هوا و فضاپیمای یا ماشین‌سازی با استفاده از راه‌حل‌های الهام‌زیست یا بیومیمتیک مورد استفاده قرار گیرد.

علاوه بر این ویژگی‌های ساختاری و عملکردی، که دلایل افزایش علاقه به راه‌حل‌های زیست‌الهام در ساخت و ساز ساختمان و بسیاری از زمینه‌های دیگر فناوری شده است، یک ویژگی دیگر هم به‌منظور برای درک علاقه خاص معماری به راه‌حل‌های الهام‌زیست باید در نظر گرفته شود: نوعی زیبایی‌شناسی بر اساس زیبایی جنبش‌های بیولوژیکی و کاربردی. در طی یک رویکرد بیومیمتیکی معمول که توسط دانشمندان و مهندسین هدایت می‌شود، انتقال قابل پیشبینی و قابل اعتماد کاربردهای بیومیمتیک اهمیت زیادی دارد. از سوی دیگر، در فرآیند طراحی معماری مبتنی بر هنر، ارزش‌های زیباشناختی زیست شناسی اغلب مشوقه‌ای برای انتخاب یک رویکرد الهام گرفته از زیست‌شناسی است. در بحث طراحی سازه‌های بیومیمتیک، نه تنها می‌توان از کاربردهای مواد موجود در طبیعت استفاده کرد، بلکه از زیبایی‌های آن‌ها هم می‌توان الهام گرفت. اولین توسعه موفق استفاده از رویکرد سخت در معماری الهام گرفته از طبیعت و رویکرد نرم طبیعت الهام، این دو رویکرد را با هم یکی کرده به نتایجی جالب توجه رسیده است که در مقاله به آن اشاره شده است.

(*) اعلام عدم تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافعی برای ایشان وجود نداشته است. (تعارض منافع به حالتی گفته می‌شود که منافع شخصی مادی یا غیرمادی نویسنده یا نویسندگان با نتایج پژوهش در تعارض باشد و این موضوع بر روند انجام پژوهش یا اعلام صادقانهٔ نتایج تأثیر بگذارد).

۶. منابع و ماخذ

۱. گنجعلی صفار، و علی بهنام والا (۱۳۹۹) تبیین جایگاه تکنولوژی پیشرفته و بیومکانیک در معماری با تاکید بر تحلیل آثار سانتیاگو کالاتراوا، نشریه بوطیقای معماری، سال دوم، شماره ۷.

۲. محمودی نژاد، هادی (۱۳۹۹) بیومکانیک در معماری، تهران: انتشارات طحان.

۳. محمودی نژاد، هادی (۱۴۰۱) مکانیک و مگارتونیک در معماری، تهران: انتشارات دانشگاه پارس.

4. Antkowiak B,Mayer WE, EngelmannW(1991) Oscillations of the membrane potential of pulvinar motor cells in situ in relation to leaflet movements of *Desmodium motorium*. J Exp Bot 42:901–910
5. Ashida J (1934) Studies on the leaf movement of *Aldrovanda vesiculosa* L. I. Process and mechanism of the movement. Mem Coll Sci Kyoto Imp Univ Ser B9:141–244
6. Bailey T, McPherson S (2012) *Dionaea*. The Venus's Flytrap. Redfern Natural History Productions, Poole
7. bending & folding principles of plant leaves. to flexible kinetic structures. Dissertation thesis, University of Stuttgart
8. Böhm J, Scherzer S, Krol E et al (2016) The Venus flytrap *Dionaea muscipula* counts prey-induced action potentials to induce sodium uptake. Curr Biol 26:1–10
9. Braam J (2005) Plant responses to mechanical stimuli. New Phytol 165:373–389
10. Burgert I (2006) Exploring the micromechanics of plant cell walls. Am J Bot 93:1391–1401
11. Burgert I, Fratzl P (2009) Actuation systems in plants as prototypes for bioinspired devices. Phil Trans R Soc A 367:1541–1557
12. Campbell NA, Garber RC (1980) Vacuolar reorganization in the motor cells of *Albizzia* during leaf movement. Planta 148:251–255
13. Colombani M, Forterre Y (2011) Biomechanics of rapid movements in plants: poroelastic
14. Cross A (2012) *Aldrovanda*. The Waterwheel Plant. Redfern Natural History Productions, Poole
15. Darwin C (1865) On the movements and habits of climbing plants. Bot J Linn Soc 9:1–18
16. Fathi, Daneshjoo, Melchers, 2006Simulation of rigid origami. In: Lang R, Peters AK (eds) Origami 4: the fourth international conference on origami in science, mathematics, and education, vol 4. A K Peters Limited, Natick, pp 175–187
17. Keijzer CJ, Hoek IHS, Willemse MTM (1987) The processes of anther dehiscence and pollen dispersal. III. The dehydration of the filament tip and the anther in three monocotyledonous species. New Phytol 106:281–287
18. Kobayashi H, Kresling B, Vincent JFV (1998) The geometry of unfolding tree leaves. Proc Roy Soc B 265:147–154
19. Lee H, Xia C, Fang NX (2010) First jump of microgel; actuation speed enhancement by elastic instability. Soft Matter 6:4342–4345

20. Lienhard J, Schleicher S, Poppinga S et al (2011) Flectofin: a hinge-less flapping mechanism inspired by nature. Bioinspir Biomim 6:045001
21. measurements at the cell scale. Comput Method Biomec 14:115–117
22. Mitani J, Iagarshi T (2011) Interactive design of planar curved folding by reflection. In: Pacific conference on computer graphics and applications, Kaohsiung, Taiwan, 21–23 September 2011
23. Müller L (1933) Über den Bau und die Entwicklung des Bewegungsmechanismus von *Physostegia virginiana*. Planta 18:651–663
24. Niklas KJ (1992) Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function. The University of Chicago Press, Chicago
25. Poppinga S, Haushahn T, Warnke M et al (2015) Sporangium exposure and spore release in the Peruvian maidenhair fern (*Adiantum peruvianum*, Pteridaceae). PLoS One 10:e0138495
26. Poppinga S, Joyeux M (2011) Different mechanics of snap-trapping in the two closely related carnivorous plants *Dionaea muscipula* and *Aldrovanda vesiculosa*. Phys Rev E 84:041928
27. Poppinga S, Masselter T, Speck T (2013) Faster than their prey: new insights into the rapid movements of active carnivorous plants traps. BioEssays 35:649–657
28. Schleicher S (2015) Bio-inspired compliant mechanisms for architectural design. Transferring
29. Speck T, Knippers J, Speck O (2015) Self-x-materials and -structures in nature and technology: bio-inspiration as driving force for technical innovation. Archit Design 85:34–39
30. Velasco R, Brakke AP, Chavarro D (2015) Dynamic façades and computation: towards an inclusive categorization of high performance kinetic façade systems. In: Celani G, Sperling DM, Franco JMS (eds) Computer-aided architectural design futures. The next city, vol 527, New technologies and the future of the built environment. Springer, Berlin/Heidelberg, pp 172–191
31. Weintraub M (1952) Leaf movements in *Mimosa pudica* L. New Phytol 50:357–582
32. Williams SE, Bennett AB (1982) Leaf closure in the Venus flytrap: an acid growth response. Science 218:1120–1122
33. Xu L., 2002 the role of action potentials in the control of capture movements of *Drosera* and *Dionaea*. In: Skoog F (ed) Plant growth substances 1979 – Proceedings of the 10th international conference on plant growth substances. Madison, Wisconsin, pp 470–480

چکـــــــیده

Shahab Ilka-*Department of Architecture, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran*
Shahin Ilka- *Department of Architecture, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran*

Analysis of biomechanics and adaptive mechanism in plants in architecture with Finite Element Method (FEM) case study: Venus Flycatcher

Abstract

"Biomechanics" is the use of mechanical principles in biological systems such as humans, animals, plants, organs, and cells. The term biomechanics was developed at the beginning of the 1970s, which describes the use of mechanical engineering in biological and medical engineering systems and is currently being used in architecture. The movements and biomechanics of plants can inspire flexible systems for architectural purposes, which can be recognized as ideal solutions with robust biological functionality with delicate natural movement. In this article, a brief overview of the different adaptive mechanisms available in techniques and in plants is presented and then described. In this research, the relationship between architecture and plant biomechanics between biologists, architects, and civil engineers, where there were aesthetic movements or patterns inspired by plants, was analyzed and used in biological technical structures for sustainable architecture. Has been taken The research method is "descriptive-analytical" and the computer simulation and analysis method of carnivorous plants, and here Venus flies. The results of the research are movement principles obtained from quantitative biomechanical and functional-morphological analyses, as well as their simulation and abstraction using the example of finite element methods, and at the end, a type of plant modeling Reference is made.

Key words: *biomechanics, adaptation in plants, kinematic and morphological analysis, Venus flytrap.*

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the BOTHIGHA Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License.

نحوه ارجاع به مقاله:

ایلکا، شهاب. شاهین. ایلکا. (۱۴۰۲) تحلیل بیومکانیک و مکانیسم سازگار در گیاهان در معماری با روش عناصر محدود (FEM)، موردپژوهی: ونوس مگس‌خوار، ۳(۱۰)، ۴۳-۶۲.

DOI: 10.52547/ijba.10.3. 3
DOR: 20.1001.1.28212398.1402.4.3.3.3
URL: www.ijba.ir/fa/downloadpaper.php?pid=149&rid=18&p=A