صفحات ۶۷ - ۸۰
نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی ● دوره ۲۰ ● شماره ۱ ● بهار ۱۳۹۴

بهره‌گیری از الگوهای طبیعت برای طراحی ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو در معماری

محمد رضا متینی*
دکترای معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه اشتوتگارت، آلمان.
(تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۷/۱۴، تاریخ پذیرش نهایی: ۹۳/۱۱/۱۳)

چکیده

به طور معمول بخش مهمی از تغییرات در معماری از طریق ساختارهای تغییرپذیر ممکن می‌گردند. این گونه ساختارها عموماً از مصالحی سخت یا نرم یا ترکیبی از این دو تشکیل شده‌اند، اما توسعهٔ مصالح جدید در عرصهٔ معماری، امکان بهره‌گیری از اجزای انعطاف‌پذیر و خم‌شو را نیز در سال‌های اخیر فراهم نموده است. این گونه ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو، برتری‌هایی نسبت به ساختارهای تغییرپذیر معمول داشته که از مهم‌ترین آنها سادگی، سبکی، نیاز به اجزای الحاقی کمتر و قابلیت بازگشت‌پذیری ساده‌تر به فرم اولیه می‌باشد. نو بودن این گونه سازه‌ها باعث گردیده پاسخ به بسیاری از مسایل و سؤالات مربوط به آنها، مطالعه و پژوهش‌های جدیدی را طلب کند که یکی از مهم‌ترین این سؤالات به مکانیزم‌های مناسب برای تغییرپذیری آنها مربوط می‌شود. در این مقاله سعی شده تا با رویکردی بایونیکی به یافتن پاسخ‌هایی ملهم از طبیعت برای مکانیزم‌های مولد تغییر فرم در این سازه‌ها پرداخته شود. در این مسیر با به‌کارگیری فرایندی سلسله مراتبی و علمی، سعی به یافتن الگوهایی مناسب از طبیعت، استخراج ایده‌ها از این الگوها و ارایهٔ مثال‌هایی عملکردی در معماری با ایده‌های به‌دست آمده شده است. در این مسیر دو روش برای انتقال قوانین طبیعت به معماری پیشنهاد گردیده که این روش‌ها می‌توانند در بسیاری از رویکردهای بایونیکی مشابه نیز استفاده داشته باشند.

واژه های کلیدی
ساختارهای تغییرپذیر، سازه‌های خم‌شو، بایونیک، الگوهای هندسی، مدل‌های فیزیکی، فرایند بالا به پایین.

*تلفکس: ۶۶۴۰۹۶۹۶-۰۲۱، E-mail: matini@yazd.ac.ir.

مقدمه

بهره‌گیری از ساختارهای تغییرپذیر در معماری از گذشته‌های دور سابقه داشته و در قالب کاربری‌ها و فرم‌های مختلف مورد استفاده بوده است. درمعماری دهه‌های اخیر، با رشد و توسعهٔ فن‌آوری‌های نوین، بهره‌گیری از این گونه ساختارها گسترش بسیار وسیع تری پیدا نموده و قابلیت‌های زیادی را نیز برای بهره برداری هر چه بیشتر و متنوع تر از فضاهای معماری فراهم نموده است. ساختارهای تغییرپذیر ممکن است به صورت موضعی، بخشی از اجزای سازندهٔ فضاهای معماری را تشکیل داده و یا به صورت جامع سازندهٔ کل فضا باشند. جداره‌های قابل باز و بسته‌شدن که به‌عنوان تفکیک کنندهٔ فضاهای داخلی عمل می‌کنند، پوشش‌های خارجی نما که برای تنظیم نور، دید و یا جلوهٔ بصری تغییر می‌کنند و همچنین سقف‌های تغییرپذیری که فضاهای باز زیر خود را از تغییرات جوی حفظ می‌کنند، مثال‌هایی از ساختارهای تغییرپذیر موضعی در یک بنا می‌باشند. از نمونه‌های ساختارهای تغییرپذیر جامع نیز می‌توان ساختمان‌های سیاری که به‌خاطر تسهیل در حمل و نقل در فضایی کوچک جمع شده و در محل مورد نیاز گسترده و مورد استفاده قرار می‌گیرند را نام برد.

براساس آنچه فرای اتو[1] در دههٔ هفتاد در کتاب *سقف‌های تغییرپذیر* ارایه کرده (Otto ,1972 ,44) که قابل تعمیم به سایر ساختارهای تغییرپذیر نیز می‌باشد، می‌توان آنها را از دو جنبه طبقه‌بندی نمود:

- طبقه‌بندی بر اساس ماهیت مصالح
- طبقه‌بندی بر اساس نوع و جهت حرکت

در طبقه‌بندی براساس ماهیت مصالح، تمامی ساختارهای تغییرپذیر در زیرمجموعهٔ ساختارهایی با مصالح نرم[2] یا سخت[3] و یا ترکیبی از این دو قرار می‌گیرند. در طبقه‌بندی بر اساس نوع و جهت حرکت، تمامی انواع حرکت‌ها اعم از تاشدن، دوران کردن، چین خوردن، لوله شدن و موارد دیگر به‌کمک عناصری لولایی برای ایجاد دوران یا تا شدن اجزای سخت و یا به‌کمک عناصری تلسکوپی و یا غلتک و ریلی از طریق سرخوردن اجزای نرم یا سخت صورت می‌گیرند.

هرچند بهره‌گیری از ساختارهای تغییرپذیر در معماری و همچنین بسیاری از حوزه‌های دیگر مانند طراحی صنعتی و مهندسی مکانیک در سدهٔ گذشته میلادی تحول زیادی پیدا نموده، اما تا اوایل سدهٔ اخیر این گونه ساختارها از نظر ماهیت مصالح و جزییات عناصر سازنده مشابه طبقه‌بندی فوق بوده و تغییر خاصی پیدا نکرده است.

تحولات سدهٔ اخیر در تولید مصالحی نو، پیشرفت‌های عظیم مربوط به علوم کامپیوتر، ظهور فرم‌های جدید در معماری و گسترش پژوهش‌های ملهم از طبیعت در زیرعنوان بایونیک که در اثر حمایت صنایع مختلف از آن رشد قابل توجهی پیدا نموده، زمینه‌ساز نوآوری‌های مهمی در ارتباط با ساختارهای تغییرپذیر گردیده است. بهره‌گیری از مصالح خم‌شو[4] به‌جای مصالح سخت یا نرم، قابلیت‌های جدیدی را برای ساختارهای تغییرپذیر ایجاد می‌کند که باعث شده این ساختارها با حداقل نیاز یا حتی حذف اعضای لولایی و یا غلتکی به تنهایی بتوانند تغییر فرم داده و بسیاری از حرکت‌های مختلف را برای سازه ممکن سازند. در واقع این گونه ساختارها نه آنقدر نرم و فرم پذیرند که برای حفظ فرم خود نیاز به سازه‌ای جانبی داشته باشند و نه آنقدر سخت هستند که برای تغییر فرم نیازمند عناصری لولایی یا غلطکی باشند.

وجود مثال‌های بی شماری در طبیعت و به طور خاص در گیاهان و جانوران (خصوصاً بی مهرگان) برای تغییرپذیری‌های خم‌شو، محققین این حوزه را برآن داشته تا با الهام و الگوبرداری از قوانین طبیعت در رابطه با ویژگی‌ها و مکانیزم تغییرفرم بدن این موجودات، به الگوها و طرح‌هایی نو در ساختارهای تغییرپذیر دست یابند. البته لازم به ذکر است که این حوزه هنوز در مراحل اولیه و مقدماتی بوده و دستیابی به الگوهایی کارآمد که در عمل جایگزین ساختارهای موجود گردند، نیازمند بسیاری از آزمایش‌ها و تجربیات تکمیلی بوده که در حال حاضر در جریان می‌باشد.

این مقاله با توجه به اطلاعات محدودی که در رابطه با سازه‌های خم‌شو و همچنین ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو وجود دارد، در ابتدا به ارایهٔ تاریخچه و معرفی نوآوری‌های معاصر در رابطه با سازه‌های خم‌شو پرداخته و سپس ریشه‌های شکل‌گیری ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو را معرفی می‌کند. در ادامه و در بخش اصلی این مقاله، مراحل الگوبرداری از طبیعت برای دستیابی به چند نمونه از ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو در معماری معرفی می‌گردد. در پژوهش‌هایی با رویکرد بایونیک که برای یافتن پاسخ سؤالات فنی به مثال‌های طبیعت رجوع می‌شود، یکی از مهم‌ترین و چالش برانگیزترین قسمت‌های پژوهش، به روش انتقال الگوها از طبیعت به حوزهٔ مورد نظر ارتباط پیدا می‌کند که در این مقاله سعی شده دو روش برای انتقال قوانین طبیعت به الگوهای قابل استفاده در معماری که توسط نگارنده در این زمینه انجام گرفته، توضیح داده شود.

۱. تاریخچهٔ سازه‌های خم‌شو

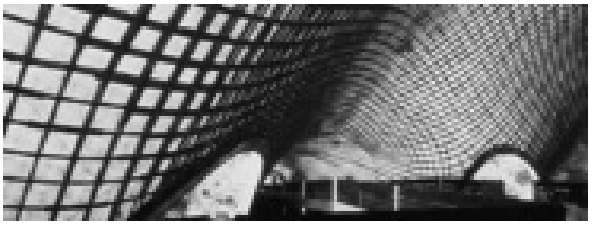
در ابتدا بهتر است عناصر خم‌شو به درستی معرفی شوند تا در مقایسه با سایر عناصری که به شکل خم شده برش خورده و یا در فرایند تولید به شکل خم‌شده درآمده، اما پس از یافتن این فرم هیچ تنشی در آنها ذخیره نمی‌گردد، قابل تشخیص و تمایز باشند. منظور از سازه‌های خم‌شو در اینجا آنهایی هستند که از عناصری الاستیک تشکیل شده‌اند. این عناصر در اثر وارد شدن

نیرو به شکل منحنی درآمده و درصورت حذف نیرو به خاطر تنشی که در آنها ذخیره شده است، می‌توانند فرم اولیه خود را به‌طور کامل یا نسبی بازیابند. به بیانی دیگر می‌توان این نوع خم‌شدگی را نوعی خم شدن فعال[۵] نامید.

خم کردن عناصر انعطاف‌پذیر خطی یا صفحه‌ای به‌عنوان عاملی که می‌تواند این عناصر را ساده‌تر از روش‌های دیگر به فرم، مقاومت و یا قابلیت‌های مورد نظر سازندگان یک فضا تبدیل کند، از گذشته و به طور خاص در معماری بومی کشورها و فرهنگ‌های مختلف معمول بوده است. این گونه سازه‌های خم‌شو از نظر تاریخی عمدتاً یا در مناطقی یافته شده‌اند که چوب‌های در دسترس بطور خاص چوب‌های نرم[۶] بوده و یا در فرهنگ‌هایی که فن آوری برش قطعات بزرگ الوار در آنها توسعه نیافته بوده است. به این ترتیب استفاده از این گونه سازه‌های سبک برای آنها راه حلی عملی و اقتصادی بوده است(Oliver, 2007, 652). این عناصر سازه‌ای انعطاف‌پذیر که عمدتاً از چوب‌های نرم، نی و یا بامبو تشکیل می‌شده در عین قابلیت خم‌پذیری مناسب از ایستایی کافی و همچنین مقاومت بالا در برابر شکستن برخوردار بوده‌اند (تصویر۱).

پس از انقلاب صنعتی و به طور خاص در قرن بیستم، فولاد و بتن مسلح، سازهٔ ساختمان‌ها را متحول نموده و به مصالح اصلی در معماری تبدیل گردیدند. معماران تحصیل کرده به تدریج جایگزین معماران تجربی شده و با ورود مهندسین سازه‌ای که اکثراً محاسبه و تعیین جزییات فنی اسکلت بناها به کمک تئوری‌های ساده شدهٔ استاتیکی را به عهده گرفته بودند، مجموعه‌ای ازگونه‌های هندسی و سازه ای، اساس بیشتر شیوه‌های معماری قرن نوزدهم و بیستم میلادی گردید.

تصویر۱- سازهٔ خم شو از جنس بامبوهای دسته شده مربوط به فضای عمومی روستایی در گینهٔ نو.
مأخذ: (Rudofsky, 1987,127)



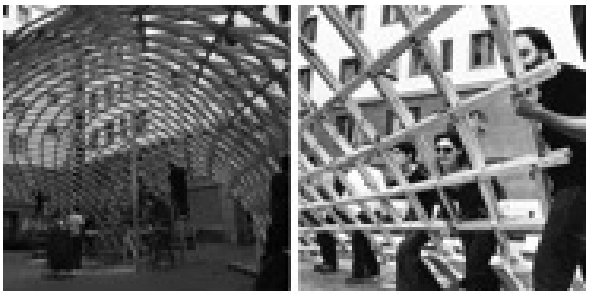
تصویر۲- سقف شبکه‌ای از جنس چوب‌های خم شدهٔ سالن چند منظورهٔ مانهایم، ساخته شده در ۱۹۷۴.
مأخذ: (Otto,1995,142)

گونه‌هایی که برای کنترل پیچیدگی‌های فنی موثر بوده، اما در عین حال خصوصیات هندسی و سازه‌ای را نیز محدود می‌کردند. بدین ترتیب تا مدت‌ها قوانینی بر سازهٔ ساختمان‌ها حاکم گردید که تغییر فرم یا به عبارتی خیز[۷] عناصر سازه‌ای را به عنوان نکته‌ای منفی معرفی می‌کرد و در نتیجه بکارگیری سازه‌های خم‌شو تقریباً از صحنهٔ معماری حذف گردید. در این میان فقط افراد محدودی مانند ولادیمیر شوکوف[۸] و آنتونیو گائودی[۹] مسیری متفاوت را تجربه نموده و راه‌کارهای تعیین فرم سازه بر اساس مواد و نیروها را توسعه دادند. کار این افراد در محدودهٔ دههٔ پنجاه میلادی به علاقه و جهت‌گیری جدیدی توسط افرادی مانند باکمینستر فولر[۱۰]، فلیکس کاندلا[۱۱]، هاینس ایزرل[۱۲] و فرای اتو منتهی گردید که متمرکز قوانین سازه‌های سبک بودند. گروه‌های معمار و مهندسین سازهٔ تحت مدیریت این افراد، با پژوهش‌های میان رشته‌ای خود در توسعهٔ مبانی مربوط به یافتن شکل سازه بر اساس نیرو و نوع مصالح کوشیدند که حاصل این پژوهش‌ها، دستیابی به روش‌هایی برای فرم یابی[۱۳] سازه گردید. به این ترتیب بهره‌گیری از مصالح سنتی خم‌شو مانند چوب نرم و بامبو معنای جدیدی در معماری پیدا نمود(Gaβ, 1985).

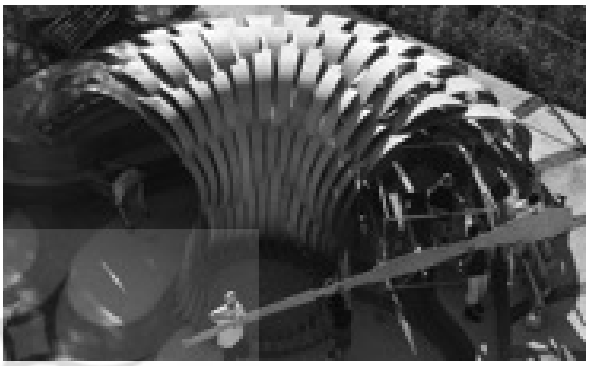
با صرف زمان و تلاشی عظیم برای فرم یابی، طراحی و تعیین جنبه‌های مهندسی پروژه‌هایی رویایی مانند سالن چندمنظورهٔ مانهایم[۱۴] در ۱۹۷۴ و چند پروژهٔ اولیهٔ دیگر، بهره‌گیری از سازه‌های خم‌شو وارد مرحلهٔ نوینی از زندگی خود گردید (تصویر۲). هرچند تا همین اواخر، فقدان روش‌های مهندسی برای فرم‌یابی و تحلیل سازه‌ای این گونه ساختارها مانع توجه و گسترش آنها بوده است(Lienhard, 2013 -a, 188; Gengnagel, 2013, 365).

به موازات توسعهٔ سازه‌های سبک در محدودهٔ دههٔ پنجاه میلادی، پلیمرها یا پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف[۱۵] به صورت گسترده‌ای شناخته شده و قابلیت‌های منحصر به فرد آنها در برخورداری از مقاومت بالا در عین انعطاف‌پذیری مورد توجه بسیاری قرارگرفت. صنایع تولیدکنندهٔ وسایل ورزشی، یکی از گروه‌هایی بودند که به سرعت متوجه قابلیت‌های مطلوب این گونه پلاستیک‌های مسلح گردیدند و از انعطاف‌پذیری آنها در تولید محصولاتی از قبیل راکت‌های تنیس، دستهٔ گلف، نیزهٔ پرش و میلهٔ چادرهای سفری بهره بردند. اما در معماری، استفاده از این گونه مصالح، بیشتر در جهت خلق فرم‌های آزاد[۱۶]، کمک به تولید محصولات مدولار صنعتی، ساخت محصولات مقاوم در برابر خوردگی و انتقال جریان برق به کار گرفته شده و تا سال‌های اخیر کمتر به ویژگی خم شدن فعال آن توجه گردیده است.

بهره‌گیری از سازه‌های خم‌شو در سدهٔ معاصر میلادی به‌خاطر دلایل اقتصادی، پیشرفت‌های صنعتی و فنی، قابلیت‌های فرمی و همچنین توسعهٔ روش‌های تحلیل رفتار غیر خطی سازه، توجه مراکز پژوهشی معماری و سازه را به خود جلب نموده و ساخت مدل‌های آزمایشی و پاویون‌های تحقیقاتی توسط این مراکز نشان‌دهندهٔ این امر می‌باشد (تصاویر ۳ و ۴).



تصویر۳- مراحل شکل دهی به سقف شبکه‌ای چوبی خم‌شوی تولدو در حیاط دانشکدهٔ معماری شهر ناپل در سال ۲۰۱۱.
مأخذ: (Pone, 2012)



تصویر۴- پاویون پژوهشی ICD/ITKE متشکل از تخته‌های چند لایهٔ خم شده واقع در فضای باز مجاور دانشکدهٔ معماری دانشگاه اشتوتگارت مربوط به سال ۲۰۱۰.
مأخذ: (URL1)

در کنار مطالعاتی که بیشتر به جنبه‌های مختلف اجرایی و فنی استفاده از عناصر خم‌شو متمرکز گردیده، در سال‌های اخیر ایدهٔ بهره‌گیری از این عناصر در ساختارهای تغییرپذیر نیز به شکل‌های متفاوت و در حوزه‌های مختلف توجه بعضی از پژوهش‌گران را به خود جلب نموده است. معماری نیز یکی از این حوزه‌ها را شامل می‌شود. در بخش بعدی این مقاله، به زمینه‌ها و عوامل شکل‌گیری و همچنین معرفی نمونه‌های مهمی از ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو که با الهام ازطبیعت ساخته شده‌اند، می‌پردازیم.

ریشه‌های شکل‌گیری ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو

همان طور که در مقدمه هم به آن اشاره شد، عناصری مانند لولا، غلتک و ریل در ساخت اکثر ساختارهای تغییرپذیر معمول نقشی کلیدی را بازی می‌کنند. به کمک این عناصر است که تغییر شکل سازه امکان‌پذیر می‌شود و با فرسودگی، آسیب دیدگی و خرابی آنها، تغییرپذیری دچار مشکل یا توقف می‌گردد. به بیان دیگر می‌توان گفت سایر اجزاء ساختاری که عناصری سخت یا نرم هستند، نقشی در تغییر شکل سازهٔ تغییرپذیر بازی نمی‌کنند. حال اگر به‌جای عناصر سخت یا نرم از عناصری خم شو استفاده شود، ساختار تغییرپذیر قابلیت‌های جدیدی را پیدا می‌کند که در ادامه معرفی گردیده‌اند:

• نیاز به عناصر لولایی یا غلتکی تا حد امکان کم شده و یا این عناصر حذف می‌گردند، زیرا بخش یا کل تغییرپذیری ساختار به عهدهٔ عناصر خم‌شو خواهد بود. به این ترتیب کل اجزای ساختاری در فرایند تغییر شکل دخیل بوده و به صورت سیستمی یکپارچه عمل می‌کنند[۱۷].

• مشکلات ساختارهای تغییرپذیر فعلی که در اثر آسیب دیدگی یا فرسودگی تجهیزات لولایی یا غلتکی پدید می‌آید، تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

• انرژی که هنگام بسته شدن ساختار درسیستم ذخیره می‌شود، به گسترده شدن و بازگشت به فرم اولیه آن کمک می‌کند.

با کاهش یا حذف عناصر لولایی یا غلتکی، پیچیدگی سیستم کاهش یافته و بدین ترتیب برای تغییر فرم به مکانیزم ساده تری نیاز خواهد بود.

• تغییرپذیری با قابلیت‌های هندسی جدید و متنوع تری امکان‌پذیر می‌گردد و به این ترتیب هماهنگی با فرم‌های آزاد بناهای جدید آسان تر خواهد بود (Schleicher, 2011).

• توسعهٔ ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو را می‌توان تحت تأثیر چند عامل دانست. هریک از این عوامل از جهتی خاص بر روی آن موثر بوده که در ادامه بیان گردیده است.

۱.۳. توسعهٔ صنعتی پلیمرهای تقویت شده با الیاف

پلیمرهای تقویت شده با الیاف و به‌طور عمده فایبرگلاس[۱۸] و فایبر کربن[۱۹]، در شکل‌گیری و تکامل ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو نقش مهمی داشته است. البته باید توجه کرد که بعضی از این نوع پلیمرها به‌خاطر هزینهٔ مواد اولیه یا فرآیند صنعتی خاص تولیدشان، از قیمت بالایی برخوردار می‌باشند. شاید بتوان گفت این امر یکی از عوامل مهمی بوده که این مصالح در ابتدا در حوزه‌هایی مانند مهندسی هوافضا که هزینهٔ طرح و مصالح در آن نقش ثانویه را بازی می‌کند، مورد توجه قرار گرفته و پس از آن به حوزه‌های دیگر از جمله معماری گسترش یافته‌اند. یکی از قدیمی‌ترین نمونه‌های بهره‌گیری از فایبر کربن‌ها در ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو در صنعت هوافضا به مطالعهٔ دیرک‌ها و لوله‌های خم‌شو در دههٔ ۶۰ میلادی مربوط می‌شود (Gertsma,1965; Crawford,1971). این مطالعات در سدهٔ اخیر به توسعهٔ پوسته‌های خم‌شو برای ساخت آنتن‌های بازتاب‌کنندهٔ فوق‌نازک قابل گسترش[۲۰] منتهی شده‌است (Tan,2004).

۲.۳. توسعهٔ علم بایونیک[۲۱] و الگوبرداری از موجودات طبیعت

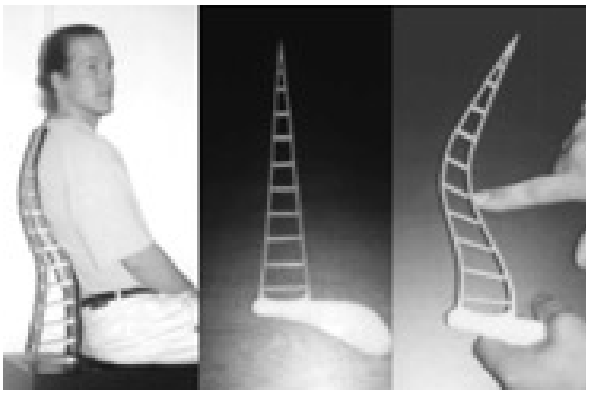
الهام از اصول نهفته در پدیده ها، سیستم‌ها و موجودات طبیعت برای به‌کارگیری در فن آوری‌های مورد نیاز در زندگی انسان، از گذشته‌های دور وجود داشته اما در دهه‌های اخیر شکل منسجم و روش مندی به خود گرفته است و در زیر عنوان بایونیک در مجامع علمی و مراکز پژوهشی و دانشگاهی بدان پرداخته می‌گردد. در ارتباط با ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو نیز الگوبرداری از طبیعت باعث شکل‌گیری و یا تکامل بعضی از ایده‌های جدید گردیده که در اینجا به بعضی از آنها اشاره می‌شود.

سازه‌های قابل گسترش در صنعت هوا فضا به صورت‌های مختلف کاربرد دارد. سلول‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر و قابل‌گسترش (بادبان‌های خورشیدی[۲۲]) و یا بازتاب‌کننده‌های خورشیدی، نمونه‌هایی از این سازه‌ها می‌باشند. در ساخت اینگونه تجهیزات، داشتن حداقل وزن، گسترده شدن در بزرگ‌ترین ابعاد، جمع‌شدن در کوچک‌ترین فضا و استفاده از حداقل انرژی برای گسترش، از خصوصیات عمده‌ای است که باید مورد توجه قرار گیرد. در این رابطه و با مشاهدهٔ سیستم ذخیرهٔ انرژی در فرایند لوله شدن دم آفتاب‌پرست توسط ماهیچه‌های آن، متخصصین مرکز هوافضای آلمان[۲۳] به توسعهٔ لوله‌هایی از جنس فایبرکربن که قابلیت خم و لوله شدن داشته دست یافته‌اند که این عناصر پس از رها شدن می‌توانند به کمک انرژی ذخیره شدهٔ خود باز و عنصری بسیار مقاوم و طویل را بعنوان سازهٔ بادبان‌های خورشیدی تشکیل دهند (Sickinger, 2005).

مثال دیگری که از طبیعت می‌توان مطرح نمود، قابلیت خاصی است که دم بعضی از ماهی‌ها از خود نشان می‌دهند. در سال ۱۹۹۷ شخصی به نام لایف کنیز[۲۴] به کشف خاصی درباره دم ماهی فلوندر[۲۵] دست یافت. او مشاهده کرد که با فشار عمودی بر سطح دم این ماهی، انتهای آن در جهت مخالف نیرو خم می‌شود. با مطالعهٔ این پدیده به‌کمک مدل‌هایی از ساختار دم ماهی در مرکز تحقیقات اولوگیس[۲۶] در برلین، قانون نهفته در پشت این ویژگی کشف و پس از توسعهٔ آن به نام Fin Ray Effect® به ثبت رسید. این ویژگی در واقع نشان‌دهندهٔ مکانیزمی است که بدون نیاز به خم کردن کل یک ساختار خم شو فقط با وارد کردن نیرو به بخشی از آن می‌توان باعث تغییر شکل سایر قسمت‌ها شد (تصویر ۵).

با استفاده از مکانیزم بدست آمده از دم ماهی، اکنون ایده‌های مختلفی برای ساخت پشتی صندلی‌های هماهنگ شونده با فرم بدن، گیره‌های حمل قطعات حساس در کارخانه‌ها، پانل‌های تغییرپذیر در معماری داخلی، گلایدرهای زیردریا (URL2) و بسیاری از ساختارهای تغییرپذیر خم‌شوی دیگر در حال توسعه و تکامل می‌باشند.

به‌عنوان مثالی دیگر از سازه‌های خم‌شوی ملهم از طبیعت،



تصویر۵- ساختار هندسی الهام گرفته از اثر باله ماهی (Fin Ray Effect®) و یکی از موارد استفاده از آن.
مأخذ: (Fischer, 2002)

می‌توان به مکانیزم تا شدن بدون لولا که به نام فلکتوفین[۲۷] در سال ۲۰۱۱ ثبت شده است، اشاره نمود. این مکانیزم از قانون تغییر فرم غیر اختیاری[۲۸] گل مرغ بهشتی[۲۹] الهام گرفته شده. ساختار این گل به صورتی می‌باشد که برای گرده‌افشانی باید دریچهٔ مخزن میله‌ای بر روی گل باز شود. این بخش با واردشدن نیرویی بر روی آن که غالباً در اثر نشستن یک پرنده ایجاد می‌شود خم شده و با این خم شدن دریچهٔ مخزن گرده باز می‌شود. با بررسی و شناخت ویژگی هندسی موجود در این گل، ایدهٔ فلکتوفین در انستیتوی سازهٔ دانشگاه اشتوتگارت[۳۰] شکل می‌گیرد. با استفاده از مکانیزم تاشدن بدون لولا و بهره‌گیری از ویژگی خیزناشی از انعطاف‌پذیری جسم می‌توان تنوع اجزای سازندهٔ یک ساختار خم‌شو را کاهش داد. فلکتوفین می‌تواند در حوزه‌های معماری، هوافضا، پزشکی، مهندسی مکانیک و موارد دیگر کاربرد داشته باشد. استفاده‌ای که توسط مبتکرین این ایده در معماری پیشنهاد گردیده سایه‌بان‌های تغییرپذیر پوششی برای نمای ساختمان‌ها (خصوصاً ساختمان‌های با فرم آزاد) می‌باشد (تصویر۶) (Lienhard, 2012).

۳.۳. توسعهٔ روش‌های شبیه‌سازی کامپیوتری

توسعه‌های اخیر ابزار مختلف شبیه‌سازی کامپیوتری، یکی دیگر از عواملی است که توانسته بعضی از ویژگی‌های مربوط به تغییرپذیری سازه‌های خم‌شو را قابل پیش‌بینی نماید. این امر، پایه‌های اکتشافات مختلف در ارتباط با خصوصیات تغییرپذیری شبکه‌ها و پوسته‌های خم‌شو یا ترکیبی از پوشش‌های غشایی و اعضای خم‌شو را فراهم نموده است. هرچند این گونه سازه‌ها از اجزایی تشکیل شده‌اند که تحت تأثیر تنش باقی ماندهٔ داخلی در آنها، رفتار و قابلیت تحمل نیروی‌شان تغییر یافته و از این جهت با سازه‌های معمول قابل مقایسه نیستند. از طرف دیگر، خیزی که در اثر وارد شدن نیرو بر آنها وارد می‌شود، بسیار زیاد می‌باشد. به همین دلایل هنوز در فرایند فرم‌یابی آنها به مدل‌های فیزیکی رجوع می‌شود. به‌عنوان مثالی از بهره‌گیری شبیه‌سازی‌های کامپیوتری می‌توان به مطالعهٔ تاثیر تغییر مقیاس در ماهیت سازه‌های خم‌شده به‌کمک نرم افزار سافیستیک[۳۱] به روش اجزای محدود[۳۲] را اشاره نمود (Lienhard, 2013-b).

تصویر۶- نمای تغییرپذیر تماتیک پاویون (Thematic Pavilion) در اکسپو ۲۰۱۲ در شهر یئوسو در کرهٔ جنوبی که توسط شرکت سازه‌ای کنیپرز-هلبیگ (Knippers Helbig Advanced Engineering) توسعه یافته است. این نما بطور غیرمستقیم ملهم از مکانیزم فلکتوفین است اما در جزییات با آن تفاوت‌هایی دارد.
مأخذ: (Lienhard, 2012)

روش‌های انتقال قوانین طبیعت به ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو در معماری

الهام از الگوهای طبیعت به عنوان یکی از عوامل مهمی که در سال‌های اخیر در توسعهٔ ساختارهای تغییرپذیر خم شو تأثیرگذار بوده باعث گردید تا در بخشی جدا در این مقاله به آن پرداخته شده و به طور دقیق‌تری فرایند انتقال قوانین طبیعت به طرح این گونه ساختارها معرفی شود.

طبیعت منبعی بی‌انتها از الگوهای تغییرپذیری است. تغییراتی که برای رشد، تکامل، حرکت، سازگاری با تغییرات محیطی، حفظ امنیت، دگردیسی، تغییر شکل ظاهری و ... در بدن گیاهان و جانوران ایجاد می‌شود. منشأ شکل‌گیری این تغییرات، درونی بوده و خود این موجودات در ایجاد آن موثر هستند. اما بسیاری از تغییرات نیز در اثر وارد شدن عاملی خارجی بوجود می‌آیند، مانند تغییر فرم‌هایی که در اثر وارد شدن نیرو یا ضربه، تغییر رطوبت، گرما و یا عواملی از این قبیل ایجاد می‌شوند. هر دو نوع این حرکت‌ها می‌توانند به عنوان منبع الهام برای ما عمل کنند. در میان تغییرات مختلفی که در بالا به آنها اشاره شد، تغییر فرم بدن موجودات جایگاه ویژه‌ای دارند. تغییر فرم‌هایی که در بدن جانوران با منشأ داخلی ایجاد می‌گردد، در مهره داران به طور عمده باحرکت استخوان‌ها که اکثراً به صورت لولایی به هم متصل هستند، صورت می‌گیرد. اسکلت بدن بی‌مهره‌گان بر خلاف مهره داران، به صورت‌های دیگری تغییر فرم‌ها را ایجاد می‌کنند که در این میان، خم شدن اسکلت بدن یکی از الگوهای معمول می‌باشد. در گیاهان، اکثر تغییر فرم‌هایی که با منشأ داخلی صورت می‌گیرد، از نوع خم‌شو است. در بین تغییر فرم بدن جانوران یا گیاهان در اثر عوامل خارجی نیز نمونه‌های زیاد و متنوعی از الگوهای خم شو وجود دارد.

این الگوها قوانین مختلفی را برای الهام‌گیری ما ارایه می‌نمایند اما فرایند استخراج این قوانین و بهره‌گیری از آنها در جهتی که ما دنبال آن هستیم، نیازمند رویکردی علمی می‌باشد که طی مراحل مختلفی این الگوها به آنچه مطلوب ما است، تبدیل شوند. یکی از پژوهشگران مهم بین المللی در حوزهٔ بایونیک که در این رابطه فرایندهای مشخصی برای الهام‌گیری از طبیعت را معرفی نموده است، پروفسور توماس اشپک از دانشگاه فرایبورگ[۳۳] می‌باشد (Speck, 2008). ساختار کلی که در ادامهٔ بحث برای الهام‌گیری از طبیعت ارائه می‌گردد، بر اساس اصولی است که توسط اشپک مشخص شده است. البته این اصول قالبی بسیار کلی داشته تا برای بهره‌گیری رشته‌های مختلف در حوزهٔ بایونیک و در هر رشته و تخصصی با توجه به ماهیت، خصوصیات و اولویت‌های آن رشته خود را هماهنگ نماید. در ادامه ابتدا به معرفی این اصول پرداخته و پس از آن مسیری که در الهام‌گیری از طبیعت برای ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو مورد نظرمان بوده است، معرفی می‌شوند.

در تمامی مراحل، یک رویکرد بایونیکی که در یک طرف آن الگویی از طبیعت و در طرف دیگر آن محصولی قابل عرضه در حوزه‌ای خاص قرار دارد، همکاری نزدیک بین بایولوژیست‌ها با مهندسین، پژوهشگران و دانشمندان حوزه‌های دیگر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این گونه پژوهش‌های بین‌رشته‌ای، برای داشتن راه‌کاری روش مند در انجام پروژه‌های پژوهش و توسعه[۳۴] می‌توان دو رویکرد متفاوت را مشخص نمود که عبارتند از: "فرایند پایین به بالا[۳۵]" و "فرایند بالا به پایین[۳۶]".

۱.۴. فرایند پایین به بالا

نقطهٔ شروع این فرایند، نتایج جدید و الهام بخش پژوهش‌ها و مطالعات پایهٔ بایولوژیست‌ها می‌باشد. سایر مراحل این فرایند عبارتند از:

- تحلیل بایومکانیک و ریخت‌شناسی کاربردی یک سیستم بایولوژیکی
- درک دقیق‌تر و گسترده‌تر از اصول و قوانین پنهان در پشت شکل‌ها، کاربری‌ها و ساختارهای بایولوژیکی به کمک تجزیه و تحلیل‌های کمّی
- انتزاعی نمودن که در آن اصول و قوانین کشف شده از مدل بایولوژیکی جدا می‌گردند. این بخش از مهم‌ترین و دشوارترین مراحل می‌باشد زیرا باید بینش و شناخت عمیق اصول و قوانین طبیعت برای بهره‌گیری هرچه بهتر درکاربردهای فنی توسط افراد غیر بایولوژیست قابل درک شوند.
- گام نهایی، به مسایل فنی اجرا که در ابتدا در مقیاس آزمایشگاهی و سپس در مقیاس مهندسی و واقعی انجام می‌گیرد، می‌پردازد. در ادامه تکنیک و روش‌های تولید صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا محصولات الهام گرفته شده از طبیعت با توجه به اولویت‌ها و هزینه‌ها، بهینه، و وارد مراحل تولید گردند.

۲.۴. فرایند بالا به پایین

این فرایند به طور معمول با یک سؤال مهندسی برای توسعه یا بهبود محصولی صنعتی آغاز می‌گردد که در ابتدا باید مشکل فنی و شرایط پیرامونی آن به دقت تعریف گردد. مراحل بعدی این فرایند در ادامه آمده است:

- جستجوی الگوهایی از طبیعت که احتمال پاسخ به سؤال مطرح شده از طریق آنها وجود دارد. این مرحله با کمک و همکاری بایولوژیست‌ها انجام می‌شود. به طور معمول در این فرایند، غربال گری تعداد متفاوتی الگوی بایولوژیکی که بهترین شرایط را برای تولید ایده‌های پاسخگو به الزامات فنی سؤال مطرح شده را دارند، از طریق بایولوژیست‌ها و مهندسین ارایه می‌گردند.
- انتخاب یک یا دو نمونه از امیدوارکننده‌ترین راه حل‌های بایولوژیکی و تجزیه و تحلیل بیشتر و بررسی‌های تجربی کامل تر برای اطمینان از مناسب بودن نمونه‌های انتخابی.
- انتزاعی نمودن؛ که در این مرحله راه حل‌های یافته شده از الگوهای بایولوژیکی جدا می‌شوند.
- مرحلهٔ نهایی پس از انتقال موفقیت‌آمیز دانش برگرفته از طبیعت به حوزهٔ مهندسی، بررسی پتانسیل‌های پیاده سازی فنی، ارایهٔ پروتوتایپ‌های اولیه و آزمایش آنها توسط مهندسین

می‌باشد. در صورت موفقیت آمیز بودن آزمایش‌ها، محصول بدست آمده وارد مراحل تولید صنعتی می‌گردد.

البته فرایند بالا به پایین ممکن است در مراحل ذکر شدهٔ فوق به‌طور کامل خاتمه نیافته و چرخهٔ پژوهش‌های بایولوژیکی بعد از مراحل غربال گری اولیه، مجدداً برای چندین مرتبه تکرار شود. این امر گاهی اوقات برای تضمین یافتن یک الگوی مناسب بایولوژیکی که دارای اطلاعات موجود بیشتری بوده یا ما را به راه‌حل‌های بهتری هدایت کند، ضروری می‌باشد (Speck, 2008).

۳.۴. بهره‌گیری از فرایند بالا به پایین در انتقال مکانیزم‌های تغییرپذیری از طبیعت به ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو

آنچه در بالا به صورت دو فرایند انتقال ایده‌ها از طبیعت به حوزهٔ مهندسی بیان شد، از مطالعه و بررسی تجربیات مختلف در حوزهٔ بایونیک به‌دست آمده است. فرایندهای فوق، نشان‌دهندهٔ این نکته است که اولاً در یک پروژهٔ بایونیکی پژوهش و توسعه، مراحل مختلفی برای انتقال ایده‌ها از طبیعت به حوزهٔ مهندسی وجود داشته و ثانیاً لازمهٔ یک پروژهٔ موفق در این زمینه، ارتباط تنگاتنگ بایولوژیست‌ها با متخصصین حوزه‌های دیگر است. نکتهٔ دیگری که در اینجا می‌توان ذکر کرد، جزییات و راه‌کارهایی است که در هر یک از این مراحل به‌طور اختصاصی و با توجه به خصوصیات رشته و حوزهٔ مورد نظر باید تعیین گردد.

برای توسعهٔ ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو، سؤالات مختلفی مطرح می‌باشند که چند نمونه از مهم‌ترین آنها عبارتند از:

- ویژگی‌های مناسب مصالح سازندهٔ این گونه از ساختارها برای بدست آوردن بالاترین بهره وری چیست؟
- چه مکانیزم‌هایی برای تغییر فرم این گونه ساختارهای تغییرپذیر می‌توان درنظر گرفت؟
- چه تغییر فرم‌هایی توسط این گونه ساختارها امکان‌پذیر است؟
- مناسب‌ترین کاربردهای معماری این گونه ساختارها در کجاست؟

از بین سؤالات فوق برای پاسخ به سؤالات اول و دوم می‌توان مستقیماً به مثال‌های طبیعت رجوع کرد. پاسخ سؤال سوم و چهارم تا حدی وابسته به نتایج سؤال دوم بوده و شاید مراجعهٔ مستقیم به طبیعت نتواند راه‌کار مناسبی برای این دو سؤال باشد.

از میان سؤال‌های اول و دوم، سؤال اول ارتباط کمتری با رشتهٔ معماری داشته و فقط سؤال دوم به‌طور عمده به حوزهٔ معماری مربوط می‌شود. البته لازم به یادآوری است که برای انجام یک پروژهٔ کامل پژوهش و توسعهٔ بایونیکی در رابطه با ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو، علاوه بر نیاز به ارتباط نزدیک معماران و بایولوژیست‌ها، به همکاری نزدیک تخصص‌های دیگری از قبیل شیمی، مکانیک و سازه نیز نیاز می‌باشد. اما به هر حال در اینجا موضوعی با محوریت اصلی معماران در کار پژوهشی مورد نظر بوده است.

بنابراین سؤال فنی مطرح شدهٔ ما از طبیعت در رابطه با مکانیزم‌هایی است که می‌توانند باعث تغییر فرم ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو در معماری گردند. مسلماً فرایندی که در اینجا مورد استفاده قرار می‌گیرد، فرایند بالا به پایین خواهد بود.

در ادامه به تشریح مراحل مختلف این فرایند می‌پردازیم:

- **تعریف دقیق مسئله و مسایل پیرامونی آن:** براساس تعریفی که از مکانیزم در دایره المعارف بروکهاوس[۳۷] آمده است، مجموعه‌ای از اجزای مرتبط با یکدیگر که حرکت یک جزء باعث حرکت سایر اجزاء می‌گردد، یک مکانیزم نامیده می‌شود. حال با توجه به این تعریف می‌توان گفت آنچه ما در جستجوی آن هستیم، یافتن ترکیبی از اجزاء و عناصر در یک ساختار تغییرپذیر خم‌شو می‌باشد که با حرکت یک عضو، سایر اعضا به‌صورت یکپارچه خم‌شده یا به حالت اولیه بازگردند. البته با مطالعهٔ ساختارهای تغییرپذیر معمول می‌توان دریافت که فقط در بعضی از آنها (به عنوان مثال چترها)، با حرکت یک عضو می‌توان باعث تغییر فرم یکپارچهٔ سایر اعضا شد و در بعضی از نمونه‌های دیگر، این تغییرپذیری، وابسته به حرکت چند عضو می‌باشد.

بنابراین می‌توان موضوع مورد جستجو را بدین‌صورت تدقیق کرد که چه ترکیبی از اجزاء و عناصر در یک ساختار تغییرپذیر خم‌شو می‌تواند باعث شود با حرکت حداقل اعضا، سایر اعضا به‌صورت یکپارچه خم شده یا به حالت اولیه باز گردد؟ در اینجا منظور از ساختار خم‌شو، ترکیبی است از عناصر سازه‌ای و عناصر پوششی که بخش عمدهٔ عناصر سازه‌ای و ترجیحاً عناصر پوششی از جنس خم‌شو باشند.

- **جستجوی الگوهای مناسب در طبیعت:** مثال‌های مختلفی از تغییرپذیری خم‌شو با منشأ داخلی در میان جانوران یا گیاهان طبیعت وجود دارند که هر یک نشان‌دهندهٔ مکانیزمی خاص برای ایجاد این تغییرات می‌باشند. همچنین می‌توان به نمونه‌هایی از تغییرات خم‌شو با منشأ خارجی در طبیعت برخورد نمود که مکانیزم مخصوص به خود را دارا هستند. البته جزییات تخصصی این بخش به‌طور عمده در محدودهٔ کار بایولوژیست‌ها بوده ولی کلیات آن می‌تواند توسط سایر متخصصین نیز شناخته شود. در این قسمت، برای جلوگیری از طولانی شدن بحث فقط به صورتی کلی به معرفی چند مثال از مهم‌ترین مکانیزم‌های مورد بررسی در طبیعت می‌پردازیم. این مثال‌ها عبارتند از: مژک‌ها و تاژک‌ها، کرم‌های پهن، عروس‌های دریایی، گیاه میموسا پودیکا، ونوس مگس‌خوار، میوهٔ کاج و گل میمون.

در جستجو به دنبال الگوهای مناسب در طبیعت می‌توان گسترهٔ جستجو را در مقیاس‌های مختلف و به‌طور کلی در مقیاس میکرو و ماکرو تعیین نمود.

مثال اول: یکی از مثال‌های مربوط به مقیاس میکرو، مکانیزم خم شدن مژک‌ها[۳۸] و تاژک‌ها[۳۹] می‌باشد. مژک‌ها، عناصری پرزمانند هستند که گرد بدن دسته‌ای از جانوران تک سلولی را فراگرفته و تاژک‌ها عناصری شلاق مانند می‌باشند که به بدن بعضی از جانوران تک سلولی متصل هستند. حرکت مژک‌ها و تاژک‌ها باعث حرکت موجودات ذره‌بینی می‌شوند. عناصر اصلی سازندهٔ مژک‌ها و تاژک‌ها، ریزلوله‌ها[۴۰] می‌باشند که دوجفت ریزلوله در مرکز و ۹ جفت ریزلوله در آرایشی دایره‌ای در اطراف قرار گرفته‌اند. این ترکیب به ۹+۲ موسوم است. مابین ریزلوله‌ها، دستک‌هایی

این ترکیب به ۹+۲ موسوم است. مابین ریزلوله‌ها، دستک‌هایی از جنس پروتئین[41] قرار دارند که حرکت آنها باعث سرخوردن ریزلوله‌ها بر روی هم و در نتیجه خم شدن مژک یا تاژک می‌شود.

مثال دوم: همانطور که در ابتدای این بخش نیز به آن اشاره شد، در میان جانوران مختلف، بی‌مهرگان نمونه‌های مناسبی را در ارتباط با تغییرپذیری خم‌شوو در مقیاس ماکرو به ما نشان می‌دهند.

مکانیزم انحنا پیدا کردن بدن کرم‌های پهن[42] که از جانوران بی‌مهره می‌باشند، نمونهٔ خاص دیگری از طبیعت برای مکانیزم سازه‌های خم‌شو است. کرم‌های پهن اکثراً جزو انگل‌ها هستند و بخشی از آنها در دریا زندگی می‌کنند. بدن کرم‌های پهن با سطحی ماهیچه‌ای احاطه شده که در زیر اپیدرم[43] جای گرفته و به بدن آنها فرم می‌دهد. این سطح ماهیچه‌ای از یک بخش پیرامونی و یک بخش طولی داخلی تشکیل شده است. در بین این دولایه، معمولاً دو لایه ماهیچهٔ مورب متقاطع نیز قرار دارد. با تغییر طول این ماهیچه‌ها بدن کرم‌های پهن می‌تواند انحنا پیدا کند.

مثال سوم: عروس‌های دریایی، نمونهٔ دیگری از بی‌مهرگان هستند که در دریاها و اقیانوس‌ها زندگی می‌کنند و ساختاری چتری شکل، بدن آنها را می‌سازد. این چتر خود مثالی از یک ساختار تغییرپذیر خم‌شو در طبیعت است. عروس‌های دریایی از طریق منقبض و منبسط شدن چترشان به آب در پشت بدن خود فشار وارد کرده و به جلو رانده می‌شوند. عامل این انقباض یا به عبارتی تغییر انحنای چتر، ماهیچه‌های بدن عروس‌های دریایی می‌باشد اما منبسط شدن چتر به دلیل قابلیت الاستیک آن بوده که چتر را به حالت اولیه خود برمی‌گرداند.

مثال چهارم: در میان گیاهان نیز با مکانیزم‌های متفاوتی برای تغییر فرم خم‌شو روبرو می‌شویم که می‌توانند مورد بررسی قرار گیرند. بعضی از مکانیزم‌هایی که برای پاسخ تنجشی[44] (پاسخ به یک محرک بیرونی مانند تماس، دما، رطوبت یا نور) وجود دارند، از این دسته هستند. مثلاً گیاه میموسا پودیکا[45] که در برابر حرکت، تماس، تاریکی و گرما از خود واکنش نشان داده و برگ‌های مرکب خود را جمع می‌کند، دارای مکانیزمی خاص برای خم‌کردن برگ‌ها در محل اتصال به دم برگ می‌باشد. این محل اتصال که به صورت بالشتکی در ساقهٔ گیاه است، از سلول‌هایی متورم شده با آب تشکیل شده. تغییراتی که پس از دریافت سیگنال محرک در یون‌های قسمت پایین بالشتک اتفاق می‌افتد، باعث تغییر فشار اسمزی و در نتیجه خروج آب از این سلول‌ها می‌گردد. با خروج موقتی آب از این سلول‌ها، قسمت پایین بالشتک جمع شده و کل ساختار خم می‌شود.

مثال پنجم: از نمونه‌های قابل توجه دیگر پاسخ تنجشی در گیاهان، فرایند شکار حشرات توسط ونوس مگس‌خوار[46] است. این مکانیزم در اثر تعامل پیچیده‌ای مابین قابلیت انعطاف، تورژسانس[47] و انبساط سطوح می‌باشد. این گیاه از دو لبهٔ متصل به یکدیگر تشکیل شده است که در حالت عادی محدب بوده (خم به سمت خارج) اما در اثر تماس با موهای ریز سطوح داخلی این گیاه، فرم آنها به سرعت از محدب به مقعر تغییر یافته و این تغییر خم سطوح باعث بستهٔ شدن سریع آن می‌شود.

مثال ششم: از مثال‌های مکانیزم غیرفعال[48] برای تغییر انحنا در گیاهان می‌توان به حرکت هیگروسکپیک[49] در میوهٔ درخت کاج اشاره کرد. دیوارهٔ خارجی پولک‌های میوهٔ کاج در هوای مرطوب با جذب رطوبت محیط متورم شده و در نتیجه پولک‌ها به داخل خم شده و به عبارتی میوه بسته می‌شود. در هوای خشک، دیوارهٔ خارجی پولک‌ها خشک و منقبض شده و پولک‌ها به خارج خم می‌شوند و میوهٔ کاج باز شده و دانه‌های آن می‌توانند به بیرون بریزند.

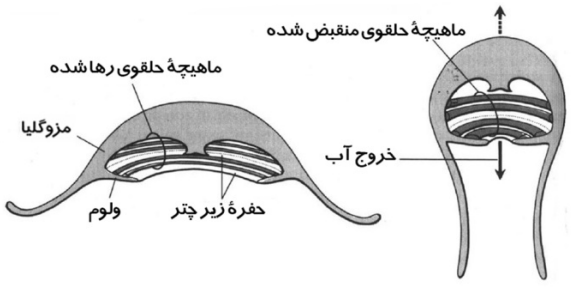
مثال هفتم: در بین گیاهان می‌توان به نمونه‌هایی برخورد نمود که دارای مکانیزم ویژه‌ای برای تغییرات خم‌شو هستند. این مکانیزم را می‌توان از طریق وارد شدن نیرویی خارجی به بخش خاصی از آنها مشاهده نمود. نمونه‌ای که قبلاً به آن اشاره شد، مکانیزم مربوط به گل مرغ بهشتی بود. نمونهٔ دیگر در این رابطه گل میمون[50] می‌باشد که به خاطر هندسهٔ خاص این گل وقتی از دوطرف به آن نیرو وارد می‌شود، این نیرو باعث خم شدن گلبرگ‌های این گل شده و بخشی که مانند دهان است باز می‌گردد.

• انتخاب مناسب‌ترین الگوها و تجزیه و تحلیل دقیق‌تر آنها:

از میان الگوهای مختلفی که مهم‌ترین آنها در بالا ذکر شد، با توجه به ماهیت هندسی تغییرپذیری، مکانیز خم‌شدن و عدم پیچیدگی‌هایی که تغییرات فرم را وابسته به تغییرات شیمیایی و یا نیازمند بهره‌گیری از مصالح خاص می‌نماید، در نهایت دو الگو مورد انتخاب نهایی قرار گرفتند. این الگوها عبارتند از عروس دریایی و گل میمون که در اینجا مکانیزم تغییرپذیری آنها به‌صورت دقیق‌تر معرفی می‌گردند.

عروس دریایی: بدن عروس‌های دریایی که به شکل چتر می‌باشد، از دولایهٔ مجزا تشکیل شده است که پوست بیرونی و پوست درونی آن را می‌سازند. مابین پوست بیرونی و درونی، یک لایهٔ نیمه شفاف، غیرزنده، بدون سلول و ژلاتینی به نام مزوگلیا[51] قرار گرفته است که به‌عنوان اسکلت حمایتی هیدرواستاتیک برای عروس دریایی عمل می‌کند. عروس‌های دریایی دارای گونه‌های مختلفی هستند. در این بین فنجان‌زیان[52] و آب سان‌زیان[53] دارای عضلات قدرتمند حلقوی و شعاعی در بخش زیرین چتر خود هستند. اما جعبه‌زیان[54]، تنها عضلاتی شعاعی دارند و فقط در بخش چین‌خوردهٔ پایینی چتر خود با الیاف عضلانی حلقوی مجهز هستند.

اکثر عروس‌های دریایی به طور دایم در حال حرکت بوده و این

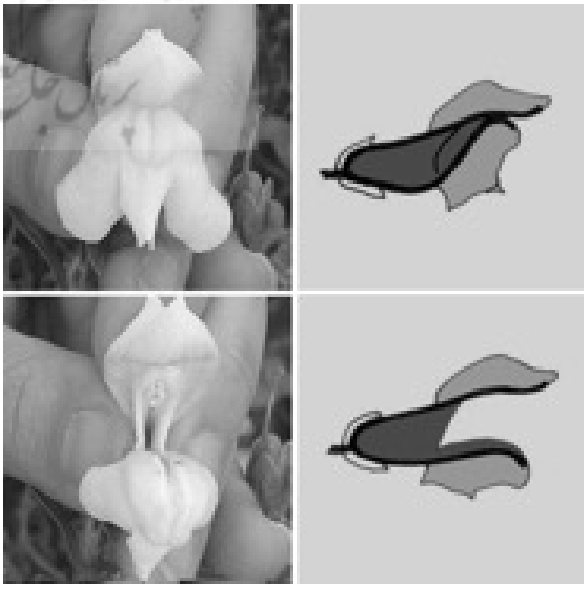


تصویر۷- حرکت عروس دریایی از طریق جمع شدن چتر به دلیل انقباض ماهیچه‌های حلقوی و باز شدن آن توسط فشار مزوگلیا.
مأخذ: (Ruppert, 2004, 116)

جمع شده به سمت عقب ممکن می‌شود. انقباض چتر توسط ماهیچه‌های حلقوی ایجاد می‌شود اما بازگشت چتر به فرم اولیهٔ آن بوسیلهٔ خاصیت ارتجاعی مزوگلیا صورت می‌گیرد (تصویر۷)، (Heeger, 2004, 43).

گل میمون: در نمونهٔ انتخابی دوم یعنی گل میمون، با ساختاری انعطاف‌پذیر از طبیعت روبه‌رو هستیم که نوع خاصی از تاشدگی سبب مکانیزمی منحصر به‌فرد در آن شده‌است. گلبرگ‌های گل میمون از دو بخش بالایی و پایینی تشکیل یافته‌است. این دو گلبرگ، فرمی شبیه دهان را برای این گل ایجاد کرده‌اند. اگر دوطرف این گل فشارداده شود، دهان گل باز می‌گردد. با نگاهی دقیق‌تر می‌توان مشاهده کرد که فقط گلبرگ پایینی قابل حرکت بوده و گلبرگ بالا ثابت است. ویژگی خاصی که در واقع باعث خم شدن گلبرگ پایین گل میمون در اثر فشار به دو طرف آن می‌شود، تاشدگی منحنی آن می‌باشد. این تاشدگی باعث می‌گردد تا نیروی واردشده از دوطرف در آن چرخش پیدا نموده و باعث خم شدگی گلبرگ در امتداد لولهٔ جامگل[55] شود. در واقع تاشدگی منحنی گلبرگ، راستای نیرو را در جهتی عمود بر راستای اولیه تغییر داده و خم شدگی در راستای جدید نیرو ایجاد می‌گردد. با حذف نیرو از دوطرف گلبرگ، قابلیت الاستیک آن باعث بازگشت به فرم اولیه می‌شود (تصویر۸)، (Matini, 2007, 37).

• انتزاعی نمودن الگوهای طبیعت: هدف اصلی در این بخش، تبدیل پدیدهٔ مورد مطالعه در طبیعت به مکانیزمی است ملموس و قابل درک که با ابزار انسان ساخت قابل اجرا باشد. این بخش که مهم‌ترین مرحلهٔ فرایند بالا به پایین می‌باشد، با توجه به ماهیت هر موضوع، راه‌کاری خاص پیدا می‌کند. با توجه به موضوع این پژوهش که یافتن مکانیزم تغییرپذیری سازه‌های خم‌شو در معماری می‌باشد، راه‌کارهایی که برای انتزاعی نمودن الگوهای طبیعت انتخاب می‌شوند، باید با دستور زبان مورد استفاده در حوزهٔ معماری هماهنگ باشند. به این دلیل در اینجا بهره‌گیری از "الگوهای هندسی" و همچنین به‌کارگیری از "مدل‌های فیزیکی" به عنوان راه‌کارهای مناسب تشخیص داده شده که هریک جزو ابزار بیانی معمول و دارای قابلیت‌های مناسب در حوزهٔ معماری هستند. با توجه به ماهیت هریک از الگوهای انتخابی، یکی از این راه‌کارها برای انتزاعی نمودن هریک به کار گرفته‌شده که در ادامه معرفی می‌گردند.



تصویر۸- تصاویر و برش‌های گل میمون در حالت بسته و باز.
ماخذ: (Matini, 2007, 37-38)

بهره‌گیری از الگوهای هندسی: برای انتزاعی نمودن مکانیزم تغییرپذیری بدن عروس دریایی، در این قسمت از الگوهای هندسی استفاده گردیده است. این الگوها در روندی سلسله‌مراتبی و با اعمال تغییر، تعدیل و تبدیل‌هایی در هر مرحله نسبت به مرحلهٔ قبلی ما را به نتیجهٔ نهایی نزدیک می‌کنند. در این قسمت با توجه به محدودیت فضای مقاله، سعی شده خلاصه‌ای از این مراحل ارایه شوند. این روش تا حدی مشابه روش گرامر شکلی[56] بوده اما سلسله مراحل تغییرات در آن در دو جهت (چپ به راست و بالا به پایین) اتفاق می‌افتد. در این روش ابتدا قالب کلی تغییر فرم بدن عروس دریایی که از شبکهٔ نقاط، پاره خط‌ها و منحنی‌های متصل کنندهٔ نقاط تشکیل شده، مدلسازی می‌گردند. این مدل از دو بخش چپ و راست (قبل و بعد از تغییر فرم) تشکیل شده است که با فلشی افقی قسمت چپ به راست مرتبط می‌گردد. تغییر طول پاره خط‌ها و منحنی‌ها بعد از تغییر فرم مدل با رنگ کدگذاری می‌شود که در اینجا رنگ آبی به معنی عدم تغییر طول، قرمز به معنی کوتاه‌تر شدن و سبز به معنی بلندترشدن است. بنابراین اعضاء آبی رنگ می‌توانند نمایش دهندهٔ عناصر خم‌شو بوده، اعضاء قرمز نمایش دهندهٔ عناصری که در مجموعه کشش ایجاد نموده و اعضاء سبز نشان‌دهندهٔ عناصری که باعث فشار در مجموعه می‌شوند، باشند. در اشکالی که در جدول ۱ آمده‌اند، مدل تغییر فرم به کمک تصاویر از بالا، مجاور و پرسپکتیو نمایش داده شده‌اند.

هر مرحله در این جدول با تعدیل و تبدیل‌هایی مانند حذف، یا افزودن پاره‌خط‌های بین نقاط یا تبدیل چند پاره خط به یک منحنی متصل کنندهٔ نقاط یا تغییر ماهیت خطوط با تغییر رنگ آنها به مرحلهٔ بعدی منتقل می‌شود که این امر از بالا به پایین اتفاق افتاده و با فلشی عمودی جهت تغییر نمایش داده شده است. این تعدیل و تبدیل‌ها در هر قسمت با توجه به قابلیت‌هایی که می‌توانند پاسخ‌های به دست آمده را به مکانیزمی مناسب‌تر برای تغییرپذیری ساختاری خم‌شو تبدیل کنند، انجام می‌شوند. تعدیل و تبدیل‌ها تا جایی ادامه می‌یابد که مناسب‌ترین تغییر فرم خم‌شو (توسط اعضاء آبی) با حداقل تغییر طول اجزاء کششی یا فشاری (توسط اعضاء قرمز یا سبز) امکان‌پذیر گردد (Matini, 2008).

در جدول ۱ و در مرحلهٔ ۱، مشاهده می‌شود که قالب کلی تغییر فرم بدن عروس دریایی با نقاط، خطوط منحنی شعاعی و دایره‌های مداری نشان داده شده است. تغییرات از چپ به راست نشان می‌دهد که منحنی‌های شعاعی تغییر طولی نداشته بنابراین به رنگ آبی هستند ولی محیط مدارها پس از تغییر فرم کوچک می‌شوند، بنابراین به رنگ قرمز می‌باشند. در مرحلهٔ ۲،

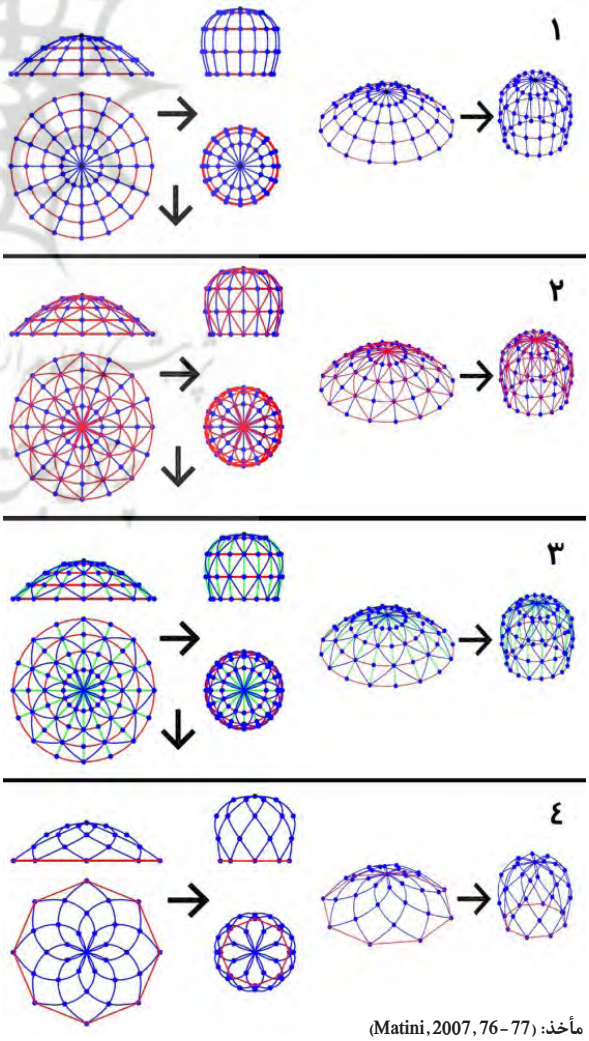
خطوط منحنی قطری به مدل اضافه گردیده و با مشاهدهٔ تغییرات آن از چپ به راست درمی‌یابیم که این اعضاء قطری کاهش طول پیدا می‌کنند (به رنگ قرمز نشان داده می‌شوند). در مرحلهٔ ۳ با توجه به اینکه منحنی‌های قطری می‌توانند پتانسیل مناسب تری برای اعضاء خم شو داشته باشند، طول آنها را در تغییر از چپ به راست ثابت نگاه داشته (آبی) و به این ترتیب منحنی‌های شعاعی باید افزایش طول پیدا کنند (سبز). البته دایره‌های مداری هنوز کاهش طول دارند (قرمز). در مرحلهٔ ۴ تمامی خطوط منحنی شعاعی و دایره‌های مداری حذف و به‌جای بزرگ‌ترین دایرهٔ مداری، پاره خط‌های متصل‌کننده نقاط جایگزین می‌شوند. می‌توان این مرحله را به عنوان نتیجهٔ اولیهٔ انتزاعی نمودن مکانیزم تغییرفرم بدن عروس دریایی درنظر گرفت که در آن اجزای منحنی مورب که با یکدیگر تقاطع پیدا نموده‌اند، به‌عنوان اعضای خطی خم‌شو و پاره‌خط‌های متصل به هم در پایین‌ترین مدار به‌عنوان عنصر کششی یکپارچه عمل می‌کنند. البته نقاط متصل‌کنندهٔ خطوط در اینجا به عنوان اتصالات لولایی می‌باشند. به‌عبارتی می‌توان نتیجهٔ انتزاعی به‌دست آمده در این مرحله را نوعی ساختار تغییرپذیر خم‌شو با مکانیزم قیچی دانست که در آن یک ساختار حبابی شکل می‌تواند گسترده و به راحتی با کشش کابلی پیرامونی جمع شود. برای آزمودن نتیجهٔ به‌دست آمده در اینجا از مدلی فیزیکی متشکل از نوارهای خم‌شو، اتصالات لولایی ساده و کابلی پیرامونی استفاده شده‌است (تصویر ۹).

نکتهٔ منحصر به فرد استفاده از عناصر خم شو در این سازه، سادگی سیستم در اتصالات، یکپارچگی کل مجموعه و بهره‌گیری از انرژی ذخیره شده در سازه برای گسترش مجدد آن می‌باشد، در صورتی که اگر از سازه‌ای تغییرپذیر با اجزای صلب برای ایجاد چنین تغییرفرمی استفاده می‌شد، نیاز به اتصالاتی بسیار پیچیده می‌بود که استفاده از آن را بسیار محدود می‌گردانید.

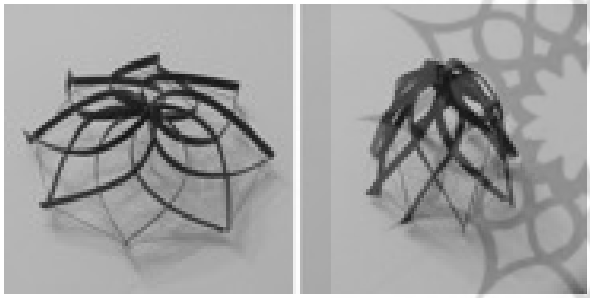
بهره‌گیری از مدل‌های فیزیکی: روشی که برای انتزاعی‌نمودن مکانیزم تغییرپذیری گل میمون در این مرحله مناسب‌تر تشخیص داده شد، بهره‌گیری از مدل‌های فیزیکی می‌باشد. خم‌شدگی گلبرگ پایین گل میمون در اثر فشاری که از دو طرف به آن وارد می‌شود را می‌توان با یک اریگامی شبیه‌سازی نمود.

در قسمت ۱-۱ تصویر۱۰، قطعه‌ای کاغذ با چهار تاشدگی

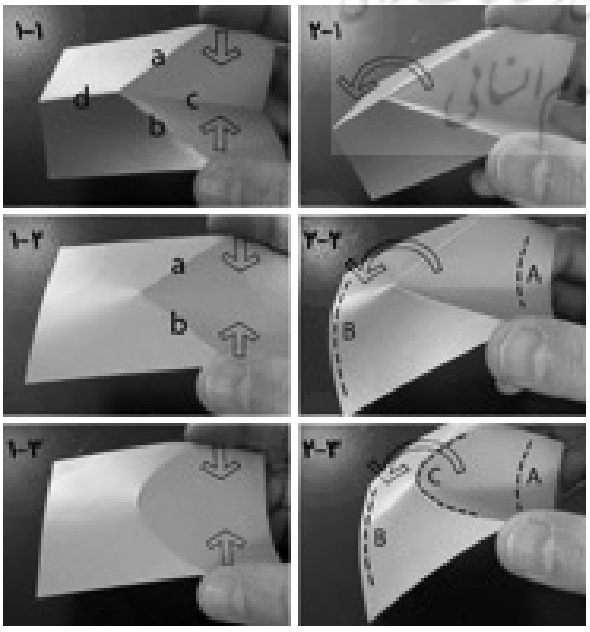
جدول ۱- بهره‌گیری از الگوهای هندسی برای انتزایی نمودن و استخراج مناسب‌ترین مکانیزم خم‌شو از تغییرپذیری بدن عروس دریایی.



مأخذ: (Matini, 2007, 76-77)



تصویر۹- آزمایش مکانیزم انتزایی شده از ساختار تغییرپذیر بدن عروس دریایی به‌کمک نوارهای خم‌شو، اتصالات لولایی ساده و کابل جمع کنندهٔ پیرامونی.
مأخذ: (Matini, 2007, 78)

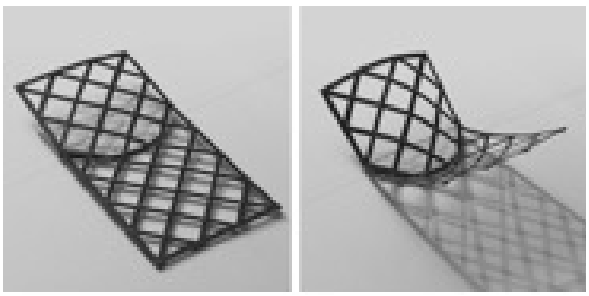


تصویر۱۰- مراحل تکامل مدل‌های الهام‌گرفته از مکانیزم تغییرفرم گل میمون.

در قسمت ۱-۱ تصویر۱۰، قطعه‌ای کاغذ با چهار تاشدگی مستقیم‌الخط دیده می‌شود که همهٔ آنها در یک نقطه به هم رسیده‌اند. سه تا شدگی a,b,d همگی هم جهت بوده و تا شدگی c در خلاف جهت آنها می‌باشد. با فشار دادن به انتهای دو تاشدگی a,b زاویهٔ بین تاشدگی‌های c,d تغییر می‌کند (قسمت ۱-۲ تصویر۱۰). مکانیزم تغییر فرم در این مدل، مشابه مکانیزم تغییر فرم گل میمون می‌باشد اما تفاوتی که با آن دارد، عدم وجود اعضای خم‌شو است. در گام بعدی با حذف خم شدگی‌های c,d این آزمایش مجدداً تکرار می‌شود (قسمت ۲-۱و ۲-۲ تصویر ۱۰). در این مدل نیز فشار به انتهای دو تاشدگی a,b مانند حالت قبل باعث تغییر زاویه سطوح دوطرف این تاشدگی می‌شود. در این حالت به‌خاطر خم شدگی سطوح در دوطرف تاشدگی a,b (خم‌شدگی‌های A,B)، مکانیزم تغییر فرم مدل، شباهت بیشتری به مکانیزم گل میمون پیدا کرده است و خم شدگی‌های A,B به خاطر تفاوت جهتی که با یکدیگر دارند، تا حدودی باعث بازگشت کاغذ خم‌شده به حالت اولیه خود می‌شوند. البته به خاطر مستقیم‌الخط بودن تاشدگی‌های a,b خم‌شدگی‌های A,B، در نزدیکی این تاشدگی‌ها به‌خوبی عمل نکرده و بازده خوبی ندارند. در مدل سوم با تبدیل تاشدگی‌های مستقیم‌الخط a,b به یک تای منحنی (تاشدگی C) مشکل مدل قبلی برطرف شده و مکانیزم تغییر فرم خم‌شوی آن بیشترین شباهت را به مکانیزم گل‌میمون پیدا می‌کند. بدین ترتیب سطوح خم شدهٔ A,B با فشار به دو طرف تاشدگی C به هم نزدیک شده و با رها نمودن آن، این خم‌شدگی‌ها به بازگشت سطوح به فرم اولیه خود کمک می‌کنند.

البته انجام این آزمایش با یک کاغذ ساده فقط نشان‌دهندهٔ ماهیت مکانیزم تغییرفرم الهام گرفته شده از گل میمون می‌باشد و برای معرفی بهتر آن از مدلی متشکل از اعضای خطی الاستیک بهره گرفته شده که در تصویر۱۱ مشاهده می‌گردد. در این مدل، سطوح خم‌شویی که در مدل اولیه وجود داشته با شبکه‌ای از اعضای خطی شکل گرفته است و نیروی وارد بر عضو قوسی شکل وسط، از طریق کشش یک کابل امکان‌پذیر می‌گردد.

• بررسی کاربردها و اعمال تغییرات نهایی مربوطه: در این مرحله که آخرین گام فرایند بالا به پایین است، باید به بررسی کاربرد مکانیزم‌های به‌دست آمده در معماری و پتانسیل پیاده‌سازی فنی آنها پرداخت، سپس پروتوتایپ‌های اولیهٔ ساختارهای پیشنهادی، باید ساخته و مورد آزمایشات مهندسی قرار گیرند و در صورت موفقیت‌آمیز بودن این آزمایش‌ها، محصولات بدست آمده می‌توانند وارد مراحل تولید صنعتی گردند. با توجه به اینکه مطالب این مقاله بیشتر به موضوعات مرتبط با معماری می‌پردازد، در این قسمت فقط کاربردهای پیشنهادی و اعمال تغییرات مورد نیاز با توجه به این کاربردها و ویژگی‌های هندسی آن آورده شده و سایر موارد به دلیل نیاز به رویکردی فنی و محاسباتی، به طرح‌های عملی آتی موکول می‌گردد.



تصویر۱۱- آزمایش مکانیزم انتزاعی شده از ساختار تغییرپذیر گل میمون به‌کمک نوارهای خم‌شو و کابل جمع‌کنندهٔ میانی.
مأخذ: (Matini, 2007, 85)

کاربردهای پیشنهادی برای ساختارهای تغییرپذیر خم‌شویی که با مکانیزم‌های ارایه شده در این مقاله تغییرفرم پیدا می‌کنند، می‌توانند به دو گروه تقسیم گردند:

- ساختارهای سیار مانند چادرها یا پناهگاه‌های موقتی که در شرایط اضطراری مورد نیاز می‌باشند. بهره‌گیری از ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو به دلیل ویژگی فنری عناصر الاستیک به‌کار رفته در آنها و همچنین به‌خاطر یکپارچگی و پیوستگی این عناصر، دارای مراحل بازشدن و برپا نمودنی راحت‌تر و سریع‌تر و جزییات ساده‌تری نسبت به ساختارهای تغییرپذیر سیار دیگر هستند که می‌تواند از مزیت‌های مهم آنها باشد.

- اجزای باز و بسته‌شونده در معماری، از دیگر موارد استفاده از این گونه ساختارهای تغییرپذیرخم‌شو می‌باشند. البته با توجه به انعطاف‌پذیری و عدم پایداری کامل این‌گونه ساختارها در برابر عواملی مانند بادهای شدید یا بارهای زنده‌ای مانند وزن انسان، و حجم زیاد برف و باران، استفاده از آنها کمتر برای اجزای بزرگ مقیاسی مانند سقف‌های تغییرپذیر یا پل‌های متحرک قابل توجیه بوده و بیشتر برای استفاده‌هایی مانند سایه‌بان‌های متحرک، سطوح جاذب صوت قابل تغییر، پارتیشن‌ها و غرفه‌های تغییرپذیر در معماری داخلی و موارد مشابه دیگر می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

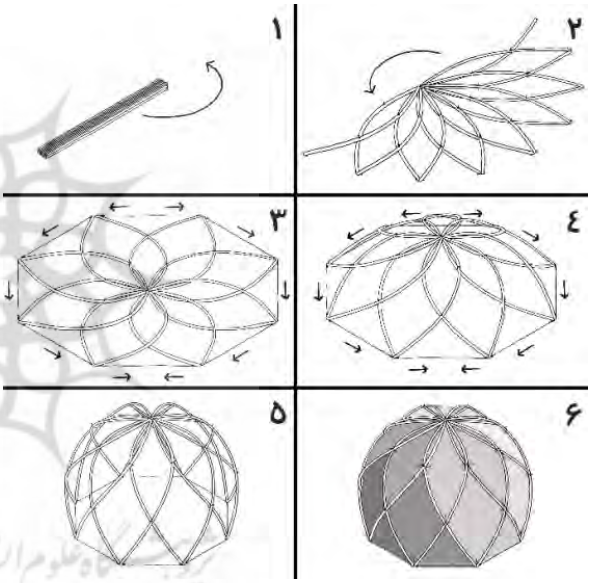
برای روشن‌تر شدن موضوع دو نمونه ارایه گردیده که اولین نمونه، مثالی از ساختار سیار با سیستم تغییر فرم ملهم از عروس دریایی و نمونهٔ دوم سایه‌بان‌هایی متحرک با الهام از مکانیزم گل میمون می‌باشد.

نمونهٔ ۱: در این نمونه، ساختاری سیار به‌عنوان سرپناهی موقت به فرمی گنبدی مورد نظر بوده است که با الگوی به‌دست آمده از عروس دریایی می‌توان به آن دست یافت. اعضای سازندهٔ سازه عبارتند از: میله‌های انعطاف‌پذیر از جنس فایبرگلاس که در دو لایهٔ غیرهم جهت در روی هم قرار گرفته‌اند، اتصالات لولایی فلزی، و کابلی جمع‌کننده در انتهای میله‌های مجموعه که از طریق حلقه‌هایی این میله‌ها را به هم متصل نموده است. نکتهٔ مهمی که در طراحی ساختارهای سیار باید در نظر گرفته شود، فضای کمی است که در حالت بسته اشغال می‌کنند. بنابراین باید الگوی انتزاعی استخراج شده از مکانیزم تغییرات بدن عروس دریایی را با اعمال تغییراتی کامل‌تر نموده و شرایط کاهش فضای اشغال شده را در حالت بسته ممکن نمود. در جدول ۲، تغییرات اعمال شده به‌صورت تصویری نمایش داده شده است. تصاویر ۴ و ۵ در این جدول، بر اساس الگوی انتزاعی به دست آمده می‌باشد. اگر سازهٔ تصویر۴ را به‌طور کامل گسترده نماییم، می‌توان آن را از فرم گنبدی به فرمی واقع در یک صفحهٔ مسطح تبدیل

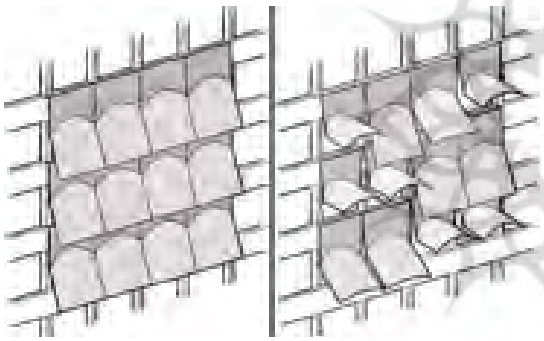
نمود (تصویر۳ جدول۲). حال اگر اتصالات واقع در یک امتداد در یکی از بال‌های سازهٔ فوق را قطع نماییم، به خاطر قابلیت الاستیک اعضا، فرم کلی سازه در مجموعه‌ای از اجزای خطی دسته‌شدهٔ مجاور یکدیگر جمع می‌شود (تصاویر ۲ و۱ جدول ۲).

بنابراین همانطور که در جدول ۲، به‌صورت مرحله به مرحله نمایش داده شده‌است، در ابتدا کل سازه در مجموعه‌ای خطی قرار گرفته و کم‌ترین فضا را اشغال می‌کند. سپس با نزدیک نمودن دو انتهای اولین و آخرین میله‌های سازه به یکدیگر و متصل نمودن آنها فرم دایره‌ای شکل می‌گیرد. سپس به کمک کابلی که انتهای میله‌ها را به هم متصل کرده و از طریق جمع کردن آن فرم مسطح به فرمی گنبدی تبدیل می‌شود. در آخرین مرحله پوششی پارچه‌ای که با فرم سازهٔ به‌دست آمده هماهنگ است گسترده شده و در محل لولاها به اسکلت گنبدی متصل می‌گردد.

جدول ۲- ساختاری سیار با اعمال تغییراتی بر روی مکانیزم به‌دست آمده از عروس دریایی.



نمونهٔ ۲: در نمونهٔ دوم با بهره‌گیری از مکانیزم به‌دست آمده از تغییر فرم گل میمون، سایه‌بانی برای حفاظت پنجره‌ها از تابش خورشید و همچنین محدود نمودن دید طراحی شده است. این سایه‌بان‌ها همان طور که در تصویر ۱۲ دیده می‌شود، می‌توانند با سطوح خم‌شو و یا شبکه‌ای از اجزای خطی خم‌شو (مانند مدل تصویر۱۱) ساخته شده و هماهنگ با هندسه و ابعاد پنجره‌های نمای یک ساختمان و در جلوی آنها نصب گردند. سطوح خم‌شو و یا سطوح پوشانندهٔ شبکهٔ خم‌شو می‌تواند متخلخل یا نیمه‌شفاف نیز در نظر گرفته شده تا بتواند در حالت بسته نیز حدی از نور را عبور دهد. این پوشش در حالت بسته بر روی قاب پنجره‌ها قرار گرفته و حداکثر میزان حفاظت در برابر ورود نور را دارا می‌باشد. این سایه‌بان به کمک میله‌ای که دو طرف قوس میانی صفحه را به هم نزدیک می‌کند (و از داخل ساختمان قابل کنترل می‌باشد)، می‌تواند به سمت بالا خم شده و جلوی پنجره را باز کند. با خم شدن این سطح به طرف بالا، علاوه بر باز شدن جلوی پنجره برای دید، سطحی در بالای پنجره به‌صورت طره شکل می‌گیرد که هنوز از ورود شعاع‌های نور مزاحم از بالا جلوگیری کرده و همچنین در این وضعیت به‌خاطر افزایش انحنای صفحه مقاومت آن در برابر نیروی باد افزایش می‌یابد.



تصویر۱۲- سایه‌بان‌های تغییرپذیر خم‌شو که به کمک مکانیزم ملهم از گل میمون باز و بسته می‌شوند.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

نتیجه

آنچه در این مقاله ارایه گردید، معرف نوع جدیدی از ساختارهای تغییرپذیر در معماری است که از قابلیت انعطاف‌پذیری بعضی از مصالح جدید و به‌طور خاص پلیمرهای تقویت شده با الیاف که به‌صورت صنعتی تولید می‌شوند، استفاده کرده است. استفاده از این مصالح که می‌توانند در شرایط خاصی خم شده و دوباره به‌صورت فنری به حالت اولیهٔ خود بازگردند، قابلیت‌های جدیدی از نظر فرم و کاربری برای این‌گونه ساختارها پدید آورده‌اند که مهم‌ترین آنها عبارتند از: یکپارچه نمودن کل سازه، بهره‌گیری از قابلیت فنری اجزا برای راحتی و سرعت در مراحل باز و گسترده شدن آن، سبک‌تر شدن مجموعه، کاهش یا رفع نیاز به عناصری جانبی مانند لولا برای تغییر فرم و در نهایت هماهنگی آسان‌تر با فرم‌های آزاد در معماری معاصر.

در کنار نکات فوق که از مزیت‌های این گونه ساختارهای تغییرپذیر می‌باشد، پیدا نمودن مکانیزم‌هایی که بتواند از این مزیت‌ها بهره برده و تغییر فرم‌های جدیدی را ایجاد نماید، خود موضوع پژوهش‌هایی نو در این حوزه می‌باشد. در این مقاله سعی شده با رویکردی بایونیکی، به جستجوی پاسخ‌هایی برای مکانیزم تغییر فرم ساختارهای تغییرپذیر خم‌شو در طبیعت پرداخته و با بهره‌گیری از فرایند بالا به پایین، دو نمونه از الگوهای مطلوب و مناسب از طبیعت به معماری منتقل شوند. همچنین در بخش انتزاعی نمودن قوانین طبیعت، دو روش ارایه شده که می‌توانند در مواردی مشابه مورد استفادهٔ معماران قرار گیرند. در پایان نیز دو مثال ازکاربردهای معماری الگوهایی که از طبیعت برداشت شده، ارایه گردیده‌اند.

در اینجا باید یاد آوری گردد که قسمت عمدهٔ آخرین مرحله از فرایند بالا به پایین که به بررسی پتانسیل‌های پیاده سازی فنی، آزمایش پروتوتایپ‌های اولیه و در صورت موفقیت آمیز بودن آزمایش‌ها تولید صنعتی محصول بدست آمده می‌گردد نیازمند ادامهٔ پژوهش و مطالعات در حوزه‌های تخصصی سازه و اقتصاد و بازاریابی محصول پیشنهادی می‌باشد که در مجال این پژوهش نگنجیده و به طرح‌های عملی آتی موکول می‌گردد.

فرایندی که در این مثال‌ها برای انتقال ایده‌ها از طبیعت به معماری استفاده شده، معرف این موضوع است که با وجود اهمیت ایده‌های منحصر به فردی که با الهام لحظه‌ای از طبیعت به‌دست می‌آیند اما روند الهام‌گیری از طبیعت می‌تواند مسیری کاملاً سیستماتیک و گام به گام را پیروی نموده که با کار گروهی متخصصین مختلف ممکن می‌گردد. به این ترتیب یافتن پاسخ بسیاری از پیچیدگی‌ها و ابهامات دنیای فناوری در طبیعت، نیازمند جرقه‌ای غیرقابل پیش‌بینی و در شرایط منحصر به‌فرد در ذهن افرادی خاص نبوده و با روندی علمی می‌توان از ابتدا به دست یابی پاسخی مطلوب در انتهای مسیر مطمئن بود.

پی‌نوشت‌ها

1 Frei Otto.

۲ Soft Materials، مصالحی مانند پارچه که به راحتی تغییر فرم داده و بصورت مستقل فرم مشخصی ندارند.

۳ Stiff Materials، مصالحی مانند فولاد که که به راحتی در اثر فشار تغییر فرم نداده و فرم خود را حفظ می‌کند.

۴ Pliable Materials، مصالحی مانند بعضی از پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف که در اثر فشار خم شده و پس از برداشتن فشار دوباره به فرم اولیهٔ خود بازگردند.

5 Active Bending (Lienhard, 2013).

6 Softwood نرم چوب یا چوب نرم.

7 Deflection.

8 Vladimir Shukov.

9 Antonio Gaudi.

10 Buckminster Fuller.

11 Félix Candela.

12 Heinz Isler.

13 Form-Finding Techniques.

14 Multihalle Mannheim.

15 FRP (Fiber Reinforced Polymer-Fiber Reinforced Plastic).

16 Free Forms.

17 All-in-one Pliable System (Schleicher, 2011).

18 GFRP (Glass-Fiber Reinforced Plastic).

19 CFRP (Carbon-Fiber Reinforced Plastic).

20 Ultrathin Deployable Reflector Antennas.

21 Bionics.

22 Solar Sail.

23 DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt).

24 Leif Kniese.

25 Flounder.

26 EvoLogics GmbH.

27 Flectofin®.

28 Non-Autonomous.

29 Bird of Paradise Flower.

30 ITKE.

31 Sofistik®.

32 Finite Element Method (FEM).

33 Thomas Speck (University of Freiburg, Faculty of Biology).

34 Research and Development (R&D).

35 'Bottom-up Process'.

36 'Top-down Process'.

37 Brockhaus Enzyklopädie.

38 Cilium.

39 Flagellum.

40 Microtubule.

41 Dynein arms.

42 Flatworms.

43 Epidermis (روپوست).

44 Nastic Response.

45 Mimosa Pudica

46 Venus Flytrap (Dionaea Muscipula)

47 Turgor، باد کردن و حجیم شدن یاخته‌های گیاهی در اثر ورود آب به درون آنها.

48 Passive Mechanism.

49 Hygroscopic Movement.

50 Antirrhinum Majus.

51 Mesoglea.

52 Scyphozoa.

53 Hydrozoa.

54 Cubozoa.

55 Corolla Tube.

56 Shape Grammar.

فهرست منابع

Crawford, R.F (1971), Strength and Efficiency of Deployable Booms for Space Applications, *AIAA Paper*, No. 71-396, AAS/AIAA Variable Geometry and Expandable Structures Conference (Anaheim, California).

Fischer, B (2002), Von wegen olle Flunder, in dimensionen, *das Berliner Wissenschafts-Magazin*, Heft 23, pp 10-12.

Gaβ, S; Druesedau, H; Hennike, J (1985), *IL31*, Bambus-Bamboo, Institute for Lightweight Structures (IL), University of Stuttgart, Stuttgart.

Gengnagel, C; Herna´ndez, E. L; Bäumer, R (2013), Natural-fibre-reinforced plastics in actively bent structures, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, *Construction Materials 166*, December 2013 Issue CM6, pp 365-377

Gertsma, L. W; Dunn, J. H; Kempke, E. E (1965), *Evaluation of one type of foldable tube*, NASA Lewis research Center, Cleveland, Ohio, NASA TM-X-1187.

Heeger, T (2004), *Quallen - gefährliche Schönheit*, Hirzel Verlag, Stuttgart.

Minimal, Edition Axel Menges, Stuttgart.

Pone, S. (2012), The Toledo Gridshell, EWT, Eco Web Town, *on-line Magazine of Sustainable Design*, No. 5, Dicembre 2012.

Rudofsky, B (1987), *Architecture without Architects: A Short Introduction to Non-Pedigreed Architecture*, Academy Editions, London.

Ruppert, E. E; Fox, R. S; Barnes, R. D (2004), *Invertebrate Zoology - A Functional Evolutionary Approach*, Thomson, Brooks/Cole, Kap. 12, p. 116.

Schleicher, S; Lienhard, J; Knippers, J; Poppinga, S; Masselter, T; Speck, T (2011), *Bio-inspired kinematics of adaptive shading systems for free form facades*, in Proceedings of the IABSE-IASS Symposium, Taller Longer Lighter, London, UK.

Sickinger, C; Melcher, J; Ströhlein, T; Nickel, J (2005), *Entfaltungsmechanismen für den leichtbau auf basis bionischer elemente*, DLR Interner Bericht 03.

Speck, T, Speck, O (2008), Process sequences in biomimetic research, *Design and Nature IV*, ed. C.A. Brebbia, WIT Press: Southampton, 3-11

Tan, L. T; Pellegrino, S (2004), Ultra thin deployable reflector antennas. In Proc. 45th AIAA/ASME/ ASCE/AHS/ASC Structures, *Structural Dynamics and Materials Conference*, 19-22 April 2004, Palm Springs, CAAIAA 2004-1730, p. 2.

URL1: http://www.itke.uni-stuttgart.de

URL2: http://www.evologics.de

Lienhard, J. et al (2012), *Flectofin®-A Hinge-less Flapping Mechanism Inspired by Nature*, Flectofin brochure, Institute of Building Structures and Structural Design, University of Stuttgart, Stuttgart.

Lienhard, J; Alpermann, H; Gengnagel, C; Knippers, J (2013), Active Bending, A Review on Structures where Bending is used as a Self-Formation Process, *International Journal of Space Structures*, Vol. 28 No. 3&4, pp 187-196.

Lienhard, J.; Knippers, J. (2013), Considerations on the Scaling of Bending-Active Structures, *International Journal of Space Structures*, Vol. 28 No. 3&4, pp 137-147.

Matini, M.R (2007), *Biegsame Konstruktionen in der Architektur auf der Basis bionischer Prinzipien*, Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE); Doctoral Dissertations, University of Stuttgar, Stuttgart.

Matini, M. R, Knippers, J (2008), Application of "abstract formal patterns" for translating natural principles into the design of new deployable structures in architecture. In: *Design and Nature IV*, WIT Press, Southampton, ed. C.A. Brebbia , pp. 147-156

Oliver, P. (Hg.) (2007), *Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World*, Taylor & Francis Ebooks, p. 652.

Otto, F. et al (1972), *IL5*, Wandelbare Dächer/ Convertible Roofs, Institute for Lightweight Structures (IL), University of Stuttgart, Stuttgart.

Otto, F.; Rasch, B (1995), *Finding Form-Towards an Architecture of*

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی