Archive of SID
نشریه هنرهای زیبا- معماری و شهرسازی • دوره ۲۴ • شماره ۳ • تابستان ۱۳۹۸

ساختارهای انعطاف‌پذیر؛ راهکاری در جهت کاهش معضلات عملکردی پوسته‌های متحرک*

کتایون تقی‌زاده[۱**]، **محمدرضا متینی**[۲]، **الناز کاکوئی**[۳]
[۱] دانشیار دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
[۲] استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران، ایران.
[۳] کارشناس ارشد، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
(تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۳/۸، تاریخ پذیرش نهایی: ۹۸/۴/۱)

چکیده

به منظور دستیابی به یک معماری پاسخگو که بتواند با شرایط پیرامونی‌اش سازگار باشد، رویکرد غالب آن است که معماران، طراحان و مهندسان سازه، تمرکز خود را بر روی طراحی و ساخت پوسته‌های ساختمانی متحرک متشکل از اعضای صلب و مفاصل مکانیکی قرار می‌دهند. گرچه ممکن است این شیوه مزایایی به همراه داشته باشد، اما می‌تواند با ایجاد مشکلات و ضعف‌هایی چون شکست و گسیختگی ناشی از تنش‌های بالا در مفاصل، منجر به هزینه بالای تعمیر و نگهداری شود. هدف از تحقیق پیشرو، بهره‌گیری از پتانسیل مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر در طراحی و ساخت نماهای متحرک است که بدین منظور، پس از دسته‌بندی کاربرد مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر در معماری در دو سطح (سطح نخست: جایگزینی آنها با مکانیزم‌های صلب-پیکر و سطح دوم: طراحی مکانیزمی یکپارچه)، تمرکز این مقاله بر روی سطح نخست است. دست‌آورد این سطح که در قالب سه زیردسته ((۱) حرکت‌های انتقالی، (۲) دورانی و (۳) انتقالی- دورانی در مفاصل انعطاف‌پذیر) و به روش شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت، طراحی، شبیه‌سازی رایانه‌ای و ساخت سه مدل فیزیکی از پوسته‌های متحرک ساختمانی است که غالب مزایای ساختارهای انعطاف‌پذیر چون یکپارچگی ساختار، کاهش تعداد اعضا و وزن سازه، کاهش چشمگیر تنش در مفاصل، هزینه تعمیر و نگاهداری و در نهایت توجیه اِقتصادی طرح را به همراه دارد.

واژه‌های کلیدی
پوسته‌های ساختمانی متحرک، مکانیزم انعطاف‌پذیر، مکانیزم صلب-پیکر، مکانیزم انعطاف‌پذیر دوپایا.

*این مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده سوم تحت عنوان: "طراحی پوسته داینامیک و هوشمند با رویکرد بایونیک (طراحی مرکز تجاری)» به راهنمایی نگارندگان اول و دوم و مشاوره جناب آقای دکتر علی شیخ‌پور در دانشگاه تهران است.
**نویسنده مسئول: تلفن: ۶۶۴۰۹۶۹۶-۰۲۱، نمابر: ۶۶۴۶۱۵۰۴-۰۲۱، E-mail: ktaghizad@ut.ac.ir.

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

مفهوم پوسته ساختمان[1] پس از قرن نوزدهم، هنگامی که انقلاب صنعتی، روش‌های تولید و مصالح جدیدی را به ارمغان آورد، مطرح می‌گردد (Schittich, 2001). به مرور زمان با افزایش آگاهی از کارآیی انرژی و افزایش مصرف سوخت، اهمیت ایجاد عملکردهایی چون ذخیره‌سازی انرژی، تهویه طبیعی، عایق‌بندی، صدابندی، کنترل روشنایی و ... افزایش یافت. این ایده‌ها به عنوان رویکردهایی پایدار و کم انرژی با کرکره‌های تاشونده و ریلی ساده یا با لوورهای بازوبسته آغاز شد و با تجهیزات متعدد متحرک برای سایه‌اندازی و محافظت از خیرگی و شکست نور، مدیریت گرما و انرژی ادامه یافت (Grosso & Basso, 2010, 1).

پوسته‌های متحرک در معماری، معمولاً در تعداد کم ساخته و برای هر پروژه جدیدی به طور خاص طراحی و اِجرا می‌شوند. در معماری به مثابه سایر حوزه‌های مهندسی، ساختارهای متحرک معمولاً بر پایه اصول ساخت اولیه مکانیک عناصر صلب[2] هستند (Knippers & Speck, 2012, 2). هر چند که تفاوت عمیقی بین ساختارهای متحرک در صنعت ماشینی و معماری وجود دارد. وزن بالای این ساختارهای متحرک با عناصر مکانیکی، منجر به وزن بالاتر ساختمان و تأثیرات مخرب ناشی از آن می‌شود. علاوه بر این، ساخت طرح‌های پیچیده در معماری که غالباً مطلوب معماران و طراحان است، صرفاً با پیچیده‌تر شدن تجهیزات مکانیکی حاصل می‌گردد. به عبارتی دیگر، در کنار تمام مزایای ساختارهای موجود با عناصر صلب که در برخی موارد غیرقابل چشم‌پوشی است، معایب ناشی از این نحوه طراحی و ساخت را نیز می‌بایست در نظر داشت. به نظر می‌رسد بخش اعظم مشکلات ناشی از ساختارهای مکانیکی صلب، مفاصل متحرک‌ساز آنها است که تنش‌های بالا و شکست سازه‌ای غالباً در این قسمت‌ها رخ می‌دهد (Schleicher et al., 2014, 105,106). استفاده از ساختارهایی که در عین داشتن کارآیی ساختارهای مکانیکی، سادگی بیشتر، پیچیدگی کمتر و هزینه اقتصادی مقرون به صرفه‌ای را به همراه داشته باشند، از افق‌های پیشروی حوزه معماری است. در این میان پیشرفت‌های صنعت ساخت‌وساز و مصالح نوین نیز در پیشبرد این اهداف تأثیر به سزایی داشته است.

مبحث مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر[3] به علت مزایای گسترده‌ی آن در مهندسی، چند دهه‌ای است که در علوم مختلفی چون رباتیک، مهندسی پزشکی، هواوفضا و ... مطرح گردیده ولی ورود آن‌ها به معماری، به چند سال اخیر باز می‌گردد و هنوز فاصله زیادی با کاربردی شدن آن به صورت گسترده در صنعت ساختمان‌سازی وجود دارد.

مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر به دلیل طبیعت بدون مفصل خود، مزایای بیشماری چون یکپارچگی، کاهش محسوس در تمرکز تنش، دقت و تکرارپذیری بالا، کاهش تعداد مفاصل و در نتیجه کاهش وزن سازه را دارا هستند. در معماری بومی مناطق مختلف، از رفتار الاستیک مصالح ساختمانی در دسترس به عنوان روشی اقتصادی در ساخت بناها استفاده می‌شد (Lienhard, 2014, 2) (تصویر۱). خم کردن عناصر انعطاف‌پذیر خطی یا صفحه‌ای، راهکاری است که می‌تواند این عناصر را ساده‌تر از روش‌های دیگر به فرم، مقاومت و یا قابلیت‌های موردنظر سازندگان یک فضا تبدیل کند (متینی، ۱۳۹۴، ۶۹) و غالباً از مصالحی مانند چوب و فرم‌یابی به صورت تجربی بهره می‌گرفتند. پیشرفت‌های اخیر در فنون شبیه‌سازی، فرم‌یابی و آنالیز، ساختارهایی را که هندسه منحنی پیچیده‌شان صرفاً از فرایند برپایی آنها نشأت می‌گیرد و در این فرایند دچار تغییر شکل الاستیک می‌شوند را امکان پذیر ساخته است (Lienhard, 2014, 53).

بسیاری از معماران و طراحان، با مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر (عملکرد، کاربرد و مزایای آنها) آشنا نیستند. در واقع کمتر مجموعه‌ای از این نوع مکانیزم‌ها با الگوهای طبقه‌بندی شده وجود دارد که بتواند در شناخت پتانسیل بالقوه این مکانیزم‌ها یاری رساند. هدف این تحقیق، افزایش سطح آگاهی طراحان و معماران در این زمینه است تا در صورت نیاز بتوانند از مزایای این مکانیزم در طراحی‌هایشان بهره گیرند. در دهه اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه در آلمان در دست انجام است، با این حال این حوزه هنوز در مراحل ابتدایی خود است و دستیابی به ساختارهایی که بتواند جایگزین مناسبی برای ساختارهای مکانیکی در صنعت ساختمانسازی گردد، نیازمند آزمایشات و تحقیقات گسترده‌تری است.

این مقاله، ابتدا با ذکر نمونه‌هایی از پوسته‌های متحرک ساختمانی موجود در جهان، به بررسی نحوه حرکت و مشکلات ناشی از آن می‌پردازد. در ادامه، مکانیزم انعطاف‌پذیر به عنوان

الف ب ج د

تصویر۱- استفاده از مصالح الاستیک در معماری بومی. الف) پروژه خانه‌های مودهیف[4] در جنوب عراق، ساخته شده از ساقه گیاهان و کاه. ب) پروژه یامات[5] در ایران، ساخته شده از چوب به دست چادرنشینان ترکمن. ج) پروژه کافه آب و باد، بار بامبو[6] در ویتنام، ساخته شده از بامبو. د) پروژه گنبد چوبی کلیسایی در کره، ساخته شده از چوب چندلایه.
ماخذ: (Lienhard, 2014, 53,54)

www.SID.ir

Archive of SID

جایگزینی مناسب برای مکانیزم موجود معرفی می‌شود. در بخشِ اصلی این مقاله، نحوه بکارگیری از مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر و دسته‌بندی کاربردی آن در معماری در دو سطح ارائه می‌گردد که در این پژوهش، تمرکز بر سطح اول قرار دارد. در بیان این سطح، از راهبرد شبیه‌سازی (طراحی، مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی رایانه‌ای) بهره‌گیری شد. در مدل‌سازی‌های فیزیکی (مقیاس (۰/۱)) از مصالح انعطاف‌پذیر پلی‌پروپیلن و فنر ورقه‌ای برای ساخت ساختار اصلی و از کاغذ اوریگامی به عنوان پوشش استفاده شد و تمامی برش‌ها با دستگاه برش لیزری انجام پذیرفت. در شبیه‌سازی رایانه‌ای، با بهره‌گیری از قابلیت‌های نرم‌افزار راینوسروز[۷] و اَفزونه گرس‌هاپر[۸] در ارائه پارامتریکی نما، حالات مختلف بازوبسته شدن پوستهٔ متحرک ساختمان، نشان داده می‌شود.

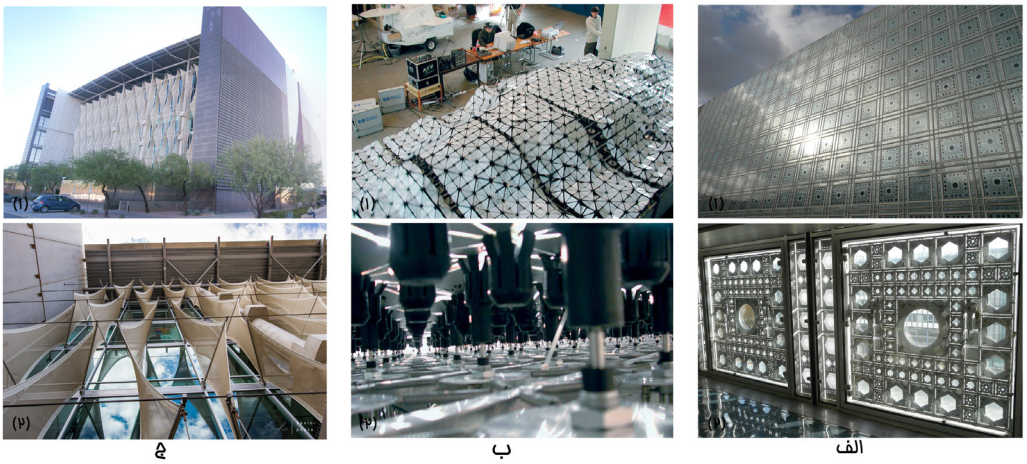
ضرورتِ انجام پژوهش

ایجاد حرکت در ساختارهای موجود، غالباً از طریقِ مفاصل مکانیکی و اعضای صلب صورت می‌پذیرد. مبحث حرکت در معماری که در پاسخ به عاملی خارجی است، به واسطهٔ حضور و تعامل با کاربر، اهمیت و نقش ویژه‌ای دارد و این امر سبب می‌گردد نقایص مکانیزم‌های مکانیکی موجود، به پیآمدهای گسترده‌تری چون عدم بکارگیری این مکانیزم‌ها، علی رغم مزایای بسیار آنها، منتهی گردد. ساختارهای انعطاف‌پذیر در بسیاری موارد قابلیت جایگزینی با ساختارهای صلب-پیکر را دارا هستند. با وجود استفاده از این مکانیزم در سایر رشته‌ها چون مهندسی پزشکی، هوافضا و رباتیک، در معماری به دلیل مقیاس بزرگ ساختارهای متحرک، کاربرد آن‌ها مهجور مانده است و این در حالی است که با بکارگیری مکانیزم انعطاف‌پذیر در ساختارهای متحرک معماری، می‌توان از مزایایی چون کاهش تعداد اعضا و در نتیجه کاهش وزن سازه، زمان و هزینهٔ مونتاژ، تولید و نگاه‌داری آسان‌تر بهره گرفت.

پوسته‌های ساختمانی سخت و مکانیزم حرکتی آن‌ها

ایده پوسته‌های ساختمانی متحرک، غالباً با حسگر و سیستم‌های مکانیکی که تحت عنوان تکنولوژی سخت[۹] همراه می‌گردد. اِصطلاح «سخت» به صورت تحت‌اللفظی اشاره به شرایط ساختارهای مکانیکی آنها مانند موتورهای متحرک‌ساز، دنده‌ها و حسگرهاشان دارد (Sample, 2012). اولین نمونه این نوع از پوسته‌های ساختمانی که در دهه ۷۰ میلادی ساخته شد (Shara-idin, 2014)، تالار شهر لس آنجلس[۱۰] طراحی ریچارد نیوترا[۱۱] در سال ۱۹۶۲ بود. در این دسته از پوسته‌های ساختمانی، از اعضای صلب با مفاصل متحرک‌ساز بهره گرفته می‌شد و غالباً نیروی ورودی در یک مفصل متحرک به یک حرکت چرخشی یا انتقالی تبدیل می‌گردید (Compliant Mechanisms Research; Brigham young university; 2015). در ادامه به سه نمونه از پوسته‌های متحرکی که در این سیستم طراحی شده‌است، اِشاره می‌گردد.

پوسته متحرک مؤسسه جهان عرب[۱۲] در پاریس (تصویر۲ (الف))، طراحی معمار فرانسوی جین ناول[۱۳] در سال ۱۹۸۷، مکانیزمی پیچیده از عناصری است که برای تنظیم مقدار نور و تابش گرمایی از حسگرهای حساس به نور بهره می‌برد. در حال حاضر این پوسته به علت نقص در سامانه حرکتی، ثابت است (Ritter, 2007, 7). ایجیس‌هایپوسرفیس[۱۴] (تصویر۲(ب)) ساخته شده به سال ۲۰۰۱، نمای متحرک دیگری است که با هدف تغییر شکل در پاسخ به محرک خارجی مانند حرکت، تصویر، گرما، صدا و نور طراحی گردید (Burry, 2003). این سطح، از راه‌حل‌های مکانیکی با تکنولوژی های-تک[۱۵] مانند اجزای پیستونی متعدد،



تصویر۲- پوسته‌های متحرک با مکانیزم صلب. الف) نمای کلی و جزئیات پوسته متحرک مؤسسه جهان عرب. ب) نمای کلی و جزئیات پوسته متحرک ایجیس هایپو سرفیس. ج) نمای کلی و جزئیات پوسته متحرک کتابخانه مرکزی فوانیکس.
ماخذ: (URL1,URL2,URL3)

www.SID.ir

Archive of SID

بهره می‌گیرد که علیرغم موفقیتش در طراحی، سطح دینامیکی آن نتوانست به درستی عمل کند و در اجزای پیستونی آن تمایل به شکست در اثر خستگی[16] مشاهده شد (Chun, 2007). پوسته متحرک دیگری که میزان نورورودی به ساختمان را براساس زاویای خورشید توسط نرم‌افزاری پیچیده تعیین می‌کند، کتابخانه مرکزی فوانیکس[17] (تصویر۲(ج)) طرح ویل برودر[18] است. در این پروژه نیز سامانه فعال نمای ساختمان دچار نقص گردید که در نهایت به تعویض آن انجامید (Ritter, 2007).

نمونه‌های ذکر شده در بالا، نماهای متحرک شکننده و آسیب‌پذیری را نشان می‌دهند که اعتبار، طول عمر، هزینه و مصرف انرژی بالای این پوسته‌ها، موانع اصلی در تمایل به طراحی و ساخت تعداد بیشتری از این دست پوسته‌های ساختمانی است.

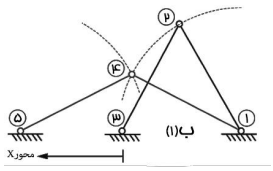
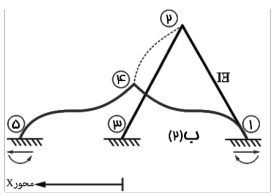
به نظر می‌رسد بسیاری از مشکلاتی که سبب محدودیت استفاده از پوسته‌های متحرک می‌شود، ریشه در پیچیدگی‌های مکانیکی مرتبط با متحرکسازی این پوسته ها دارد. امری که سبب شد تا استفاده از این پوسته‌ها به دلیل هزینه‌های زیاد ساخت، تعمیر و نگهداری از آنها مقرون به صرفه نباشد. حال این سوال مطرح می‌گردد که چگونه می توان از مصالح و ابزار جدید برای دست یافتن به اجزای مکانیکی کمتر در معماری متحرک استفاده کرد؟ در این زمینه، یکی از پتانسیل‌های طراحی ممکن، استفاده از مصالح اِلاستیک و تغییرشکل‌پذیر در ساخت اجزای معماری است. به دلیل آنکه معماری غالباً در فرم استاتیکی خود درک می‌شود، ایده داشتن یک معماری ریخت‌پذیر با استفاده از مصالح اِلاستیک به نظر متناقض می‌رسد زیرا این دست از مصالح، غالباً دارای خصوصیات سازه‌ای نیستند که به آنها امکان تأمین مقاصد ریخت‌پذیر را دهد. در تضاد با ساختارهای متحرک متداول، ساختارهای متحرک با مصالح انعطاف‌پذیر مفهومی جدید ملهم از ایده ریخت‌پذیری در طراحی است که تغییرشکل را در پاسخ به خصوصیت الاستیک مصالح ارائه می‌کند. در این ساختارها، سطح تغییرشکل‌دهنده، خود یک متحرک‌ساز محسوب می‌شود که این امر موجب رهایی پوسته‌های تغییرشکل‌دهنده از یک ساختار سنگین می‌گردد. هدف اصلی در پس گسترش این ایده در طرح‌های معماری، پیوستگی ساختار اسکلت و صفحه برای ایجاد تحرک است. این متحرک‌سازی در سرتاسر سیستم با استفاده از مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر و استفاده کمتر از اجزای مکانیکی رخ می‌دهد.

مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر

مطالعه حرکت به همراه جرم و نیروها در حوزه کینتیک[19] مطرح می‌گردد (Lienhard, 2014). اگر تغییر شکل‌های اِلاستیک در سامانه‌ای عامل حرکت محسوب گردد، نمی‌توان آن را صرفاً با کینماتیک توصیف کرد زیرا حرکت و تغییر شکل، وابسته به خصوصیات مکانیکی سیستم و نیروهای دخیل در حرکت هستند. بنابراین سیستمی که نیروهای ورودی یا جابجایی را به وسیله تغییر شکل پیکره اِلاستیک به نقطه دیگر انتقال می‌دهد، در زیر دسته کینتیک و یا به عبارت دقیق‌تر کینتیک الاستیک[20] قرارمی‌گیرد. در مهندسی مکانیک این گونه از سیستم ها را مکانیزم‌های انعطاف پذیر می‌نامند (Lienhard, 2014).

یک مکانیزم انعطاف‌پذیر به مانند مکانیزم‌های صلب، حرکت، نیرو یا انرژی را انتقال می‌دهد اما برخلاف مکانیزم‌های صلب‌پیکر، مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر حداقل بخشی از حرکت خود را از تغییر شکل عناصر منعطف خود به دست می‌آورند (Howell, 2001, 2). به عبارت دیگر، هنگامی‌که تغییرشکل‌های خمشی عاملی نامطلوب در مکانیزم‌های صلب متداول محسوب می‌شوند، در مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر به منظور انتقال نیرو و حرکت از آن بهره گرفته می‌شود. مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر و سازه‌های متحرک

جدول۱- مقایسه میان مکانیزم صلب‌پیکر و انعطاف‌پذیر.

خصوصیات ساختارهای متحرک	تفاوت حرکت در دو مکانیزم صلب و انعطاف‌پذیر
با مفاصل مکانیکی	
۱. متشکل از تعداد زیادی اجزا ۲. وزن بالا ۳. پیچیدگی در ساخت ۴. دشواری در تعمیر و نگهداری ۵. هزینه‌های بالای ساخت، تعمیر و نگهداری ۶. احتمال لقی و تکان‌های ناشی از آن و فرسودگی در مفاصل و نیاز به روغن‌کاری ۷. تمرکز تنش در مفاصل مکانیکی ۸. نیاز به نیروی در برگشت ساختار به حالت اولیه ۹. سهولت در طراحی	
با مفاصل انعطاف پذیر	
۱. داری ساختاری یکپارچه و کاهش تعداد اجزا ۲. سبکی ۳. سهولت در ساخت ۴. سهولت در تعمیر و نگهداری ۵. مقرون به صرفه در ساخت، تعمیر و نگهداری ۶. حذف مفاصل و نیز دشواری مربوط به آن‌ها ۷. توزیع تنش در سرتاسر ساختار یکپارچه خود ۸. ذخیره‌سازی انرژی تنشی و عدم نیاز به نیرو در برگشت ساختار به حالت اولیه ۹. دشواری در طراحی ۱۰. تأثیر مستقیم مصالح، هندسه، شرایط باربری و تکیه‌گاهی بر ساختار	

ماخذ: (نگارندگان و Lienhard, 2014,15).

www.SID.ir

Archive of SID

اِلاستیکی، سازه‌های خمش پذیری هستند که به لحاظ استاتیکی نامعین هستند (Lienhard, 2014). جدول۱، نحوه تغییرشکل در دو مکانیزم صلب و انعطاف‌پذیر را در مقایسه با هم نشان می‌دهد.

کاربرد مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر در معماری

گرچه استفاده از مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر به منظور ایجاد حرکت در معماری پیشینه‌ای طولانی ندارد و در سال‌های اخیر با الهام از ساختارهای موجود در طبیعت بیشتر بدان پرداخته شده است، این تحقیق بر آن است تا با بررسی کاربرد این مکانیزم‌ها در دو سطح کلی، به نحوه عملکرد آنها در معماری بپردازد، گرچه در برخی مواقع مرز مشخصی میان این دو سطح وجود ندارد.

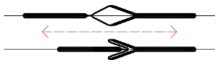
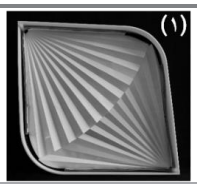
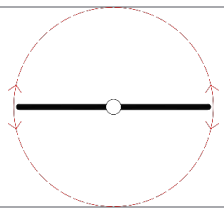
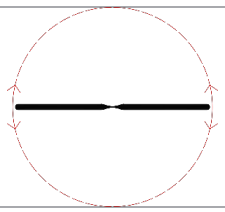
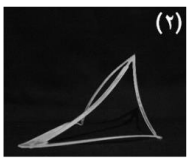
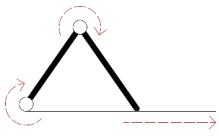
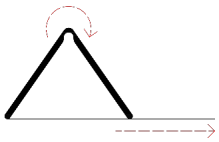
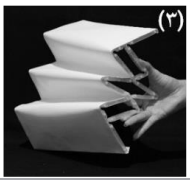
۱. سطح نخستِ استفاده از مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر در پوسته‌های متحرک در معماری

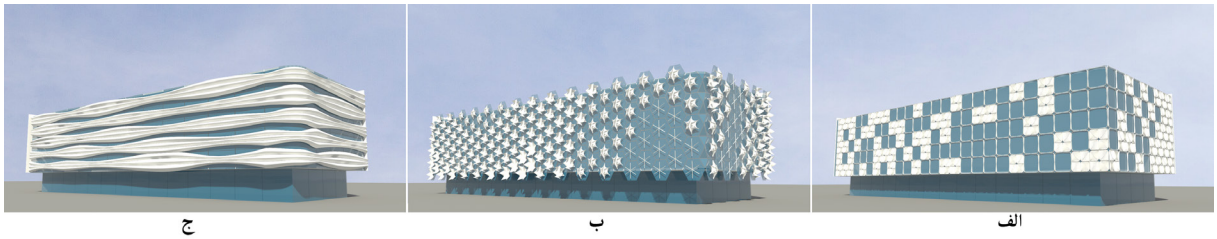
این سطح شامل آن دست از طرح‌هایی می‌شود که در آنها، مفاصل انعطاف‌پذیر جایگزین مفاصل مکانیکی در ساختارهای صلب-پیکر می‌شود. دراین دست از طرح‌ها، طراحی ساختار متحرک مورد نظر به مانند ساختارهای مکانیکی انجام می‌پذیرد و صرفاً از مفاصل انعطاف‌پذیر برای اتصال اعضای صلب به هم استفاده می‌شود. در کنار تمامی مزایای این روش که در جدول۲ برشمرده شد، این روش محدودیت‌هایی نیز دارد که نمی‌توان این جایگزینی را در تمامی شرایط انجام داد. به عنوان نمونه در اغلب مواقع مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر، بازه حرکتی محدودتری نسبت به مکانیزم‌های صلب-پیکر دارند و طراحی آنها دشواری‌های بیشتری را به دنبال خواهد داشت. به نظر می‌رسد، بیشتر ساختارهای متحرک با ابعاد محدود و مقیاس کوچک، در گسترهٔ این سطح از مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر قرار می‌گیرند.

به طور کلی حرکت‌های مکانیکی را همواره می‌توان در انواع پایهٔ آن دسته‌بندی کرد: دوران[۲۱]، انتقال[۲۲] و ترکیب این دو. در این طبقه‌بندی محل قرارگیری مفصل یا لولا در نظر گرفته نشده است (Elkhayat, 2014, 819). در جدول۲، مقایسه‌ای میان این سه نوع حرکت با مفاصل مکانیکی و انعطاف‌پذیر صورت گرفته است.

تصویر۳، شبیه‌سازی پوسته‌های متحرک طراحی شده در

جدول۲- تقسیم‌بندی حرکت‌های مکانیکی در معماری.

انواع حرکت‌های مکانیکی (در پوسته‌های متحرک)	مفاصل مکانیکی	مفاصل انعطاف‌پذیر	پوسته‌های متحرک (با مفاصل انعطاف‌پذیر)	توضیحات
حرکت انتقالی			 (۱)	مکانیزم دوپایا، نمونه‌ای از حرکت انتقالی در پوسته است که با خمش مفصل، پوسته در بین دو حالت جابجا می‌گردد.
حرکت دورانی			 (۲)	چرخش اعضا حول مفصل انعطاف‌پذیر، امکان حرکت دورانی را در پوسته متحرک فراهم می‌آورد.
حرکت دورانی-انتقالی			 (۳)	مکانیزم چتری، نمونه‌ای از سامانه‌های بازوبسته‌شونده است که با انتقال و دوران اعضا حول مفصل، امکان حرکت را فراهم می‌آورد.



الف ب ج

تصویر۳- شبیه‌سازی رایانه‌ای پوسته‌های متحرک طراحی شده در جدول۲ در مقیاس ساختمانی. الف) پوستهٔ متحرک با مکانیزم دوپایا (جدول۲-پوستهٔ شمارهٔ۱). ب) پوستهٔ متحرک با مفاصل دورانی انعطاف‌پذیر (جدول۲-پوستهٔ شمارهٔ۲). ج) پوستهٔ متحرک با مکانیزم چتری (جدول۲-پوستهٔ شمارهٔ۳).

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۲ را بر روی نمای ساختمان، در حالات مختلف باز و بسته، نشان می‌دهد. جزئیات بیشتر مکانیزم‌های طراحی شده، در ادامه، در دسته‌بندی انواع حرکت‌های مفاصل، بیان می‌شود.

۱-۱. حرکت‌های انتقالی با مفاصل انعطاف‌پذیر

حرکت انتقالی، حرکت یک عضو در راستای خطی در صفحه‌ای مسطح است (Moloney, 2011,7). بر اساس نیاز و عملکرد ساختار متحرک موردنظر، می‌توان با کنترل محور حرکت و درجه آزادی، انواعی از حرکت انتقالی (حرکت‌های موازی، محوری، دایره‌ای و محیطی) را در این گونه از پوسته‌ها ایجاد نمود (Megahed, 2017,7). این حرکت‌ها غالباً با استفاده از مفاصل مکانیکی در پوسته‌ها ایجاد می‌شوند و این در حالی است که مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر نیز امکان حرکت انتقالی را با خمش مفصل امکان‌پذیر می‌سازند (Deshmukha et al., 2014,1035. PEI, 2014, 147).

توانایی ذخیره‌سازی انرژی ناشی از تنش در مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر، نیاز به ساختارهای برگشت‌پذیر را رفع می‌کند و می‌توان برای طراحی مکانیزم‌های دوپایا[۲۳] از آنها بهره گرفت (Golabchi & Guest; 2009). مکانیزم‌های دوپایا، مکانیزم‌هایی هستند که دارای دو حالت تعادل پایدار در محدوده حرکتی خود هستند و به سمت یکی از این دو موقعیت خود تمایل دارند. در این دو حالت، مکانیزم به نیروی ورودی برای ماندن در حالت تعادل خود نیازی ندارد و با وارد آوردن نیرویی اندک به موقعیت پایدار بعدی خود نقل مکان می‌کند. به لحاظ مکانیکی، رفتار دوپایا ناشی از ذخیره و آزادسازی انرژی در موقعیت‌های پایداری است که در کمینه موضع انرژی ذخیره شده اتفاق می‌افتد (Milojevic, 2011,181). مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر دوپایا[۲۴]، گروهی خاص از مکانیزم‌های دوپایا هستند که از خمش اعضای خود بیش از تکیه صرف بر مفاصل صلب خود، برای ایجاد حرکت بهره می‌گیرند. مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر، شیوه‌ای بسیار مطلوب برای رفتارهای دوپایا ارائه می‌کنند زیرا اعضای انعطاف‌پذیر آنها امکان حرکت و ذخیره‌سازی انرژی برای ترکیب شدن در یک عضو را فراهم می‌سازند (Jensen & Howell, 2004, 657).

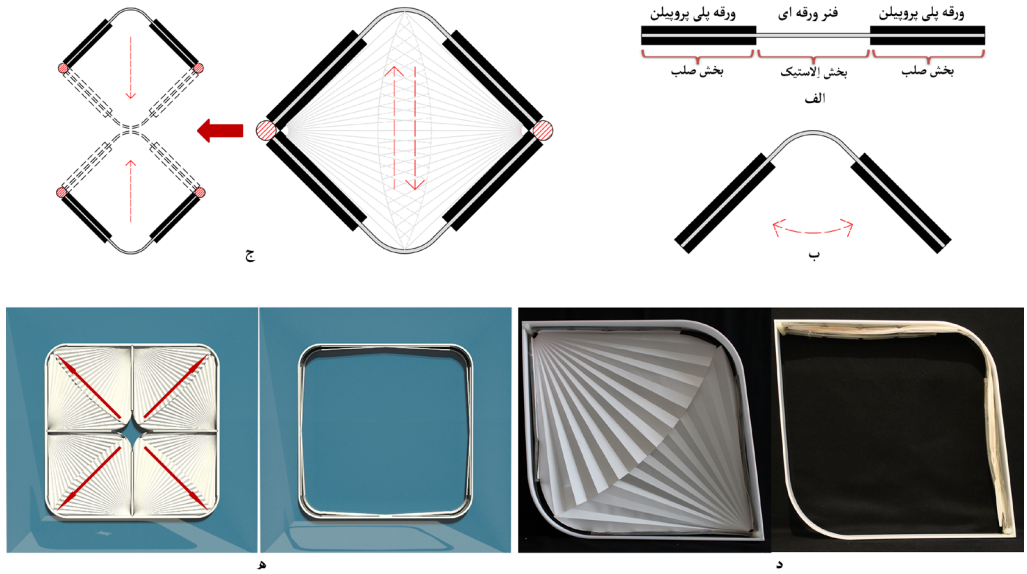
با استفاده از مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر دوپایا می‌توان نماهای متحرکی را طراحی کرد که دارای دو حالت باز و بسته برای ورود و عدم ورود نور و جریان هوا به داخل فضا باشند. به این ترتیب که با اعمال نیرویی اندک به دو سر عضو انعطاف‌پذیر و ایجاد خمش در آن، نما می‌تواند بین دو حالت باز و بسته خود از طریق ذخیره و آزادسازی انرژی، تغییر وضعیت داشته باشد.

مدل فیزیکی طراحی شده (تصویر۴) نمونه‌ای کوچک مقیاس از پوسته متحرکی است که از خمش عضو انعطاف‌پذیر خود برای ایجاد حرکت انتقالی در کل پوسته بهره می‌گیرد. برای ساخت این مدل، از فنرِ ورقه‌ای به عنوان مفصل انعطاف‌پذیر برای ذخیره و آزادسازی انرژی در میان دو قطعه ورق پلی‌پروپیلن به عنوان عضو صلب استفاده گردید. این ساختار دارای دو حالت تعادلی در زوایای ۹۰ درجه خود است که با وارد آوردن اندکی نیرو در دو انتهای اعضا، می‌توان دو حالت باز و بسته را در پوسته ایجاد نمود.

از مزایای این پوسته می‌توان به سهولت ساخت، نگاهداری و تعمیر، کاهش وزن و مصرف انرژی در تغییر وضعیت بین دو حالت باز و بسته اشاره نمود.

۱-۲. حرکت‌های دورانی با مفاصل انعطاف‌پذیر

در حرکت دورانی، امکان چرخش عضو حول محوری دلخواه فراهم است (Moloney, 2011,7). با ملاحظه محل قرارگیری مفصل و میزان چرخش می‌توان انواعی از حرکت‌های چرخشی



تصویر۴- نمونه طراحی شده از پوسته‌ای متحرک با مفصل انعطاف‌پذیر در حرکت انتقالی. الف)کامپوزیت فنر و ورق پلی‌پروپیلن، که فنر به عنوان بخش الاستیک و ورق پلی‌پروپیلن به عنوان بخش صلب عمل می‌کند. ب) نمایش خمش کامپوزیت در مفصل انعطاف‌پذیر. ج) نمایش جابجایی مدول بین دو حالت باز و بسته. د) نمونه‌سازی فیزیکی از مدول متحرک در دو حالت باز و بسته. ه) نمونه‌سازی رایانه‌ای از نحوه گسترش مدول متحرک.

www.SID.ir

Archive of SID

را در پوسته‌های متحرک ایجاد نمود. مفاصل انعطاف‌پذیر با خمش خود، امکان چرخش حول یک یا بیش از یک محور را در پوسته‌های متحرک فراهم می‌سازند.

در مدل فیزیکی طراحی شده (تصویر۵)، از خمش برون صفحه‌ای در مفصل انعطاف‌پذیر برای ایجاد حرکت در کل پوسته بهره گرفته شده است و با بکارگیری از صفحات پلی‌پروپیلن در ساخت، تمامی اعضا در انتقال نیرو شرکت داشته‌اند. علاوه بر مزایای بهره‌گیری از مفاصل انعطاف‌پذیر، از مزایای خاص این طرح می‌توان ساخت یکپارچه اعضا، سبکی ساختار، ساخت دوبعدی و دستیابی به ساختاری سه‌بعدی را برشمرد.

۱-۳. حرکات انتقالی-دورانی با مفاصل انعطاف‌پذیر

بسیاری از پوسته‌های متحرکی که در معماری کاربرد دارند، ترکیبی از حرکت‌های دورانی و انتقالی را در مکانیزم حرکتی خود دارند. دو مکانیزم تاشدگی[۲۵] و قیچی[۲۶]، زیرمجموعه‌ی از این نوع حرکت‌ها محسوب می‌گردند که در ادامه نمونه‌ای از آن در پوسته‌های معماری بررسی می‌شود.

۱-۳-۱ اوریگامی[۲۷]

اوریگامی هنر تاکردن کاغذ است (Cromvik, 2007, 3) و به عنوان زیرمجموعه‌ای از حالت تاشدگی محسوب می‌گردد که در حیطه مهندسی، از تاشدن اعضای خود برای حل مصائب مکانیکی بهره می‌گیرد (Demaine & O'Rourke, 2007).

مکانیزم اوریگامی بدین صورت است که خطوط تا به عنوان مفصل و صفحات بین خطوط به عنوان عضوهای صلب آن محسوب می‌گردند و حرکت، بدون خمش یا پیچش اعضا انتقال می‌یابد (Tachi, 2010). همپوشانی مکانیزم اوریگامی با ساختارهای کینماتیک، قرارگیری آنها در دسته ساختارهای انعطاف‌پذیر را امکان‌پذیر می‌سازد. هنگامی‌که در اوریگامی‌های کنتیک، ایجاد حرکت وابسته به خمش اعضای انعطاف‌پذیر باشد به عنوان مکانیزمی انعطاف‌پذیر محسوب می‌گردد (Greenberg et al., 2011, 3). این نحوه ساخت زیرمجموعه‌ای از مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر است که مزایایی چون کاهش تعداد اعضا و درنتیجه کاهش وزن، سهولت[۲۸] و کاهش هزینه ساخت و افزایش دقت را به همراه خواهد داشت (Jacobsen et al., 2007, 165).

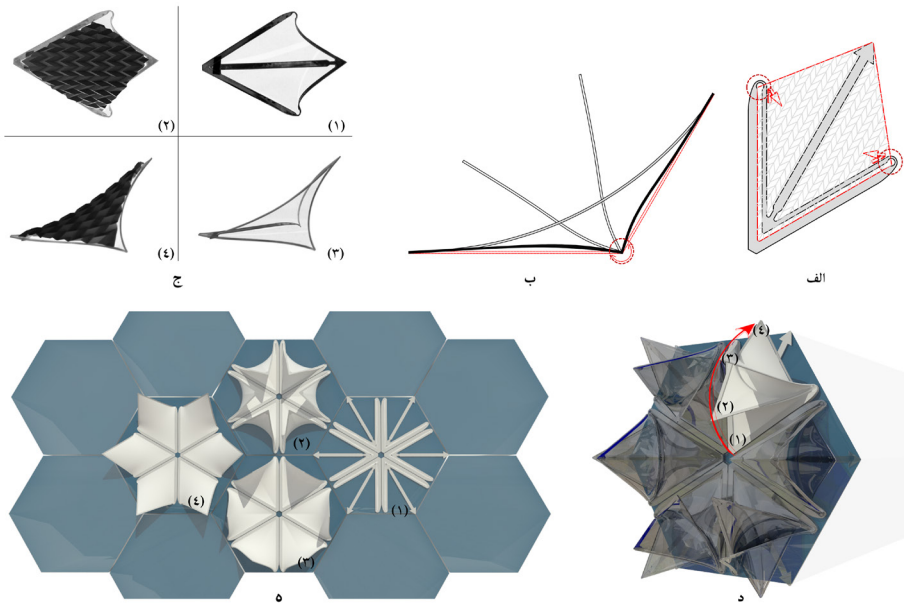
ساخت ساختارهای اوریگامی متحرک با مفاصل انعطاف‌پذیر را می‌توان به دو دسته کلی طبقه‌بندی کرد. در جدول۳، انواع حالات قرارگرفته در هر از این دسته‌ها آورده شده است.

۱-۳-۲. ساختار چتری؛ نمونه‌ای از ساختارهای بازوبسته شونده

ساختارهای چتری متحرک، از انواع ساختارهای بازوبسته شونده‌ای هستند که غالباً برای ایجاد سایه برروی نما در پاسخ به شرایط محیطی خارج (تعدیل نور و حرارت دریافتی از خورشید و کاهش خیرگی) بکار گرفته می‌شوند. این ساختارها غالباً اعضایی با اتصالات مفصلی هستند که به دلیل تعدد اجزا و افزایش وزن، تعمیر و نگهداری آن دشوار است.

بهره‌گیری از ساختارهای انعطاف‌پذیر، یکی از شیوه‌های فایق آمدن بر این مشکلات است، بدین صورت که مفاصل انعطاف‌پذیر را در نقاط تاشدگی سازه با مفاصل مکانیکی جایگزین می‌کنند.

در مدل فیزیکی طراحی شده از ورقه پلی‌پروپیلن (تصویر۶)، از مفاصل خمشی انعطاف‌پذیر برای ایجاد حرکت در پوسته استفاده شده است. حرکت انتقالی بخش مرکزی، حرکت خمشی مفاصل و در نتیجه حرکت کل ساختار را موجب می‌گردد.

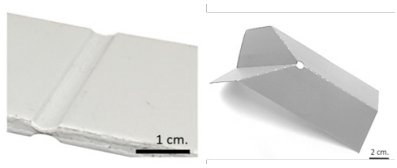
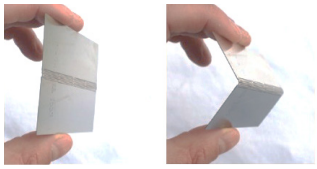


تصویر۵- نمونه طراحی شده از پوسته‌ای متحرک با مفصل انعطاف‌پذیر در حرکت دورانی. الف) نمای از بالای مدول (محل قرارگیری مفصل در تصویر نشان داده شده است). ب) نحوه باز شدن مدول متحرک (محل قرارگیری مفصل در تصویر نشان داده شده است). ج) مدل‌سازی فیزیکی مدول طراحی شده، تصاویر۱ و ۲ نمای از بالا و تصاویر۳ و ۴ نمای جانبی مدول (از مدلی اریگامی به عنوان پوشاننده استفاده گردید). د) مراحل باز شدن یک مدول. ه) مدل‌سازی رایانه‌ای از نحوه باز شدن مدول متحرک در چهار حالت.

www.SID.ir

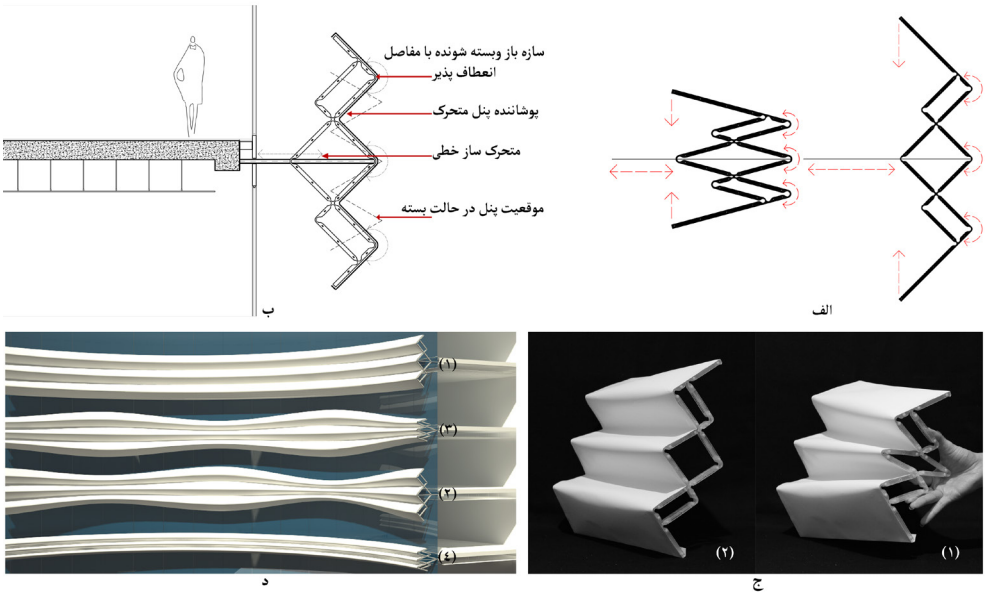
Archive of SID

جدول۳- دسته‌بندی پوسته‌های اُریگامی با مفاصل انعطاف‌پذیر بر اساس متریال مورد استفاده در ساخت.

ساخت پوسته‌های اوریگامی با مفاصل انعطاف‌پذیر	یک نوع متریال برای ساخت استفاده شود*	**پلاستیک** ورق پلی‌پروپیلن ← ایجاد خط مفصل با کاهش مقطع ورق پلی‌پروپیلن ← ایجاد خط مفصل با خط دوخت	
		فلز ورق فلزی ← ایجاد خط مفصل با برش	
	انواعی از متریال‌ها برای ساخت استفاده شود**	**مفصل و عضو صلب** مفصل: استفاده از متریال‌های با قابلیت انعطاف‌پذیری عضو صلب: استفاده از متریال‌های متنوعی با توجه به شرایط پروژه	
		کامپوزیت کامپوزیت: استفاده از متریال‌های با قابلیت انعطاف‌پذیر به عنوان هسته و متریال‌های صلب به عنوان لایه خارجی هسته	

*با توجه به نوع متریال مورد استفاده، نحوه ساخت متفاوت خواهد بود.

**متریالی که برای مفصل مورد استفاده قرار می‌گیرد میبایست از نوع انعطاف‌پذیر باشد.



تصویر۶- نمونه طراحی شده از پوسته‌ای متحرک با مفصل انعطاف‌پذیر در حرکت انتقالی-دورانی. الف) نمای جانبی مکانیزم چتری در دو حالت باز و بسته (حرکت انتقالی و دورانی هر مفصل در تصویر مشخص شده است). ب) مقطعی از نحوه قرارگیری مدول بر روی نمای ساختمان. ج) مدل‌سازی فیزیکی از نحوه باز و بسته شدن مدول. د) مدل‌سازی رایانه‌ای از نحوه باز و بسته شدن مدول بر روی نمای ساختمان.

ساخت ساختاری یکپارچه، حذف مفاصل مکانیکی موضعی و مصائب ناشی از آن، نمونه‌ای از مزایای این طرح است.

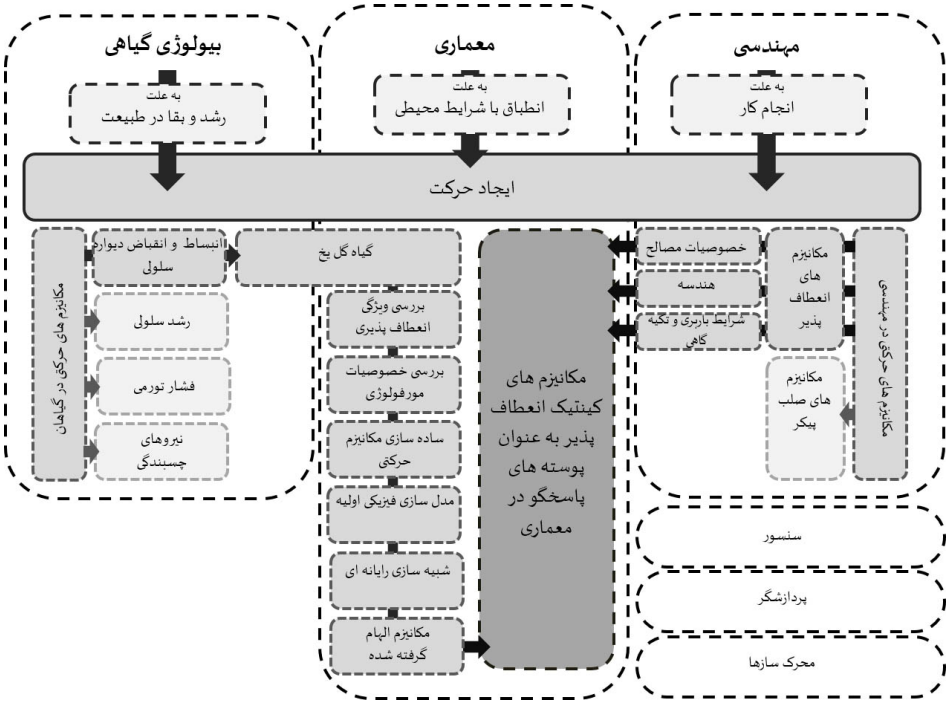
۲. سطح دومِ استفاده از مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر در ساختارهای متحرک در معماری

این سطح مربوط به آن دست از مکانیزم‌هایی است که کل اعضا به صورت یکپارچه در انتقال نیرو شرکت می‌کنند. به عبارت دیگر هدفِ اصلی این روش، طراحی مکانیزم یکپارچه‌ای است که با صرف نیرویی کمتر، بهترین پاسخگویی عملکردی و بیشترین بازده را به همراه داشته باشد. نمونه‌های ساخته شده از این دست را می‌توان در پروژه‌هایی چون فلکتوفین[۲۹] و نمای متحرک غرفه کره جنوبی در اکسپو ۲۰۱۲ در یئوسو مشاهده کرد. این روش تمامی مزایای بکارگیری مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر را چون کاهش تعداد اعضا، زمان و هزینه مونتاژ و نیز کاهش تعداد مفاصل و در

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه کاهش اصطکاک و عدم نیاز به روغن‌کاری و افزایش دقت را داراست (Howell et al., 2013). بزرگترین چالش طراحی در این سطح، دشواری نسبی در آنالیز و طراحی مکانیزم‌های انعطاف‌پذیر است که این امر نیازمند دانش در رابطه با روش‌های آنالیز مکانیزم و خمش اعضای منعطف است (Compliant Mechanisms Re-search; Brigham young university; 2015). در دهۀ اخیر، اقداماتی شایان توجه در این زمینه با الهام از طبیعت انجام گرفته است به گونه‌ای که بتوان با خلاصه‌سازی مکانیزم‌های حرکتی در گیاهان و انتقال قوانین آن به سازه‌های متحرک در معماری، به راه‌حلی کارآتر برای این نوع از سازه‌ها دست یافت. نمودار۱، دیدی کلی از طریقه انتقال قوانین حرکتی گیاهان به سازه‌های متحرک در معماری را نشان می‌دهد.



نمودار۱- نحوه انتقال قوانین حرکتی گیاهان به سازه‌های متحرک در معماری.

نتیجه

در این تحقیق، استفاده از ساختارهای انعطاف‌پذیر برای ایجاد حرکت در دو سطح کلی به منظور آشنایی معماران و طراحان با عملکرد، کاربرد و مزایای آنها، مورد بحث‌وبررسی قرار گرفت. در سطح نخست، ساختارهایی مورد بحث قرار گرفت که به روش مکانیزم‌های صلب-پیکر طراحی می‌شوند و در آنها مفاصل انعطاف‌پذیر جایگزین مفاصل مکانیکی می‌گردد که از مزایای آن می‌توان به یکپارچگی طرح، کاهش تعداد اعضا و وزن سازه، کاهش چشمگیر تنش در مفاصل و هزینه تعمیر و نگاهداری کمتر اشاره کرد که این امر سبب می‌گردد بهره‌گیری از ساختارهای متحرک در معماری با توجیه اِقتصادی همراه باشد. این سطح در سه بخش مفاصل اِنعطاف‌پذیر اِنتقالی، دورانی و اِنتقالی-دورانی بر مبنای تقسیم‌بندی حرکت پوسته‌های صلب در معماری مورد ملاحظه قرار گرفت. در هر بخش، پوسته‌ای متحرک با مکانیزمی انعطاف‌پذیر، طراحی، مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی رایانه‌ای گردید و مزایای استفاده از آن برشمرده شد.

در سطح دوم، به مکانیزم‌های اِنعطاف‌پذیر یکپارچه‌ای اشاره شد که عمده دشواری آنها در طراحی و آنالیز معادلات غیرخطی مرتبط با آنهاست و طبیعت به عنوان منبعی الهام‌بخش در طراحی اِین مکانیزم‌ها که سبب پایایی بیشتر و پیچیدگی کمتر این ساختارهاست، مورد ملاحظه قرار می‌گیرد.

گرچه استفاده از ساختارهای انعطاف‌پذیر در سطوح مختلف مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، ولی کاربرد آنها در معماری در دهه اخیر مورد توجه قرار گرفت. تحقیقات گسترده‌ای در آلمان در این زمینه در حال انجام است و تا رسیدن به مرحله استفاده گسترده در معماری، زمان باقی است.

پی‌نوشت‌ها

1 Building Skin.
2 Rigid Body.
3 Compliant Mechanisms.
4 Mudhif Houses.
5 Yamut.
6 Water and Wind Café, Bamboo bar.

www.SID.ir

Archive of SID

7 Rhinoceros.
8 Grasshopper.
9 Hard Technology.
10 Los Angeles County Hall of Records.
11 Richard Neutra.
12 L'Institut du Monde Arabe.
13 Jean Nouvel.
14 Aegis Hyposurface.
15 High-Tech.
16 Fatigue Failture.
17 Phoenix Central Library.
18 Will bruder.
19 Kinematics.
20 Elastic Kinetics.
21 Rotation.
22 Translation.
23 Bi-stable Mechanisms.
24 Bi-stable Compliant Mechanisms.
25 Fold.
26 Scissor-Fold.
27 Origami.

۲۸ یکی از خصوصیات مثبت این نوع از ساختارها، مکانیزم ساخت آنها می‌باشد که با ساخت دوبعدی و ایجاد خمش در مصالح ساختار می‌توان آنها را تبدیل به ساختارهای سه‌بعدی نمود.

29 Flectofin.

فهرست منابع

متینی، محمدرضا (۱۳۹۴)، بهره‌گیری از الگوهای طبیعت برای طراحی ساختارهای تغییرپذیر خمشو در معماری، *نشریه هنرهای زیبا- معماری و شهرسازی*، دوره ۲۰، شماره ۱، صص ۶۷-۸۰.

Burry M (2003), Between Surface and Substance, Architectural Design, *Surface Consciousness*, Vol. 73, No. 2, pp. 8-19.

Chun, M.K (2007), *Investigation into the Cause of Pneumatic Actuator Failure on the HypoSurface*, BSc thesis, Massachusetts Institute of Technology.

Compliant Mechanisms Research; Brigham young university (2015), http://compliantmechanisms.byu.edu/content/intro-compliant-mechanisms.

Cromvik, C (2007), *Numerical Folding of Airbags Based on Optimization and Origami*, Master's thesis, Chalmers University of Technology and G¨oteborg University, Sweden.

Demaine E & O'Rourke J (2007), *Geometric Folding Algorithms*, Cambridge University Press, Cambridge.

Deshmukha, Bhagyesh; Pardeshib, Sujit; Mistryc, Roohshad; Kandharkard, Sachin & Waghe Santosh (2014), Development of a Four bar Compliant Mechanism using Pseudo Rigid Body Model (PRBM), *Procedia Material Science*, Vol.6, pp. 1034-1039.

Elkhayat, Youssef Osama (2014), Interactive Movement In Kinetic Architecture, *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 42, No.3, pp.816-845.

Golabchi M. R & Guest S. D (2009), *Morphing Multistable Textured Shells*, Proc. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Valencia. Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures.

Greenberg, H. C; Gong, M. L; Howell, L. L & Magleby, S. P (2011), Origami and Compliant Mechanisms, Conference Paper: *Second International Symposium on Compliant Mechanisms at Delft*, The Netherlands, pp.1-7.

Grosso, A. E & Del, Basso P (2010), Adaptive Building Skin Structures, *Smart Materials and Structures*, Vol.19, No.12, pp.1-12.

Howell Larry, L (2001), Compliant Mechanisms, John Wiley and Sons, New York.

Howell, Larry; L, Spencer; P, Magleby & Brian M. Olsen (2013), *Handbook of Compliant Mechanisms*, A John Wiley & Sonrs, Ltd., Publication.

Jacobsen, Joseph; O, Larry; L, Howell, Spencer & P. Magleby (2007), Components for the Design of Lamina Emergent Mechanisms, ASME 2007 International Mechanical Congress and Exposition, *Mechanics of Solids and Structures*, Vol.10, pp.165-174.

Jensen, Brian; D, Larry & L, Howell (2004), Bistable Configurations of Compliant Mechanisms Modeled Using Four Links and Translational Joints, *Journal of Mechanical Design*, Vol.126, Issue 4, pp.657-666.

Knippers, Jan & Tomas, Speck (2012), Design and construction principles in nature and architecture, IOPscience, *Bioinspiration & Biomimetics*, Volume7, No.1.

Lienhard, Julian (2014), *Bending-Active Structures, Form-finding Strategies Using Elastic Deformation in Static and Kinetic Systems and The Structural Potentials Therein*, Doctoral Dissertation in Stuttgart University, ITKE.

Megahed, Naglaa Ali (2017), Understanding Kinetic Architecture: Typology, Classification, and Design Strategy, *Architectural Engineering and Design Management*, Vol.13, Issue2.

Milojevic, Andrija (2011), Compliant bistable mechanisms, *Conference Paper at Kraljevo*, Serbia, June 2011, pp. 181-186.

Moloney, Jules (2011), *Designing Kinetics for Architectural Facades*, Routledge Taylor & Francis Group, London and New York.

Sample, H (2012), *A Brise-Soleil without a Building*, In Matter: Material Processes in Architectural Production; Edited by Borden G.P. & Meredith M., Routledge, Oxon, pp. 329-339.

Schittich, C (2001), *In Detail: Building Skins—Concepts, Layers, Materials*, Birkhauser, Basel.

Sharaidin, Kamil (2014), *Kinitic Façade: Towards design for Environmental Performance*, Presented to the School of Architecture and Design RMIT University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy.

Ritter, Axel (2007), *Smart Materials in Architectur; InteriorArchitecture and Design*, Birkhauser Publication, Basel, Berlin, Boston.

Schleicher, Simon; Julian, Lienhard; Simon, Poppinga; Thomas, Speck & Jan, Knippers (2014), A Methodology for Transferring Principles of Plant Movements to Elastic Systems in Architecture, *Computer-Aided Design*, Vol.60, pp.105-117.

Tachi, T (2010), Rigid-Foldable Thick Origami, in: Origami 5: *The 5th International Conference on Origami in Science Mathematics and Education*.

PEI, Xu; YU, Jingjun; ZONG, Guanghua & BI, Shusheng (2014), Design of Compliant Straight-line Mechanisms Using Flexural Joints, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 27, No. 1, pp. 146-153.

URL1: https://www.imarabe.org/en/architecture

URL2: http://fluxwurx.com/installation/wpcontent/uploads/2011/01/PR_2003_hyposurface

URL3: https://www.archdaily.com/255208/burton-barr-central-library-will-bruderpartners

www.SID.ir

Archive of SID

Compliant Mechanisms; an Approach Leading to Reduce Functional Deficiencies of Kinetic Skins*

Katayoon Taghizade**[*1]*****, Mohammadreza Matini*****[2]*****, Elnaz Kakouee*****[3]***
[1]Associate Professor, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.
[2]Assistant Professor, School of Architecture, Tehran University of Art, Tehran, Iran.
[3]M.A. in Architectural Technology, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.
(Received 29 May 2018, Accepted 22 Jun 2019)

In order to achieve a responsible architecture, which can adapt itself with surrounding conditions, the major approach is that architects, designers and structural engineers concentrate on design and construction of kinetic structures consisted of rigid bodies and mechanical joints. Although this method may have some advantages in, but for architectural applications, which increasingly need their own solutions in each project, it can have deficiencies such as failures and ruptures due to high tensions in joints as well as high costs in repairing and maintenance. Kinetic skins in architecture are usually designed and executed in negligible numbers and customized for each new project. In architecture as other fields of engineering, kinetic structures are usually based on the principles of the basic construction that rigid bodies are connected with mechanical joints. However, there is a difference between moving structures in the machine industry and architecture. The high weight of these structures with mechanical elements leads to higher weights, which can cause lots of deficiency in earthquakes. In addition, the construction of complex designs that are often desirable for architects and designers is only due to the complexity of mechanisms and considerable increasing in the number of elements. In other words, along with all the advantages of structures made with rigid elements, which cannot be ignored, disadvantages of this design and construction also have to be considered. Most of challenges due to rigid mechanical structures seem to be caused by animated joints; high stresses, fractures and structural failures often occur in these parts of structures. The aim of this research is to use the potential of compliant mechanisms in design and construction of kinetic facades to familiarize architects and designers with their functions, applications and advantages and for that; after classifying the application of compliant mechanisms in architecture in two levels (the first level is to replace compliant mechanisms with rigid ones and the second one, designing an integrative mechanism), Here, the focus is on first level. In the first level, developed structures are designed in a rigid-body mechanism in which compliant joints replace with mechanical joints, which lead to simplicity in construction and maintenance. The achievement of this level, which has been considered in three subcategories (Translational, rotational, translational-rotational movements in compliant joints) by means of simulation method, is design, computational simulation and construction of three physical models of kinetic skins with compliant joints. Through these models, most benefits of compliant structures such as structural integrity, reduction in member numbers and structure weight, significant reduction in joints' tension, cost of repair and maintenance and finally, economic justification of plan can have been achieved. In the second level, integrated flexible mechanisms were considered, most of which are difficult to design and need nonlinear equation analysis. Nature, plants in particular, as an inspirational source in the design of these mechanisms have been studied, so that by exploring the rules of motion in the tested plants and transferring them to kinetic structures in architecture, to achieve greater reliability and less complexity, these structures were achieved.

Keywords: Kinetic Building Skins, Compliant Mechanisms, Rigid-Body Mechanisms, Bi-Stable Compliant Mechanisms.

*This article is extracted from the third author`s M.A. thesis entitled: "Designing Dynamic and Smart Skin with the Approach of Bionic (Designing Commercial Center)" under supervision of other authors.
**Corresponding Author: (+98-21) 66409696, Fax: (+98-21) 66461504, E-mail: ktaghizad@ut.ac.ir.
www.SID.ir