تحلیل مکانیزم جابه‌جایی در سازهٔ سقف‌های تغییر فرم‌پذیر بر اساس بررسی نمونه‌های شاخص جهانی

علمی پژوهشی

امیرحسین صادق‌پور*
نیلوفر ربانی**
فائزه تفرشی***

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از سازه‌های باز و بسته‌شونده به‌دلیل قابلیت آن‌ها در دستیابی به یک معماری پویا و انعطاف‌پذیر مورد توجه بسیاری از معماران و مهندسان قرار گرفته است. سقف‌های تغییر فرم‌پذیر با تأمین شرایط مطلوب و متفاوت برای یک فضای مشخص و ایجاد پویایی و انعطاف‌پذیری برای بنا، جایگاه ویژه‌ای در بسیاری از پروژه‌های موفق جهانی دارد. در این پژوهش مکانیزم‌های حرکتی سقف‌های متحرک بررسی و تحلیل شده است. ساختار حرکتی سقف‌های تغییر فرم‌پذیر در چهار گروه مکانیزم صلب، غشایی، قیچی‌سان و چتری دسته‌بندی شده و ضمن تشریح جزئیات و نحوهٔ تغییر فرم در هر مکانیزم، یک پروژهٔ شاخص به‌عنوان مصداق هر گروه تحلیل شده است. سپس با بررسی مشخصات ۶۰ پروژهٔ شاخص جهانی که در حدود شش دههٔ اخیر احداث و در آن از سیستم سقف‌های تغییر فرم‌پذیر استفاده شده، ویژگی‌های مهم این سازه‌ها تحلیل و ارزیابی شده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که استفاده از سقف‌های تغییر فرم‌پذیر در حدود دو دههٔ اخیر توسعهٔ چشمگیری پیدا کرده و برای پوشش استادیوم‌ها و اماکن ورزشی به‌طور گسترده‌ای استفاده شده است. در بین مکانیزم‌های حرکتی، مکانیزم صلب و در مرحلهٔ بعد مکانیزم غشایی بیشترین کاربرد را داشته و سیستم سازهٔ خرپا و سازهٔ کابلی بیش از سایر سیستم‌ها استفاده شده است. این سقف‌ها برای پوشش دهانه‌های تا بیش از ۳۰۰ متر نیز مورد استفاده قرار گرفته و نسبت طول دهانه به ضخامت سقف از حدود ۳۰ تا ۲۴۰ تغییر می‌کند و بیشترین مقدار آن برای مکانیزم غشایی است. برای پوشش سقف‌های متحرک در چهار گروه، عمدتاً از مصالح سبک شامل تفلون، ETFE و PVC استفاده شده است.

کلیدواژه‌ها:
فرم‌های متحرک سازه‌ای، سقف تغییر فرم‌پذیر، مکانیزم باز و بسته‌شونده، معماری پویا، سقف.

* استادیار، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، نویسنده مسئول، Sadeghpour@kashanu.ac.ir
** دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان
*** دانشجوی دکتری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر

مطالعات معماری ایران
دو فصلنامه معماری ایرانی
شماره ۲۲ ـ پاییز و زمستان ۱۴۰۱
صفحات ۲۱۳-۱۹۵ ۱۹۵

پرسش‌های پژوهش

۱. ساختار و مکانیزم حرکت، جابه‌جایی و تغییر فرم در سازه‌هایی که سقف تغییر فرم‌پذیر دارند چگونه است؟
۲. ویژگی‌های مهم سازه‌ای سقف‌های تغییر فرم‌پذیر در پروژه‌های شاخص جهانی چیست؟

مقدمه

تاریخچهٔ سازه‌های تغییر فرم‌پذیر به قرن‌ها پیش بازمی‌گردد. شاید یکی از اولین نمونه‌های این سازه‌ها، خیمه‌های مخروطی‌شکل سرخ‌پوستان سایوکس است. این خیمه‌ها سبک بوده و به‌کمک حیوانات حمل می‌شدند. از دیگر نمونه‌های تاریخی می‌توان به سقف متحرک کولوسئوم‌ها که در قرن اول میلادی ساخته شده است، اشاره کرد. این ساختار یک سازهٔ غشایی سبک و احتمالاً از جنس پارچه بوده که ولاریوم نامیده شده و با تکیه بر اعضای طره‌ای، حفاظت در برابر تابش و شرایط جوی را فراهم می‌کرده است (بانی‌مسعود ۱۳۹۵، ۳۲). چترهای خورشیدی پادشاهی آشور و خیمهٔ کروی مغولان دیگر نمونه‌هایی است که می‌توان در این زمینه نام برد (سرکرده‌ئی، جامعی، و مجاهدی ۱۳۸۹). از نیمهٔ دوم قرن بیستم، علاقه به ساختارهای قابل تغییر و کاربردهای متعدد آن‌ها، از سازه‌های موقت معماری تا تجهیزات پزشکی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. بر اساس تحقیقات می‌توان گفت آیندهٔ طراحی معماری به ایجاد فضاهای انعطاف‌پذیر و پویا برای خلق سازه‌های موقت و سبکی تعلق دارد که می‌تواند برای رسیدن به فرم پایدار مهندسی با توجه به کاهش منابع طبیعی، تغییرات آب‌وهوایی و افزایش سریع جمعیت جهانی، ضروری باشد (گودرزی، و متدین ۱۳۹۰). شکل‌گیری هر فرم به سازه وابسته و پیوسته است؛ بنابراین، سازه و مفاهیم و شیوهٔ عمل آن، نقش اصلی را در پدید آوردن هر فرم ایفا می‌کنند (عالمی، پوردیهیمی، و مشایخ فریدنی ۱۳۹۵). پل‌های متحرک و نماهای پویا نمونه‌هایی از کاربرد سیستم‌های تغییر فرم‌پذیر هستند که کاربرد زیادی در معماری پویا دارند. صادقپور و تفرشی (۱۴۰۰) در مقاله‌ای به بررسی و تحلیل مکانیزم‌های حرکتی در پل‌های متحرک پرداخته و انواع حرکت در آن‌ها را در شش مکانیزم ریلی، باسکولی، عمودی، چرخشی، نوسانی و تاشونده تقسیم‌بندی و تحلیل کردند. ساختارهای متحرک در پوستهٔ خارجی بنا به‌عنوان حائلی بین فضای داخل و خارج عمل می‌کند که متشکل از مجموعهٔ جداره‌ها و سقف نهایی می‌باشد. نماهای پویا در مدیریت نور و بهره‌گیری بصری بسیار مؤثر بوده و عموماً یکی از انواع مکانیزم چرخشی، جمع‌شونده، بالنی، مثلثی گسترش‌پذیر و قیچی‌سان را دارند (صادقپور و یاوری ۱۴۰۱). سقف‌های متحرک ساختمانی می‌توانند در افزایش انرژی کارایی ساختمان تأثیر بسزایی داشته باشد. کارایی این نوع سقف‌ها در فضاهایی مانند آمفی‌تئاترها، استخرها، فضاهای ورزشی، تفریحی و نیز فضاهای چندمنظوره می‌تواند هزینه‌های طراحی و ساخت این سقف‌ها را توجیه کند (احمدنژادکریمی، آصفی، و حق‌پرست ۱۳۹۵). تنوع نیازهای کاربران، ضرورت تطبیق با شرایط محیطی مختلف و پیشرفت‌های علمی، تمایل و توجه بیشتر کاربران را به استفاده از ساختارها و سازه‌های متحرک و انعطاف‌پذیر در داخل و خارج بنا جلب کرده است (سرکرده‌ئی، جامعی، و مجاهدی ۱۳۸۹).

رابرت گرونبرگ معماری پویا را به‌عنوان ساختمان یا اجزای ساختمان با تحرک، موقعیت مکانی یا هندسهٔ متغیر تعریف می‌کند (Zanfaly 2011 - El). گونه‌شناسی انواع حرکت در معماری پویا و تقسیم‌بندی ساختارهای متحرک در معماری بر اساس چگونگی و مکانیزم حرکت در عناصر توسط محققان مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است (Sharaidin 2014; Elkhayat 2014). سقف‌های متحرک سازه‌های پیش‌ساخته‌ای هستند که می‌توانند با دستور کاربر یا رایانه باز و بسته شوند. این تغییر حالت می‌تواند با هدف دریافت نور طبیعی، کنترل شدت تابش، تهویه، تغییر عملکرد فضا، اسکان موقت و یا... باشد (قوچانی، تاجی، و دربانیان ۱۳۹۸) .سقف‌های متحرک به‌دلیل حرکت و بسته به نوع مکانیزم حرکتی، برای محدودهٔ معیّنی از بارگذاری طراحی شده و برای بارگذاری‌های فراتر از محدودهٔ تعریف‌شده نیاز به تدابیر خاصی دارند (Takahashi et al. 2016). این ساختارها به پیوند بخش‌های معماری، سازه، مکانیک و برق به‌صورت توأمان نیازمندند تا عملکرد مناسبی داشته باشند (Ramzy and Fayed 2011). در سقف‌های باز و

بسته‌شونده شکل کلی سقف تغییر نکرده و تنها بخش‌هایی از سقف با چرخش، جابه‌جایی و جمع شدن از موقعیت خود خارج می‌شود (Akgün, Haase, and Sobek 2007). مصالح قابل استفاده در این ساختارها به تنوع مصالح قابل استفاده برای طراحی سیستم‌های سازه‌ای بوده و پوشش‌های آن‌ها بسته به نوع مکانیزم می‌تواند مواد کشسان، پارچه‌ها و در مواردی پانل‌های سبک باشد (Megahed 2017).

سقف‌های متحرک در بنا انعطاف‌پذیری ایجاد می‌کنند و شرایط تطبیق با محیط را ممکن می‌سازند. تمایل بهره‌برداری از این دو مؤلفه به‌ویژه در بناهایی همچون استادیوم‌ها توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. از سوی دیگر تحلیل مکانیزم‌های حرکتی سازه‌های متحرک برای طراحی و اجرای صحیح این سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و با شناخت آن می‌توان سیستم مناسب برای هر پروژه را تعیین کرد. در این پژوهش ابتدا ساختارهای حرکت و تغییر فرم در سقف‌های تغییر فرم‌پذیر معرفی و مکانیزم حرکتی آن‌ها تحلیل شده است. در ادامه مصادیقی از هرکدام از ساختارها شناسایی و بررسی شده و سپس با بررسی ویژگی‌های شصت پروژهٔ شاخص ساخته‌شده در دنیا و بیان ویژگی‌های سازهٔ آن‌ها، مکانیزم حرکتی این سازه‌ها مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است.

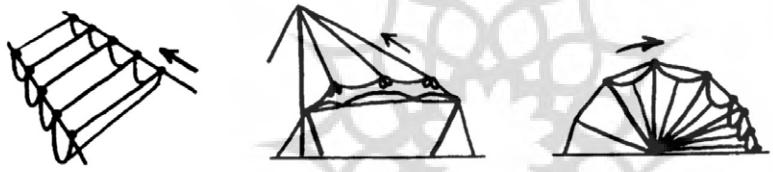
۱. مبانی نظری سقف‌های تغییر فرم‌پذیر

مکانیزم حرکتی مناسب برای یک سقف باز و بسته‌شونده، با توجه به ساختار سقف، دهانه، هندسه و سیستم سازه‌ای سقف می‌تواند تعیین و انتخاب شود (قوچانی، تاجی، و دربانیان ۱۳۹۸). سقف‌های متحرک شامل سازهٔ نگهدارنده، ستون، مجموعه مکانیزم حرکتی و پوشش نهایی هستند. سازهٔ نگهدارنده وظیفهٔ انتقال وزن سقف متحرک به ستون‌ها را برعهده دارد. ستون‌ها مجموعه اعضایی هستند که سازه را در ارتفاع معین نگه داشته و بارهای سقف را به زمین منتقل می‌کنند. مکانیزم حرکتی مجموعه مفاصل و اعضایی هستند که همبستگی و نحوهٔ عملکرد متقابل آن‌ها، باز و بسته شدن یک سقف متحرک را ممکن می‌سازد. هنگامی که سقف متحرک کاملاً گسترده بوده و مانع از ورود نور و هوا می‌شود، به‌عنوان حالت بسته و هنگامی که سقف بنا به مکانیزم حرکتی کنار رفته و نفوذ نور و هوا را ممکن می‌سازد، به‌عنوان حالت باز در نظر گرفته می‌شود. پوشش نهایی نیز صفحات صلب و پارچه‌ها هستند که محدودهٔ مسقف را در برابر تابش، بارندگی و شرایط محیطی حفاظت می‌کنند. این سقف‌ها نیازمند فضایی هستند که پس از جمع شدن در آن قرار بگیرند. این فضای تجمیع سقف عموماً محدود بوده و میزان آن به عناصر سقف، نوع مکانیزم حرکتی و پوشش سقف بستگی دارد و در بسیاری از موارد به حداقل رساندن فضای تجمیع اهمیت بسیاری دارد (Jensen 2005). مطابق با تصویر ۱، انواع مکانیزم‌های حرکتی در سقف‌های باز و بسته‌شونده قابل تفکیک به مکانیزم باز و بسته‌شوندهٔ غشایی، صلب، قیچی‌سان و چتری هستند (Arnouts et al. 2020). در ادامه ضمن شناخت جزئیات هرکدام از این مکانیزم‌های حرکتی، با معرفی نمونه‌ای اجراشده از هر سیستم و تحلیل آن، ویژگی‌ها و مکانیزم‌های حرکتی هر سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تصویر ۱: دیاگرام تفکیک و دسته‌بندی انواع مکانیزم‌های حرکتی در سقف‌های متحرک

۱.۱. مکانیزم حرکت غشایی

این گروه از سقف‌ها متداول‌ترین نوع سقف تغییر فرم‌پذیر است که می‌توانند به‌صورت خطی، مرکزی و دایره‌ای باز و بسته شوند. عملکرد این ساختارها به‌وسیلهٔ تا شدن و رول شدن پوشش غشایی صورت می‌گیرد (Mollaert 1996). سبکی وزن، صرفهٔ اقتصادی و محدود بودن فضای تجمیع از محاسن این سقف به‌شمار می‌رود (You and Springer 2000). این مکانیزم برای تئاتر، پاویون، استخر و فضاهای مشابه گزینهٔ مناسبی است. این سقف‌ها در برابر بار باد، برف و باران آسیب‌پذیر بوده و نیازمند تدابیری برای کنترل این بارها هستند (Bhavana and Shilpa 2018). از مواردی که در طراحی سازه‌های غشایی باید به آن توجه کرد، دستیابی به کشش مناسب در اعضاست. در این سازه‌ها فشار و کشش باید به‌صورت پیوسته و مستمر در اعضا وجود داشته باشد تا بار وارده به تکیه‌گاه‌ها انتقال یابد. همچنین لازم است انتخاب مصالح با دقت کافی انجام شود تا اعضا دچار خزش نشوند (Smith 2003). در این سقف‌ها، در صورتی که سازهٔ نگهدارنده به‌صورت ثابت طراحی شود، مکانیزم حرکتی تنها روی پوشش سقف‌ها عمل خواهد کرد. در ساختارهایی که سازهٔ نگهدارنده به‌صورت متحرک طراحی شده است، پوشش به‌وسیلهٔ حرکت سازه، باز و بسته خواهد شد (احمدنژادکریمی، آصفی، و حق‌پرست ۱۳۹۵). تصویر ۲ نمونه‌هایی از سقف‌های غشایی باز و بسته‌شونده را نشان می‌دهد.



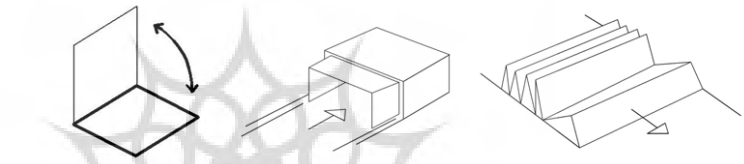
تصویر ۲: مکانیزم حرکت غشایی، راست: حرکت دایره‌ای، میانه: حرکت مرکزی، چپ: حرکت خطی (Mollaert 1996)

تالار شهر وین، نمونهٔ مکانیزم حرکت غشایی: قسمت حیاط مرکزی این سازه تاریخی در شهر وین اتریش، توسط سقف متحرک با مکانیزم حرکت غشایی تاشونده، در سال ۲۰۰۰ میلادی پوشش داده شد. این سقف دهانه‌ای ۳۴ متری را می‌پوشاند و در دو طرف حیاط دو تیر اصلی به سازه متصل شده و به‌عنوان ریل برای تیرهای عرضی و کابل استفاده می‌شود. عملکرد اصلی تیرهای عرضی کنترل نیروهای افقی وارد به سقف است که در اثر وزن غشا ایجاد می‌شود. وزن سقف بسیار کم است و به‌راحتی در راستای افقی حرکت می‌کند. بنابراین سازه تنها بارهای فشاری را تحمل می‌کنند. سقف به‌وسیلهٔ موتورهای الکتریکی حرکت می‌کند. غشا مشابه یک آکاردئون گسترده می‌شود و فرایند باز یا بسته شدن سقف حدود ۴ دقیقه طول می‌کشد. تصویر ۳ سقف متحرک این مجموعه را در دو حالت باز و بسته نشان می‌دهد.

تصویر ۳: نمونهٔ سقف باز و بسته شونده با مکانیزم غشایی، راست: پوشش سقف تالار شهر وین در حالت بسته، چپ: سقف این مجموعه در حالت باز (URL 1)

۲.۱. مکانیزم حرکت صلب

این سیستم شامل ورق‌های سازه‌ای است که از قاب فلزی یا فولادی به‌همراه مصالحی نظیر پلاستیک و فلز به‌عنوان پوشش تشکیل‌شده‌اند. حرکت در این نوع سقف می‌تواند به‌صورت لغزشی، تاشونده یا چرخشی باشد. در حرکت تاشونده، عناصر با تغییر زاویهٔ یک یا چند مفصل به‌صورت کتابی کنار هم قرار می‌گیرند ولی در حرکت لغزشی پانل‌ها به هنگام جمع شدن هم‌پوشانی دارند. در مکانیزم حرکت چرخشی، صفحات با چرخش یا تغییر زاویه در بعد سوم از موقعیت خود خارج می‌شوند (Pawlak - Jakubowska and Romaniak 2020). چگونگی حرکت در این گروه از سقف‌ها در تصویر ۴ نشان داده شده است. از این سیستم برای پوشش دهانه‌هایی با ابعاد بزرگ استفاده می‌شود و برای سقف فضاهایی که به‌صورت گنبد طراحی می‌شوند، نمی‌توان آن‌ها را به‌صورت یکپارچه در نظر گرفت. بنابراین هر پانل به‌کاررفته باید به‌صورت مجزا و به‌عنوان سازه‌ای منفرد مورد بررسی قرار گیرد (Pawlak - Jakubowska and Romaniak 2020). استفاده از اتصالات مناسب و کنترل انتقال رطوبت از میان پانل‌ها دقت و توجه ویژه‌ای را طلب می‌کند (Pellegrino 2001).



تصویر ۴: به ترتیب از راست به چپ: مکانیزم حرکتی صلب تاشونده، لغزشی و چرخشی(URLv2)

استادیوم ورزشی اویتا، نمونهٔ مکانیزم حرکت صلب: این سازه در شهر اویتای[1] ژاپن در سال ۲۰۱۰ ساخته شده است. سقف بنا شامل یک بخش کروی ثابت به قطر ۲۷۴ متر است. دو پانل بالایی جمع‌شونده بر روی هفت ریل به‌طور موازی در محیط گنبد می‌لغزند. پنل‌های لغزشی با یک لایه تفلون پوشانده شده و امکان عبور نور را فراهم کرده است (تقی‌زاده، گلابچی، و وجدانزاده ۱۳۹۷). مکانیزم حرکتی این سقف کشویی از نوع مکانیزم‌های حرکتی صلب است. مدت‌زمان باز و بسته شدن این سقف ۲۰ دقیقه برآورد شده است. تصویر ۵ سقف این استادیوم را در دو حالت باز و بسته نمایش می‌دهد.

تصویر ۵: نمونه سقف باز و بسته‌شونده با مکانیزم لغزشی، راست: سقف استادیوم ورزشی اویتا در حالت بسته، چپ: سقف این مجموعه در حالت باز (URL 2)

۳.۱. مکانیزم حرکت قیچی‌سان

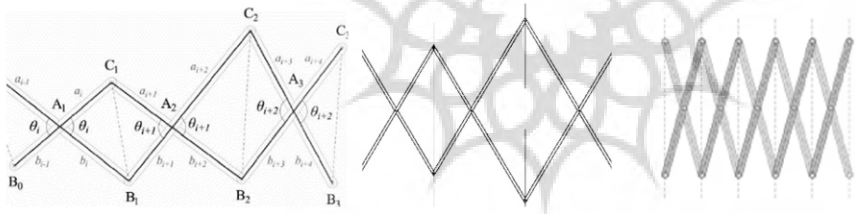
در این مکانیزم حرکتی، سازه‌ها شامل تعدادی عناصر قیچی‌سان هستند که هرکدام از دو عضو صلب ساخته شده‌اند. این عناصر در نقطه‌ای در طول خود توسط یک مفصل به هم متصل می‌شوند. این مفاصل اجازهٔ چرخش اعضا حول محور خود را داده و چرخش و حرکت را در سایر محورها محدود می‌نماید (Temmerman and Alegria Mira 2011). اعضای قیچی‌سان توسط مفصل‌های انتهایی به هم وصل شده و به سیستم اجازهٔ حرکت در راستای مورد نظر و انتقال نیرو را می‌دهد. در این ساختارها با حرکت، تغییر شکل و هندسهٔ مدول‌های قیچی‌سان، کل سیستم گسترش یافته یا

جمع می‌شود (Maden et al. 2019). هندسهٔ سازه‌های قیچی‌سان وابسته به شکل عناصر آن است به‌طوری که با تغییر در طول اعضا و جابه‌جایی محل اتصال عناصر قیچی‌سان، فرم کل سیستم تغییر می‌کند. بر اساس هندسهٔ عناصر تشکیل‌دهنده، این سازه‌ها به سه دستهٔ سازه‌های قیچی‌سان انتقالی، سازه‌های قیچی‌سان منحنی و سازه‌های قیچی‌سان زاویه‌دار تقسیم می‌شوند (Dinevari, Shahbazi, and Maden 2021).

۱.۳.۱. قیچی‌سان انتقالی

این سازه‌های قیچی‌سان را می‌توان با انتقال مستقیم‌الخط و بدون هیچ‌گونه تغییر زاویه‌ای در کلیت سازه ایجاد نمود. قانون اصلی در طراحی این سازه‌ها آن است که همهٔ خطوطی که مفصل‌ها را به هم وصل می‌کنند، با هم موازی باشند (موسوی، و داودآبادی فراهانی ۱۳۹۸). با توجه به طول اعضا و مکان قرارگیری مفاصل میانی، سه نوع از سازه‌های انتقالی شکل می‌گیرد: سازه‌های قیچی‌سان انتقالی با اعضایی با طول ثابت، سازه‌های قیچی‌سان انتقالی با اعضایی با طول متفاوت و سازه‌های قیچی‌سان انتقالی با هندسهٔ آزاد.

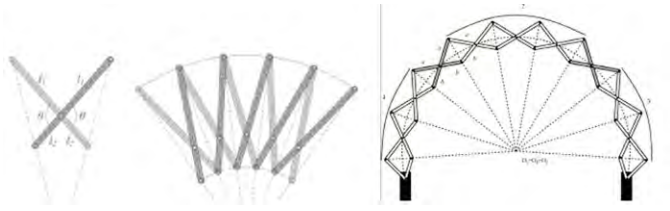
در سازه‌های قیچی‌سان انتقالی با اعضایی با طول ثابت، تمامی اعضا طول یکسان داشته و مفصل میانی آن‌ها را به یکدیگر متصل می‌کند و محورهای متصل‌کنندهٔ مفصل‌ها با هم موازی هستند (Mira et al. 2015). در سازه‌های قیچی‌سان انتقالی با اعضایی با طول متفاوت، اعضایی که یک مدول را به وجود می‌آورند، دارای طول متفاوت بوده و مفصل میانی آن‌ها را به هم متصل نموده و مشابه سازه‌های قیچی‌سان انتقالی با طول اعضای ثابت، محورهای متصل‌کنندهٔ مفصل‌ها با هم موازی‌اند. در سازه‌های قیچی‌سان انتقالی با هندسهٔ آزاد اعضا دارای طول‌های متفاوت بوده و موقعیت مفصل میانی بر اساس هندسه‌ای پیچیده شکل می‌گیرد (Chen, Fan, and Feng 2017). انواع سازه‌های قیچی‌سان انتقالی در تصویر ۶ نشان داده شده است.



تصویر ۶: راست: هندسهٔ سازه‌های قیچی‌سان انتقالی با اعضایی با طول ثابت (Chen, Fan, and Feng 2017)، میانه: هندسهٔ سازه‌های قیچی‌سان انتقالی با اعضایی با طول متفاوت. چپ: هندسهٔ سازه‌های قیچی‌سان انتقالی با هندسهٔ آزاد(Yar et al. 2017)

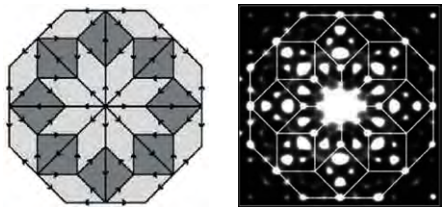
۲.۳.۱. قیچی‌سان منحنی

سازه‌های قیچی‌سان منحنی با انتقال محل مفصل میانی به انتهای اعضا ایجاد می‌شود. این نوع سازه‌ها به دو صورت با هندسهٔ مدور و با هندسهٔ آزاد شکل می‌گیرد (تصویر ۷). سازه‌های قیچی‌سان منحنی با هندسهٔ مدور به‌مثابهٔ یک قوس باز و بسته‌شده و همهٔ محورهای مفاصل در یک نقطه به هم می‌رسند (Akgün 2010). در سازه‌های قیچی‌سان منحنی با هندسهٔ آزاد، بر اساس اندازهٔ منحصربه‌فرد هر مدول شکل گرفته و هیچ‌گونه نقطهٔ مرکزی یا رابطی وجود ندارد (Liao and Krishnan 2017).



تصویر ۷: راست: سازهٔ قیچی‌سان منحنی با هندسهٔ مدور، میانه و چپ: سازهٔ قیچی‌سان با هندسهٔ آزاد (Chen, Fan, and Feng 2017)

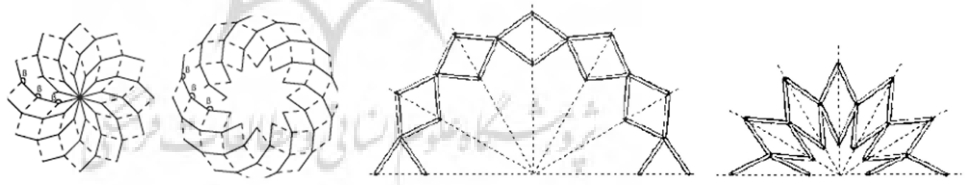
ساختارهای قیچی‌سان از منظر نظم تناوبی یا شبه‌تناوبی، شباهت بسیاری با منطق شمسهٔ ایرانی دارد. نظم تناوبی بر اساس منطق انتقالی شکل گرفته است و از تکرار یک عنصر به‌صورت متناوب ایجاد می‌شود. نظم شبه‌تناوبی هنگامی شکل می‌گیرد که تقارن انتقالی وجود نداشته باشد (محمدیان‌منصور و فرامرزی ۱۳۹۲). در تصویر ۸ تصویر یک شمسهٔ ایرانی و تشابه هندسهٔ آن با ساختارهای قیچی‌سان نشان داده شده است.



تصویر ۸: هندسهٔ مستخرج از شمسهٔ ایرانی (محمدیان‌منصور، و فرامرزی ۱۳۹۲)

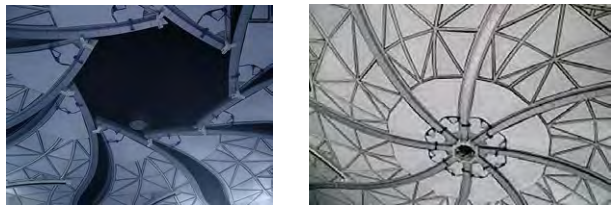
۳.۳.۱. قیچی‌سان زاویه‌دار

برخلاف سازه‌های قیچی‌سان انتقالی و منحنی، اعضای سازه‌های قیچی‌سان زاویه‌دار مستقیم‌الخط نبوده و در محل مفصل‌ها دارای زاویه (β)هستند. این نوع سیستم یا دارای یک زاویه است یا به‌صورت چند زاویه‌ای گسترش می‌یابد (Dinevari, Shahbazi, and Maden 2021). عناصر زاویه‌دار برای سازه‌های بازوبسته شونده‌ای که به شکل بسته هستند به‌کاررفته و برای سازه‌های با هندسه مدور به‌دلیل توسعه خطی‌شان امکان‌پذیر نیستند (موسوی ۱۳۹۸). سازه‌های قیچی‌سان با اعضای زاویه‌دار می‌توانند دو شکل متفاوت داشته باشند: سازه‌های قیچی‌سان زاویه‌دار با اعضای منفرد و سازه‌های قیچی‌سان زاویه‌دار چند عضوی که نمونه‌هایی از آن در تصویر ۹ نشان داده شده است. سازه‌های قیچی‌سان زاویه‌دار با اعضای منفرد شامل دو نیم میله صلب با طول مشخص هستند که در طول فرایند باز و بسته‌شدن ثابت باقی می‌ماند. سازه‌های قیچی‌سان زاویه‌دار از چند نیم‌میله تشکیل‌شده که با زاویه‌های یکسان به‌هم وصل شده‌اند (Liao and Krishnan 2017).



تصویر ۹: راست: سازه‌های قیچی‌سان زاویه‌دار با اعضای منفرد. چپ: سازه‌های قیچی‌سان زاویه‌دار چندعضوی در دو حالت باز و بسته (URL 3)

مرکز تنیس چیژانگ، نمونهٔ مکانیزم حرکت قیچی‌سان: این استادیوم در سال ۲۰۰۵ در شانگهای چین افتتاح شد و سقف این مجموعه با مکانیزم قیچی‌سان باز و بسته شده و سازهٔ آن از خرپای حلقوی و ۸ قطعهٔ متحرک در سقف که شبیه گلبرگ هستند تشکیل شده است. باز و بسته شدن سقف این مجموعه ۸ دقیقه طول کشیده و هنگام باز و بسته شدن شبیه دیافراگم دوربین عمل می‌کند (تقی‌زاده، گلابچی، و وجدانزاده ۱۳۹۷). سقف متحرک این مجموعه دهانه‌ای حدوداً ۵۰ متری را می‌پوشاند. تصویر ۱۰ سقف این بنا را از داخل نشان می‌دهد.



تصویر ۱۰: نمونهٔ سقف باز و بسته‌شونده با مکانیزم قیچی‌سان، راست: سقف مرکز تنیس چیزانگ در حالت بسته، چپ: سقف این مجموعه در حالت باز (URL 4)

٤.١. مکانیزم حرکت چتری

از دهۀ ۱۹۵۰میلادی از الگوی چتری به‌عنوان سازه‌های متحرک استفاده بسیاری شده است. در این سیستم یک پوشش کششی به‌همراه اعضای نگهدارنده و ستون مرکزی یک واحد ساختمانی را تشکیل می‌دهد. در دهۀ ۱۹۵۰ فرای‌اتو نوع جدیدی از این چترها را ابداع کرد که بر اساس قانون کمترین سطح طراحی شده بودند (Asefi, Valadi, and Ebrahimi Salari 2013). طرح این دسته از سازه‌ها بر اساس عملکرد چترهای معمول است و شامل یک پایۀ ثابت یا متحرک بوده که گرداگرد آن گروهی از میله‌ها وجود دارد و به‌وسیلۀ لغزاندن یک گره در امتداد پایه به‌سمت بالای آن باز می‌شود (Siotor and Hermeking 2017). برای سازه‌های چتری دو مکانیزم جمع‌شونده رو به بالا و جمع‌شونده رو به پایین وجود دارد. مکانیزم جمع‌شونده رو به بالا، زیبایی مطلوب را نداشته و نیازمند تدابیر ویژه برای جلوگیری از جمع شدن باران و گردوخاک است؛ مکانیزم جمع‌شونده رو به پایین شرایط مطلوب‌تری از این نظر دارد (Van der Wijk, Kiper, and Yasır 2015). مکانیزم محرک سازه‌های چتری نیز به دو شیوۀ مکانیزم لغزندۀ پیچی با نیروی محرکۀ موتور الکتریکی و مکانیزم رفت و برگشتی با نیروی محرکۀ جک‌هیدرولیکی شکل می‌گیرد (Pawlak - Jakubowska and Romaniak 2020). تصویر ۱۱ سازۀ چتری جمع‌شونده رو به پایین و رو به بالا را نشان می‌دهد.

تصویر ۱۱: راست: مکانیزم حرکتی چتری رو به پایین، چپ: مکانیزم حرکتی چتری رو به بالا (Hemmerling 2017)

سایه‌بان‌های متحرک مسجدالنبی، نمونه مکانیزم حرکت چتری: این سایه‌بان‌ها را می‌توان بزرگ‌ترین سقف متحرک ساخته‌شده در دنیا دانست که در سال ۱۹۹۲ ساخته شده و در شهر مدینه در عربستان قرار دارد. این چترها در روز باز و در شب جمع می‌شوند و با این عمل سبب ایجاد محیط مطلوب‌تر از لحاظ شرایط دمایی می‌شوند. هر چتر در ابعاد ۱۷ متر در ۱۸ متر و با ارتفاع ۱۴ متر در هنگام باز بودن سطح حیاط را پوشش می‌دهند. یک سیلندر هیدرولیکی بر روی مرکز یک ستون قرار گرفته و بازوهای چتر را در مدت‌زمان ۳ دقیقه باز و بسته می‌کند (Bhavana and Shilpa 2018). تصویر ۱۲ این سایه‌بان‌ها را در دو حالت باز و بسته نشان می‌دهد.

تصویر ۱۲: نمونۀ سقف باز و بسته‌شونده با مکانیزم چتری، راست: سایه‌بان‌های مسجدالحرام در حالت بسته، چپ: سایه‌بان‌های این مجموعه در حالت باز (URL 5)

با توجه به تحلیل انجام‌شده در بخش مبانی نظری، ویژگی‌های کلی انواع مکانیزم‌های حرکتی به‌صورت خلاصه در جدول ۱ جمع‌بندی و ارائه شده است.

جدول ۱: ویژگی انواع مکانیزم‌های حرکتی سقف‌های تغییر فرم‌پذیر

مکانیزم	ساختار حرکت	محاسن	معایب	الزامات و توجهات	کاربری‌های رایج
غشایی	خطی مرکزی دایره‌ای	سبکی وزن، اقتصادی بودن، کوچک بودن فضای تجمیع	آسیب‌پذیری در برابر بار باد، برف و باران	انتخاب مصالح مناسب دستیابی به کشش مناسب در اعضا	تئاتر پاویون استخر
صلب	لغزشی تاشونده چرخشی	پوشش دهانه‌های بزرگ	دشواری در طراحی سقف‌های گنبدی	کنترل انتقال رطوبت و آب‌بندی سقف	دهانه‌های وسیع همچون استادیوم‌ها
قیچی‌سان	انتقالی منحنی زاویه‌دار	ساختار پیوسته در حرکت و فرم	دشواری محاسبات و طراحی	توجه به موقعیت مفاصل و تناسبات اعضا برای شکل‌گیری هندسه	دهانه‌های بزرگ همچون استادیوم
چتری	رو به بالا رو به پایین	سادگی مکانیزم و گستردگی کاربرد	نیاز به مقابله با نیروی رو به بالای باد در چتری جمع‌شونده رو به پایین و جمع شدن آب باران و گرد و خاک در چتری رو به بالا	انتخاب نوع پوشش فضای کافی تجمیع و پایه‌ها	حیاط‌ها کاربری‌های فرهنگی

۲. مطالعهٔ پروژه‌های شاخص جهانی

به‌منظور ارزیابی و تحلیل مشخصات فنی سیستم سقف‌های تغییر فرم‌پذیر، ویژگی‌های تعدادی از نمونه‌های شاخص و مشهور سازه‌های احداث‌شده با این سقف‌ها در نقاط مختلف جهان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. این تحلیل با استفاده از خصوصیات تعداد شصت پروژهٔ شاخص با سیستم سقف‌های تغییر فرم‌پذیر انجام شده که در طول شش دههٔ گذشته در کشورهای مختلف ساخته شده و اطلاعات آن در جدول ۲ به‌طور خلاصه گردآوری شده و ویژگی‌های کلی و مکانیزم حرکتی سیستم سازهٔ آن در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین برای پاسخ به پرسش‌های پژوهش به‌ویژه پرسش دوم از تحلیل ویژگی‌های پروژه‌های اجراشده استفاده شده است.

جدول ۲: مشخصات فنی نمونه‌های سقف‌های تغییر فرم‌پذیر ساخته‌شده در جهان

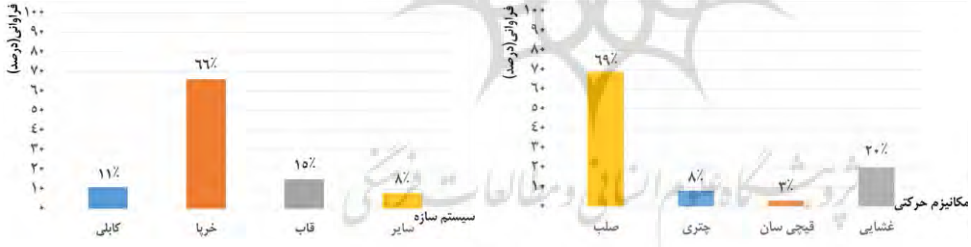
ردیف	مشخصات عمومی پروژه				مشخصات فنی و مکانیزم حرکتی سازه				مرجع
	نام پروژه/ساختمان	محل شهر/کشور	سال ساخت	کاربری پروژه	دهانه (متر)	جنس و سازه سقف	مکانیزم حرکتی	مصالح پوششی	
۱	پیتزبورگ	پنسیلوانیا ـ آمریکا	۱۹۶۰	ورزشی	۱۲۶	خرپای فولادی	صلب	تفلون	(URL 1)
۲	استخر بلوارد	مارسی ـ فرانسه	۱۹۶۷	ورزشی	۶۷	خرپای فولادی	صلب	تفلون	(URL 2)
۳	کاخ‌موزهٔ نیاوران	تهران ـ ایران	۱۹۶۹	فرهنگی	۱۲	قاب فولادی	صلب	آلومینیوم	(URL 3)
۴	نمایشگاه کلمن	آلاسکا ـ آمریکا	۱۹۷۱	فرهنگی	۱۹	چتری غشایی	چتری رو به بالا	PVC	(URL 2)
۵	بال دام	اتاوا ـ کانادا	۱۹۷۸	ورزشی	۱۱۲	خرپای فولادی	صلب	آلومینیوم	(URL 3)
۶	راد لیورآرنا	اورانا ـ استرالیا	۱۹۷۸	ورزشی	۲۷۸	خرپای فولادی	صلب	تفلون	(URL 4)

ردیف	مشخصات عمومی پروژه				مشخصات فنی و مکانیزم حرکتی سازه				مرجع
	نام پروژه/ساختمان	محل شهر/کشور	سال ساخت	کاربری پروژه	دهانه (متر)	جنس و سازه سقف	مکانیزم حرکتی	مصالح پوششی	
۷	استادیوم پادشاه فهد	ریاض ـ عربستان	۱۹۸۷	ورزشی	۱۴۷	کابلی ـ غشایی	چتری روبه پایین	PVC	(URL 5)
۸	گنبدآسمان	تورنتو ـ کانادا	۱۹۸۹	ورزشی	۲۱۳	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 2)
۹	آرنا	زاراگوزا ـ اسپانیا	۱۹۹۰	ورزشی	۸۲	کابلی ـ غشایی	غشایی	PVC	(URL 2)
۱۰	آریاک کلوزیوم	توکیو ـ ژاپن	۱۹۹۱	ورزشی	۱۳۶	خرپای فولادی	صلب	تفلون	(URL 6)
۱۱	چتر مسجدالنبی	مدینه ـ عربستان	۱۹۹۲	مذهبی	۱۸	چتری غشایی	چتری رو به پایین	PVC	(URL 2)
۱۲	تیلا پارکن	کپنهاگ ـ دانمارک	۱۹۹۲	ورزشی	۱۰۵	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 7)
۱۳	گنبد اقیانوس	هوکایدو ـ ژاپن	۱۹۹۳	ورزشی	۱۱۰	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 2)
۱۴	گریوبر	هانوفر ـ آلمان	۱۹۹۳	ورزشی	۴۳	خرپای فولادی	صلب	تفلون	(URL 8)
۱۵	آرنا	آمستردام ـ هلند	۱۹۹۶	ورزشی	۶۵	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 2)
۱۶	آرتور اش	نیویورک ـ آمریکا	۱۹۹۷	ورزشی	۸۸	کابلی ـ غشایی	غشایی	PVC	(URL 9)
۱۷	فونیکس	آریزونا ـ آمریکا	۱۹۹۸	ورزشی	۱۱۰	خرپای فولادی	صلب	تفلون	(URL 10)
۱۸	گنبد تاجیما	هوکایدو ـ ژاپن	۱۹۹۸	ورزشی	۱۵۰	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 11)
۱۹	رترنبام	اشتوتگارت ـ آلمان	۱۹۹۹	ورزشی	۶۲	چتری غشایی	چتری رو به پایین	PVC	(URL 10)
۲۰	سیفکو	واشنگتن ـ آمریکا	۱۹۹۹	ورزشی	۲۰۰	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 12)
۲۱	تالار شهر وین	وین ـ اتریش	۲۰۰۰	خدماتی	۳۴	خرپایی ـ چادری	غشایی	PVC	(URL 1)
۲۲	گنبد آیریس	هانوفر ـ آلمان	۲۰۰۰	فرهنگی	۵	قیچی‌سان فولادی	قیچی‌سان منحنی	تفلون	(URL 13)
۲۳	مینت پارک	تگزاس ـ آمریکا	۲۰۰۰	ورزشی	۹۶	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 5)
۲۴	میلر	میلواکی ـ آمریکا	۲۰۰۱	ورزشی	۱۸۰	خرپای فولادی	صلب	تفلون	(URL 5)
۲۵	آمریکن فیلد	آتلانتا ـ آمریکا	۲۰۰۱	ورزشی	۸۲	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 3)
۲۶	ومبلی	ومبلی ـ انگلستان	۲۰۰۲	ورزشی	۵۲	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 8)
۲۷	ان ار جی	تگزاس ـ آمریکا	۲۰۰۲	ورزشی	۱۰۸	خرپای فولادی	صلب	تفلون	(URL 13)
۲۸	یوونتوس	تورین ـ ایتالیا	۲۰۰۳	ورزشی	۱۱۰	کابلی ـ غشایی	غشایی	تفلون	(URL 9)
۲۹	مرکز تنیس چیژانگ	شانگهای ـ چین	۲۰۰۳	ورزشی	۵۰	خرپای فولادی	قیچی‌سان زاویه‌دار	ETFE	(URL 2)
۳۰	مرکز تئاتر	پنسیلوانیا ـ آمریکا	۲۰۰۳	فرهنگی	۲۴	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 3)
۳۱	کیژانگ	شانگهای ـ چین	۲۰۰۳	ورزشی	۱۲۵	خرپای فولادی	صلب	تفلون	(URL 3)
۳۲	تویوتا	آیچی ـ ژاپن	۲۰۰۵	ورزشی	۲۳۰	خرپایی ـ چادری	غشایی	تفلون	(URL 13)
۳۳	گنبد فوکوکا	فوکوکا ـ ژاپن	۲۰۰۵	ورزشی	۲۲۲	خرپای فولادی	صلب	تفلون	(URL 1)

ردیف	مشخصات عمومی پروژه				مشخصات فنی و مکانیزم حرکتی سازه				مرجع
	نام پروژه/ساختمان	محل شهر/کشور	سال ساخت	کاربری پروژه	دهانه (متر)	جنس و سازه سقف	مکانیزم حرکتی	مصالح پوششی	
۳۴	والداستادیون	فرایبورگ ـ آلمان	۲۰۰۵	ورزشی	۱۱۸	چتری غشایی	چتری رو به پایین	PVC	(URL 14)
۳۵	ویمبلی	لندن ـ انگلستان	۲۰۰۷	ورزشی	۱۰۰	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 5)
۳۶	استادیوم ملی تنیس	پکن ـ چین	۲۰۰۸	ورزشی	۶۱	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 7)
۳۷	المپیک مونترال کانادا	مونترال ـ کانادا	۲۰۰۹	ورزشی	۲۶۶	کابلی ـ غشایی	غشایی	PVC	(URL 1)
۳۸	ویمبلدون	لندن ـ انگلستان	۲۰۰۹	ورزشی	۷۰	خرپای فولادی	غشایی	تفلون	(URL 15)
۳۹	ای تی اند تی	تگزاس ـ آمریکا	۲۰۰۹	ورزشی	۹۱	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 6)
۴۰	اویتا	آویتا ـ ژاپن	۲۰۱۰	ورزشی	۲۷۴	خرپای فولادی	صلب	تفلون	(URL 4)
۴۱	استادیوم نانتانگ	نانتانگ ـ چین	۲۰۱۰	ورزشی	۱۰۰	قاب فولادی	صلب	تفلون	(URL 9)
۴۲	نشنال آرینا	بخارست ـ رومانی	۲۰۱۱	ورزشی	۱۲۰	کابلی ـ غشایی	غشایی	PVC	(URL 5)
۴۳	بی سی پلیس	ونکوور ـ کانادا	۲۰۱۱	ورزشی	۱۳۷	کابلی ـ غشایی	غشایی	PVC	(URL 14)
۴۴	آلیانتس آرینا	مونیخ ـ آلمان	۲۰۱۲	ورزشی	۱۱۵	کابلی ـ غشایی	غشایی	تفلون	(URL 12)
۴۵	اردوس	اردوس ـ چین	۲۰۱۲	ورزشی	۱۰۴	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 5)
۴۶	مارلین پارک	تگزاس ـ آمریکا	۲۰۱۲	ورزشی	۱۷۱	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 7)
۴۷	شائوگسینگ	پکن ـ چین	۲۰۱۳	ورزشی	۲۶۷	خرپای فولادی	صلب	تفلون	(URL 7)
۴۸	موزه مرکزی	لیون ـ فرانسه	۲۰۱۳	فرهنگی	۲۹	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 1)
۴۹	مارگارت	ملبورن ـ استرالیا	۲۰۱۴	ورزشی	۵۷	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 10)
۵۰	مجموعه سنگاپور	کالنگ ـ سنگاپور	۲۰۱۴	ورزشی	۳۱۰	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 14)
۵۱	استادیوم شاوشینگ	شاوشینگ ـ چین	۲۰۱۴	ورزشی	۱۲۸	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 15)
۵۲	مرسدس بنز	آتلانتا ـ آمریکا	۲۰۱۷	ورزشی	۱۳۰	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 7)
۵۳	رستوران لست	تگزاس ـ آمریکا	۲۰۱۷	خدماتی	۱۵	قاب فولادی	صلب	ETFE	(URL 15)
۵۴	پترزبورگ	کراسنودار ـ روسیه	۲۰۱۷	ورزشی	۱۰۵	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 3)
۵۵	صدای پرندگان	آتلانتا ـ آمریکا	۲۰۱۸	خدماتی	۱۸	قاب فولادی	صلب	ETFE	(URL 13)
۵۶	هاسون	تگزاس ـ آمریکا	۲۰۱۹	فرهنگی	۲۴	قاب فولادی	غشایی	PVC	(URL 14)
۵۷	بام رستوران اتحاد	تورنتو ـ کانادا	۲۰۱۹	خدماتی	۲۲	قاب فولادی	صلب	ETFE	(URL 15)
۵۸	ورزشگاه جام جهانی	دوحه ـ قطر	۲۰۲۱	ورزشی	۱۱۵	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 4)
۵۹	مجموعه ورزشی لایف	نیویورک ـ آمریکا	۲۰۲۱	ورزشی	۱۱۸	خرپای فولادی	صلب	ETFE	(URL 7)
۶۰	هاکید	توکیو ـ ژاپن	۲۰۲۲	ورزشی	۱۶۸	خرپای فولادی	صلب	تفلون	(URL 7)

۳. یافته‌های پژوهش و تحلیل ویژگی‌های سقف‌های تغییر فرم‌پذیر

در این پژوهش به بررسی ویژگی‌های شصت نمونه از سقف‌های تغییر فرم‌پذیر ساخته‌شده از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۲ میلادی پرداخته شده و مشخصات آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نمودار سمت راست تصویر ۱۳ فراوانی سقف‌های باز و بسته‌شونده بر اساس مکانیزم حرکتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بررسی مکانیزم‌های حرکتی در مصادیق موجود نشان می‌دهد که بیشترین مکانیزم حرکتی در سقف‌های متحرک به‌ترتیب، مکانیزم صلب و سپس مکانیزم غشایی است. به‌عبارت دیگر بیش از دوسوم نمونه‌های موجود از مکانیزم صلب حرکتی استفاده شده و در یک‌پنجم نمونه‌ها مکانیزم غشایی مورد استفاده قرار گرفته است. کاربرد بیشتر مکانیزم صلب می‌تواند ناشی از سادگی در طراحی، اجرا و حرکت و همچنین تعمیر و نگهداری آسان‌تر این سیستم در مقایسه با سایر مکانیزم‌های مورد بررسی باشد. در تصویر ۱۳ ـ چپ به مقایسهٔ سیستم‌های سازه در این سقف‌ها پرداخته شده و بررسی آن نشان می‌دهد که در طراحی و ساخت سقف‌های متحرک، خرپاهای فولادی بیش از سایر سیستم‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که یکی از دلایل آن می‌تواند ضرورت پوشش دهانه‌های بزرگ و سبکی سازه در این سقف‌ها باشد. در تصویر ۱۴ بررسی کاربری‌ها و عملکرد پروژه‌هایی که از سقف‌های متحرک استفاده شده، نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که بیش از ۸۰ درصد این سقف‌ها در پروژه‌های مختلف اجراشده برای پوشش استادیوم‌ها و فضاهای ورزشی به کار رفته و کمتر از ۲۰ درصد آن‌ها برای سایر کاربری‌ها همچون فرهنگی و مذهبی بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که گزینهٔ سقف‌های باز و بسته‌شونده با توجه به چگونگی عملکرد مورد نیاز استادیوم‌های ورزشی از جانب طراحان مورد استقبال خوبی قرار گرفته است. شاید بتوان اهمیت این استادیوم‌ها در مقیاس جهانی را دلیلی برای توجیه هزینه‌های اجرا و نگهداری این سیستم‌ها در کنار ضرورت تأمین هم‌زمان یک فضای سرپوشیده و سرباز عنوان کرد. ساده‌تر بودن طراحی و اجرای این سیستم برای دهانه‌های بزرگ مورد نیاز در استادیوم‌ها و هزینهٔ کمتر تعمیر و نگهداری سازه در مکانیزم صلب از دلایل استفادهٔ بیشتر از این سیستم به شمار می‌رود.

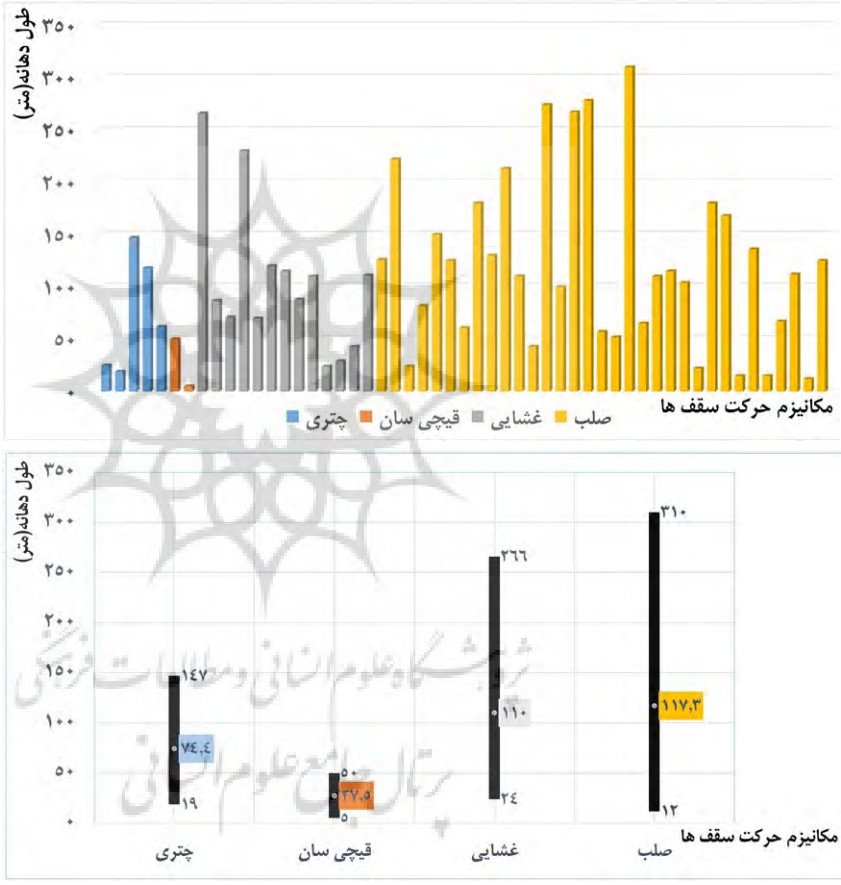


تصویر ۱۳: بررسی سیستم سازه و مکانیزم‌های حرکتی در سقف‌های تغییر فرم‌پذیر

تصویر ۱۴: مقایسهٔ کاربری‌های فضاها با سقف‌های تغییر فرم‌پذیر

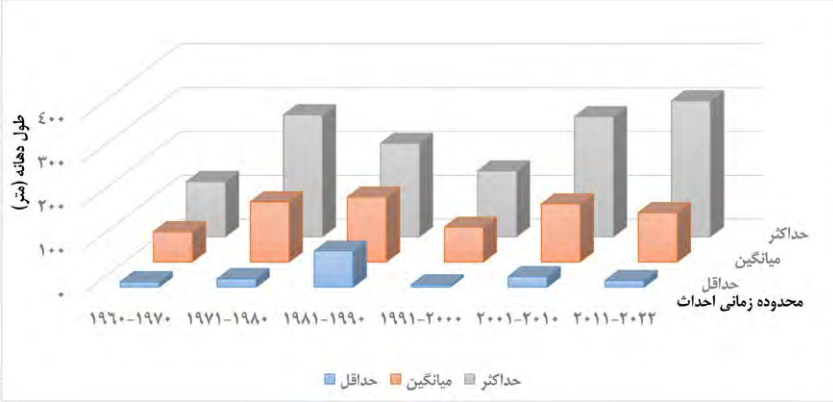
در تصویر ۱۵بالا، دهانهٔ سقف‌ها به تفکیک مکانیزم حرکتی نشان داده شده است. این مقایسه نشان می‌دهد بیشترین دهانه در مکانیزم کشویی صلب و کمترین دهانه در مکانیزم قیچی‌سان استفاده شده است. در تصویر ۱۵ پایین،

حداقل، حداکثر و میانگین دهانه‌هایی که سقف‌های تغییر فرم‌پذیر به تفکیک مکانیزم عملکردی پوشانده‌اند نمایش داده شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که مکانیزم صلب در دهانه‌هایی با دامنهٔ تغییرات بزرگ‌تر به کار رفته و میانگین دهانه‌ها در مکانیزم صلب و غشایی به هم نزدیک است. مکانیزم‌های صلب و غشایی بزرگ‌ترین و مکانیزم‌های چتری و قیچی‌سان کوچک‌ترین دهانه‌ها در بین سازه‌های مورد بررسی را دارند و تغییرات دهانه به‌ترتیب در سقف‌های صلب و غشایی بیشترین دامنه و در سقف‌های قیچی‌سان کمترین دامنه را دارد. علاوه بر آن، بررسی تجربیات جهانی استفادهٔ موفق از مکانیزم سقف‌های باز و بسته‌شونده با سیستم‌های صلب و غشایی با طول دهانهٔ تا بیش از ۳۰۰ متر را نشان می‌دهد.

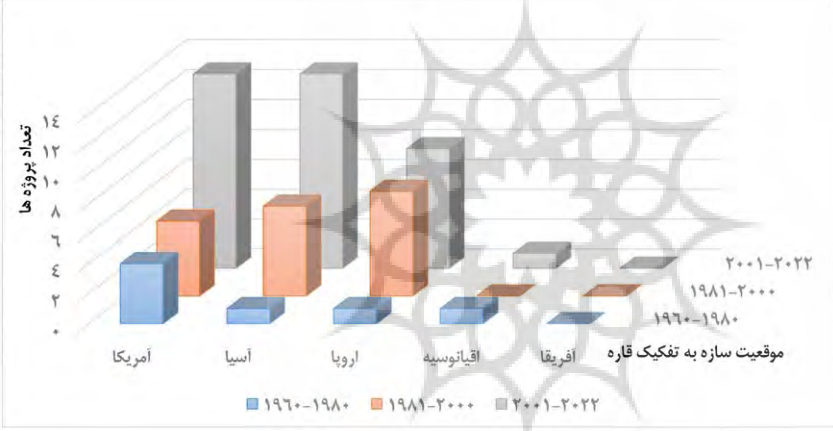


تصویر ۱۵ بالا: مقایسهٔ دهانهٔ سقف‌ها به تفکیک مکانیزم حرکتی آن‌ها. پایین: مقایسهٔ حداقل، حداکثر و میانگین دهانه در مکانیزم‌های حرکتی مختلف سقف‌های تغییر فرم‌پذیر

در تصویر ۱۶ مقایسهٔ حداقل، حداکثر و میانگین دهانهٔ سقف‌های متحرک در طی بازه‌های ده‌ساله نشان داده شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که با رشد تکنولوژی ساخت‌وساز در قرن ۲۰ و ۲۱ میلادی، طراحان امکان استفاده از سقف‌های باز و بسته‌شونده برای دهانهٔ بزرگ‌تر را پیدا کرده‌اند و در طی حدود شش دههٔ اخیر حداکثر طول دهانهٔ این سیستم سازه‌ای بیش از دو برابر افزایش پیدا کرده است. در تصویر ۱۷ تعداد پروژه‌های ساخته‌شده در هر قاره نشان داده شده است. بیشترین پروژه‌ها به‌ترتیب در قاره‌های آمریکا، آسیا و اروپاست که تعداد این پروژه‌ها با گذشت زمان سیر صعودی داشته است.



تصویر ۱۶: مقایسهٔ حداقل، حداکثر و میانگین دهانه‌ها در سقف‌های تغییر فرم‌پذیر از سال ۱۹۶۰ میلادی



تصویر ۱۷: مقایسهٔ تعداد پروژه‌های سقف‌های تغییر فرم‌پذیر ساخته‌شده در پنج قاره در طی بازه‌های بیست‌ساله

در تصویر ۱۸ به بررسی پوشش‌های استفاده‌شده در سقف‌های متحرک پرداخته شده است. این بررسی نشان می‌دهد در سقف‌ها با مکانیزم حرکتی صلب، بیش از ۹۰ درصد موارد از پوشش تفلون و ETFE [2] استفاده شده و جنس پوشش استفاده‌شده در مکانیزم غشایی در اکثر مواقع از پوشش PVC[3] انتخاب شده است. در نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش، پوشش PVC تنها پوشش استفاده‌شده در مکانیزم‌های حرکتی چتری بوده و در سازه‌های قیچی‌سان، تفلون و ETFE پرکاربردترین پوشش‌ها بوده‌اند. درمجموع برای تمامی موارد پوشش سقف‌های تغییر فرم‌پذیر، از مصالح سبک استفاده شده که این موضوع سهولت حرکت مجموعه سقف را به دنبال دارد.

یکی از نسبت‌های مهم در بررسی مشخصات سیستم سازهٔ سقف‌های مختلف، نسبت طول دهانه به ضخامت سقف است، بنابراین برای نمونه‌های منتخب از هر نوع مکانیزم مورد بررسی، این مقدار محاسبه و نتایج آن در جدول ۳ تحلیل شده است. از میان نمونه‌های ارائه‌شده، از هر مکانیزم حرکتی بیشترین و کمترین طول دهانه، جدیدترین و قدیمی‌ترین سقف‌ها در بازهٔ زمانی مورد بررسی و نزدیک‌ترین دهانه به میانگین دهانهٔ مکانیزم انتخابی ارائه شده و عوامل طول دهانه و ضخامت سقف در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. صرفاً در مورد مکانیزم قیچی‌سان به‌علت محدودیت نمونه‌ها، تنوع نمونه‌های مورد بررسی کمتر است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که نسبت متغیر دهانه به ضخامت سقف در مکانیزم‌های مختلف از کمتر از ۳۰ تا بیش از ۲۴۰ تغییر می‌کند و بیشترین مقدار آن مربوط به مکانیزم غشایی است؛ بنابراین سقف‌های تغییر فرم‌پذیر با مکانیزم غشایی با ضخامت کمتری به نسبت سایر مکانیزم‌ها احداث شده‌اند.

تصویر ۱۸: بررسی و مقایسهٔ مصالح پوششی در مکانیزم‌های مختلف حرکت سقف

جدول ۳: مقایسهٔ نسبت دهانه به میانگین ضخامت سقف در سقف‌های متحرک با مکانیزم‌های حرکتی مختلف

مکانیزم حرکتی	نمونه‌های موردی	دلیل انتخاب	دهانه (متر)	متوسط ضخامت سقف (متر)	نسبت دهانه به ضخامت سقف	میانگین نسبت دهانه به ضخامت سقف
صلب	مجموعهٔ سنگاپور	بیشترین دهانه	۳۱۰	۲/۱۲	۱۴۶/۲	۸۰/۹
	کاخ‌موزهٔ نیاوران	کمترین دهانه	۱۲	۰/۸۳	۱۴/۴	
	پیتزبورگ	قدیمی‌ترین نمونه	۱۲۶	۱/۹۳	۶۵/۲	
	هاکید	جدیدترین نمونه	۱۶۸	۱/۹۷	۸۵/۲	
	مجموعه ورزشی لایف	نزدیک‌ترین نمونه به میانگین دهانه	۱۱۸	۱/۲۶	۹۳/۹۶	
غشایی	المپیک مونترال کانادا	بیشترین دهانه	۲۶۶	۱/۱	۲۴۱/۸	۱۰۱/۵
	هاسون	کمترین دهانه	۲۴	۰/۴۳	۵۵/۸	
	آرنا	قدیمی‌ترین نمونه	۸۲	۰/۸۷	۹۴/۲	
	هاسون	جدیدترین نمونه	۲۴	۰/۴۸	۵۰	
	یوونتوس	نزدیک‌ترین نمونه به میانگین دهانه	۱۱۰	۱/۶۷	۶۵/۸	
چتری	استادیوم پادشاه فهد	بیشترین دهانه	۱۴۷	۱/۰۵	۱۴۰	۸۵/۲
	چتر مسجدالنبی	کمترین دهانه	۱۸	۰/۵۸	۳۱	
	نمایشگاه کلمن	قدیمی‌ترین نمونه	۱۹	۰/۴۳	۴۴/۲	
	والداستادیون	جدیدترین نمونه	۱۱۸	۰/۹۳	۱۲۶/۹	
	رترنبام	نزدیک‌ترین نمونه به میانگین دهانه	۶۲	۰/۷۴	۸۳/۷	
قیچی‌سان	مرکز تنیس چیژانگ	بیشترین دهانه	۵۰	۰/۳۸	۱۳۱/۵	۷۹/۶
	گنبد آیریس	کمترین دهانه	۵	۰/۱۸	۲۷/۸	
	گنبد آیریس	قدیمی‌ترین نمونه	۵	۰/۱۸	۲۷/۸	
	مرکز تنیس چیژانگ	جدیدترین نمونه	۵۰	۰/۳۸	۱۳۱/۵	

نتیجه

معماری پویا برای استفادهٔ بهینه و متفاوت از فضاها در مواقع مختلف، شرایط بهتری را ایجاد می‌کند و سقف‌های تغییر فرم‌پذیر یکی از موارد استفاده از این نوع معماری به شمار می‌رود. انتخاب یک سیستم سقف باز و بسته‌شونده در معماری پویا و طراحی فضاهای سرپوشیدهٔ متحرک می‌تواند شرایط مطلوبی برای استفادهٔ بهتر از یک بنا ایجاد کند، به همین دلیل، این سازه‌ها در دهه‌های اخیر توسعهٔ قابل توجهی پیدا کرده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که انواع مکانیزم و ساختارهای حرکتی در سقف‌های تغییر فرم‌پذیر را می‌توان در چهار گروه صلب، غشایی، چتری و قیچی‌سان طبقه‌بندی کرد و هر گروه از نظر نوع حرکت و نحوهٔ تغییر فرم ویژگی‌های متفاوتی دارند. بررسی ویژگی‌های شصت پروژهٔ شاخص جهانی که در حدود شش دههٔ اخیر ساخته شده، نشان می‌دهد که فناوری سقف‌های تغییر فرم‌پذیر برای بناهای با طول دهانه تا بیش از ۳۰۰ متر هم به کار رفته و بیشترین استفاده از این فناوری برای دهانه‌های بزرگ در کاربری ورزشی و استادیوم‌ها بوده است. بررسی نمونه‌های تحلیل‌شده که بیشترین تعداد آن به‌ترتیب در قاره‌های آمریکا، آسیا و اروپا قرار گرفته، نشان می‌دهد که استفاده از مکانیزم سقف‌های باز و بسته‌شونده در دهه‌های اخیر به‌دلیل مزایای قابل توجه آن توسعه یافته و از آن برای پوشش دهانه‌های بزرگ‌تر استفاده شده است. علاوه بر آن برای پوشش دهانه‌های بزرگ‌تر عمدتاً از مکانیزم‌های صلب و غشایی استفاده شده که این موضوع می‌تواند به‌دلیل مزایای نسبی این مکانیزم در مقایسه با سایر مکانیزم‌های حرکتی باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در مکانیزم‌های صلب عمدتاً از پوشش ETFE، در مکانیزم غشایی و چتری از PVC و در مکانیزم قیچی‌سان از پوشش تفلون و ETFE استفاده می‌شود؛ همچنین بررسی نسبت دهانه به ضخامت سقف نشان می‌دهد که بیشترین نسبت در سقف‌های با مکانیزم حرکتی غشایی اجرا شده است.

پی‌نوشت‌ها

1. Oita
2. Ethylene Tetra Fluoro Ethylene
3. Poly Vinyl Chloride

منابع

ـ احمدنژادکریمی، مجید، مازیار آصفی، و فرزین حق‌پرست. ۱۳۹۵. الگوی سازه‌ای حرکتی سقف‌های باز و بسته‌شوندهٔ منحنی‌شکل توسط میله‌های متحرک. *نقش جهان* ۶ (۳): ۲۷ـ۳۷.

ـ بانی مسعود، امیر. ۱۳۹۵. *تاریخ معماری غرب*. تهران: خاک.

ـ تقی‌زاده، کتایون، محمود گلابچی، و لادن وجدانزاده. ۱۳۹۷. *معماری تغییر فرم‌پذیر*. تهران: دانشگاه تهران.

ـ سرکرده‌ئی، الهام، احمد جامعی، و محمدرضا مجاهدی. ۱۳۸۹. بررسی انواع سقف‌های باز و بسته‌شونده و ملاحظات مرتبط با آن‌ها. ارائه‌شده در اولین همایش ملی *فناوری‌های نوین در علوم مهندسی*. تهران.

ـ صادق‌پور، امیرحسین، و فائزه تفرشی. ۱۴۰۰. ارزیابی انواع مکانیزم‌های تغییر شکل در ساختمان پل‌های متحرک. *جاده* ۲۹ (۱۰۹): ۱۹ـ۳۴.

ـ صادق‌پور، امیرحسین، و نرگس یاوری. ۱۴۰۱. ارزیابی مکانیزم‌های پویایی در نمای ساختمان. دوفصلنامه *انرژی‌های تجدیدپذیر و نو* ۹ (۲): ۱۰۱ـ۱۱۲.

ـ عالمی، بابک، شهرام پوردیهیمی، و سعید مشایخ فریدنی. ۱۳۹۵. سازه، فرم و معماری. *مطالعات معماری ایران* ۹ (۵): ۱۲۳ـ۱۴۰.

ـ قوچانی، محیا، محمد تاجی، و مجتبی دربانیان. ۱۳۹۸. کاربرد سقف‌های متحرک به‌منظور آماده‌سازی حیاط مرکزی مساجد جهت اسکان موقت در شرایط بحران. *شهر ایمن* ۲ (۵): ۶ـ۱۹.

ـ گودرزی، رفیدا، و حشمت‌الله متدین. ۱۳۹۰. طراحی فضایی برای اجرای هنرهای نمایشی با کاربرد سازهٔ متحرک و باز و بسته‌شونده. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران، ۱۳۹۰.

ـ محمدیان‌منصور، صاحب، و سینا فرامرزی. ۱۳۹۲. بررسی وجود نظم شبه تناوبی در ساختار هندسی پتکانه. نشریه *هنرهای زیبا* معماری و شهرسازی ۱۸ (۱): ۴۳ـ۵۴.

ـ موسوی، سیده فائزه، و حمیدرضا داودآبادی‌فراهانی. ۱۳۹۸. ارائهٔ طرح ترکیبی از سازه‌های اوریگامی و قیچی‌سان به‌عنوان سایه‌بان‌های متحرک متصل به ساختمان. *نخبگان علوم و مهندسی* ۴ (۱): ۴۰ـ۵۲.

- Akgün, Yenal. 2010. A Novel Transformation Model for Deployable Scissor - hinge. *Structures Engineers*. 21.

- Akgün, Yenal, Walter Haase, and Werner Sobek. 2007. Proposal for a New Scissor - hinge Structure to Create Transformable and Adaptive Roofs. *In Proceedings IASS 2007 (International Association of Spatial Structures) Symposium.*

- Arnouts, Liesbeth IW, Thierry J Massart, Niels De Temmerman, and PZ Berke. 2020. Multi - objective Optimisation of Deployable Bistable Scissor Structures. *Automation in Construction*. 114: 103 - 154.

- Asefi, Maziar, Sh Valadi, and Elia Ebrahimi Salari. 2013. New Proposal for a Retractable Roof Over a Courtyard in Tabriz Islamic Art University. *International Journal of Architecture & Urban Planning (IJAUP)*. 23: 113 - 20.

- Bhavana, B, and M Shilpa. 2018. Modeling and Analysis of Retractable Roofs. *International Journal of Applied Engineering Research*. 13: 89 - 93.

- Chen, Yao, Linzi Fan, and Jian Feng. 2017. Kinematic of Symmetric Deployable Scissor - hinge Structures with Integral Mechanism Mode. *Computers & Structures*. 191: 140 - 52.

- Dinevari, Najmeh Faghih, Yaser Shahbazi, and Feray Maden. 2021. Geometric and Analytical Design of Angulated Scissor Structures. *Mechanism and Machine Theory*. 164: 104 - 124.

- El - Zanfaly, Dina Ezz ElDin. 2011. Active Shapes: Introducing Guidelines for Designing Kinetic Architectural Structures. *Massachusetts Institute of Technology*.

- Elkhayat, Youssef Osama. 2014. Interactive Movement in Kinetic Architecture. *JES Journal of Engineering Sciences*. 42: 816 - 845.

- Hemmerling, Marco. 2017. Architecture by Numbers. *An Interdisciplinary Approach Towards Computational Design and Architectural Geometry*.

- Jensen, Frank Vadstrup. 2005. *Concepts for Retractable Roof Structures*. University of Cambridge.

- Liao, Yuan, and Sudarshan Krishnan. 2017. Geometric Design and Kinematics of Curvilinear Deployable Structures. *In Proceedings of IASS Annual Symposia*. 1 - 10. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).

- Maden, Feray, Yenal Akgün, Gökhan Kiper, Şebnem Gür, Müjde Yar, and Koray Korkmaz. 2019. A Critical Review on Classification and Terminology of Scissor Structures. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. 60: 47 - 64.

- Megahed, Naglaa Ali. 2017. Understanding Kinetic Architecture: Typology, Classification, and Design Strategy. *Architectural Engineering and Design Management*. 13: 130 - 146.

- Mira, L Alegria, R Filomeno Coelho, Ashley P Thrall, and Niels De Temmerman. 2015. Parametric Evaluation of Deployable Scissor Arches. *Engineering Structures*. 99: 479 - 491.

- Mollaert, M. 1996. Retractable Membrane Roofs. *WIT Transactions on the Built Environment*. 24.

- Pawlak - Jakubowska, Anita, and Krystyna Romaniak. 2020. Retractable Roofs in Engineering Education. *Technical Transactions/Czasopismo Techniczne*. 13.
- Pellegrino, Sergio. 2001. Deployable Structures in Engineering. *Deployable Structures* (Springer).
- Ramzy, Nelly, and Hatem Fayed. 2011. Kinetic Systems in Architecture: New Approach for Environmental Control Systems and Context - Sensitive Buildings. *Sustainable Cities and Society*. 1: 170 - 177.
- Sharaidin, Kamil. 2014. *Kinetic Facades: Towards Design for Environmental Performance*. RMIT University.
- Siotor, Igor G, and Thomas Hermeking. 2017. Convertible Architecture with Lightweight Technology. *In Proceedings of IASS Annual Symposia*, 1 - 8. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).
- Smith, Julie Katherine. 2003. *Current Technologies and Trends of Retractable Roofs*. Massachusetts Institute of Technology.
- Takahashi, Kenryo, Axel KÖrner, Valentin Koslowski, and Jan Knippers. 2016. Scale Effect in Bending - Active Plates and a Novel Concept for Elastic Kinetic Roof Systems. *In Proceedings of IASS Annual Symposia*, 1 - 10. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).
- Temmerman, Niels, and Lara Alegria Mira. 2011. *Development of a Sustainable Construction System for Temporary Structures*.
- Van der Wijk, V, G Kiper, and A Yasır. 2015. Synthesis and Experiments of Inherently Balanced Umbrella Canopy Designs. *In Proceedings of the TrC - IFToMM Symposium on Theory of Machines and Mechanisms*.
- Yar, Müjde, Koray Korkmaz, Gökhan Kiper, Feray Maden, Yenal Akgün, and Engin Akta. 2017. A Novel Planar Scissor Structure Transforming Between Concave and Convex Configurations. *The International Journal of Computational Methods and Experimental Measurments*. 5: 442 - 450.
- You, Z, and J Springer. 2000. A New Approach to Design of Retractable Roofs. *In IUTAM - IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications*. 477 - 483. Springer.
- URL 1: https://structurae.net/en
- URL 2: https://www.kugel - architekten.com/
- URL 3: https://coveredaustralia.com.au/retractable - roofing - system.Accessed- 22 November 2022 -.
- URL 4: https://www.zappoutdoor.co.uk/products/retractable - roofs.accessed 7 - October - 2022.
- URL 5: https://www.cantensile.com/stadium - customized - innovative - automatic - retractable - roof - system _ p110 . html. Accessed 10 - January 2022 -.
- URL 6: https://en.wikipedia.org/wiki/Retractable_roof.Accessed 22 - November 2022 -.
- URL7: https://www.businesswire.com/news/home/20160518005426/en/New - Vikings - Football - Stadium - First–in - the - U.S. - to - Use - Lightweight - ETFE - Film - Roof. Accessed 10 - January 2022 -.
- URL 8: https://www.coliseum - online.com/el - salvador - new - stadium - in - truck - with -

china. Accessed 10 - January 2022 -.
- URL 9: https://www.pinterest.com/rollacover/_created.Accessed 22 - November 2022 -.
- URL10:https://www.archdaily.com/catalog/us/products/17851/outdoor - roof - retractable - shadefx. Accessed 22 - November 2022 -.
- URL 11: https://www.mhi.com/products/living/culture_sports_movable_roof.html.Accessed 22 - November 2022 -.
- URL12:https://www.aurecongroup.com/insights/designing - retractable - roofs - for - multi - purpose - stadiums. Accessed 22 - November 2022 -.
- URL13:https://www.mhi.com/products/living/culture_sports_movable_roof.html. Accessed 10 - January 2022 -
- URL 14: https://www.johndesmond.com/blog/design/lilles - grand - stadium. Accessed 10 - January 2022 -

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Analysis of Structural Mechanisms in Transformable Roofs: Prominent Global Examples

Amir-Hossein Sadegh-pour
Assistant Professor, Faculty of Architecture and Arts, University of Kashan

Niloofar Rabbani
M.Sc. student, Faculty of Architecture and Arts, University of Kashan

Fa'ezeh Tafreshi
Ph.D. candidate, Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Art

In recent years, the use of deployable structures has drawn the attention of many architects and engineers due to their flexibility. By providing favorable conditions for spaces and creating dynamics and flexibility in buildings, transformable roofs have been used in many global projects. In this research, the structural mechanisms of transformable roofs are investigated and analyzed. The transformation mechanism of these roofs is classified here into four groups: rigid, membrane, scissor, and umbrella mechanisms. While explaining the processes and the mode of movement in each mechanism, one prominent project is analyzed as an example of each group. Then, 60 examples of transformable roof structures built around the world during the last six decades are briefly analyzed. The results of this study show that transformable roofs are used extensively in stadiums and sports centers. The rigid and membrane mechanisms are the most used mechanisms for transformable roofs and truss and cable structures are the most used systems. These roofs are used to cover spans of more than 300 meters. The span-to-thickness ratio of the roof changes from about 30 to 240, where the highest value is for membrane mechanisms. The cover material for retractable roofs in all four groups includes lightweight materials including Teflon, ETFE, and PVC.

Keywords: movable structures, transformable roof, deployable mechanisms, kinetic architecture, roof

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی