DOR: 20.1001.1.24234931.1401.9.2.11.4

سال نهم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۱، ص ص ۱۰۱- ۱۱۲

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۰/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۲/۲۴

ارزیابی مکانیزم‌های پویایی در نمای ساختمان

امیرحسین صادقپور[۱*]، نرگس یاوری[۲]

۱- استادیار، گروه فناوری معماری، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد معماری، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

* کاشان، ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳، Sadeghpour@kashanu.ac.ir

چکیده

با استفاده از نمای پویا شکل بیرونی ساختمان از حالت صلب خارج شده و علاوه‌بر تطابق با نیاز کاربران و محیط، امکان کاهش مصرف انرژی در ساختمان فراهم می‌شود. در این پژوهش ضمن معرفی نمای پویا در ساختمان، به معرفی الگوهای حرکتی عناصر تشکیل‌دهنده نما پرداخته شده است. به منظور تحلیل ویژگی‌های نماهای پویا، مشخصات ۵۰ پروژه ساختمانی شاخص دنیا با نمای پویا که در چهار دهه اخیر ساخته شده‌اند از نظر نوع کاربری، هدف اصلی کاربرد پویایی در نما، مصالح به‌کار رفته و دسته‌بندی مکانیزم حرکتی نما، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج تحلیل شده‌اند. تحلیل ویژگی‌های نمونه‌ها نشان می‌دهد که هدف اصلی طرح نمای پویا، مدیریت نور و بهره‌گیری بصری بوده و بیشترین میزان کاربرد این نما در ساختمان‌های با کاربری فرهنگی و اداری است. نوع مصالح و سیستم‌های محرکه در اکثر نمونه‌ها، سلول‌های فتوولتاییک، دیافراگم‌های حساس به نور و صفحات خورشیدی بوده و مکانیزم حرکت کشویی و چرخشی رایج‌ترین الگوی به‌کار رفته در نمونه‌های بررسی شده است. در نهایت یک نمونه نمای پویا که در اقلیم گرم و خشک کشورمان می‌تواند به‌کار رود، توسط الگوی اوریگامی طراحی و ارائه شده است.

کلیدواژگان: نمای پویا، عملکرد نما، مکانیزم حرکتی، الگوی اوریگامی

Analysis of dynamic mechanisms in building facades

Amir Hossein Sadeghpour[1*], Nargess Yavari[2]

1- Assistant Professor, Department of Architecture and Art, University of Kashan, Kashan, Iran
2- M.Sc. Student in Architecture Engineering University of Kashan, Kashan, Iran *P.O.B. 8731753153 Kashan, Sadeghpour@kashanu.ac.ir

Received: 16 September 2021 Accepted: 14 May 2022

Abstract

Using the dynamic facades, the exterior of building is removed from the rigid state and in addition to adapting to the needs of users and the environment, it is possible to reduce energy consumption in the building. In this research, while introducing a dynamic facade in the building, the movement patterns of the elements that make up the facade were introduced. To analyze the characteristics of dynamic facades, specifications of 50 world-class dynamic projects with dynamic facades which were built in the last four decades in terms of type of use, the main purpose of dynamic application in facades, materials used and classification of facade movement mechanism, have been examined and the results were analyzed. The major objective of the dynamic facade design is light management and visual exploitation, and the most common application of this facade is in cultural and office buildings, according to the features of the examples. Photovoltaic cells, light-sensitive diaphragms, and solar panels are the most frequent materials and propulsion systems in most of the examples, with sliding and rotating motion being the most common pattern. Finally, the origami model designs and presents a dynamic facade example that may be employed in our country's hot and dry environment.

Keywords: Dynamic facades, facade function, movement mechanism, origami pattern

۱- مقدمه

نمای ساختمان نقش مهمی در کنترل شرایط محیطی فضاهای داخلی دارد و مانعی بین داخل و خارج ساختمان است. نمای ایستا که امروزه در بیشتر بناها مورد استفاده قرار می‌گیرد قادر به رفع نیازهای متغیر و پاسخگوی تغییرات محیطی در طراحی معماری نیست. نمای پویا به عنوان یک روش قابل‌تنظیم با استفاده از اتصالات متحرک می‌تواند شکل و پیکربندی نما را با توجه به پاسخ‌های دریافتی تغییر دهد. این نوع ساختار ممکن است کارایی یک ساختمان را از نظر زیبایی‌شناختی و یا عملکردی بهبود بخشد. نمای ساختمان، مرزی بین معماری و فضاهای شهری فراهم می‌کند و تأثیر اساسی بر درک مردم از محیط ساخته شده دارد [۱]. امروزه میزان قابل توجهی از انرژی مصرفی در ساختمان‌ها به سیستم‌های گرمایشی، سرمایشی و تهویه مطبوع HVAC[1] اختصاص یافته تا آسایش ساکنان را فراهم نماید. حدود ۴۲ درصد از کل مصرف سالانه انرژی و ۳۳ درصد از دی‌اکسیدکربن تولیدی جهان مربوط به ساختمان است، بنابراین عملکرد صحیح نمای ساختمان‌ها برای کنترل مصرف انرژی و تأمین آسایش افراد بسیار مهم است. برخی از نمای ساختمان‌های جدید با شرایط جوی، کارکردهای فضایی، محیط داخلی و ساکنان تعامل بیشتری دارند و به تدریج به عنوان سیستم‌های پیچیده تکامل‌یافته و سازگار، توسعه یافته‌اند [۲].

از آنجا که طراحی نمای ساختمان "ثابت" است ولی شرایط بیرونی به طور مداوم تغییر می‌کند، نماهای سنتی پاسخگوی این تغییرات نیستند بنابراین با استفاده از نماهای سازگار، ساختمان‌ها توانایی واکنش در برابر این شرایط را دارند [۳]. سازگاری نما توسط روش‌های مختلفی مثل ایجاد نمای پاسخگو، نمای دو پوسته و هوشمندسازی مصالح نما صورت می‌گیرد. بسیاری از تعاریف یک نمای ساختمانی، آن را به عنوان مرز جدایی بین محیط داخلی و خارجی بیان می‌کند که پشتیبانی، حفاظت، زیبایی‌شناسی و توزیع خدمات را ارائه می‌دهد [۴].

در دهه‌های اخیر نماهای منطبق با تغییرات محیطی و نیاز کاربران با پیشرفت فناوری‌های ساختمانی محقق شده است. نمای تطبیقی یا سازگار با یک نمای سنتی متفاوت است؛ این نما دارای تجهیزاتی است که کنترل آنها اجازه می‌دهد بخش خارجی ساختمان به عنوان یک تعدیل‌کننده آب و هوا عمل‌کند. اگر ادبیات مربوط به نمای پویا را بررسی کنیم، به عناوین گوناگونی مانند "هوشمند"، "تعاملی[2]"، "تطبیقی[3]" یا "پاسخگو" برای تعریف آن مواجه خواهیم شد [۵]. برای مثال رابرت کروننبرگ (۲۰۰۳) معماری پویا را به عنوان "ساختمان‌ها یا اجزای ساختمان با تحرک، موقعیت مکانی و یا هندسه متغیر" تعریف کرد [۶].

به طورکلی می‌توان گونه‌شناسی حرکت در معماری را به پنج نوع تقسیم کرد: ۱- حرکت عناصر معماری سفت و سخت؛ ۲- جابجایی عناصر معماری قابل‌تغییرشکل؛ ۳- حرکت عناصر معماری نرم و انعطاف‌پذیر؛ ۴- حرکت عناصر معماری کشسانی و ۵- اشکال تحت فشار هوا[4]. همچنین حرکات مکانیکی می‌توانند به چرخش، انتقال و ترکیبی از این دو تقسیم شوند [۷].

براساس طبقه‌بندی شوماخر(۲۰۱۰)، ساختارهای مختلف حرکتی در معماری پویا هشت گروه هستند که عبارتند از: ۱- چرخان؛ ۲- چرخشی؛ ۳- پره‌دار؛ ۴- لغزان؛ ۵- تاشو؛ ۶- گسترشی؛ ۷- قابل جمع‌آوری و رول‌کردن و ۸- تحت فشار هوا [۳].

1. Heating Ventilating and Air Conditioning
2. Interactive
3. Adaptive
4. Pneumatic forms

به‌طور کلی پویایی در نما به‌منظور مدیریت نور مزاحم و بهره‌برداری مناسب تابش خورشید، مهار باد و ایجاد تهویه، ایجاد عایق حرارتی و آسایش برودتی، مدیریت و ذخیره‌سازی انرژی و بهره‌برداری بصری و زیبایی‌شناسانه از ساختمان صورت می‌گیرد. این پژوهش به‌عنوان یکی از راهکارهای کاهش مصرف انرژی در ساختمان با هدف معرفی و تحلیل انواع مکانیزم‌های پویایی در نما و ارزیابی نمونه‌های شاخص نمای پویا انجام شده و در انتها یک مدل پیشنهادی نمای متحرک ارائه شده است.

۲- انواع مکانیزم‌های حرکتی در نمای پویا

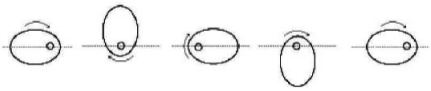
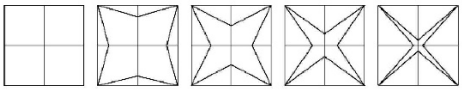
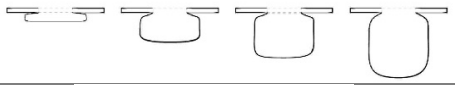
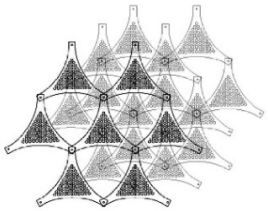
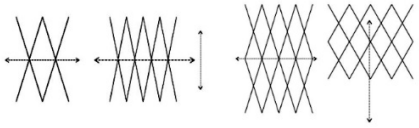
ایجاد حرکت در نماهای پویا از طریق نیروی محرکه موتورهای برقی، آبی یا تحت فشار هوا ایجاد شده و دستورات آن توسط سیستم کنترل مرکزی صادر می‌شود. برای ایجاد اتصالات متحرک بین دو عنصر در قطعات نما، یاتاقان یا لولا مورد نیاز است. یک اتصال لولایی قابلیت تاشدن و یک اتصال یاتاقان قابلیت چرخش دارد؛ همچنین ساختار حرکتی می‌تواند ترکیبی از چرخش و تاشدن باشد [۷]. با وجود طبقه‌بندی‌های گوناگون الگوهای حرکتی در نمای پویا، بسیاری از آنها رفتارهای مشابهی دارند. شریدین انواع مکانیزم‌های حرکتی در نمای پویا را به پنج گروه تفکیک می‌کند که عبارتند از: کشویی و چرخشی[5]؛ تاشو و جمع‌شونده[6]؛ قیچی: باز و جمع‌شونده[7]؛ بالونی: انقباض و انبساطی[8]؛ مثلثی گسترش‌پذیر[9] [۳]. در جدول ۱ انواع ساختارهای حرکتی در نماهای پویا معرفی شده و نحوه تغییر شکل اجزای نما در هر مکانیزم با ترسیم شکل توضیح داده شده است. سپس برای تشریح هر ساختار حرکتی، نمای یک ساختمانِ احداث شده به عنوان نمونه مورد بررسی و تحلیل قرار - گرفته است.

۳- ارزیابی مکانیزم حرکتی در مصادیق اجرایی

با توجه به اینکه انواع مکانیزم‌های حرکتی در نماهای پویا براساس الگوی شریدین در پنج گروه طبقه‌بندی گردیده و تحلیل ویژگی ساختمان‌های با نمای پویا براین اساس انجام شده، در این بخش از هر مکانیزم حرکتی یک نمونه موردی با ارائه جزئیات اجرایی کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

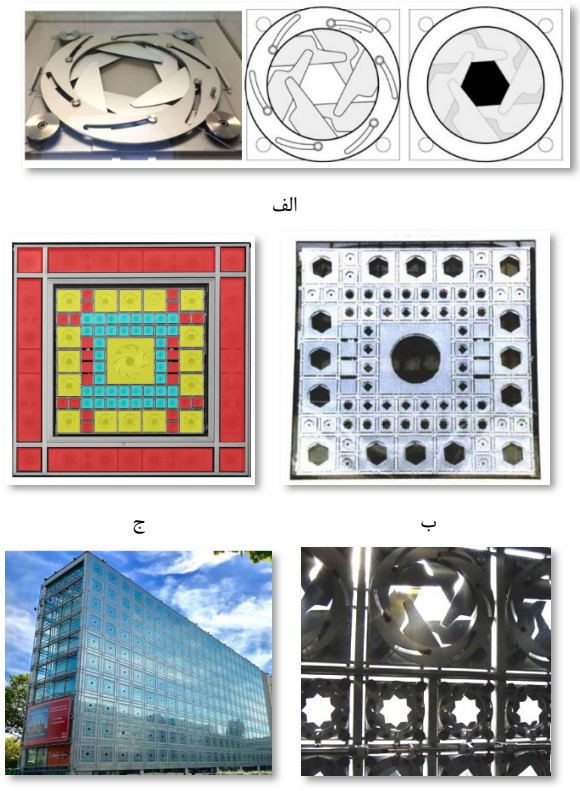
5. Wave: Sliding and Rotating
6. Square-tic: Sliding and Retracting
7. Scissor net: Contracting and Expanding
8. Balloon: Inflate and Deflate
9. Triangular: Expand and retract

جدول ۱ تقسیم‌بندی نما از لحاظ ساختار ظاهری و نحوه حرکت بر اساس الگوی شریدین [۳]

ردیف	ساختار حرکتی	مکانیزم تغییر شکل یا حرکتی	نحوه حرکت
۱	کشویی و چرخشی		چرخش یک صفحه حول محور متحرک
۲	تاشو و جمع‌شونده		جابه‌جایی صفحات حول یک محور ثابت
۳	بالنی: انقباض و انبساطی		ساختار قابل انعطاف با خاصیت پر و خالی شدن توسط هوا یا انواع گاز
۴	مثلثی گسترش‌پذیر		سطوح فعال با قابلیت گسترش در قالب الگوی مثلثی (اتصالات در رئوس مثلث)
۵	قیچی: باز و جمع‌شونده		حرکت دو بازوی متقاطع در نقطه اتصال با قابلیت باز و بسته شدن

۳-۱- موسسه جهان عرب در پاریس[1]

این پروژه یکی از اولین ساختمان‌هایی است که دارای نمای بیرونی با حسگرهای کنترلی است. نور عبوری از سطحِ کاملاً براقِ آن از طریق حائل‌های متحرک کنترل می‌شود و آنها قادر به کاهش اندازه روزنه‌ها در برابر نور مستقیم هستند. هر یک از قطعات نمای خارجی یک نقاب نیمه‌شفاف ایجاد می‌کند که از طریق آن عبور نور مهار می‌شود. نمای این ساختمان مجموعه‌ای از حائل‌های مکانیکی دوربین مانند است که می‌تواند میزان نور ورودی ساختمان را کنترل کند. ۲۴۰ کرکره به یک رایانه مرکزی متصل شده‌اند که حداکثر ۱۸ حرکت را در روز انجام می‌دهند؛ همچنین سلول‌های خورشیدی و حائل‌های سیار وجود دارند که مقدار نور خورشید را به منظور مدیریت نور طبیعی، ردیابی می‌کنند. صدها صفحه لغزشی موتوردار که درون نمای خارجی قرار داده شده (سلول فتوالکترونیک مشابه با لنز دوربین) با حسگرهای مختلف، نور روز را اندازه‌گیری می‌کنند و برای کنترل سطوح نورپردازی، باز یا بسته می‌شوند. طرح کلی این نما به همراه جزئیات مدول‌ها و چگونگی مکانیزم حرکتی بخش‌های مختلف نما در شکل ۱ نشان داده شده است [۶،۸،۹]. اجزای نما به صورت کشویی حول محورِ منحنی شکل، مانند لنز یک دوربین می‌چرخند. از نظر تقسیم‌بندی انجام شده برای مکانیزم حرکتی نماهای پویا، نمای این ساختمان مطابق الگوی حرکتی کشویی و چرخشی در تقسیم‌بندی شریدین است.



الف ب ج د هـ

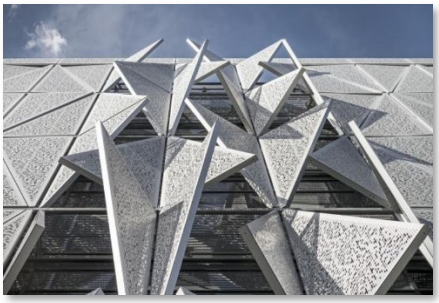
شکل ۱ الف: نحوه حرکت حائل به صورت کشویی و چرخشی [۱،۳]- ب: یکی از پنل‌های نما [۶]- ج: حائل‌های ثابتِ بدون عملکرد به رنگ قرمز؛ عملکرد جداگانه دیافراگم‌ها توسط دو عملگر به رنگ زرد و آبی [۸]- د: نمای نزدیک پنل نما و چگونگی چیدمان حائل‌ها در کنار یکدیگر [۴]- هـ: نمای کلی موسسه جهان عرب پاریس [۱]

1. Institute du Araba

۳-۲- ساختمان دانشگاه SDU دانمارک[1]

این بنا اولین ساختمان دانشگاهی در دانمارک است که استفاده بهینه از انرژی به‌طور کامل در آن رعایت می‌شود. سیستم سایه‌بان‌های خورشیدی متشکل از ۱۶۰۰ کرکره فولادی سوراخ‌دار و مجهز به حسگرهایی است که به‌طور مداوم میزان نور و گرما را اندازه‌گیری کرده و کرکره‌ها را بصورت مکانیکی با استفاده از یک موتور کوچک تنظیم می‌کنند. هنگامی که دریچه‌ها بسته می‌شوند در امتداد نمای ساختمان قرار می‌گیرند و از نمای بیرونی محافظت می‌کنند، زمانی که نیمه‌باز و یا کاملاً باز هستند ساختمان را با ظاهری بسیار پر زرق و برق نمایش می‌دهند [۹،۱۰].

برای ایجاد یک نمای خلاق و سازگار با محیط‌زیست، بیش از ۴۵۰۰ مترمربع آلومینیوم با صفحات خورشیدی که به طور خودکار براساس سطوح نور و گرما تنظیم می‌شوند، استفاده شده است. جزئیات و فرم کلی نما در شکل ۲ نشان داده شده است. کرکره‌های متحرک نما حول محور عمودی به حرکت در می‌آیند و صفحات مثلثی شکل که از وسط تاخورده، در نما باز و بسته می‌شوند. این مکانیزم حرکتی نما براساس الگوی شریدین در گروه تاشو و جمع‌شونده قرار می‌گیرد [۹،۱۰].



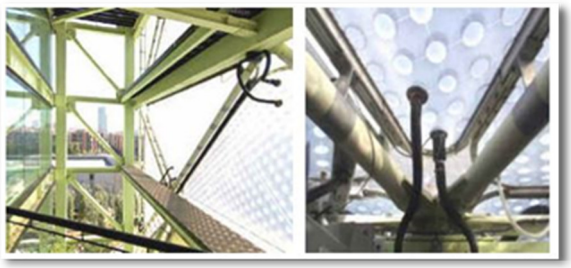
الف

ب

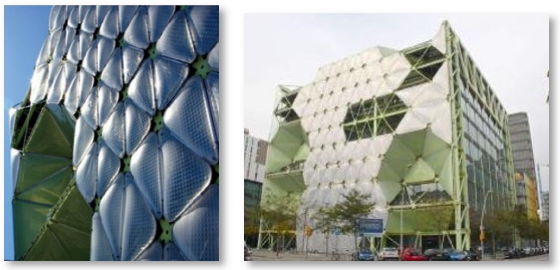
شکل ۲ الف: صفحات متحرک در حالت های باز و بسته و نیمه باز
ب: نمای کلی ساختمان دانشگاه دانمارک [۹،۱۰].

۳-۳- مرکز اطلاعات رسانه‌ای بارسلونا

نمای هوشمند این ساختمان از صفحات ETFE[2] و بالشتک‌های پرشده از هوا ساخته شده که در محفظه‌های آلومینیومی قرار گرفته و سازه‌ای سبک وزن را تشکیل می‌دهد. جهت ایجاد پوششی مقاوم و عایق، بالشتک‌ها از هوای کم-فشار پرشده که تعداد آنها از دو تا پنج لایه متغیر است. صفحات ETFE، در برابر پرتوهای فرابنفش و آلودگی‌های محیطی مقاوم هستند و عمری طولانی دارند. روکش فلزی، با استفاده از سه محفظه هوا قابل باد کردن است که نه تنها عایق‌بندی حرارتی را بهبود می‌بخشد بلکه امکان ایجاد سایه با استفاده از سیستمِ تحت فشار هوا را نیز فراهم می‌آورد. پوشش پلیمر شفاف در مقایسه با شیشه، ماده ساختمانی انعطاف‌پذیرتری است [۷،۹،۱۱]. نمای کلی این ساختمان و جزئیات آن در شکل ۳ نشان داده شده است. الگوی حرکتی عناصر نمای پویا در این ساختمان، با الگوی بالنی: منقبض و منبسط‌شونده در تقسیم‌بندی شریدین همخوانی دارد.



الف



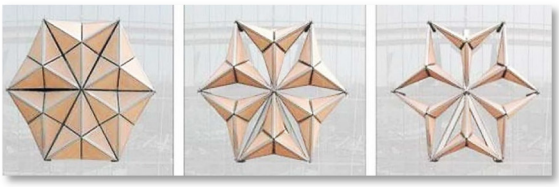
ب ج

شکل ۳ الف: نمای داخل صفحات پرشده از هوا در چارچوب آلومینیومی [۷]
ب: نمای کلی ساختمان مرکز اطلاعات رسانه‌ای بارسلونا [۹]
ج: نمای نزدیک صفحات پرشده از هوا [۱۱]

۳-۴- برج‌های دوقلوی البحر ابوظبی

این ساختمان‌های ۲۹ طبقه یک شبکه سایه‌بان تاشو تطبیقی را به‌وجود آورده که از تزئینات مشبک و یکی از اصول معماری عربی به نام "مشربیه"[3] الهام گرفته است. شبکه شامل یک حفاظ و سایه‌بان با چترهای سه طرفه شفاف فیبرشیشه با پوشش PTFE[4] است که میزان نور ورودی به داخل بنا را مدیریت کرده و از آزرده شدن چشم و گرم شدن بیش از حد محیط جلوگیری می‌کند. کنترل زمان و میزان باز و بسته شدن این سیستم شبکه-ای، توسط برنامه‌ریزی رایانه‌ای انجام می‌شود. ساختار لانه زنبوری این شبکه با بیش از ۱۰۰۰ قطعه، به آن اجازه می‌دهد که نور روز در ساعت‌های مناسب دریافت شده و استفاده از نور مصنوعی و دستگاه‌های تهویه مطبوع را به اندازه قابل‌توجهی کاهش دهد. در نتیجه در این پروژه میزان مصرف انرژی ۵۰ درصد کاهش یافته و استفاده از انرژی خورشیدی نیز تا ۸۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. به منظور انطباق با تغییر شرایط محیطی در پوسته این ساختمان که در شکل ۴ نشان داده شده، از مدول‌های پویا استفاده شده که از طریق گسترش‌پذیری پوسته و ایجاد الگوهای تصادفی با ترکیبات مختلف، حالت تاشویی ایجاد می‌کند [۱۱،۱۲]. پوشش‌های مثلثی شکلِ نما، در رئوس به یکدیگر متصل شده‌اند و قابلیت گستردگی و جمع‌شدگی دارند؛ مکانیزم حرکتی این نمای پویا مطابق با الگوی مثلثی گسترش‌پذیر در تقسیم‌بندی شریدین است.

1. SDU University of Southern Denmark campus Kolding
2. Ethylene Tetra flora ethylene
3. Mashrabiya
4. Poly tetra flora ethylene



الف

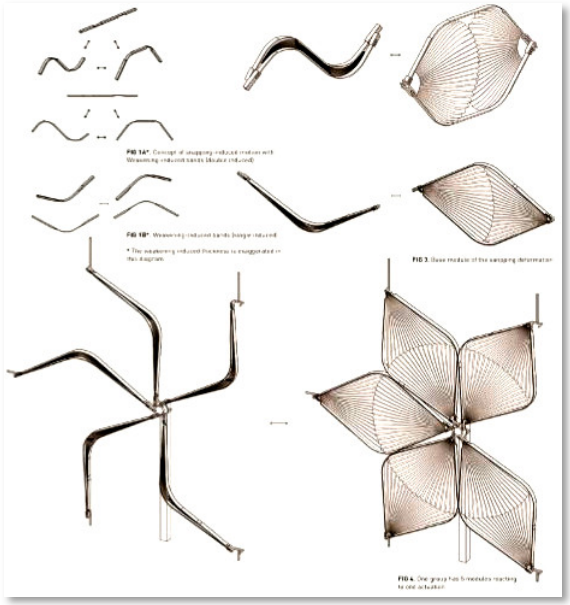
ب

ج

شکل ۴ الف: نحوه باز و بسته شدن پوشش PTFE با الگوی مثلثی گشترش‌پذیر- ب: سایه‌بان نصب شده بر روی نما- ج: نمای کلی ساختمان‌های برج البحر ابوظبی [۱۱،۱۲]

۳-۵- طرح " نمای چفت‌شده "[1]

طرح سیستم نمای پویا در پروژه " نمای چفت‌شده " توسط "گروه معماری دیونیو پی ال سی"[2]، طراحی شده است. با استفاده از خاصیت کشسانی باندهای تاب خورده، این نمای پویا قادر به ایجاد تغییر شکل مناسب با حداقل نیروی محرکه است؛ این خاصیت در چادرهای مسافرتی که به یکباره باز و بسته می‌شوند نیز به‌کار می‌رود. صفحات تاشده سایه‌بان که بین این باندها قرار می‌گیرند بدون نیاز به نیروی زیاد در پی حرکت باندها باز و بسته می‌شوند. باندهای تاب خورده دارای پتانسیل چرخشی هستند که به کمک نیروی محرک کم، باز و بسته می‌شوند. غشایی که توسط الگوی اوریگامی(صفحات تاخورده) طراحی شده در بین همین باندها جاگرفته و آنها نیز در پی حرکت باندها باز و بسته می‌شوند. این طرح به تعمیر و نگهداری پیچیده نیاز ندارد و در مقایسه با سایر سیستم‌های نمای پویا، ساده‌تر است و نیاز به انرژی کمتری دارد. با استفاده از موادی مانند فلزات منعطف، پلاستیک و چوب‌های مخصوص روکش[3]، باندهای نگهدارنده ساخته می‌شود و از طریق یک پوسته با الگوی اوریگامی، یک پوشش پلیمری در نمای ساختمان ایجاد می‌شود. این طرح که در شکل ۵ نشان داده شده با هدف ایجاد نمای سازگار با انرژی کم (LEAF[4]) بدون اینکه مانعی برای دید و جلوه بصری ایجاد کند تابش مستقیم نور را مهار و آن را پراکنده می‌کند [۱۳-۱۵]. صفحات تاشده در پوسته این سیستم نمای پویا، مانند بازوهای قیچی خاصیت باز و بسته-شدن دارند. این ویژگی در بسیاری از روش‌های اوریگامی دیده می‌شود و با الگوی حرکتی قیچی: باز و بسته شونده با تقسیم‌بندی شریدین مطابقت دارد.



الف

ب

شکل ۵ الف: اجزای تشکیل‌دهنده باند و صفحات تاشده و نحوه باز و بسته شدن آنها ب: نمای طرح پروژه " نمای چفت شده " اجرا شده بر روی ساختمان و چگونگی توزیع نور در فضای داخلی و عدم تأثیر بر دید و جلوه بصری [۱۳-۱۵]

از بررسی پنج نمونه فوق، مشاهده می‌شود که نمای متحرک با مکانیزم-های حرکتی مشخص در ساختمان‌هایی با کاربری‌های گوناگون، به منظور رفع نیازهای متغیر اقلیمی و محیطی و نیاز مختلف کاربران، توسط محرکه‌ها و سیستم‌های گوناگون، با مصالح متنوع می‌تواند ساخته شود؛ این موضوع گستردگی مبحث نمای پویا در صنعت ساختمان را نشان می‌دهد.

۴- تحلیل نمونه ساختمان‌های با نمای پویا

در جدول ۲ ویژگی‌های مهم پروژه‌های شاخص ساختمان‌ها با نمای پویا که در حدود چهار دهه اخیر در کشورهای مختلف احداث شده‌اند معرفی و سپس براساس این ویژگی‌ها، تحلیل مکانیزم حرکتی و سایر خصوصیات مهم ساختمان‌های دارای نمای پویا ارائه شده است.

1. Snapping Facades
2. Dioinno Architecture PLLC
3. Veneers
4. Low Energy Adaptive Facade

جدول ۲ مشخصات نمونه‌های شاخص ساختمان‌های با نمای پویا

ردیف	عنوان ساختمان، سال ساخت	نوع کاربری ساختمان						هدف از طرح پویایی در نما (کارایی نما)										مصالح به‌کار رفته در نمای پویا										مکانیزم حرکتی براساس الگوی شریدین										منبع
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	D1	D2	D3	D4	D5	D6										
۱	موسسه جهان عرب پاریس، ۱۹۸۷					*		*			*			*	*			*					*															۸-۹
۲	خانه دیوار پرده‌ای[1] توکیو ژاپن، ۱۹۹۵				*			*		*		*					*				*						*										۱۶
۳	ال همیسفریک[2] والنسیا اسپانیا، ۱۹۹۸					*		*				*		*									*															۱۷
۴	اقامتگاه خانه برج جوزا[3] اتریش، ۲۰۰۱				*	*		*			*		*		*			*	*				*															۱۸
۵	موزه هنر میلواکی ویسکانسین امریکا، ۲۰۰۱					*		*			*	*		*				*										*										۶
۶	ساختمان گل آفتابگردان[4] آلمان، ۲۰۰۲				*			*		*	*		*					*	*				*															۱۹
۷	تئاتر گردشگاه[5] سنگاپور، ۲۰۰۲					*		*						*				*										*										۲۰
۸	موزه هنر کاغذ شیزوکا ژاپن، ۲۰۰۲					*				*		*		*	*									*														۲۱
۹	تئاتر نور ستارگان ساستروم بنگت[6] آمریکا، ۲۰۰۳					*		*	*	*	*		*	*			*									*												۶
۱۰	مرکز سالمندان[7] آلمان، ۲۰۰۳	*		*				*			*	*								*					*													۲۲
۱۱	شانل گینزا توکیو ژاپن، ۲۰۰۴	*	*					*				*			*			*		*								*										۲۳
۱۲	دانشکده بازرگانی کپنهاگ دانمارک، ۲۰۰۵			*		*		*		*		*			*			*																			۲۴
۱۳	ای دبلیو ای آرنا[8] اولدنبرگ آلمان، ۲۰۰۶							*					*		*			*					*															۲۵
۱۴	پیکسل اسکین۰۲[9] انگلستان، ۲۰۰۶					*		*				*						*				*				*												۲۳
۱۵	بیمارستان چشم مورفیلد لندن انگلستان، ۲۰۰۷							*				*		*	*					*								*										۲۶
۱۶	شش آپارتمان مسکونی باریکه آلپ مارتیمس[10] فرانسه، ۲۰۰۷					*		*				*		*			*							*														۲۷
۱۷	نمایشگاه کیفر تکنیک اشتایر مارک اتریش، ۲۰۰۷	*				*		*				*	*	*				*				*		*														۲۳
۱۸	هتل هومو لومنس[11] بوداپست مجارستان، ۲۰۰۷					*		*				*						*		*		*						*										۲۱
۱۹	غرفه اسمارت وارپ تی ام[12] نیویورک، ۲۰۰۸					*		*					*					*			*							*										۲۸
۲۰	پی آی ایکس سبز[13] بیجینگ چین، ۲۰۰۸					*	*	*				*	*					*		*								*										۲۹
۲۱	آزمایشگاه آی هوم[14] سوئیس، ۲۰۰۸	*		*								*		*													*											۲۳
۲۲	نمای فلر[15] برلین آلمان، ۲۰۰۸	*				*		*	*	*				*				*		*			*															۳۰
۲۳	ال وی وای خورشیدی[16] نیویورک، ۲۰۰۹					*		*			*		*		*			*		*								*										۲۳
۲۴	خانه کشویی سافولک انگلستان، ۲۰۰۹				*			*	*	*	*	*		*			*	*					*															۳۱
۲۵	مرکز اطلاعات رسانه‌ای بارسلونا ، ۲۰۱۰	*				*		*		*	*			*				*		*					*													۷-۹
۲۶	تای سین کراپ[17] ایسان آلمان، ۲۰۱۰	*						*				*		*	*			*					*															۳۲
۲۷	مرکز سلامت شمال مدیترانه آلمریا اسپانیا، ۲۰۱۰	*		*				*	*		*		*										*															۳۳
۲۸	بازار مرکزی الدار ابوظبی، ۲۰۱۰	*	*	*	*		*	*	*	*	*			*			*	*								*												۷
۲۹	ساختمان ام آ سی ۵۶۷ میلان ایتالیا،	*		*				*	*		*	*			*			*					*															۳۴

1. Curtain Wall
2. L Hemispheric
3. Gemini Hausa
4. Heliotrope
5. The esplanade
6. Bengt Sjostrom Starlight
7. Gerontology
8. EWE Arena
9. Pixelskin02
10. Strip Alpes-Maritimes
11. Homo Lumens MMVII
12. Smart Wrap TM
13. Green PIX
14. I Home Lab
15. Flare facade
16. Solar LVY
17. ThyssenKrupp

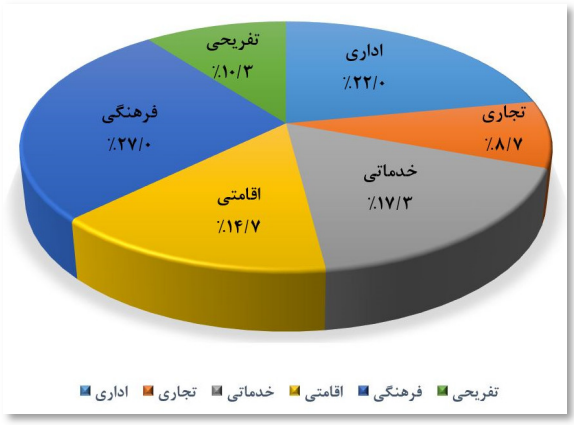
	۲۰۱۰																											
۳۰	گالریا مرکز شهر اینچئون کره جنوبی، ۲۰۱۰	*	*			*	*	*				*	*		*			*		*								*	۳۵
۳۱	ترمینال داخلی بریزبین[1] استرالیا، ۲۰۱۱			*				*	*	*		*		*										*					۷
۳۲	ساختمان‌های ام ۹ سی پاریس فرانسه، ۲۰۱۲	*		*	*	*		*	*		*	*		*								*		*					۳۶
۳۳	پاویون کره جنوبی اکسپو ۲۰۱۲					*			*	*	*										*						*		۴
۳۴	برج‌های دوقلوی البحر ابوظبی، ۲۰۱۲	*	*		*			*			*	*	*	*	*			*			*					*			۱۱،۱۲
۳۵	سافت هاوس[2] هامبورگ المان، ۲۰۱۳				*			*		*	*		*		*		*	*	*		*		*						۱۲
۳۶	انستیتوی فناوری رویال ملبورن هاب آر ام آی تی[3] استرالیا، ۲۰۱۲	*				*		*		*	*		*	*	*			*						*					۳۷
۳۷	موسسه تحقیقات فناوری صنعتی تایوان آی تی آر آی[4]، ۲۰۱۴	*		*				*				*	*	*	*			*		*								*	۳۸
۳۸	ورزشگاه هزاز ابن زاید ابوظبی، ۲۰۱۴						*			*	*		*					*		*	*			*					۳۹
۳۹	ساختمان دانشگاه اس دی یو[5] دانمارک، ۲۰۱۴	*				*		*		*		*		*				*						*					۹،۱۰
۴۰	پارکینگ فرودگاه لوگان بوستون امریکا، ۲۰۱۵			*					*	*	*			*										*					۴۰
۴۱	پارکینگ مرکز خرید اچ اند ام[6] در ادینبرگ، ۲۰۱۵			*					*	*	*			*										*					۴۱
۴۲	کافه دیوار لاوور[7] کره جنوبی، ۲۰۱۶		*		*			*				*		*			*						*						۴۲
۴۳	طرح نمای "نمای چفت‌شده"، ۲۰۱۷	*	*					*			*	*		*	*						*						*		۱۳-۱۵
۴۴	پارکینگ مرکزی نمایشگاه آلمان پی ۲۲ آ، ۲۰۱۷			*				*	*	*				*														*	۴۳
۴۵	برج سی اف مالر مارسک[8] دانشگاه کپنهاگ، ۲۰۱۷	*		*		*		*		*		*				*		*					*						۴۴
۴۶	خانه بالت مکانیکیو[9] زوریخ آلمان، ۲۰۱۷				*			*	*	*		*		*								*		*					۴۵
۴۷	استادیوم مرسدس بنز امریکا، ۲۰۱۷						*	*		*	*		*	*				*			*		*						۴۶
۴۸	مرکز بیماری‌های عصبی دی زد ان ای[10] آلمان، ۲۰۱۷			*				*			*	*	*		*			*						*					۴۷
۴۹	مرکز فرهنگی شانگهای چین، ۲۰۱۷					*				*		*	*			*							*						۴۸
۵۰	مرکز فرهنگی شد[11] منهتن نیویورک، ۲۰۱۹					*		*	*			*		*							*		*						۴۹

1. Brisbane
2. SOFT HOUSE
3. RMIT Hub
4. ITRI
5. SDU
6. H & M
7. Louver Wall
8. CF Moller Maersk
9. Ballet Mechanique
10. DZNE
11. The shed

جدول ۳ راهنمای علائم و توضیحات جدول ۲

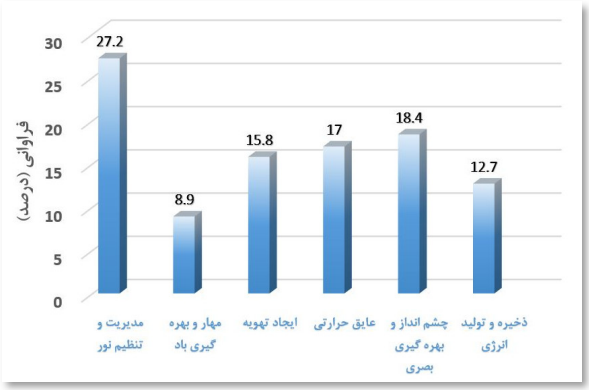
عنوان	علامت	توضیحات	عنوان	علامت	توضیحات	عنوان	علامت	توضیحات	عنوان	علامت	توضیحات
کاربری ساختمان	A1	اداری	هدف از طرح پوایی در نما (کارایی نمای پویا)	B1	مدیریت و تنظیم نور	مصالح تشکیل دهنده نمای پویا	C1	فولاد، استیل، آلومنیوم، ورق گالوانیزه آلیاژهای مشابه	تقسیم بندی براساس الگوی شریدین	D1	کشویی و چرخشی
	A2	تجاری		B2	مهار و بهره‌گیری از باد		C2	شیشه، فیبر شیشه		D2	تاشو و جمع شونده
	A3	خدماتی		B3	ایجاد تهویه		C3	مس و برنز و آلیاژهای مشابه		D3	بالنی: منقبض و منبسط شونده
	A4	اقامتی		B4	عایق حرارتی		C4	چوب، تیر و پانل‌های چوب و فراورده-های سلولوزی		D4	مثلثی گسترش‌پذیر
	A5	فرهنگی		B5	چشم‌انداز و بهره بصری		C5	پانل خورشیدی، صفحات فتوولتاییک، PEGE		D5	قیچی: باز و بسته شونده
	A6	تفریحی		B6	ذخیره و تولید انرژی		C6	مصالح هوشمند، فیلم نوری، نوارهای PV		D6	سایر (مکانیزم‌های دیگر)
							C7	چراغ، LED، الکترواپتیک			
							C8	غشا و ورق پلیمری، صفحات ETFE، پانل پارچه‌ای یا سیلیکونی، کاغذی			
							C9	صفحات سرامیکی و سنگ، کاشی پیکسلی و مصالح مشابه			

بررسی و مقایسه انواع کاربری ساختمان‌های با نمای پویا در نمودار شکل ۶ ارائه شده است؛ مشاهده می‌شود که ۲۷ درصد نماهای پویای اجرا شده در ساختمان‌های با کاربری فرهنگی مورد استفاده قرار گرفته که بیشترین مقدار استفاده از این نما را به خود اختصاص داده‌اند؛ پس از آن در ساختمان‌های اداری ۲۲ درصد، خدماتی ۱۷/۳ درصد بوده و ساختمان‌های با کاربری تفریحی و تجاری کمترین میزان استفاده از نمای پویا را دارند. به نظر می‌رسد که تأثیرگذاری بیشتر بناهای فرهنگی بر سیمای شهری نسبت به کاربری‌های دیگر و توجه به مبحث انرژی در این ساختمان‌ها به منظور زمینه‌سازی فرهنگی برای جلب توجه مردم به اهمیت موضوع انرژی‌های تجدیدپذیر و نو در صنعت ساختمان از دلایل کاربرد بیشتر نمای پویا در بناهای فرهنگی است.



شکل ۶ نمودار مقایسه کاربری ساختمان‌های با نمای پویا

به طور کلی نماهای پویا برای کنترل و یا بهبود وضعیت موجود ساخته می‌شوند و کارایی گسترده در مدیریت نور، باد، صدا و تهویه دارند و به تنهایی یا در ترکیب با یکدیگر می‌توانند قابلیت چند عملکردی داشته باشند. در نمودار شکل ۷ توزیع فراوانی دلایل مختلف کاربرد نماهای پویا براساس ایده طراحان مورد بررسی قرار گرفته است.

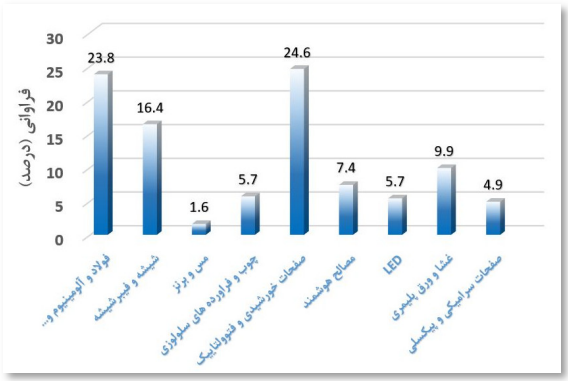


شکل ۷ نمودار مقایسه اهداف کاربرد نمای پویا در ساختمان

مشاهده می‌شود که براساس ایده طراحان این پروژه‌ها در ۲۷/۲ درصد از موارد، دلیل اصلی استفاده از نمای پویا برای مدیریت و تنظیم نور خورشید ذکر شده است؛ پس از آن ایجاد چشم‌انداز و بهره‌گیری بصری از نما ۱۸/۴ درصد و کمترین سهم در مهار و بهره‌گیری از باد ۸/۹ درصد است. نمای ساختمان‌های مرتفع و همچنین سقف بناهایی عظیم چون استادیوم‌های ورزشی، امکان تبادل هرچه بیشتر بدنه ساختمان با انرژی پاک خورشیدی را فراهم می‌سازد. این سطوح گسترده به جای اینکه فقط نقش حائل را داشته باشند، می‌توانند توسط صفحات خورشیدی و سلول‌های فتوولتاییک بیشترین بهره را از انرژی خورشیدی ببرند. گاهی مزاحمت ایجاد شده نور زیاد خورشید می‌تواند توسط پوسته‌ها و سایه‌بان‌هایی پوشیده شود که در بسیاری از موارد این پوسته‌ها انرژی مورد نیاز خود را از همین نور مزاحم دریافت و آن را به انرژی حرکتی تبدیل می‌کنند.

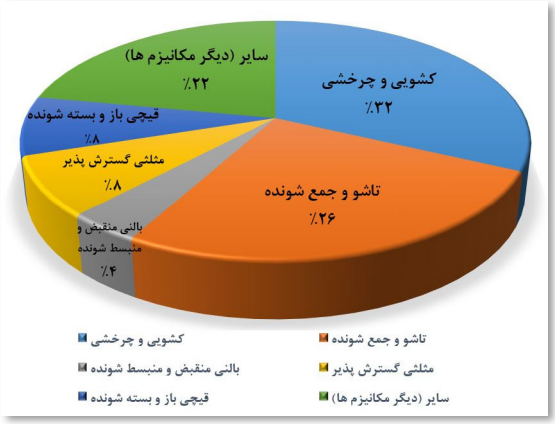
انتخاب نوع صحیح مصالح در ترکیب با مکانیزم‌های حرکتی نمای پویا که بتواند امکان حرکت در نما را فراهم کند، از اهمیت بالایی برخوردار است. در شکل ۸ انواع مصالح به‌کار رفته در نماهای پویا مورد بررسی قرار گرفته

است. نتایج بررسی ۵۰ نمونه موردی ساختمان‌های احداث شده با نمای پویا نشان می‌دهد که بیشترین استفاده مربوط به صفحات خورشیدی، صفحات فتوولتاییک و حائل‌های حساس به نور با ۲۴/۶ درصد می‌باشد که این موضوع اهمیت استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر با استفاده از پتانسیل نمای ساختمان را نشان می‌دهد. بهره‌برداری مناسب از انرژی پاک خورشیدی به‌منظور تولید، ذخیره و تبدیل آن به انرژی محرکه در اکثر نمونه‌های ساخته - شده به چشم می‌خورد. استفاده از کرکره‌های آلومینیومی، صفحات فولادی و ساختارهای فلزی با ۲۳/۸ درصد در رده بعدی جای دارد.



شکل ۸ نمودار مقایسه جنس مصالح به‌کار رفته در نمای پویا

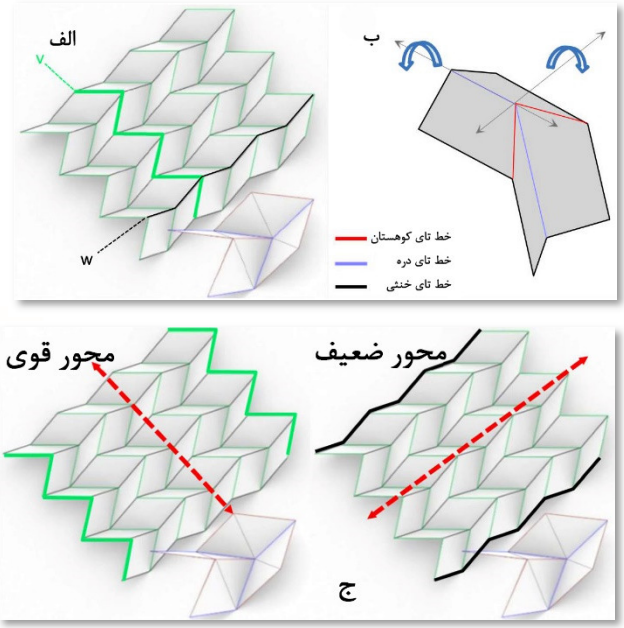
با بررسی نمونه‌های مطالعه شده براساس مکانیزم حرکتی نما طبق الگوی شریدین، انواع مکانیزم‌های حرکتی نما به پنج گروه طبقه‌بندی گردید که نتایج آن در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود سیستم کشویی و چرخشی با ۳۲ درصد بیشترین کاربرد را در الگوهای حرکتی نما دارد، بعد از آن سیستم تاشو و جمع‌شونده با ۲۶ درصد در مرتبه دوم قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه برخی از انواع نماهای پویا در این طبقه‌بندی قرار نمی‌گیرند، از آنها به عنوان "سایر" نام برده شده است. نما رسانه‌ها که بیشتر تحرک را به شکل بصری توسط نورپردازی در ظاهر نمایش می‌دهند و مصالح هوشمند یا حافظه‌دار که پویایی در درون مصالح اتفاق می‌افتد و در نهایت تأثیر کلی آن در نمای ساختمان و فضاهای داخلی دیده می‌شود، در این گروه قرار می‌گیرد.



شکل ۹ نمودار فراوانی مکانیزم حرکتی در نمای پویا بر اساس الگوی شریدین

۵- طرح یک مدل نمای پویا

در این بخش یک مدل نمای پویا با الگوی اوریگامی معرفی شده که می‌توان از آن در طرح نمای ساختمان استفاده کرده و پوسته‌ای فعال جهت جلوگیری از اتلاف انرژی و تأمین آسایش حرارتی و بصری برای ساختمان ایجاد نمود. از اهداف اصلی اوریگامی دستیابی به فرم‌ها و اشکالی با سطوح مقاوم در برابر عوامل طبیعی و همچنین ساخت سازه‌هایی با قابلیت تغییر شکل و جابه‌جایی است. این الگو با الهام از طرح میورا و همکارش ساکاماکی ساخته شده و به مدل میورا-اوری معروف است [۵۰]؛ ساختار این الگو که در شکل ۱۰ نشان داده شده از دو صفحه متوازی‌الاضلاع متقارن تشکیل شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در این طرح یک حرکت ساده درون ساختار، باعث ایجاد حرکت در سایر اعضای آن می‌شود و با ایجاد یک نیروی فشاری کم در یک گوشه، صفحه در راستای قطر آن خم شده و مجموعه صفحات را به سادگی می‌توان باز و بسته نمود. این ساختار، الگویی از تاخوردگی‌ها است که یک مجموعه موزائیکی متوازی‌الاضلاع را تشکیل می‌دهد و کل سازه با یک حرکت باز و بسته می‌شود.

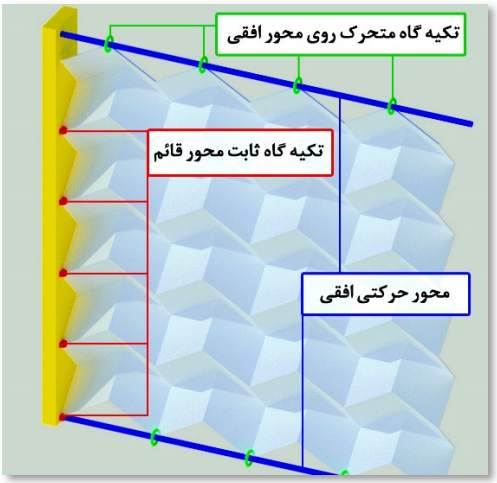


شکل ۱۰ الف: الگوی سطحی با زیگزاگ و نوار polylines برجسته
ب: خط تاهای موجود در مدل اوریگامی
ج: محور خمش قوی و ضعیف ساختار [۵۱]

این الگو را می‌توان با استفاده از سه نوع مصالح اجرا کرد: ۱- مصالح نرم و منعطف که بر روی اسکلت تاشو یا چارچوب مستحکم کشویی قرار گرفته و به راحتی باز و بسته شوند؛ ۲- مصالح با قابلیت تاشدن و در عین حال مستحکم که می‌توانند علاوه‌بر تاشدن، فرم هندسی را حفظ کنند؛ ۳- مصالح صلب که می‌توانند مانند صفحات جداگانه، با لولا یا کام و زبانه به‌هم متصل شوند. صفحات متحرک طبق این الگو در جهت عمودی، افقی و همزمان در هر دو جهت می‌توانند حرکت کنند و به این علت، جمع‌شدگی صفحات می‌تواند در محل لبه قائم، افقی یا محل تلاقی دو قسمت قاب نگهدارنده ایجاد شود.

در این پژوهش طراحی نمونه براساس الگوی اوریگامی و صفحات متحرک ایجاد شده است. شکل ۱۱ یک پانل شبیه‌سازی شده متشکل از صفحه اوریگامی و قاب نگهدارنده را نشان می‌دهد که با حرکت صفحه در

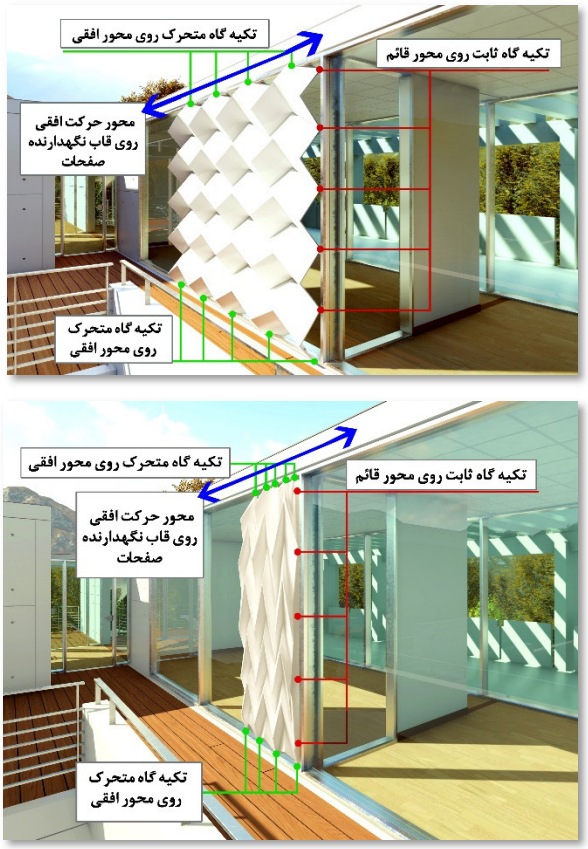
داخل یک قاب ثابت، کل پوشش نما می‌تواند باز و بسته شود. در این الگو با جلوگیری از ورود نور شدید به داخل بنا و ایجاد سایه، آسایش کاربران ساختمان تأمین می‌شود. بررسی تجربیات معماری بومی در خانه‌های کهن شهرهای مرکزی ایران مانند کاشان، یزد و اصفهان نیز نشان می‌دهد که استفاده از ساختار پنجره‌های مشبک به نام اُرُسی با هدف ایجاد سایه، و مدیریت نور مستقیم مرسوم بوده است. بنابراین به‌منظور سایه‌اندازی داخل بنا با فناوری جدید، این ساختار می‌تواند عملکرد مشابهی ایجاد کند؛ ساختار پیشنهادی نسبت به موارد سنتی از ویژگی‌هایی همچون امکان کنترل خودکار و یکپارچه مجموعه نما، وزن کم و سرعت تغییر شکل بیشتر برخوردار است.



شکل ۱۱ مدلسازی یک پانل نمای ساختمان بر اساس الگوی اوریگامی

براساس مدل نشان داده شده در شکل ۱۱، نقاط قرمز رنگ محل اتصال صفحه به قاب نگهدارنده است که ثابت هستند؛ نقاط سبز رنگ که به شکل حلقه نشان داده شده‌اند نقاط متحرک و نگهدارنده صفحات هستند و برای تاشدن و باز شدن صفحات روی محور افقی حرکت می‌کنند. در این مدل محور حرکتی افقی به شکل میله‌های آبی رنگ در بالا و پایین صفحه مشاهده می‌شود. با توجه به ساختار پانل‌ها، امکان جابجایی نقاط متحرک محور افقی و قائم به راحتی امکان‌پذیر است.

این صفحات بر روی نمای خارجی به صورت خود ایستا و یا با استفاده از قاب و مش‌بندی به صورت پوسته قابل نصب است. شکل ۱۲ شبیه‌سازی مدل طراحی شده برای بخشی از نمای ساختمان را نشان می‌دهد. مجموعه صفحات متحرک در قاب‌های جداگانه بر روی نما قرار گرفته و حرکت پوسته اوریگامی در محور افقی را امکان‌پذیر می‌سازد؛ صفحات صلب متحرک با المان‌های لولایی به یکدیگر متصل می شوند.



شکل ۱۲ شبیه‌سازی استفاده از مدل اوریگامی روی نمای ساختمان در دو حالت بسته و باز

حرکت و پویایی نما به صورت عمودی، افقی و گوشه‌ای توسط محرک‌های مختلف الکتریکی و یا حساس به نور می‌تواند صورت گیرد؛ مکانیزم حرکتی نما در این طرح مطابق با الگوی حرکتی قیچی: باز و بسته شونده شریدین است. ماکت شبیه‌سازی شده نمای ساختمان در شکل ۱۳ نشان داده شده است. ساخت این صفحات می‌تواند از طریق مصالح منعطف با قابلیت تا‌شدن و یا مصالح صلب با قابلیت حرکت توسط لولا و تکیه‌گاه انجام شود. همانطور که در مدل ساخته شده نیز مشاهده می‌شود این الگوی نمای متحرک امکان حرکت در دو راستای افقی و عمودی را دارا بوده و کنترل میزان نور ورودی به بنا را امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین در صورت جایگزینی پانل‌های شفاف به جای بخشی از این صفحات، امکان عبور مقادیر متفاوت نور از بخش‌های مختلف ایجاد می‌شود.

شکل ۱۳ ماکت برای مدل‌سازی نمای متحرک با استفاده از الگوی اوریگامی

۶- جمع‌بندی

پاسخگویی به تغییرات اقلیمی و نیازهای گوناگون کاربران، بهره‌برداری مناسب از انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش آلودگی محیط‌زیست مهمترین مزیت نماهای پویا نسبت به نماهای سنتی است. با وجود هزینه‌های زیاد طراحی، اجرا و نگهداری نماهای پویا، مزایای مهم آن توجیه مناسبی برای کاربردشان در ساختمان است. مطالعه مشخصات ۵۰ نمونه شاخص جهانی از نماهای پویای اجرا شده در طول چهار دهه گذشته نشان می‌دهد که ساختمان‌های با کاربری فرهنگی و اداری بیشترین استفاده از این نوع نما را به خود اختصاص داده‌اند.

همچنین براساس ایده طراحان، مدیریت و تنظیم نور ساختمان، اصلی‌ترین دلیل استفاده از نمای پویا ذکر شده است. استفاده از صفحات خورشیدی و فتوولتاییک به منظور حرکت دادن بخشی از نما، ذخیره‌سازی و تبدیل به انرژی مورد نیاز ساختمان، بیشترین کاربرد را در بین مصالح و محرکه‌های نمای پویا دارد؛ در طراحی مکانیزم حرکتی نمای پویا سیستم چرخشی، کشویی و تاشونده بیشترین کاربرد را دارد که به نظر می‌رسد مهمترین دلیل آن سادگی طراحی و عملکرد آن است.

با بررسی تحقیقات صورت گرفته در رابطه با الگوی اوریگامی، طرح نمایی پویا در این پژوهش ارائه شده که با استفاده از صفحات تاشده، سطح پوششی قابل انعطاف ایجاد می‌شود و نیروی محرکه آن می‌تواند توسط موتورهای الکتریکی تحت فرمان حسگرهای حساس به نور خورشید در نظر گرفته شود. این پوشش به عنوان بخش الحاقی نما به ویژه برای مناطق با آفتاب شدید می‌تواند آسایش حرارتی، برودتی و زیبایی بصری ایجاد کند.

۷- مراجع

[1] M. Asefi, S. Shoaee, proposing a novel kinetic skin for building facades using scissor -like- element structures, *Archnet- IJAR: International Journal of Architectural Research*, Vol. 12, Issue 3, pp. 273-287, Regular Section, 2018.

[2] M.M.S. Ahmed, A.K. Abdel-Rahman, M. Bady, E. K. Mahrous, The Thermal Performance of Residential Building Integrated with Adaptive Kinetic Shading System, *International Energy Journal,* Vol. 16, pp. 97-106, 2016.

[3] K. Sharaidin, *Kinetic Facades: Towards design for Environmental Performance,* PhD Thesis, RMIT University, Australia, 2014.

[4] M. López, R. Rubio, S. Martín, B. Croxford, How plants inspire facades, From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.67 pp. 692-703, 2017.

[5] C. B. Bacha, F. Bourbia, Effect of kinetic facades on energy efficiency in office buildings -hot dry climates, *11th Conference on Advanced Building Skins,* pp. 458-468, 2016, Bern, Switzerland,.

[6] D. E. El-Zanfaly, *Active Shapes: Introducing guidelines for designing kinetic architectural structures*, MSc Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Massachusett, June 2011.

[7] Y.O. Elkhayat, Interactive Movement In Kinetic Architecture, *Journal of Engineering Sciences Assiut University Faculty of Engineering,* Vol. 42, No. 3, pp. 816-845, 2014.

[8] M. Meagher, Designing for change: The poetic potential, Science Direct, *Frontiers of Architectural Research,* Vol. 4, pp.159-165, 2015.

[9] M.M. Fouad, V.A.R. Ibrahim, A.H. Radwan, The Impact of Responsive Systems on Energy Consumption and Thermal Performance of Buildings, *Journal of Al Azhar University Engineering Sector,* Vol. 14, No. 52, pp.1037-1049, 2019.

[10] A. Ćurčić, G. Topličić Ćurčić, N. Matić, D. Ranđelović, Kinetic Facades as Elements of Contemporary and Sustainable Architecture, *3rd International Conference on Urban Planning - ICUP2020,* pp. 145-152, Serbia, Niš, November 13, 2020.

[11] H.S.M. Shahin, Adaptive building envelopes of multistory buildings as an example of high performance building skins, *Alexandria Engineering Journal,* Vol. 58, pp. 345-352, 2019.

[12] M. Barozzi, J. Lienhard, A. Zanelli, C. Monticelli, The sustainability of adaptive envelopes: developments of kinetic architecture*, International Symposium on Novel Structural Skins: Improving sustainability and efficiency through new structural textile materials and designs*, Procedia Engineering, Vol. 155, pp. 275-284, 2016.

[13] J. Kim, *Folding Fan Facade: Designing an Actuated Adaptive facade System for Fine-Grain Daylight Control,* MSc Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Massachusett, 2018.

[14] *Snapping Facade/ Building shade,* Accessed 24 August 2021; https://ifworlddesignguide.com/entry/230325-snapping-facade.

[15] *Snapping Facade explores a sustainable building envelope design strategy that utilizes elastic instability to create dynamic motion at the building envelope,* Accessed 24 August 2021; https://dioinno.com/Snapping-Facade.

[16] *Curtain Wall house,* Accessed 24 August 2021; https://inhabitat.com/shigeru-ban-curtain-wall-house/.

[17] *L'Hemisfèric,* Accessed 24 August 2021; https://structurae.net/en/structures/l-hemisferic.

[18] *Gemini House,* Accessed 24 August 2021; http://architectuul.com/architecture/gemini-house.

[19] *Heliotrope creator sets sights on international expansion, By Paul Ridden,* Accessed 24 August 2021; https://newatlas.com/heliotrope-disch-plusenergy-international-exapnsion-announced/16165/.

[20] *The Esplanade – Theatres on the Bay, with DP Architects and Michael Wilford and Partners,* Accessed 24 August 2021; https://www.atelierten.com/projects/the-esplanade-theatres-on-the-bay/.

[21] *Shigeru Ban Architects, Paper Art Museum,* Accessed 24 August 2021; https://www.world-architects.com/en/shigeru-ban-architects-tokyo/project/paper-art-museum.
[22] *ETFE architectural membrane, Centere For Gerontology,* Accessed 24 August 2021; https://www.archiexpo.com/prod/hightex/product-58335-1442069.html.
[23] P. Balascakova, J. Comes, M. Veloso, P. Heřmánková, A. Luca, l. Ruiz-Morote Tramblin, M. Sirotnjak, B. Torreira Álvare, Energy Design Vol. IV/I "Adaptive Facade Systems", *Seminar Energy Design, course number 159.801,* Institute of Buildings and Energy, Graz University of Technology (IGE), Rechbauerstrasse 12, 8010 Graz, Austria, 2016.
[24] *A Students' (S)Take: on Education Today and Society Tomorrow, By: Vinzent Rest,* Accessed 24 August 2021; http://projourno.org/2013/07/the-students-stake-on-education-today-and-society-tomorrow/.
[25] *PV database, Urban Scale Photovoltaic Systems,* Accessed 24 August 2021; http://www.pvdatabase.org/projects_view_detailsmore.php?ID=256.
[26] *Children's Eye Centre, Moorfields Eye Hospital,* Accessed 24 August 2021; https://www.penoyreprasad.com/project/the-richard-desmond-childrens-eye-centre-moorfields-eye-hospital/.
[27] *Strip Of Six Appartments In Eze/ CAB Architects,* Accessed 24 August 2021; https://www.archdaily.com/313303/strip-of-six-apartments-in-eze-cab-architects.
[28] *Smartwrap,* Accessed 24 August 2021; https://lightingarchitecture.wordpress.com/2010/04/30/smartwrap/.
[29] *GreenPix: Zero Energy Media Wall,* Accessed 24 August 2021; https://www.archdaily.com/245/greenpix-zero-energy-media-wall.
[30] *FLARE kinetic ambient reflection membrane [130],* Accessed 24 August 2021; https://www.filt3rs.net/case/flare-kinetic-ambient-reflection-membrane-130.
[31] *Sliding House by dRMM,* Accessed 24 August 2021; https://www.dezeen.com/2009/01/19/sliding-house-by-drmm-2/.
[32] *Q1, ThyssenKrupp Quarter Essen / JSWD Architekten + Chaix & Morel et Associés,* Accessed 24 August 2021; https://www.archdaily.com/326747/q1-thyssenkrupp-quarter-essen-jswd-architekten-chaix-morel-et-associes.
[33] *ferrer arquitectos: north mediterranean health center,* Accessed 24 August 2021; https://www.designboom.com/architecture/ferrer-arquitectos-north-mediterranean-health-center/.
[34] *MAC567,* Accessed 24 August 2021; https://www.sceproject.it/projects/mac567/.
[35] *Galleria Centercity/ UNStudio,* Accessed 24 August 2021; https://www.archdaily.com/125125/galleria-centercity-unstudio.
[36] *M9-C Building/ BP Architectures,* Accessed 24 August 2021; https://www.archdaily.com/287863/m9-c-building-bp-architectures.
[37] *RMIT Design Hub/ Sean Godsell,* Accessed 24 August 2021; https://www.archdaily.com/335620/rmit-design-hub-sean-godsell.
[38] *Industrial Technology Research Institute(ITRI),* Accessed 24 August 2021; https://noizarchitects.com/en/archives/works/itri-research-lab.
[39] Hazza Bin Zayed Stadium/ Pattern Design, Accessed 24 August 2021; https://www.archdaily.com/604755/hazza-bin-zayed-stadium-pattern-design.
[40] *Case Study: Logan Airport Parking Expansion,* Accessed 24 August 2021; https://extechinc.com/logan-airport-kinetic-wall/.
[41] *H&M clothing store large logo on building front, Ocean terminal shopping centre, Leith, Edinburgh, Scotland, UK,* Accessed 24 August 2021; https://www.alamy.com/hm-clothing-store-large-logo-on-building-front-ocean-terminal-shopping-centre-leith-edinburgh-scotland-uk-image227981421.html.
[42] *Louverwall/ AND,* Accessed 24 August 2021; https://www.archdaily.com/796733/louverwall-and.
[43] *Parking Garage Facade P22a/ wulf architekten,* Accessed 24 August 2021; https://www.archdaily.com/928400/parking-garage-facade-p22a-wulf-architekten.
[44] *The Maersk Tower in Copenhagen awarded,* Accessed 24 August 2021; https://www.cfmoller.com/g/The-Maersk-Tower-in-Copenhagen-awarded-i17817.html.
[45] *Housing in Zürich,* Accessed 24 August 2021; http://www.manuelherz.com/ballet-mecanique.
[46] *American Cathedral: The story behind Mercedes-Benz Stadium,* Accessed 24 August 2021; https://www.atlantamagazine.com/great-reads/american-cathedral-mercedes-benz-stadium/.
[47] *DZNE German Center for Neurodegenerative Diseases/ wulf architekten,* Accessed 24 August 2021; https://www.archdaily.com/880109/dzne-german-center-for-neurodegenerative-diseases-wulf-architekten.
[48] *Foster and Heatherwick complete Shanghai theatre with curtain-like facade,* Accessed 24 August 2021; https://www.dezeen.com/2017/06/09/foster-heatherwick-complete-shanghai-arts-centre-curtain-like-facade-fosun-foundation-theatre-architecture/.
[49] *The shed's building gets a new name, as opening date announced for NYC arts center,* Accessed 24 August 2021; https://www.designboom.com/architecture/shed-new-york-bloomberg-building-diller-scofidio-renfro-rockwell-group-01-09-2018.
[50] M. Pesentia, G. Maseraa, F. Fioritob, M. Sauchellia, Kinetic solar skin: a responsive folding technique, *International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry,* Energy Procedia, Vol. 70 , pp. 661- 672, 2015.
[51] M. Tsiamis, A. Oliva, M. Calvano, Algorithmic Design and Analysis of Architectural Origami, *Nexus Network Journal, Architecture and Mathematics,* https://doi.org/10.1007/s00004-017-0361-9,21 December 2017.