DOI: 10.30495/HOVIATSHAHR.2022.64865.12140

صفحات ۳۸-۲۳

# ارائه یک پوسته تطبیق‌پذیر هوشمند با رویکرد بیومیمتیک جهت کاهش مصرف انرژی*

حسین مهیاری**، افسانه زرکش***، محمدجواد مهدوی نژاد****

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۹/۱۶

## چکیده

این پژوهش به پوســـته‌ی خارجی ســـاختمان، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های ساختمان که می‌تواند میزان مصرف انرژی را کنترل کند، پرداخته اســـت. هدف از این تحقیق دســـتیابی به راه‌کارهای تأثیرگذار کاهش مصرف انرژی در ساختمان به‌وسیله‌ی پوســـته تطبیق‌پذیر و رویکرد بیومیمتیک اســـت. روش گـــردآوری اطلاعات کتابخانه‌ای و ســـایت‌های اینترنتی و روش پژوهش توصیفی- تحلیلی و شبیه‌سازی می باشد. نرم افزار راینو ۶ و افزونه گرس‌هاپر و کامپوننت انرژی پلاس برای آنالیز نور روز و میزان مصرف انرژی اســـتفاده شده است. آزمون نتایج با توجه به سیستم لید انجام گرفته است. با بررسی تأثیر پوسته خارجی بر فضای شبیه‌ســـازی شده مشخص شد که این پوســـته‌ها بار حرارتی کل را ٪۲۸ ، بار سرمایش را ٪۵۶ و احتمال خیرگی نور روز را ٪۲۳ کاهش دهد. با الگوبرداری رفتاری از گیاهان، به‌دلیل ماهیت ایســـتا و تطبیق‌پذیری با محیط پیرامون می‌توان به مکانیســـمی در ساختمان مانند پوسته‌ای پاسخگو به محیط رسید.

## واژه‌های کلیدی

پوسته تطبیق‌پذیر، مصرف‌انرژی، بیومیمتیک، سلول‌فتوولتائیک.

* این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشـــد نویســـنده حسین مهیاری با عنوان «طراحی پوسته هوشمند با رویکرد انرژی کم و الهام از طبیعت؛ نمونه: طراحی یک بیمارســـتان» اســـت که با راهنمایی نویسنده دکتر افسانه زرکش و مشاوره نویسنده دکتر محمدجواد مهدوی‌نژاد در دانشگاه تربیت مدرس تهران در سال ۱۴۰۰ به اتمام رسیده است.

** کارشناس‌ارشد معماری، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. Email:h.mahyari@modares.ac.ir

*** استادیار، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (مسئول مکاتبات).
Email:zarkesh@modares.ac.ir

**** استاد، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. Email:mahdavinejad@modares.ac.ir

## مقدمه

انرژی را می‌توان اســاس زندگی بشــر نامید که تمدن بشری بر بنیاد نوآوری‌ها و چگونگی استفاده از منابع گوناگون انرژی پایه‌گذاری شده اســت. بدون شک اکنون و آینده بشــر امروزی در گروی بحث انرژی است (اربابیان، ۱۳۸۰). تا پیش از انقلاب صنعتی، انرژی مورد استفاده بشــر لزوماً تجدیدپذیر بود. انقلاب صنعتی با بکارگیری اشکال مختلف انرژی، بر تمامی عرصه‌های اقتصادی و اجتماعی بشــری تأثیر زیادی داشت. در این دوره با استفاده زیاد از سوخت‌های فسیلی ضمن اینکه باعث پیشرفت سریعی شد، عواقب وخیمی مانند آلودگی هوای شهرها و آلودگی محیط زیســت را در پی داشت بطوریکه سازمان ناسا اعلام کرد ســال ۲۰۲۰ گرم‌ترین سال ثبت شده در تاریخ بشر بوده است. در حال حاضر حدود ۸۰ درصد از انرژی جهان توسط منابع تجدیدناپذیر تأمین می‌شود (Nakhle, 2019). یکی از مهم‌ترین حوزه‌های مصرف انرژی، ســاخت بشــر در حوزه معماری اســت. هــدف از این تحقیق دســتیابی به راه‌کارهای تأثیرگذار کاهش مصرف انرژی در ساختمان به‌وسیله‌ی پوســته تطبیق‌پذیر و رویکرد بیومیمتیک است که هم‌سو بــا این هدف به دنبال تحقق اهداف دیگــری چون، بهره‌گیری هرچه بیشتر از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند نور خورشید برای کاهش استفاده از ســوخت‌های فســیلی، و افزایش بهره‌وری سیستم‌های سرمایش و گرمایش ســاختمان به‌وسیله‌ی کنترل عوامل تأثیرگذار خارجی مانند نور خورشــید بر روی مصرف انرژی نیز می‌باشــد. لذا در جهت تحقق اهداف مذکور می بایســت به سوالات مطرح شده در پژوهش به شرح ذیل پاســخ داد: پوسته هوشــمند چگونه می‌تواند ضمن صرفه‌جویی در مصرف انــرژی و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر، پاســخگوی مناســبی به استفاده بهینه از نور طبیعی روز نیز باشد؟ چگونه می‌توان یک رویکرد بیومیمتیک را برای توســعه همانندســازی بین پوشــش ســاختمان و پوسته طبیعی پیشــنهاد کرد؟ پوسته هوشمند چگونه و چقدر بر مصرف انرژی و کنترل آن تأثیر می‌گذارد؟ جهت پاسخگویی به سوالات و دســتیابی به اهداف پژوهش روشهای تحقیق متناسب با آنها در نظر گرفته شده که در ادامه معرفی خواهند شد.

## پیشینه پژوهش

پوسته ساختمان‌ها نقش مهمی در کنترل اتلاف انرژی در ساختمان‌ها دارند ولی با این وجود اکثر آنها دارای راه‌کارهایی هستند که شاکله آن ثابت اســت و میزان انرژی زیادی باز هم هدر می‌رود. یکی از مهم‌ترین اهداف پوسته‌های هوشــمند ایجاد حالتی بهینه بین آسایش انسان و مصرف‌انرژی می‌باشد (ترابی، ۱۳۹۰). از جمله مطالعات انجام‌شده در این زمینه به مقایســه تفاوت پوسته ســاختمان‌ها و نمونه‌های موجود در طبیعت پرداخته و نشــان می‌دهد باید چه قدم‌هایی برداشته شود تا به الگوبرداری مناســب از موجودات‌زنده برسیم (Yeler & Yeler, 2017).

خردمند و ســتاری ساربانقلی در مقاله‌ای در ســال ۱۳۹۷، هدف را بررسی قابلیت صرفه‌جویی در مصرف انرژی با کاربرد روش زیست‌الگو در طراحی پوســته بنا و روش‌های تحقیــق را نمونه موردی، توصیفی و تحلیلی بیان می‌کنند. ســاختمان اســتودیو در بیابــان و پنل‌های هوشمند متحرک را درنظر می‌گیرد. یافته‌ها ماتریس طرح زیست‌الگو برای تعیین الزامات اصلی پوســته بنا و نتایج را شناسایی و الگوبرداری از اســتراتژی‌های طبیعت و به‌کارگیری روش زیست‌الگو برای کاهش مصرف انرژی ذکر می‌نماید (خردمند و ستاری ساربانقلی، ۱۳۹۷). بوی در مقاله ای در ۲۰۲۰ هدف را کاهش مصرف انرژی کل با طراحی نمای تطبیق‌پذیر بیومیمتیک و روش‌تحقیق را شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، و ابزار را نرم افزار انرژی‌پلاس[۱]، یادگیری ماشین[۲] و بسته اپی[۳] و ابزارهای آماری عنوان می‌کند. ســاختمان مدنظر را اداری در تگزاس و ملبورن در نظر می‌گیرد. تحقیق به میزان صرفه‌جویی در انرژی ۲۹-۱۸/۸٪ و ۲۲/۳-۱۴/۲٪، و ذخیره انرژی روشنایی ۱۹/۶-۱۴/۶٪ از مصرف انرژی کل و آســایش بصری با اجرای بصری ۱۰۰٪ می‌رسد (Bui, 2020). عبدالرحمَن و همکاران در مقاله‌ای در سال ۲۰۲۰ هدفشان را دستیابی به پوسته‌های ساختمانی جوابگوتر و انطباق‌پذیرتر قابل‌تغییر و سطوح آســایش حرارتی می‌دانند. روش‌های تحقیق شبیه‌ســازی و ابزارها را گرس‌هاپر[۴] در راینو[۵] و پلاگین‌های لیدی‌باگ[۶] و هانی‌بی[۷] بیان می‌کند. یافته‌هــا کاهش قابل‌توجه گرما، و آســایش حرارتــی به‌خصوص در تابســتان و کاهش منطقه با گرمای خیلی‌زیاد، افزایش ساعات آسایش تا ۲۸۷۳ ســاعت در سال بوده و نتایج کاهش خیرگی و تکیه کمتر بر نورپردازی مصنوعی را در سیستم پیشنهادی به‌دست آورد. ساختمان اداری در اقلیم گرم و ســایبان دینامیــک از پنل‌های «پی‌تی‌اف‌ای[۸]» توصیه کرد و به کاهش مصرف انرژی سرمایشــی در ســال در نماهای جنوبی، غربی و شــرقی به ۱۶۰۸۰/۴ Kwh دســت یافت (Abd El-Rahman et al., 2020). ایکســینیو در تز ارشد در ۲۰۲۱ هدفش را دستیابی به سیستم حصار دینامیک پاسخگوتر، کارآمدتر، هوشمندتر و با طبیعت دوســت‌تر و روش‌پژوهش را شبیه‌سازی، تجزیه و تحلیل و ارزیابی می‌داند. یافته ها از نظر هندســه، طیف بازشدگی سایبان را ۸۲٪ و دیدپذیــری را ۶۵٪ و از نظر نور روز، کیفیت نور داخل را ۶۹٪ و خیرگی اجتنابی را ۸۰٪، و از جنبه انرژی، بار گرمایشی افزایش‌یافته را ۵۲٪ و بــار سرمایشــی کاهش‌یافته را ۳۸٪ بدســت می‌آورد. روش محاسبات تعیین برنامه، مقایسه با نمونه مبنا،کنترل، قیاس سه نمونه با هم و محاسبات شبیه‌سازی بوسیله نرم‌افزار پارامتریک برای ارزیابی

و انتخاب پلان حصار مناسب است. از پلاگین راینو گرس‌هاپر استفاده شده و ساختمان اداری مدنظر بوده است (Xinyue et al., 2021). صادق و همکاران در مقاله‌شان در سال ۲۰۲۲ هدف از تحقیق را بررسی پتانسیل نمای انطباق‌پذیر بیومیمتیک برای بهبود کارآمدی انرژی در ساختمان‌ها ذکر می‌کنند که روش‌های تحقیق شبیه‌سازی، طراحی و ارزیابی و کاربرد الگوریتم هوش مصنوعی و ابزارها در آن سه پلاگین دی‌سیم[9] و دیوا[10] و هانی‌بی برای راینو و همچنین انرژی‌پلاس و دیوا و آیس‌وی[11] هستند. ساختمان اداری و نمای پویا و ایستای تطبیق‌پذیر و چندعملکردی در آن در نظر گرفته شده و نتیجه نور روز سالیانه بین ۴۰-۱۰٪ برای حالات مختلف سایبان و استقلال نور روز به حداکثر ۶۹٪ و استقلال نور روز ممتد بیش از ۷۰٪ ، و UDI برای هر حالت سایبان بیش از ۶۰٪ بدست می‌آید (Sadegh, 2022).

تحقیقات نشان می‌دهد که در مناطق گرم‌ومرطوب، نمای ساختمان تقریباً ۳۶٪ در هزینه‌ی انرژی تأثیر دارد (Haase & Amato , 2006) اینکاروجریت در تحقیقات خود بیان می‌کند که نماهای هوشمند باید به سه پارامتر اصلی یعنی هوا، محیط‌زمینه و ساکنین پاسخگو باشند (Inkarojrit, 2007). سورالکار مدل مفهومی پیشنهادی را برای سیستم سایه‌انداز که بخشی از نمای حرکتی بوده ارائه داد. ساخت این مدل برای اثبات قابل استفاده و مؤثر بودن پاسخگویی اتوماتیک نما به زمینه صورت گرفته است (Suralkar, 2011) تبادکانی و همکاران به انواع نماهای تطبیق‌پذیر پرداخته و مشخص کردند که جامع‌ترین نما، نمای پاسخگویی است که قابلیت واکنش به شرایط محیطی را داشته و بتواند برای بهبود عملکرد ساختمان، بطورخودکار با کاربر نیز در تعامل باشد (Tabadkani et al., 2021). جانسن و وینتر برای یک نمای دو پوسته، قاب‌هایی را بطور افقی و عمودی و با قابلیت تعامل با شرایط پیرامونی در جلوی پنجره‌ها قرار دادند و با بررسی ۱۲ موقعیت در چهار فصل، هوای ابری و صاف و شرایط بدون کاربر و فضاهای اشغال شده مشخص شد یک ساختمان اداری با نمای ایستا در دانمارک سالانه ۵۰کیلووات ساعت برمترمربع انرژی نیاز دارد درصورتی‌که با کاربرد نمای پویا با سیستم کنترل هوشمند، این نیاز به نصف کاهش می‌یابد (Johnsen & Winther, 2015). با تجزیه‌وتحلیل ۵۲ نمونه موردی نماهای سازگار با رویکرد بیومیمتیک بر پایه شاخص‌های مقیاس، سازگاری، بیومیمتیک و عملکرد مشخص شد که الگوی بیشتر این نماها گیاهان بوده و به‌دلیل محدودیت نرم‌افزارهای شبیه‌سازی بیش از نیمی از آنها بدون تحلیل عملکرد توسعه یافته، ۴۲٪ درصد دارای تحلیل عملکرد و تنها پنج مورد دارای تحلیل انرژی هستند. همچنین معین شد که بیومیمتیک یک رویکرد امیدوارکننده برای نماهای سازگار جهت حل چالش‌های عوامل محیطی مانند گرما، هوا، نور، آب و انرژی می‌باشد (Kuru et al., 2019). در جدول ۱ به مقایسه و بررسی کارایی پوسته‌های تطبیق‌پذیر عبدالرحمن (Abdel-Rahman, 2021) ، شیخ و اصغر (Sheikh & Asghar, 2019)، کنسک و هانسانوات (Kensek & Hansanuwat, 2011)، پرهیزگار و همکاران (۱۳۹۱) و رستم زاد و همکاران (۱۴۰۰) پرداخته شده است.

## ضرورت پژوهش

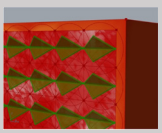
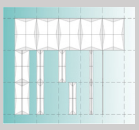
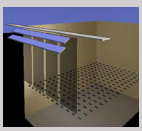
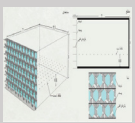
ایران با داشتن یک درصد از جمعیت جهان حدود نه درصد از فرآورده‌های نفتی دنیا را مصرف می‌کند. اکنون ایران ۹۹٪ انرژی مورد استفاده خود را از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌کند. انتشار آلاینده‌ها یکی از دلایل مهمی شده که روند افزایش دما در ایران سرعت بیشتری نسبت به میانگین جهانی داشته باشد بطوری‌که میانگین دمای کشور در هر دهه حدود ۰/۴۳ درجه سلسیوس افزایش داشته است (سالنامه مرکز ملی اقلیم و مدیریت بحران خشکسالی، ۱۳۹۹). در سال ۱۳۹۶ مصرف انرژی بخش خانگی، تجاری و عمومی ۲/۲ برابر متوسط جهانی را نشان می‌دهد و شدت مصرف انرژی در داخل کشور از سال ۱۳۷۷ به‌تدریج افزایش یافته که بیشترین میزان آن در بخش خانگی و تجاری با سهم ۳۵ درصدی بوده است (علیدادی پور و خوشکلام خسروشاهی، ۱۴۰۰). برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان جهت کاهش مصرف آن، باید به شرایط محیطی مناسبی برای کاربر دست پیدا کرد (Pacheco et al., 2012) .بدین‌گونه متغیرهای طراحی و تمام عناصر مؤثر در شکل ساختمان باید بهینه شود. پوسته‌های ساختمان‌ها نقش مهمی در کنترل اتلاف انرژی دارند. رویکردهای مختلفی برای ایجاد پوسته هوشمند وجود دارد تا بتوان مصرف انرژی را کاهش داد. رویکردهایی که معتقد به واکنش معماری به شرایط محیطی داخلی و خارجی است (Hagan, 2001, 4-5) .پوسته‌های هوشمند می‌توانند با طراحی مناسب، در عین اجازه ورود نور و گرمای خورشید در فصول سرد به داخل، مانع از ورود آن در فصول گرم شوند. مثلا با طراحی نامناسب و تابش زیاد نور خورشید، تهویه فعال در سال ۲۵ درصد افزایش خواهد داشت (Elasfouri et al., 1991).

## مبانی‌نظری

### بیومیمتیک و زیست‌الگو

با توجه به تغییرات اقلیمی و آلودگی محیط زیست، انسان باید بیشتر با طبیعت تعامل داشته باشد. یکی از ویژگی‌های مهم طبیعت سازگاری تحت شدیدترین شرایط زیستی و آب‌وهوایی با تغییر در ساختار خود است تا بهتر بتواند با کمترین مصرف انرژی به حیات خود

جدول ۱. بررسی و مقایسه پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه نماهای سازگار و متحرک
Table 1. studying and comparing of researches done in the field of adaptive and movable facades

| ردیف | نویسنده | عبدالرحمن | شیخ و اصغر | کنسک و هانسانوات | پرهیزگار و همکاران | رستم زاد و همکاران |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | اهداف | پوسته بیومیمتیک برای کنترل عملکرد حرارتی | کاهش مصرف انرژی با نمای تطبیق‌پذیر | افزایش بهره‌وری انرژی با پوسته متحرک | بهترین ترکیب پوسته متحرک و روشنایی | تأمین آسایش بصری فضا |
| ۲ | روش‌تحقیق | مدل‌سازی-شبیه سازی-بهینه‌یابی | توصیفی- تحلیلی | توصیفی- تحلیلی | توصیفی- تحلیلی | توصیفی- تحلیلی |
| ۳ | یافته‌ها | کاهش ٪۱۲ بار حرارتی | کاهش ٪۳۲ بار انرژی کل | کاهش٪۳۰بار سرمایش وگرمایش | صرفه‌جویی سالانه ۷۹۲کیلووات | کاهش ٪۵۰ تابش مستقیم نور خورشید |
| ۴ | نتایج | روشی بهینه برای افزایش عملکرد حرارتی | کاهش مصرف انرژی با حفظ آسایش بصری | کاهش مصرف انرژی | صرفه‌جویی در مصرف انرژی با ترکیب موردنظر | نقش پوسته متحرک در افزایش بهره‌وری روشنایی |
| ۵ | الگوریتم | الگوبرداری از کاکتوس | ماژول چهارتایی ملهم از پونه‌کوهی | سایبان‌های متحرک | سایبان افقی و سلول فتوولتائیک | شبیه‌سازی نقوش هندس بعنوان ماژول |
| ۶ | روش‌محاسبات | تجزیه-تحلیل | شبیه‌سازی | شبیه‌سازی | شبیه‌سازی | شبیه‌سازی |
| ۷ | ابزار مورد استفاده | Energy plus, Grasshopper | Insight, Ecotect | Ecotect | AGI 32, Ecotect | Grasshopper,LB, HB |
| ۸ | نوع ساختمان | اداری | اداری | اداری | اداری | اداری |
| ۹ | نوع پوسته | پوسته متحرک بیومیمتیک | پوسته متحرک بیومیمتیک | پوسته متحرک | سایبان افقی | پوسته متحرک |
| ۱۰ | میزان صرفه‌جویی در انرژی مصرفی | کاهش از ۳۶۶ به ۳۱۹ کیلووات ساعت | کاهش ٪۳۲ بار حرارتی کل | بارسرمایش ٪۳۳ بارگرمایش ٪۳۰ | ۷۹۲ کیلووات ساعت کاهش | - |
| ۱۱ | میزان تأثیر بر روشنایی | - | ٪۹۰حفظ روشنایی فضاها | کاهش استفاده از نور مصنوعی | - | افزایش روشنایی مفید نور روز ٪۲۰ |
| ۱۲ | تصویر |  |  | |  |  |

ادامه دهد. این راه‌کار باعث بوجود آمدن گونه‌های مختلف معماری از جمله معماری بیونیک، معماری بیومیمتیک، معماری واکنشی و معماری انطباقی شده است (منصوریان، ۱۳۸۸). جنی بنیوس در ۱۹۹۷ در کتاب خود «بیومیمکری: نوآوری‌های برگرفته از طبیعت»، بیومیمکری[۱۲] را مشتق از کلمه‌ی یونانی «بایوس» به معنی زندگی و «میمسیس» به معنای تقلید می‌داند. لذا آن را می‌توان دانشی نوین دانست که به مطالعه طبیعت پرداخته و هدف آن یافتن راه‌کار برای حل مشکلات بشر با اقتباس از این طرح و فرآیندها می‌باشد (ژراردن، ۱۳۷۹، ۱۵۶). دانش بیومیمکری الگوبرداری از طبیعت و یا مهندسی الهام‌گرفته از طبیعت است. در کل می‌توان دسته‌بندی این رویکرد را با بیونیک به‌عنوان سرشاخه، بیومیمتیک به‌عنوان مفاهیم ملهم از طبیعت، بیومورفیسم با استفاده از اشکال بیولوژیکی، بیوفیلی در قالب پذیرش طبیعت به‌عنوان بخشی از یک طرح، الهام‌گیری بیونیکی به‌عنوان دربرگیرنده تمام مفاهیم زیست‌محور و بیومیمکری که الهام از زندگی است، هم‌راستا دانست (Kuru et al., 2019). هدف این دانش تقلید از طبیعت نیست بلکه انتزاع، تبدیل و توسعه روش‌ها و مکانیسم‌های انجام شده توسط موجودات‌زنده و سیستم‌های طبیعی است تا بتوان راه‌حل‌های کارآمدی برای طراحی مثلا پوشش ساختمان

پیدا کرد. هم‌گرایی چالش‌های پوسته‌ی ساختمان با مکانیسم‌های موجود در طبیعت، برای طراحی پوسته‌هایی است که بطور تعاملی با طبیعت در ارتباط بوده و بتوانند برای راحتی کاربران، شرایط محیط پیرامون را تنظیم کنند (Badarnah Kadri, 2012, 4).

### فرآیندهای طراحی برگرفته از طبیعت در معماری

فرآیندهای طراحی برگرفته از بیونیک در معماری را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد. رویکرد اول با نگاه به چالش‌های طراحی به‌دنبال راه‌کارهای موجودات‌زنده می‌باشد . این رویکرد را « طراحی با نگاه به بیولوژی» می‌نامند. روند کار اینست که بعد از مطرح شدن چالش پیش‌رو می‌توان با جستجو میان الگوهای موجود در طبیعت شبیه‌ترین راه‌کارهای طبیعی را پیدا کرد و این راه‌حل‌ها را به حوزه مربوطه انتقال داد و آنها را آزمایش کرد تا درستی انتخاب سنجیده شود. این رویکرد بیشتر در حوزه‌های مهندسی استفاده شده و از جمله مزایای آن کاربردی‌بودن و از معایب آن زمان‌بر بودن فرآیند می‌باشد. رویکرد دوم که به «بیولوژی مؤثر در طراحی» معروف است، روند معکوس رویکرد اول بوده بطوری‌که ابتدا یک سیستم بیولوژیکی را تحلیل و ریخت‌شناسی آن را بررسی کرده، قوانین موجود در آن را کشف می‌کند و در انتها این قواعد را مهندسی می‌نماید (Hwang et al., 2015). شروع این رویکرد بیشتر در حوزه‌های زیست‌شناسی و جانورشناسی بوده و از جمله مزایای آن یافتن راه‌کارهای هر موجود زنده در مقابل چالش‌های خود بعد از تحقیق بر روی آن است. از معایب آن جنبه نظری و آزمایشگاهی بودن آن است.

در شیوه طراحی در معماری مانند چالش طراحی پوسته هوشمند، «رویکرد چالش‌محور» مبنای کار قرار می‌گیرد. زیرا ما ابتدا با چالشی در کنترل تأثیر متغیرهای محیطی بر ساختمان مواجه هستیم و باید با جستجو میان موجودات‌زنده مکانیسم مطابق با چالش موردنظر را پیدا کنیم (Badarnah Kadri, 2012, 41-43).

### راهکارهای الهام‌گرفته از طبیعت مناسب طراحی نما

از میان موجودات‌زنده، گیاهان به دلیل ماهیت ایستای خود و اینکه نمی‌توانند در تغییرات محیطی (نور، رطوبت، باران و سرما و...) مانند حیوانات از خود حفاظت خاصی نمایند، از اینرو انطباق‌پذیری آنها با محیط پیرامون و واکنش‌های مناسبی که در برابر شرایط متغیر جوی بخصوص تابش خورشید از خود نشان می‌دهند، می‌تواند الگوی مناسبی برای استفاده در پوسته ساختمان باشد. مکانیسم کارکردی گیاهان در برابر تابش نور خورشید متفاوت و بعضاً متضاد است. جدول۲ کارکرد برخی از نمونه‌های گیاهان را نشان می‌دهد.

### پوسته تطبیق‌پذیر هوشمند

درباره‌ی ساختمان هوشمند ذکر شده که بر وجهه‌ی فناوری تکیه دارد، ساختمانی است که با سیستم‌های کنترلی کاملا خودکار تعریف شده است (Wigginton & Harris, 2002, 2). منظور از معماری هوشمند با رویکرد بیونیک بنایی است که مانند موجودات‌زنده، خود را با شرایط متفاوت داخلی و خارجی تطبیق دهد. درحقیقت این ساختمان‌ها قادر هستند که واکنش به‌موقع و مناسبی در برابر متغیرهای محیطی مانند تغییرات دمایی زیاد، تابش خورشید و باد، از خود نشان دهند.

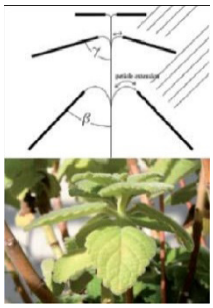
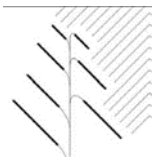
در دنیای معاصر با استفاده از برخی فناوری‌های هوشمند به تدریج این امکان در حال شکل‌گیری است که نمای‌ساختمان مانند پوست یا پوسته‌ای‌هوشمند طراحی یا اجرا گردد تا بتواند در برابر بعضی از عوامل بیرونی، کنش‌های متفاوتی بروز دهد (ثروت جو و ارمغان، ۱۳۹۰). نمای هوشمند باید عملکردهایی مانند دست‌یابی به حداکثر بهره‌وری از نور روز به‌وسیله بازتابنده‌ها، ورود حداکثری نور روز به داخل بنا توسط بستن سایه‌اندازها، جلوگیری از ورود نور مزاحم به داخل به‌وسیله بازکردن سایه‌اندازها را برای رسیدن به حداکثر کارآیی انجام دهد (امیر هدایی، ۱۳۹۲).

## روش پژوهش

در این پژوهش با الگوبرداری از گیاهانی که ماهیت نورگرایی دارند، مدل زیستی را انتخاب کرده که راه‌کار مناسبی در این راستا داشته و بتوان از فرم و عملکرد گیاه در برابر محرک‌های محیطی مانند نور روز بوسیله حس‌گرهای تعبیه‌شده در پوسته الهام گرفت. راه‌کار پیشنهاد شده طراحی سازه سبک و الحاق شده به ساختمان بوده که الگوی برگرفته از گیاه موردنظر بصورت ماژولار و متصل به سازه الحاقی، به‌عنوان پوسته دوم قرار بگیرد تا با واکنش به متغیرهای محیطی وظیفه خود را انجام دهد.

بسیاری از گیاهان در پاسخ به تغییر میزان نور می‌توانند زاویه و جهت‌گیری برگ خود را تغییر دهند. برخی این کار را برای افزایش ره‌گیری و برخی دیگر برای جلوگیری از نور زیاد انجام داده تا میزان مناسب فتوسنتز خود را در شرایط مختلف حفظ کنند. از جمله گیاهانی که ماهیت نورگرایی داشته و برگ‌های خود را متناسب با میزان دریافت نور خورشید باز و بسته می‌کند، خانواده اکسالیدها[۱۳] بوده و گیاه انتخابی برای این پژوهش، برگ‌های نوعی گل بنام پونه‌کوهی اکسالیس[۱۴] یا ترشک چوب سرخ[۱۵] می‌باشد که در جنگل‌های غرب آمریکای شمالی، در اقلیم گرم و نیمه‌مرطوب و مرطوب و در لایه ارتفاعی پایین جنگل رشد می‌کند. برگ‌های این گیاه به شکل قلب

جدول ۲. آنالیز نمونه‌های‌موردی گیاهان در برابر دریافت نورخورشید
Table 2. Analysis of case samples of plants against receiving sunlight

| استراتژی | مکانیزم | اصول کلیدی | ویژگی اصلی | تصاویر |
|---|---|---|---|---|
| **گیاهانی با تاج پوششی:** با آرایش لایه‌به‌لایه برگ های تاجشان بصورت پراکنده، مساحت بیشتری را در معرض تابش خورشید قرار می‌دهند. | برگ‌ها در ارتفاع‌های مختلف قرار می‌گیرند تا امکان نفوذ نور از میانشان و رسیدن به ساقه فراهم شود و دراز شدن دم‌برگ ها سبب متمایل شدن برگ‌ها با زاویه‌ها و قوس‌های مختلف می گردد. | دراز شدن دم‌برگ و زاویه‌های متنوع برگ‌ها در ارتفاع های مختلف گیاه | کشیده‌بودن و متمایل‌شدن و قرار گیری با زاویه‌های مختلف |  |
| **گیاهان زیر درختی:** سطوح در معرض نور خورشید را با آرایش تک لایه‌ی متراکم‌شان افزایش می‌دهند. | این نوع گیاهان بصورت افقی و متراکم گسترش پیدا کرده و سطوح در معرض نورشان را به حداکثر می‌رسانند. | پراکندگی تک‌لایه و متراکم برگ‌ها | بیشینه سطوح در معرض نورخورشید | |
| **گیاهانی که به‌سمت‌نور حرکت می‌کنند:** سطوح برگ‌هایشان را عمود بر تابش خورشید نگه داشته تا بیشینه انرژی‌خورشید را جذب کنند. | سلول‌های نوری به تابش خورشید واکنش نشان داده و با منقبض و منبسط کردن خود برگ‌ها را خم می‌کنند تا زاویه برگ‌ها بر تابش خورشید عمود باشد. | جذب نور خورشید با عمود نگه‌داشتن برگ‌ها بر تابش | تعقیب و دنبال‌کردن |  |
| **کاکتوس‌های دندانه‌دار (چین‌خورده):** سطوح در معرض تابش‌خورشید کم است. | ساختار چین‌خورده کاکتوس که با اشعه‌های خورشید موازی است مانع از دریافت انرژی گرمایی بیش از حد می‌شود. | حالت خودسایه اندازی با مورفولوژی خاص خود | چین‌خورده یا پلیسه دار | |

و سه‌برگچه‌ای بوده و طول هر برگ دوتایی معادل ۳/۵×۶ سانتیمتر دارد. این گیاه در نور نسبتاً کم خورشید که معادل ۱/۲۰۰ نور کامل خورشید است قادر به ردیابی نور خورشید می‌باشد. مطابق با شکل ۱ برگ‌ها واکنش‌پذیر به نور بوده و وقتی نور مستقیم خورشید به برگ‌ها می‌خورد، برگ‌ها باز شده و وقتی سایه می‌شود، برگ‌ها بسته می‌شوند (Klinkenberg, 2020). مدل برگ‌های این گیاه با توجه به فرم خود وقتی‌که در کنار برگ‌های دیگر قرار می‌گیرند می‌توانند یک سطح را بطورکامل پوشش دهند و مناسب الگوبرداری برای پوسته‌ی ساختمان می‌باشد.

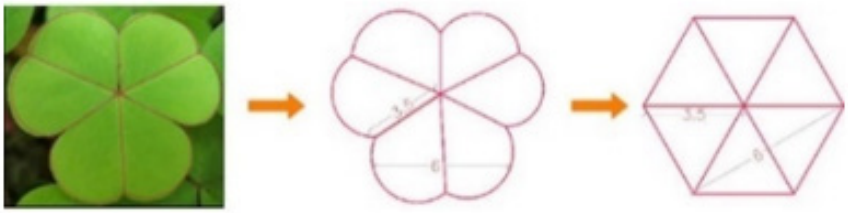
## مدل‌سازی ماژول پیشنهادی

طبق شکل ۲ هر کدام از برگ‌های این گیاه دارای شش برگ هم‌شکل بوده که به‌صورت جفت‌شده سه‌گانه از یک نقطه به ساقه خود وصل هستند و هر برگ از وسط به سمت پایین تا می‌شود. هر برگ این گیاه را می‌توان به دو مثلث متساوی‌الاضلاع ۳/۵×۳/۵ سانتیمتری تقسیم کرد. شبیه‌ترین الگوی هندسی به فرم برگ‌های پونه‌کوهی اکسالیس، یک شش‌ضلعی با قطرهای داخلی می‌باشد. ماژول مربوطه از شش مثلث متساوی‌الاضلاع با طول واحد تشکیل شده است. این چیدمان و استفاده از این نوع مثلث باعث می‌شود که پوسته در تمام‌جهات به‌خاطر برابربودن اضلاع، مکانیسم مشابه را اجرا کند و با کم‌ترین مشکل و هر گونه چیدمان بر روی سطح پوسته با هر شکلی پخش شود.

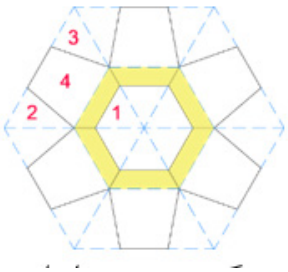
## نحوه کارکرد ماژول‌ها

ماژول اصلی در نمای پیشنهادی یک ماژول سایه‌انداز می‌باشد. هر ماژول از شش جزء متشابه تشکیل شده است. با توجه به شکل ۳

شکل ۱. واکنش برگ‌های پونه‌کوهی اکسالیس در برابر دریافت نور خورشید، راست: برگ‌ها در حالت تاشده، چپ: برگ‌ها در حالت باز (Klinkenberg, 2020)
Fig.1: The reaction of Oxalis plant oregano leaves against receiving sunlight, right: leaves folded, Left: leaves open



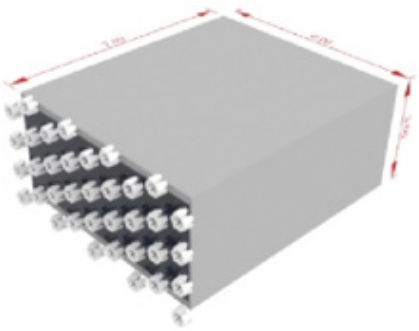
شکل ۲. انتزاع فرم ماژول اصلی از گیاه پونه‌کوهی اکسالیس
Fig. 2: Abstraction of the main module form from Oxalis oregano




شکل ۳. سطوح ماژول با قابلیت تاخوردگی به سمت‌داخل (ترسیم‌شده در نرم‌افزار اتوکد)
Fig. 3: Module surfaces with the ability to fold inwards (drawn in Auto CAD software)

ماژول‌ها از طریق یک سیستم به‌وسیله‌ی لولا، موتورهای الکتریکی و هسته ثابت و استوانه کشویی داخل آن که به مرکز ماژول رسیده و توسط شش دستک به قسمت شماره ۴ مثلث متصل است و از محل اتصال دستک و سطح شماره ۴ به‌وسیله سه کابل به موتور در محل اتصال لولای قسمت چهارم و سطوح سوم و دوم و اول رسیده و فرمان چرخش این سطوح سه‌گانه به داخل را به موتورهای آنها صادر می‌کند و از محل هسته ثابت که به یک سازه اسکلت فلزی شش‌ضلعی متصل است و این سازه فلزی خود به ساختمان موجود متصل می‌باشد، حرکت می‌کنند تا بتوانند واکنش مناسب و به‌موقعی را به‌وسیله‌ی سنسورهای کنترل الکترونیکی، در مقابل متغیرهای محیطی نشان دهند. اطمینان از کارکرد صحیح ماژول نیاز به ساخت نمونه‌ی آزمایشگاهی دارد که خارج از بحث این مقاله می‌باشد.

طول ضلع هر ماژول ۳/۵ سانتیمتر و ارتفاع هر مثلث سه سانتیمتر و ارتفاع هر ماژول شش سانتیمتر و ارتفاع هر ماژول با قاب‌هایی به عرض یک سانتیمتر در دو طرف به اندازه‌ی هشت سانتیمتر خواهد بود. با توجه به اینکه ارتفاع هر اتاق حدوداً سه متر می‌باشد، در شبیه‌سازی انجام‌شده از چهار ماژول در ارتفاع و مجموع ۳/۲۰ متر با توجه به ضخامت سقف می‌توان استفاده کرد. مقیاس درنظر گرفته شده در شبیه‌سازی یک به ده می‌باشد. این اندازه‌ها با توجه به کاربری و ارتفاع فضاهای طبقات کاربری آن متغیر خواهد بود. این ماژول‌ها بسته به تنظیمات آنها سایه‌اندازی، کاهش درخشندگی و خیرگی نور خورشید را کنترل می‌کند. نحوه کارکرد آنها بدین‌گونه است که در فصل‌های



شکل۴. محیط شبیه‌سازی‌شده برای آنالیز کارکرد مدول‌های پوسته بر میزان مصرف انرژی
Fig. 4: Simulated environment for analysing the performance of shell modules on the amount of energy consumption

گرم سال با هدف کنترل گرمای خورشید و کاهش نور وارد شده به داخل، با بازنگه‌داشتن ماژول‌ها باعث ایجاد سایه می‌شوند. در زمانی‌که سطوح ماژول باز می‌باشد، لوله‌های تلسکوپی و فنر داخلی هسته کشویی باز شده و اهرم‌های نگه‌دارنده سطوح تا انتها رفته و اهرم‌ها سطوح را به بالا هل داده و تمام سطوح ماژول باز می‌شود. در حالت نیمه‌بسته فرمان از طریق سنسورها به موتورهای تعبیه شده در لبه‌های سطوح شماره یک تا سه صادر شده و لولای آنها چرخیده و این سطوح تحت زاویه‌ی خاصی به داخل بسته می‌شود. در حالت کاملاً بسته ماژول، سطح بزرگتر چهارم هم به داخل بسته می‌شود. برای مدل‌سازی ایده‌نهایی و شبیه‌سازی ماژول مورد نظر، از نرم‌افزار طراحی پارامتریک راینو و افزونه آن گرس‌هاپر استفاده شده است (Roudsari et al., 2013).

پوسته موردنظر طبق شکل ۴ بر روی نمای کاملاً شیشه‌ای در نمای جنوبی اتاقی به عرض ۶ متر و عمق ۷ متر (بر اساس مقررات ملی ساختمان عمق مفید برای دریافت نور در یک فضا هفت متر است) و ارتفاع ۳ متر (ارتفاع معمول اتاق مسکونی) قرار می‌گیرد.

علاوه بر نرم‌افزار راینو و افزونه گرس‌هاپر، از افزونه‌ی لیدی‌باگ برای واردکردن اطلاعات آب‌وهوایی و مختصات خورشیدی منطقه‌ی موردنظر و هانی‌بی و کامپوننت انرژی‌پلاس برای آنالیز نور روز و میزان مصرف انرژی استفاده شده است. دقت شبیه‌سازی انجام‌گرفته توسط نرم‌افزار و افزونه‌های ذکرشده از لحاظ شبیه‌سازی و آنالیز نور روز مطابق با استاندارد سی.آی.ای[۱۶] می‌باشد (Solvang et al., 2020).

## شهر تهران

برای شبیه‌سازی یک نمونه‌موردی، یک اتاق مسکونی در شهر تهران درنظر گرفته شده است. ارتفاع زمین تهران از سمت جنوب به شمال شهر افزایش یافته، به طوری که ارتفاع قسمت های پست شهر حدود ۹۰۰ متر و قسمت های مرتفع تا ۱۸۰۰ متر می رسد. اختلاف ارتفاع ۹۰۰ متری باعث تعدیل آب و هوا شده است (فخرالساعه و همکاران، ۱۴۰۰). در اقلیم استان تهران سه عامل جغرافیایی وجود دارد که در آب و هوای آن نقش موثری دارند: رشته‌کوه های البرز در شمال، وزش بادهای باران زای غربی و دشت کویر در جنوب استان (احمدی، ۱۳۹۰). در مناطق کوهستانی در شمال تهران آب و هوا معتدل و در دشت، نیمه‌خشک است.

میانگین دمای سالانه ایستگاه اقدسیه در ده سال اخیر ۱۶/۲۳ درجه، بالاترین دمای ثبت شده ۴۱/۸ در ماه ژوئیه و پایین ترین آن منفی ۱۳ درجه سانتیگراد در ماه ژانویه بوده است (فخرالساعه و همکاران، ۱۴۰۰). از نظر فصلی هوای تهران در زمستان در قسمت های مرکزی و جنوبی معتدل یا اندکی سرد است و در قسمت شمالی سرد یا معتدل و مرطوب می باشد. در تابستان هم هوا گرم و خشک است (زینالی و اصغری سراسکانرود، ۱۳۹۴).

میانگین بارش سالانه در ایستگاه اقدسیه در ده سال اخیر ۳۸۱/۵ میلی متر بوده است. میانگین ده ساله رطوبت نسبی بین ۲۰ تا ۷۱ درصد تغییر کرده که خشکی نسبی هوا در ماه های گرم سال را نشان می دهد. میانگین ساعات آفتابی موجود در این شهر از ۴/۷۷ ساعت در ژانویه تا ۱۰/۳۴ ساعت در ژوئن، نقش تعیین کننده تابش خورشیدی در ویژگیهای اقلیمی شهر را در بر دارد (فخرالساعه و همکاران، ۱۴۰۰).

مسیر اصلی و جهت باد غالب شهر تهران، شمال‌غرب به جنوب‌شرق است. از دیگر بادهای غالب، بادهای غربی هستند که تقریباً در تمام طول سال شهر تهران را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد و سرعت آن به‌طور متوسط ۵/۵ متر بر ثانیه است. از دیگر بادهای این شهر نسیم توچال از سمت شمال و بادهای منطقه‌ای جنوبی و جنوب‌شرقی از سمت دشت‌کویر و چاله‌های مرکزی ایران هستند. خلاصه مشخصات اقلیمی در جدول ۳ آمده است.

جدول۳. خلاصه داده‌های آب‌وهوایی (Sadegh et al., 2022)
Table 3. Summery of climate data

| پارامتر | ارزش |
|---|---|
| حداکثر دما | ۲۰ ژوئیه- ۴۰ درجه سلسیوس |
| حداقل دما | ۱۶ ژانویه- منفی ۵ درجه سلسیوس |
| حداکثر رطوبت نسبی | ۲۰ مارس، ۱۰ صبح- ۹۹ درصد |
| حداکثر رطوبت نسبی | متوسط دسامبر و ژانویه بیش از ۶۰ درصد |
| حداکثر شعاع نور | ۲۱ ژوئن، ۵ تا ۶ ساعت- ۱۰۶۹ $wh/m^2$ |
| حداکثر جهت شعاع نور | جنوب شرقی و جنوب غربی |
| حداکثر ماه‌های با شعاع نور متوسط | ژوئن-۳۶۲ $wh/m^2$ |
| حداکثر متوسط باد | ۲۵/۴ m/s – مسلط از غرب (۹ ماه) |

از نظر اداری، تهران به ۲۲ منطقه تقسیم شده است. محل موردنظر در منطقه ۲۲ و ناحیه چهار قرار دارد. با توجه به شکل ۵ این منطقه در قسمت شمال‌غربی تهران واقع شده است. این منطقه در شمال با کوهستان البرز مرکزی، در شرق با حریم رودخانه کن، در جنوب با آزادراه تهران کرج و در غرب با محدوده جنگلهای دست‌کاشت وردآورد محدود می‌گردد و به‌این‌ترتیب مرز شمالی منطقه ۲۲ شهرداری تهران تا منتهی‌الیه دامنه‌های جنوبی البرز تا ارتفاع ۱۸۰۰ متری توسعه یافته است.

در اقلیم این منطقه بهتر است ساختمان در جهت دریافت حداکثر انرژی خورشیدی در ماه‌های سرد و در جهتی که نمای آن در حوزه بی‌اثر یا نیمه‌مؤثر بادهای سرد زمستانی باشد، مستقر گردد. جهت‌گیری مناسب در کل به این معنی است که جدارهای نورگذر جنوبی، برای بهره‌برداری بیشتر از انرژی تابشی خورشید در کوتاه‌ترین روز سال، از ۹ صبح تا ۳ بعدازظهر، در معرض تابش خورشید قرار گیرد.

## یافته‌ها

میزان تاثیر پوسته‌ی متحرک تطبیق‌پذیر بر کنترل ورود نور خورشید به داخل، بر اساس شاخص‌های میزان مصرف انرژی توسط تجهیزات مکانیکی، الکتریکی، میانگین‌دما و رطوبت فضای شبیه‌سازی شده و همچنین آسایش بصری کاربران از لحاظ خیرگی نور خورشید و پارامترهای روشنایی نور روز می‌باشد. سیستم تأسیسات درنظر گرفته شده، سیستم تهویه مطبوع ترمینال بسته‌بندی‌شده[۱۷] بوده که امکان

شکل۵. محل منطقه ۲۲ در شهر تهران و بزرگنمایی آن (منبع: ابراهیمی و همکاران، ۱۳۸۹؛ حسینی و همکاران، ۱۴۰۰)
Fig. 5: The location of district 22 in Tehran and its enlargement

کنترل بیشتر و دقیق‌تر در محیط‌های اختصاصی اتاق‌های جداگانه را ایجاد می‌کند. زمان و میزان باز و بسته شدن ماژول‌ها تابعی از زاویه‌ی چرخش و شدت نور خورشید و فصل سال بوده که بر اساس داده‌های برگرفته از افزونه لیدی‌باگ بدست آمده است. دوره‌های زمانی آنالیز بصورت ماهیانه و از ساعت ۶ صبح تا ۷ بعدازظهر به‌دلیل اثر باز و بسته شدن ماژول‌های پوسته بر تابش نور خورشید انتخاب شده است. شاخص‌های بارهای حرارتی، انرژی روشنایی الکتریکی و میانگین‌های دما و رطوبت نسبی فضای مدنظر بر اساس سه حالت بدون پوسته و با پوسته باز و بسته شده و میزان تاثیر پوسته بر شاخص‌ها مقایسه و بررسی شده است. در جدول ۴ با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، میزان‌کارآیی پوسته‌ی پیشنهادی بررسی شده و شاخص‌هایی که بیشترین تأثیر را گرفتند، مشخص شده است.

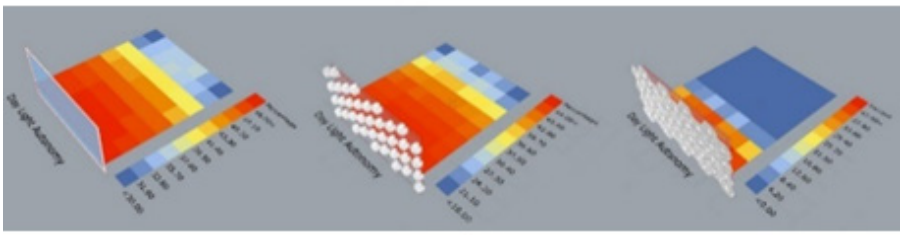
نتایج بدست آمده نشان می‌دهد قرارگیری پوسته بر روی نما بار حرارتی کل را ۲۸درصد و بار سرمایش را ۵۶ درصد کم می‌کند. از طرف دیگر اگر پوسته غیرهوشمند باشد بار گرمایش به‌دلیل ممانعت از ورود نور خورشید به‌داخل هنگام بسته‌بودن، ۷۰ درصد افزایش می‌یابد که این نقصان با باز شدن به‌موقع ماژول‌ها برطرف می‌شود. شاخص بهره انرژی خورشیدی با استفاده مناسب از پوسته تا ۹۲ درصد بهینه شده و هدررفت انرژی هم ۹ درصد کاهش می‌یابد. میانگین دمای مؤثر، تابشی و هوا به‌علت عبور نور و گرمای کمتر کاهش پیدا می‌کند که این فاکتور می‌تواند میزان استفاده از وسایل سرمایشی در فصول گرم سال را کمتر کند. رطوبت نسبی موجود در فضای شبیه‌سازی شده هم با توجه به تبخیرکمتر چهار درصد بیشتر شده است. بر اساس سیستم لید که مصرف قابل تأیید ۱۰۰کیلووات ساعت بر مترمربع می‌باشد (Fuertes et al.,2014). تنها بار سرمایش با ۶۸ کیلووات ساعت بر مترمربع در محدوده موردنظر بوده ولی بار کل هم با ۱۲۲ کیلووات ساعت بر مترمربع نزدیک محدوده می‌باشد. در مبحث روشنایی، شاخص استقلال نور روز[۱۸] با توجه به عمق نفوذ و تعداد مربع‌های شکل ۶ به داخل فضا نشان می‌دهد که در حالت پوسته غیرهوشمند تفاوت چندانی با حالت بدون پوسته نداشته در حالی‌که با استفاده از پوسته هوشمند در نما می‌توان در فصول گرم عمق نفوذ گرمای ناشی از نورخورشید به داخل فضا را کنترل کرد تا بار سرمایشی موردنیاز کاهش یابد و از طرف دیگر ورود نور در فصل سرما مدیریت شود.

تابش مستقیم سالانه نور خورشید[۱۹] که بر اساس معیارهای آسایش بصری سیستم لید باید کمتر از ۱۰٪ باشد(USGBC, 2015)، برای شبیه‌سازی بدون پوسته ۳۵٪، برای حالت پوسته غیرهوشمند ۳۲٪ و برای پوسته هوشمند موردنظر ۷/۸٪ و در محدوده مورد تأیید سیستم لید است. هم‌چنین در زمینه شاخص خیرگی، با ارزیابی پارامترهای احتمال خیرگی و شاخص خیرگی نور روز در جدول ۵ می‌توان به این

جدول ۴. بررسی میزان تأثیر پوسته بر شاخص‌های مصرف انرژی محیط شبیه‌سازی شده

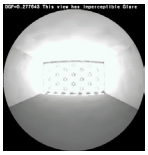
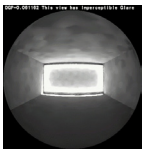
Table 4. Investigating the impact of the shell on the energy consumption indicators of the simulated environment

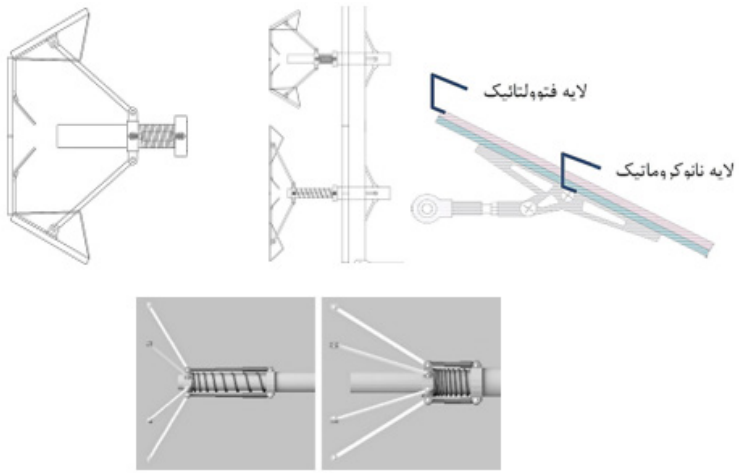
| ردیف | شاخص | بدون پوسته | مدول باز شده | میزان تاثیر |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | بار حرارتی کل ($KWh/m^2$) | ۱۷۰ | ۱۲۲ | ۲۸٪ |
| ۲ | تعادل بار حرارتی ($KWh/m^2$) | -۱۳۸ | -۱۴ | ۹۰٪ |
| ۳ | بار سرمایش ($KWh/m^2$) | ۱۵۴ | ۶۸ | ۵۶٪ |
| ۴ | بار گرمایش ($KWh/m^2$) | ۱۵ | ۵۴ | -۷۰٪ |
| ۵ | انرژی روشنایی الکتریکی ($KWh/m^2$) | ۳۴ | ۳۴ | - |
| ۶ | انرژی تجهیزات روشنایی ($KWh/m^2$) | ۲۲ | ۲۲ | - |
| ۷ | بهره انرژی خورشیدی ($KWh/m^2$) | ۳۱۷ | ۲۲/۵ | ۹۲٪ |
| ۸ | انرژی هدررفته ($KWh/m^2$) | -۴۴ | -۴۰ | ۹٪ |
| ۹ | میانگین دمای مؤثر ($^0C$) | ۲۴/۸ | ۲۲/۵ | ۹٪ |
| ۱۰ | میانگین دمای هوا ($^0C$) | ۲۳/۳۵ | ۲۲/۶ | ۳٪ |
| ۱۱ | میانگین دمای تابشی ($^0C$) | ۲۶/۲۵ | ۲۲/۴ | ۱۴٪ |
| ۱۲ | رطوبت نسبی ($^0C$) | ۲۷ | ۲۸ | ۴٪ |
| ۱۳ | حجم جریان هوای ورودی از منافذ ($m^3/s$) | ۰/۱ | ۰/۰۴ | ۶۰٪ |



شکل ۶. آنالیز شاخص استقلال نور در محیط شبیه‌سازی شده، چپ: بدون پوسته، وسط: پوسته غیرهوشمند و راست:پوسته‌هوشمند
Fig. 6: Analysis of the light independence index in the simulated environment, left: no shell, middle: non-smart shell, right: smart shell

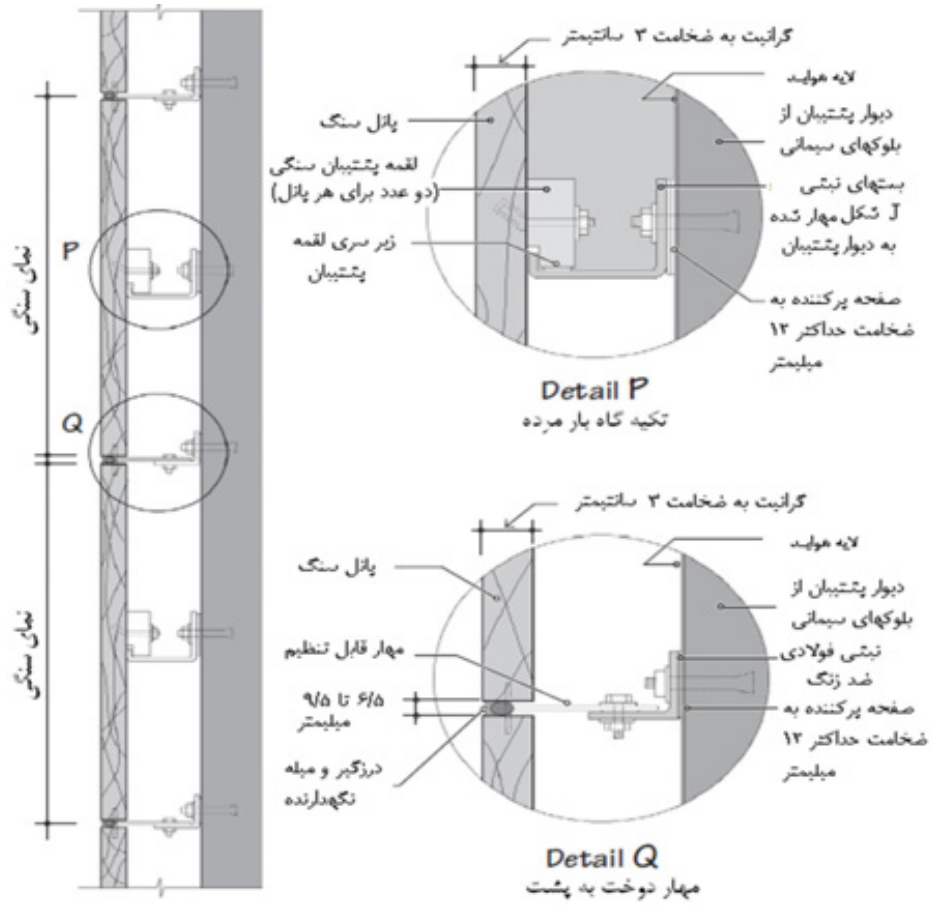
جدول۵. بررسی تأثیر پوسته متحرک بر شاخص خیرگی
Table 5. Investigating the effect of movable shell on glare index

| ردیف | شاخص | بدون پوسته | ماژول بسته شده | ماژول باز شده |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | درصد احتمال خیرگی نور روز[۲۰] | ۳۹ | ۷/۲۷ | ۶ |
| ۲ | شاخص‌خیرگی نور روز [۲۱] | ۲۳.۵ | ۶/۲۲ | حدود صفر |
| ۳ | تصویر خیرگی | |  |  |

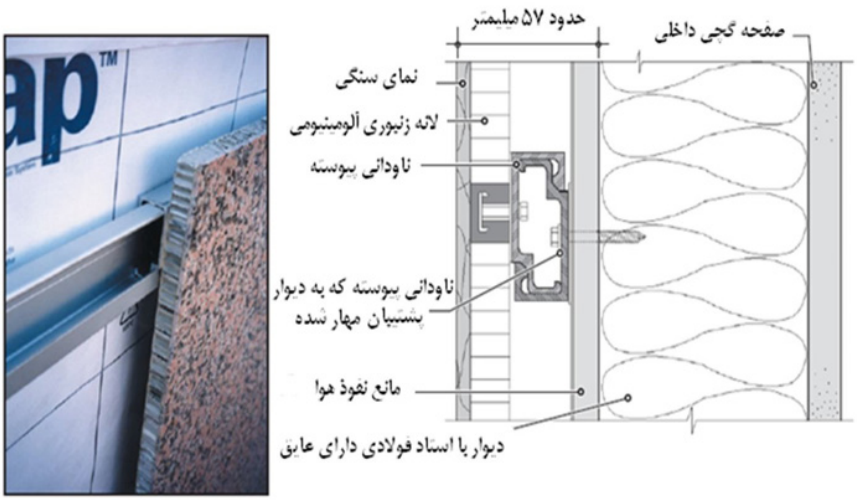



حالت‌های باز و بسته لوله‌ی تلسکوپی و فنر مابین هسته کشویی

شکل۷ . جزئیات اجرایی نمای پیشنهادی
Fig. 7: Detail of proposed facade




شکل۸. مقطعی از یک دسته از نماهای سنگی (امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه‌و بودجه کشور، ۱۳۹۵، ۸۴)
Fig.8: A section of a group of stone facades




شکل۹. روش‌معمول برای پنل‌های سنگی- لانه‌زنبوری و مهار آن (امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه‌و بودجه کشور، ۱۳۹۵، ۱۰۳)
Fig. 9: The usual method for stone-honeycomb panels and its bracing

نتیجه رسید که خیرگی با وجود پوسته متحرک به میزان قابل‌توجهی کاسته می‌شود بطوریکه احتمال خیرگی ۲۳درصد و شاخص خیرگی به حدود صفر کاهش پیدا می‌کند. در تصاویر جدول ۵ کاهش میزان خیرگی نور روز در روز اول ماه ژوئیه (اواسط ماه تیر تا اواسط ماه مرداد) در ساعت ۱۲ ظهر یک‌روز آفتابی در سه حالت بدون پوسته، با پوسته باز و بسته قابل‌مشاهده است.

حال جزئیات اجرایی ماژول پیشنهادشده در شکل ۷ ارائه می‌گردد.

مقایسه نمای تطبیق‌پذیر هوشمند با دو دسته از نماهای سنگی، طبق شکل‌های ۷-۹ تغییر و پویایی آن را متناسب با شرایط اقلیمی و بهره‌مندی از آن به قدر لازم، بر اساس توضیحات بخش یافته‌ها، و ثبات و ایستابودن دو دسته نماهای سنگی را نشان می‌دهد.

## نتیجه‌گیری

بیشتر پوسته‌های هوشمند متحرک بر مبنای اشکال ماژولار مبتنی بر شبکه شکل گرفته‌اند. در این پژوهش سعی شد با تمرکز بر روی پوسته ساختمان، با الهام از مدل سازگاری موجودات‌زنده بخصوص گیاهان و راه‌کارهایی که در مقابل گرما و نور خورشید دارند، بتوان با کنترل متغیرهای محیطی، مصرف انرژی در داخل ساختمان را کاهش داد. در این تحقیق تلاش گردید که با روند مسئله به راه حل و با نگاه به طبیعت، ماژولی طراحی شود که از نظر فرم، عملکرد و مکانیسم واکنش در برابر متغیرهای محیطی مانند تغییرات نور روز، شبیه عملکرد پونه‌کوهی اکسالیس باشد. این پوسته دارای ویژگی‌هایی از قبیل ماژولار بودن و خاصیت تکرارشوندگی، امکان تغییر زاویه سطوح با توجه به متغیرهای محیطی و ایجاد یک نقطه کانون بصری به‌دلیل استفاده از نقوش هندسی حاصل از چیدمان ماژول‌ها می‌باشد.

با بررسی تأثیر پوسته متحرک بر شاخص‌های ذکر شده می‌توان به این نتیجه رسید که بیشترین کاهش مصرف انرژی و تأثیرگذاری مربوط به شاخص‌های بار سرمایشی و شاخص بهره انرژی خورشیدی می‌باشد. از طرف دیگر با کاهش شاخص‌خیرگی‌چشم توسط نور روز، آسایش بصری فضا ارتقاء می‌یابد. چالش مهم در این زمینه، مسدود شدن دید کاربران به بیرون می‌باشد که می‌توان مصالح بدنه‌ی ماژول‌ها را شفاف انتخاب کرد به‌نحوی که انرژی الکتریکی مورد نیاز برای حرکت ماژول‌ها را از بدنه خود تولید کند. لذا مصالح پیشنهادی بدنه ماژول «سلول فتوولتائیک شفاف» می‌باشد. این مصالح، در اصل نسخه شفاف‌شده سلول‌های فتوولتائیک مرسوم است که طیف نور مرئی را عبور داده ولی طیف‌های فرابنفش و مادون‌قرمز را جذب و استفاده می‌کند. سلول‌های فتوولتائیک شفاف مبتنی بر اکسیدفلز بوده که از یک لایه‌ی فوق‌العاده نازک سیلیکون بین دو نیمه‌هادی اکسیدفلز شفاف یعنی اکسیدروی و اکسیدنیکل با هدف ایجاد یک سلول خورشیدی کارآمد تشکیل شده است.

## پی‌نوشت‌ها

1.Energy Plus

2.Machine Learning

3.Eppy

4.Grasshopper

5.Rhino

6.Ladybug

7.Honeybee

8.PTFE (poly tetra fluoro ethylene)

9.Daysim

10.Diva

11.IES VE

12.Biomimecry

13.Oxalidaceae

14.Oxalis

15.Redwood Sorrel

16.CIE-CIE171:2006 مخفف Commission International de l'Eclairage بوده و مربوط به کشور اتریش با همکاری کشورهای جهان می‌باشد.

17. PTAC (Packaged Terminal Air Conditioner)

18. DLA (Daylight Autonomy)

19. ASE ( Annual Sun Exposure)

20. DGP (Daylight Glare Probability)

21. DGI (Daylight Glare Index)

## نقش نویسندگان

نگارش اولیه و انجام اصلاحات مقاله، تهیه مدارک لازم برای نشریه توسط حسین مهیاری انجام گرفته است. افسانه زرکش با بررسی و راهنمایی مقاله، و انجام اصلاحات نشریه و محمدجواد مهدوی‌نژاد نیز با بررسی و راهنمایی مقاله، در انجام آن یاری نمودند.

## تقدیر و تشکر

این پژوهش منتج از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد با عنوان طراحی پوسته

هوشمند با رویکرد انرژی کم و الهام از طبیعت، نمونه: طراحی یک بیمارستان است و با حمایت دانشکده هنر دانشگاه تربیت‌مدرس انجام گرفته است. از همکاری دانشکده در این راستا تشکر می‌شود.

## تعارض منافع نویسندگان

نویسندگان بطور کامل از اخلاق نشر تبعیت کرده و از هرگونه سرقت‌ادبی، سوءرفتار، جعل‌داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافعی تجاری در این راستا وجود ندارد و نویسندگان در قبال ارائه اثر خود وجهی دریافت ننموده‌اند.

## فهرست مراجع


۱. ابراهیمی, آرام, توکلی, مرتضی, افتخاری, عبدالرضا رکن الدین. (۱۳۹۸). تحلیل فضایی زیرساخت های سبز با استفاده از اصول آمایش سرزمین (مطالعه موردی: منطقه ۲۲ تهران). *جغرافیای اجتماعی شهری*, ۶(۲), ۲۵۳-۲۳۵.

۲. احمدی، محمود. (۱۳۹۰). تحلیل آسایش انسان از نظر عوامل اقلیمی در استان تهران. *جغرافیا*، ۹(۲۹)، ۸۱-۶۱.

۳. اربابیان، همایون. (۱۳۸۰). بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان. *سومین همایش ملی انرژی*. اردیبهشت ۱۱. تهران: کمیته ملی انرژی جمهوری اسلامی ایران، معاونت برق و انرژی وزارت نیرو.

۴. امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور. (۱۳۹۵). *دستورالعمل طراحی سازه ای و الزامات و ضوابط عملکردی و اجرایی نمای خارجی ساختمان‌ها* (ضابطه شماره ۷۱۴). تهران: وزارت راه و شهرسازی، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

۵. امیر هدایی، الناز. (۱۳۹۲). مروری بر مفهوم و عملکرد نمای هوشمند. *معماری و فرهنگ*، ۱۴(۵۱)، ۳۶-۳۲.

۶. پرهیزگار، ترنم؛ جعفریان، هامون؛ کیالاشکی، یاسر؛ و سبوحی، یدالله. (۱۳۹۱). طراحی بهینه سایبان خورشیدی متحرک به‌همراه تولید برق و اثر آن روی جریان انرژی یک اتاق اداری مشخص. *انرژی ایران*، ۱۵(۱)، ۹۶-۸۱.

۷. ترابی، فاطمه. (۱۳۹۰). رابطه متقابل پوسته‌های هوشمند و کاهش انرژی در ساختمان. *همایش‌ملی عمران. معماری، شهرسازی و مدیریت انرژی*. بهمن ۱۲. اردستان: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردستان.

۸. ثروت جو، حمید؛ و ارمغان، مهتاب. (۱۳۹۰). نمای دو پوسته، هوشمندی و پایداری، مدیریت انرژی. *همایش‌ملی عمران. معماری، شهرسازی و مدیریت انرژی*. بهمن ۱۲. اردستان: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردستان.

۹. حسینی، سید زین‌العابدین؛ صالحی، اسماعیل؛ و ایرانی‌بهبهانی، هما. (۱۴۰۰). سنجش شاخص‌های برگزیده در روند توسعه‌شهری در منطقه ۲۲ شهر تهران. *برنامه‌ریزی توسعه شهری و منطقه‌ای*، ۶(۱۶)، ۱۵۰-۱۰۹.

۱۰. خردمند، صبا؛ و ستاری ساربانقلی، حسن. (۱۳۹۷). معماری از طبیعت پیروی می‌کند. *جغرافیایی سرزمین*، ۱۵(۵۷)، ۶۹- ۸۷.

۱۱. رزازی، سمیرا؛ و مظفری، فاطمه. (بهمن ۱۳۹۶). پوسته‌های سازگار و انطباق‌پذیر ساختمان با الگوپذیری از گیاهان در طبیعت. *معماری سبز*، ۳(۱۱)، ۸۷-۶۷.

۱۲ رستم زاد، سحر؛ فیضی، محسن؛ صنایعیان، هانیه؛ و خاکزند، مهدی. (۱۴۰۰). طراحی پارامتریک نمای متحرک با هدف ارتقاء بهره‌وری روشنایی و آسایش بصری بررسی موردی: ساختمان‌های اداری تهران. *نامه معماری و شهرسازی*, ۱۳(۳۱), ۱۰۰-۸۵.

۱۳. زینالی، بتول؛ و اصغری سراسکانرود، صیاد. (۱۳۹۴). مطالعه تاثیرات اقلیمی توسعه شهری در شهرستان تهران. *علوم جغرافیایی*، ۱۱(۲۲)، ۵۸-۶۹.

۱۴. ژاردن، لوسین (۱۳۷۹). *بیونیک: تکنولوژی از جانداران الهام می‌گیرد* (ویرایش ۳). (محمد بهزاد و پرویز قوامی، مترجمان). تهران: سروش.

۱۵. علیدادی پور، آذر؛ و خوشکلام خسروشاهی، موسی. (۱۴۰۰). بهبود کارایی مصرف برق خانگی و اثر بازگشتی آن در ایان با لحاظ عدم تقارن در قیمت برق. *فصلنامه علمی مدلسازی اقتصادی*، ۱۵(۵۴), ۶۶-۴۷.

۱۶. فخرالساعه، فاطمه؛ طاهباز، منصوره؛ دیواندری، جواد؛ و صنایعیان، هانیه. (۱۴۰۰). تاثیر آب و گیاه در عملکرد اقلیمی نورگیرهای داخلی ساختمان بررسی موردی: ساختمان مسکونی واقع در شهر تهران. *نامه معماری و شهرسازی*، ۱۴(۳۳)، ۱۲۶-۱۰۹.

۱۷. مرکز ملی خشکسالی و مدیریت بحران. (۱۳۹۹). *سالنامه مرکز ملی اقلیم و مدیریت بحران خشک‌سالی*. تهران، وزارت راه و شهرسازی، سازمان هواشناسی کشور.

۱۸. منصوریان، علیرضا. (۱۳۸۸). بررسی وضعیت آموزشی مهندسی‌خلاقیت بیونیکی. *آموزش مهندسی ایران*، ۱۱(۴۱)، ۹۱-۶۹.

19. Abdel-Rahman, W. S. M. (2021). Thermal performance optimization of parametric building envelope based on bio-mimetic inspiration. *Ain Shams Engineering,* 12(1), 1133-1142.

20. Abd El-Rahman, S. M., Es mail, S. I., Khalil, H. B., & El-Razaz, Z. (2020). Biomimicry inspired adaptive building envelope in hot climate. *Engineering Research,* 166(0), 30-47.

21. Badarnah Kadri, L. (2012). *Toward the Living Envelope: Biomimetics for building envelope adaptation.* Unpublished master's thesis, University of Delft, Delft.

22. Bui, D. K. (2020). *Improving building energy efficiency:*

*Biomimetic adaptive façade and computational data-driven approach, Unpublished Doctoral dissertation,* University of Melbourn, Melbourn.

23. Elasfouri, AS., Maraqa, R., & Tabbalat, R. (1991). Shading control by neighbouring building: application to building in Amman, Jordan. *Refrigeration,* 14(2), 112-116.

24. Fuertes, G. & Schiavon, S. (2014). Plug load energy analysis: The role of plug loads in LEED certification and energy modeling. *Energy and Buildings,* 76, 328-335.

25. Haase, M., & Amato, A. (2006). Performance Evaluation of three different façade Models for Sustainable Office Building. *Green Building,* 1(4), 89-103.

26. Hagan, S. (2001). *Taking Shape: A New Contract between Architecture and Nature.* (1-240) . The Architectural Press, Routledge, London.

27. Hwang, J., Jeong, Y., Park, J. M., & Lee, K. H. (2015). Biomimetics: Forecasting the future of science, engineering and medicine. *Nanomedicine,* 10(1), 5701-5713.

28. Inkarojrit, V. (2007). Multivariate Predictive window blind control models for intelligent building facade systems. *Proceedings Building Simulation conference,* September 3-6, (pp.787-794). Beijing: China.

29. Johnsen, K., & Winther, F. V. (2015). Dynamic Facades, the Smart Way of Meeting the Energy Requirements. *Energy Procedia,* 78, 1568-1573.

30. Kensek, K., & Hansanuwat, R. (2011). Environment Control Systems for sustainable design: A Methodology for Testing, Simulating and Comparing Kinetic Facade Systems. *Creative Sustainable Architecture & Built Environment,* 1, 27-46.

31. Klinkenberg, Brian. (2020). E-Flora BC: Electronic Atlas of the Plants of British Columbia- Oxalis oregana Nutt. Lab for Advanced Spatial Analysis, Department of Geography, University of British Columbia, Vancouver. Retrieved October 10, from https://linnet.geog.ubc.ca/Atlas/Atlas.aspx?sciname=Oxalis%20oregana

32. Kuru, A., Oldfield, Ph., Bonser, S., & Fiorito, F. (2019). Biomimetic adaptive building skins: Energy and environmental regulation in buildings. *Energy and Buildings,* 205, 5-26.

33. Nakhle, C. (2019, February 13), Global Outlook: Market forces move developments in energy. Retrieved April 11, 2020, from https://www.crystolenergy.com/2019-global-outlook-market-forces-move-developments-in-energy/

34. Pacheco, R., Ordonez, G., & Martinez, G. (2012). Energy Efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Review,* 16, 3559-3573.

35. Roudsari, S., Pak, M., Smith, A., & Gill, G. (2013). Ladybug: A Parametric Environmental Plugin for Grasshopper to Help Designers Create an Environmentally-Conscious Design. *In Proceedings of the 13th international IBPSA conference held in Lyon,* Aug 26-28, (pp. 3128-3135). Lyon: France.

36. Sadegh, S. Q. (2022). Development of two-step biomimetic design and evaluation framework for performance-oriented design of multi-functional adaptive building envelopes. *Daylighting*, 9(1), 13-27.

37. Sheikh, W. T., & Asghar, Q. (2019). Adaptive biomimetic facades: Enhancing energy efficiency of highly glazed buildings. *Frontiers of Architectural Research,* 8(3), 2095-2635.

38. Solvang, H., Kristiansen, T., Bottheim, R. M., & Kampel. W. (2020). Comparison and development of daylight simulation software – A case study. *In E3S Web of Conferences* (Vol. 172, p. 19001). Oslo: Multiconsult Norway AS, Department of Building Physics and Energy.

39. Suralkar, R. (2011). Solar Responsive Kinetic Façade Shading Systems inspired by plant movement in nature. People and Building, *In Proceedings of Conference: People and Buildings held at the offices of Arup UK*, 23rd. (pp.106-123).

40. Tabadkani, A., Roetzel, A., Xian Li, H., & Tsangrassoulis, A. (2021). Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. *Automation in Construction,* 121, 11-23.

41. USGBC. (2015). Leadership in Energy and Environmental Design (LEED). U.S: Green Building Council.

42. Wigginton, M., & Harris, J. (2002). *Intelligent skin*. (193-225). Oxford: Architectural Press.

43. Xinyue, F., Jiadong, L., & Ziyuan, W. (2020/2021). B*ionic adaptive façade design.*Unpublished master's thesis, University of Politecnico, Milano.

44. Yeler, G., & Yeler, S. (2017). Models from nature for innovative building skins. *Engineering and Science* ,3(2), 142-165.

**COPYRIGHTS**

©2022 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.