دوفصل‌نامه علمی معماری و شهرسازی
۱۴۰۲ ۳ ۱

طراحی سایبان متحرک در جهت کنترل نور روز در اقلیم گرم و نیمه‌خشک (با الهام از الگوی حرکتی گیاه گوشت‌خوار)

زهرا یارمحمودی[۱]، طاهره نصر[۲]*، حامد مضطرزاده[۳]

[۱] پژوهشگر دکتری، گروه معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.
[۲] دانشیار، گروه معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران. (نویسنده مسئول).
[۳] استادیار، گروه معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۲ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶

چکیده

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، ساخت بناهای پایدار و سبز مورد اهمیت قرار گرفته و به‌دنبال آن مفاهیم جدیدی از ساختمان‌های هوشمند مطرح شده است. درحقیقت معماری که براساس پارامترهای ثابت طراحی می‌شود، به عوامل خارجی واکنش نشان نمی‌دهد. بنابراین برای رسیدن به یک معماری پاسخگو، این پارامترها باید قابل تغییر باشند. ساختمان‌های غیرهوشمند قابلیت تغییر با مسیر حرکت خورشید، تغییرات باد و غیره نداشته و همین امر موجب ایجاد جدایی بین ساختمان و محیط پیرامون می‌شود. بنابراین امروزه به ساختمان‌هایی نیاز است که با استفاده از اطلاعاتی که به بنا داده می‌شود، بیاموزند، انطباق‌پذیر باشند. در این راستا، طبیعت که یکی از بهترین سیستم‌های پاسخگو را دارا است، می‌تواند الگوی مناسبی در جهت ارائه راهکار برای حل این مسئله باشد. باتوجه به اینکه نمای ساختمان به‌عنوان عامل ارتباطی فضای داخل و خارج ساختمان است، هدف از انجام پژوهش حاضر، ارائه مدل سایبان متحرک، سازگار با اقلیم شیراز (گرم و نیمه‌خشک) در جهت کنترل انرژی تابشی و نور روز جداره شفاف جنوبی ساختمان است. گیاه گوشت‌خوار به‌عنوان منبع الهام این پژوهش انتخاب شده و الگوی حرکتی منحصربه‌فرد گیاه در پژوهش حاضر مورد تحلیل قرار گرفته است.روش تحقیق دارای ماهیت ترکیبی (کمی-کیفی) و به‌صورت مدلسازی-شبیه‌سازی است. به این صورت که پوسته متحرک در نرم‌افزار راینو۶ و افزونه گرس‌هاپر مدل شده و توسط افزونه لیدی‌باگ آنالیزهای انرژی تابشی ناشی از برخورد نور خورشید به سطح جداره شفاف بنا در جبهه جنوبی ساختمان (اقلیم شیراز) و توسط افزونه هانی‌بی آنالیزهای میزان دریافت نور روز توسط سطح تعریف شده در کف بنا بدست آمده است. نتایج حاصله حاکی از آن است که سایبان متحرک الهام گرفته شده از الگوی حرکتی گیاه گوشت‌خوار، پویا و انطباق‌پذیر بوده و قابلیت کنترل انرژی تابشی وکاهش ورود نور روز تا ۳۰درصد را در فصول گرم سال دارا است.

واژگان کلیدی: سایبان متحرک، اقلیم شیراز، انرژی تابشی، نور روز، گیاه گوشت‌خوار، معماری بیونیک.

* نویسنده مسئول: E-mail: Tahereh.nasr@iau.ac.ir

این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول با عنوان «انطباق الگوریتم حرکتی گیاهان در راستای هوشمندسازی اقلیمی نمای ساختمان» به راهنمایی نگارنده دوم و مشاوره نگارنده سوم در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز انجام شده است.

مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی در عصر حاضر، اتلاف انرژی و از بین رفتن انرژی‌های تجدیدپذیر رو به افزایش است. به همین دلیل امروزه طراحان به‌دنبال ارائه راه‌حل برای این مسئله هستند (نوروزیان، ۱۳۹۵). باتوجه به اینکه نمای ساختمان که در اکثر مواقع به‌صورت شفاف است، مرز بین درون و بیرون ساختمان را تشکیل می‌دهد، به‌همین دلیل، طراحی مناسب آن می‌تواند در کاهش مصرف انرژی ساختمان بسیار مطلوب عمل کند (Attia et al., 2018). به جز مصالح، ابعاد بازشو و غیره، کنترل انرژی تابشی و نور روز هم خود عامل موثری در رسیدن به اهداف حاضر است. زیرا خورشید پیوسته در حال حرکت است و با تغییر فصل، زاویه حرکت خورشید نیز تغییر می‌کند، به همین دلیل نمای ساختمان باید هوشمند و متحرک طراحی شود تا بتواند متناسب با حرکت خورشید انعطاف داشته و کنترل انرژی تابشی و نور روز را در فصول گرم سال به‌همراه داشته باشد.

مطالعات نشان می‌دهند که بیشتر سازه‌های پایدار که الگوی باز و بسته شونده دارند از مکانیزم‌های طبیعی الگو گرفته‌اند، مانند انسان، گیاهان و جانوران (Mashayekh Faridani, 2013). باتوجه به اینکه گیاهان ثابت هستند و با محدودیتی که دارند (نفوذ ریشه گیاه در خاک) باید نسبت به محیط اطرافشان واکنش نشان دهند، به‌همین دلیل، رفتاری مشابه ساختمان دارند (Lopez et al., 2015) و می‌توانند الگوی مناسب‌تری جهت ایده‌پردازی باشند. در پژوهش حاضر نیز الگوی حرکتی گیاه گوشت‌خوار، به‌عنوان منبع الهام سایبان متحرک انتخاب شده و هدف از انجام پژوهش حاضر، طراحی سایبان متحرک سازگار با اقلیم شیراز (گرم و نیمه‌خشک) در راستای کنترل انرژی تابشی و نور روز است. لازم به ذکر است که این پژوهش درصدد پاسخ به سوالات زیر است:

- **سوال عام:** رفتار باز و بسته شونده‌ی گیاه گوشت‌خوار در مقابل محیط پیرامون خود چگونه است؟
- **سوال خاص:** آیا سایبان نمای الهام گرفته شده از الگوی حرکتی گیاه گوشت‌خوار می‌تواند متناسب با اقلیم شیراز (گرم و نیمه‌خشک) در جهت کنترل انرژی تابشی و نور روز عمل کند؟

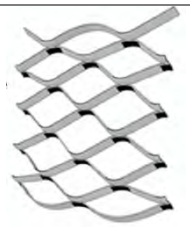
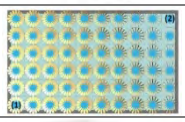
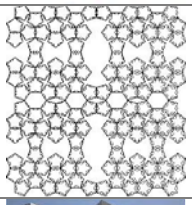
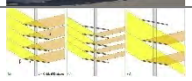
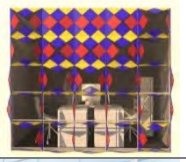
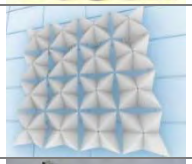
علاوه‌برآن، این پژوهش برمبنای فرضیه‌های زیر مورد تحلیل قرار گرفته است:

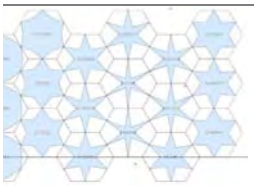
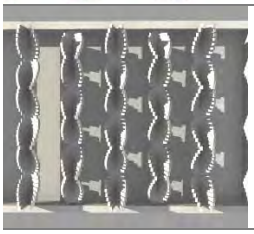
- به نظر می‌رسد که با مشاهده و بهره‌گیری از پژوهش‌های صورت گرفته توسط بایولوژیست‌ها، در زمینه مکانیزم حرکتی گیاه گوشت‌خوار، می‌توان الگوی رفتار حرکتی گیاه را بدست آورد.
- به نظر می‌رسد که مدل‌سازی سایبان متحرک براساس الگوریتم حرکتی گیاه گوشت‌خوار به‌دلیل قابلیت انطباق با مسیر حرکتی خورشید، می‌تواند الگوی مطلوب و سازگار با اقلیم شیراز (گرم و نیمه‌خشک) در جهت کنترل انرژی تابشی و نور روز باشد.

پیشینه پژوهش

جلوگیری از اتلاف انرژی، امروزه برای معماران و طراحان یک مسئله مهم محسوب می‌شود که یکی از راه‌حل‌های مناسب جهت حل این مشکل، بهره‌گیری از سایبان هوشمند در طراحی نمای ساختمان است که متناسب با مسیر و زاویه‌ی حرکت خورشید، با تغییر فصل تنظیم شود. این رویکرد به نوعی، معماری انطباق‌پذیر نیز نام دارد (Moulaii et al., 2016) و (Rahbar et al., 2019). بنابراین پژوهش‌های زیادی در این حیطه صورت گرفته که در ادامه، بخشی از پژوهش‌ها، مربوط به ده سال اخیر در زمینه رویکرد و ابزار تحلیل تحقیق حاضر در جدول۱، مطرح شده است.

جدول۱. پیشینه‌ی پژوهش برمبنای رویکرد و ابزار تحلیل تحقیق حاضر (نگارندگان)

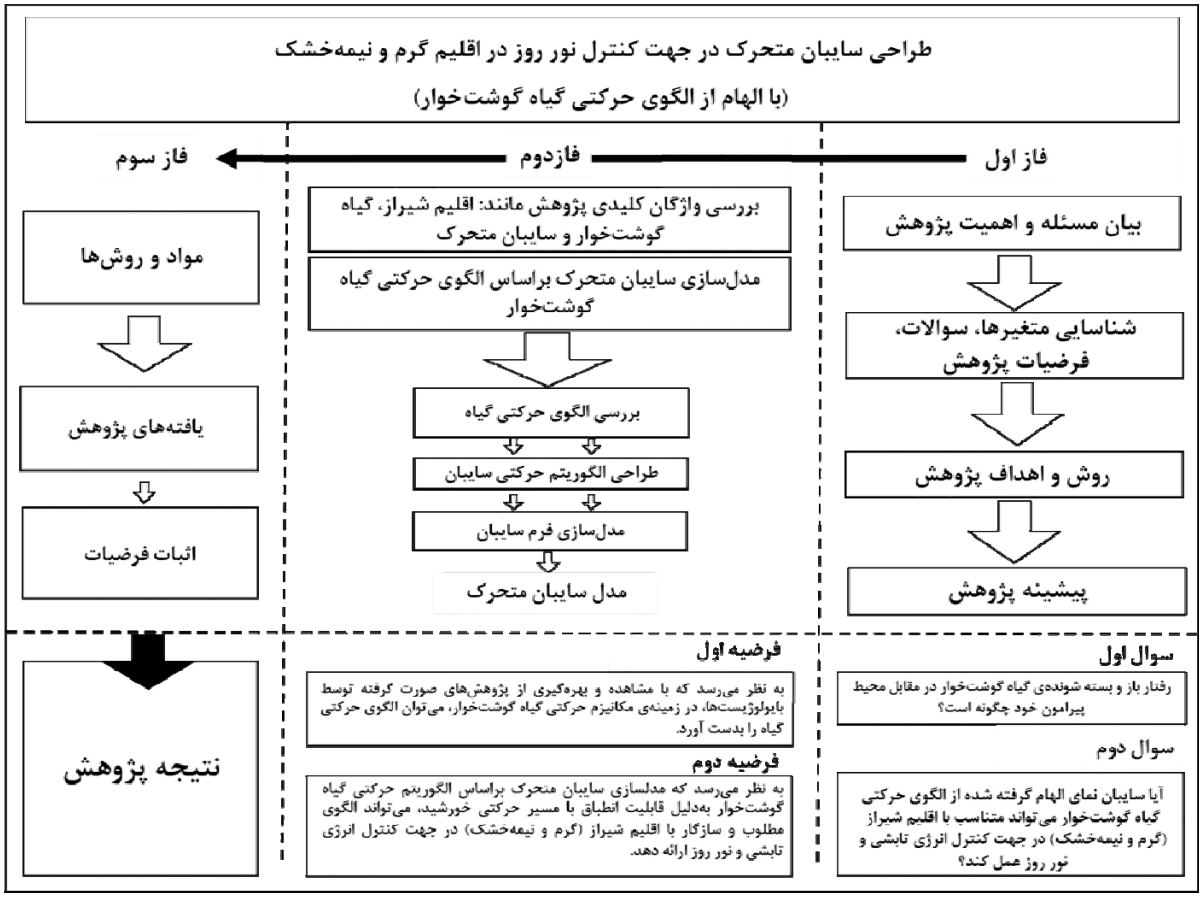
منبع	طرح	رویکرد	نرم افزار	اقلیم/کشور/شهر	پوسته
(Yi et al., 2018)	سایبان متحرک	کنترل نور روز	گرس هاپر و انرژی پلاس	آمریکا	
(Tabadkani et al., 2018)	پوسته انعطاف‌پذیر	آسایش بصری و کنترل نور روز	گرس هاپر و دیوا	ایران/تهران	
(Tabadkani et al., 2019)	نمای انعطاف‌پذیر	آسایش بصری	گرس هاپر و افزونه لیدی‌باگ	ایران/تهران	
(Fazeli et al., 2019)	سایبان متحرک	آسایش بصری	گرس هاپر و افزونه لیدی‌باگ	ایران/تهران	
(Hosseini, Mohammadi, & Guerra-Santin, 2019)	نمای متحرک	آسایش بصری و کنترل نور روز	گرس هاپر و دیوا	ایران/یزد	
(Samadi et al., 2020)	سایبان متحرک خودکار	کنترل نور روز	گرس هاپر و افزونه لیدی‌باگ	ایران/تهران	
(Hosseini et al., 2020)	پوسته متحرک با شیشه‌های رنگی	کنترل نور روز	گرس هاپر و دیوا	ایران/یزد	
(Yi et al., 2020)	سایبان متحرک با متریال آلیاژ حافظه‌دار	سازگاری با اقلیم	گرس هاپر، دیوا و انرژی پلاس	آمریکا	
(Kirkegaard & Foged, 2011)	پوسته متحرک	معماری انعطاف‌پذیر	گرس هاپر	-	
(Pesenti et al., 2015)	پوسته اوریگامی[1]	آسایش بصری و بهینه‌سازی مصرف انرژی	گرس هاپر و انرژی پلاس	ایتالیا	
(Mahmoud & Elghazi, 2016)	پوسته شش ضلعی	کنترل نور روز	گرس هاپر	مصر/قاهره	

(Rahbar et al., 2019)	پوسته متحرک الهام گرفته شده از هندسه پالکانه	کنترل نور روز	گرس هاپر و اکوتکت	ایران/تهران	
نصر و همکاران، ۱۳۹۹	پوسته متحرک الهام گرفته شده از مکانیزم حرکتی گیاه قهرو آشتی	بهینه‌سازی مصرف انرژی	گرس هاپر و افزونه لیدی‌باگ	ایران/شیراز	

همانطور که اشاره شده است تاکنون مدل سایبان متحرک با الهام از گیاه گوشت‌خوار سازگار با اقلیم شیراز در جهت کنترل انرژی تابشی و نور روز، طراحی نشده است؛ بنابراین، پژوهش حاضر از نظر موضوع و متغیرهای تحقیق کاملا نوآورانه است. علاوه برآن، از جدول۱، می‌توان نتیجه گرفت که برای طراحی پارامتریک و تحلیل انرژی تابشی نمای ساختمان به‌طور معمول از افزونه گرس‌هاپر و لیدی‌باگ استفاده شده است. همین امر نشان دهنده اعتبار روش تحلیل داده‌های پژوهش حاضر می باشد.

روش تحقیق

روش پژوهش حاضر دارای ماهیت ترکیبی (کمی-کیفی) است؛ زیرا در بخش مبانی‌نظری روش پژوهش توصیفی-تحلیلی است و ماهیت کیفی دارد. ابزار گردآوری اطلاعات در بخش مبانی‌نظری، کتابخانه‌ای و اسنادی است. روش پژوهش در بخش یافته‌های تحقیق مدل‌سازی-شبیه‌سازی است که دارای ماهیت ترکیبی است. به این صورت که پس از بررسی الگوی حرکتی گیاه گوشت‌خوار، در نرم‌افزار راینو۶ و افزونه گرس‌هاپر، سایبان متحرک براساس الگوی حرکتی گیاه گوشت‌خوار بر روی نمای جنوبی ساختمان طراحی شده و توسط پلاگین لیدی‌باگ در محیط گرس‌هاپر، آنالیزهای انرژی تابشی با تغییر زاویه پنل‌های سایبان بر روی سطح شفاف نمای جنوبی ساختمان در اقلیم گرم و نیمه‌خشک شیراز بدست آمده است. علاوه‌برآن، آنالیز میزان کنترل ورود نور روز به فضای داخلی ساختمان به درصد توسط پلاگین هانی‌بی و براساس داده‌های اقلیمی شیراز انجام شده و در بخش مواد و روش‌ها به‌طور مفصل توضیح داده شده است. در ادامه تصویر۱، نشان‌دهنده فرآیند تحقیق است که برای رسیدن به نتیجه تحقیق به سه فاز تقسیم شده است.



تصویر۱. ساختار پژوهش (نگارندگان)

مبانی‌نظری

برای اثبات فرضیه‌های پژوهش و پاسخ به سوالات تحقیق، باید در بخش مبانی‌نظری، واژگان کلیدی مانند: معماری بیونیک، اقلیم شیراز، سایبان متحرک و گیاه گوشت‌خوار مورد تحلیل قرار گیرد. سپس براساس اطلاعات اولیه می‌توان به بخش یافته‌های پژوهش رسید.

معماری بیونیک

اصطلاح بیونیک[۲] به معنای تقلید (نه کپی کردن) است و از کلمه‌ی یونانی Bio به معنای زندگی می‌آید (Hosseini et al., 2019). در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از الگوهای موجود در طبیعت، به‌عنوان یکی از ساختارهای سازگار و انطباق‌پذیر بسیار تاثیرگذار بوده است (Korner et al., 2016). بنابراین، باتوجه به اهمیت این موضوع و مرتبط بودن با رویکرد پژوهش حاضر در ادامه به‌طور مختصر مراحل انتقال قوانین طبیعت به طرح بررسی شده است.

در طبیعت بی‌شمار منبع الهام تغییرپذیر وجود دارند که این تغییرات گاهی درونی و وابسته به خود موجود زنده است و گاهی این تغییرات بر اثر عوامل خارجی ایجاد می‌شوند، مانند: تغییرات فرمی براثر نیرو، گرما، رطوبت و غیره (López et al., 2017). هر دو مدل از این تغییرات می‌تواند به‌عنوان منبع الهام طرح انتخاب شوند. با این وجود باتوجه به اینکه در پژوهش حاضر، طراحی سایبان نما مدنظر می‌باشد و نمای ساختمان با محیط پیرامون در تعامل

است، بنابراین تغییرات فرمی به‌صورت باز و بسته شونده براثر عوامل خارجی به‌عنوان منبع الهام انتخاب شده است. پس از انتخاب منبع الهام، نیاز است که به روشی علمی فرآیند الگوبرداری طی شود. پروفسور توماس اشپک[۳]، از دانشگاه فرایبورگ ساختار کلی جهت الگوبرداری از طبیعت ارائه دادند که در ادامه مطرح شده است (تقی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸).

- **فرآیند پایین به بالا:** این مرحله برپایه مطالعات بایولوژیست‌ها آغاز می‌شود. پس از آن به ترتیب: تجزیه و تحلیل کمی جهت درک گسترده‌تر و یافتن اصول پنهان ساختارهای بایولوژیکی، انتزاعی کردن اصول (مهم‌ترین بخش، زیرا قرار است، توسط فردی غیربایولوژیست درک شود) و در نهایت مسائل اجرایی در مقیاس آزمایشگاهی و پس از آن در مقیاس مهندسی انجام گرفته که نتیجه آن تولید یک محصول بیونیکی است.
- **فرآیند بالا به پایین:** در این مرحله، براساس دغدغه و مسائل موجود مهندسی، سوالی جهت رسیدن به راه‌حل، مطرح می‌شود. بنابراین این مرحله برای رسیدن به الگوی مطلوب نیاز به همکاری مهندسین و بایولوژیست‌ها دارد. پس از انتخاب موضوع، انتزاعی نمودن مطرح می‌شود و در نهایت، آزمایش محصول توسط مهندسین، اجرایی ساختن و وارد کردن محصول به مرحله تولید قرار دارد. بنابراین این ساختار نیازمند آزمایش و تحقیق بیشتر است و گاهی بهتر است از منابعی که اطلاعات بیشتری از آن موجود است، بهره گرفته شود (Schleicher et al., 2011).

الگوبرداری از طبیعت خود به سه دسته تقسیم می‌شود که مراحل رسیدن به هر کدام از طرح‌ها متناسب با ساختار بالا می‌باشد. در ادامه مراحل الگوبرداری مطرح شده است:

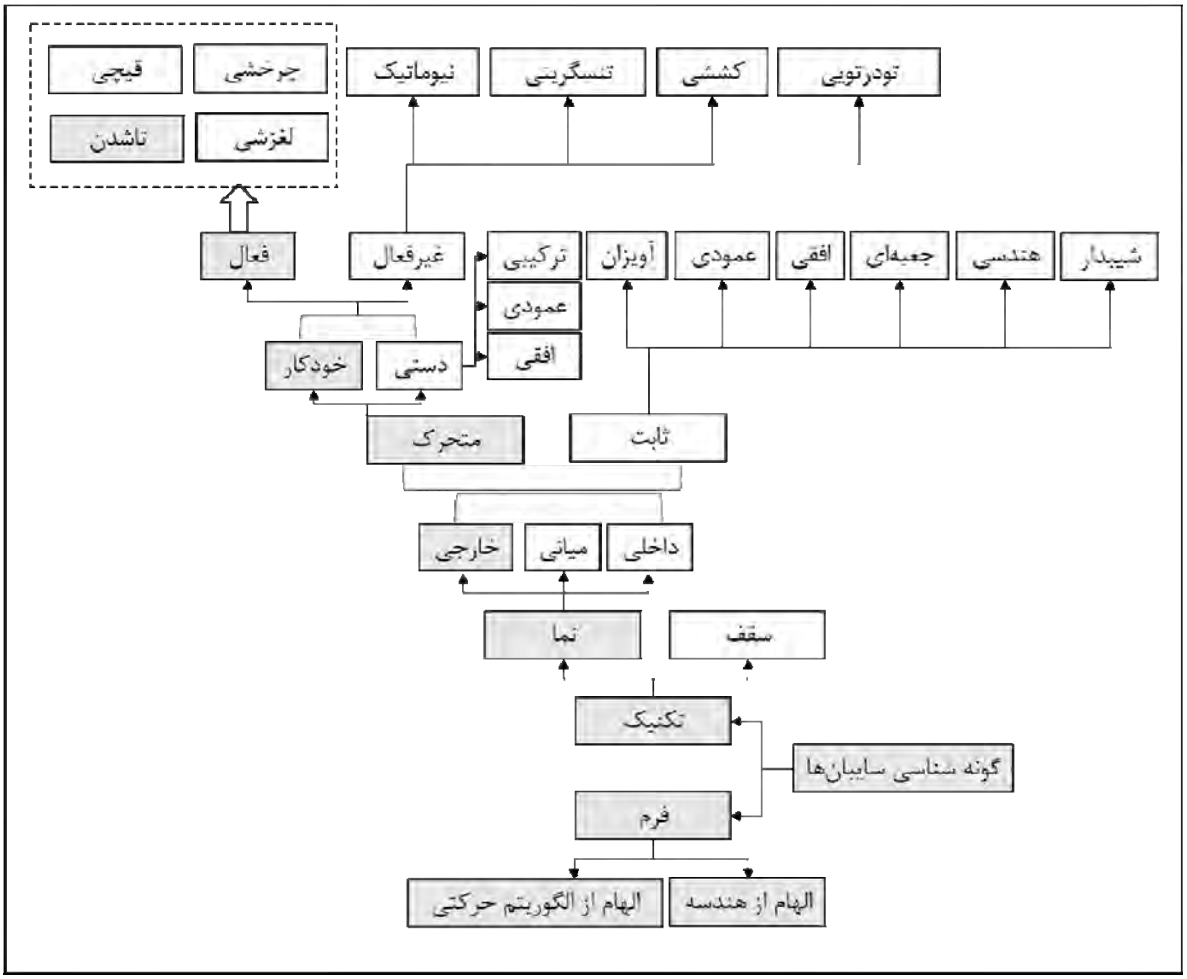
- **الگوبرداری ساختاری:** بهره‌گیری از فرم، اندازه و ساختار موجودات زنده که باعث افزایش عملکرد آن‌ها شده است.
- **الگوبرداری عملکردی:** این بخش به فرآیند شیمیایی موجودات زنده مربوط می‌شود که درحقیقت یک سیستم پاسخگوی انفرادی به محرک‌های خارجی برای حفظ تعادل حیاطی لازم است.
- **الگوبرداری رفتاری:** رفتار موجودات زنده برای نجات خود دربرابر شرایط پیرامون را شامل می‌شود. این رفتار درحقیقت باعث انطباق‌پذیری و سازگاری موجودات زنده با محیط اطرافشان می‌شود (Vorobyeva, 2018).

باتوجه به مطالب ذکر شده، در پژوهش حاضر، الگوبرداری رفتاری گیاه گوشت‌خوار که به صورت باز و بسته شونده می‌باشد، به‌عنوان منبع الهام طراحی سایبان متحرک نما انتخاب شده است؛ زیرا فرآیند رسیدن به مدل بیونیکی از پایین به بالا است و در مورد این گیاه پژوهش‌های زیادی توسط بایولوژیست‌ها صورت گرفته است.

سایبان متحرک

عملکرد اصلی سایبان نما، حفاظت از سطوح شفاف ساختمان در برابر نور خورشید است (نصر و یارمحمودی، ۱۴۰۱). که به دو دسته‌ی خارجی و داخلی تقسیم شده و این دو دسته خود به گروه متحرک و ثابت تقسیم می‌شوند (Omrany & Marsono, 2016). سایبان‌های متحرک به دلیل اینکه می‌توانند خود را با مسیر حرکت خورشید و تغییر ساعت و فصل منطبق کنند، عملکرد بهتری نسبت به سایبان‌های ثابت داشته و در مقایسه با سایبان‌های ثابت در بهینه‌سازی مصرف انرژی موفق‌تر عمل می‌کنند (رسولی و همکاران، ۱۳۹۸). با این وجود سایبان‌های ثابت به دلیل ثابت بودن و طرح ساده‌ای که دارند، به راحتی قابل اجرا بوده و اقتصادی‌تر هستند

(Heidari et al., 2021). سایبان‌های متحرک را نیز می‌توان براساس فرم و مکانیزم حرکتی تقسیم کرد که در پژوهش حاضر فرم گیاهی و مکانیزم حرکتی گیاه گوشت‌خوار (تاشدن) به‌عنوان منبع الهام انتخاب شده است. در ادامه تصویر۲، به گونه‌شناسی سایبان نما پرداخته است. نوع سایبان متحرک پژوهش حاضر در تصویر۲، با رنگ خاکستری مشخص شده است.



تصویر۲. گونه‌شناسی سایبان (نگارندگان)

گیاه گوشت‌خوار

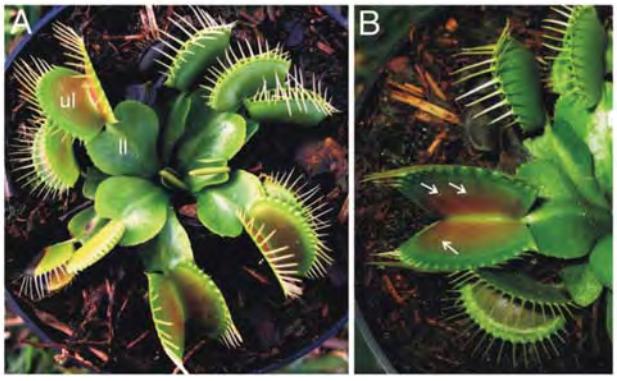
گیاه گوشت‌خوار[۴] همانطور که از نامش مشخص است، بیشتر مواد غذایی که نیاز دارد، از راه تله‌گذاری برای جانوران، حشرات و بندپایان بدست می‌آورد، زیرا در بستری که خاک آن دارای فقر غذایی است، رشد می‌کند. علاوه‌بر گیاه گوشت‌خوار، بیش از ۳۰۰ گونه‌ی گیاهی این خصوصیات را دارند (Poppinga et al., 2012). بنابراین حرکت واکنشی گیاه، بیشتر در جهت تامین غذا می‌باشد. در پژوهش حاضر، باتوجه به انتخاب رویکرد معماری بیونیک در راستای طراحی سایبان متحرک، از الگوی رفتاری گیاه که به صورت باز و بسته شدن می‌باشد، بهره گرفته شده است؛ بنابراین انجام این پژوهش به‌معنای واکنش گیاه نسبت به نور خورشید نمی‌باشد. در ادامه الگوی رفتار حرکتی گیاه باتوجه به پژوهش‌های پیشین مطرح شده است.

الگوی حرکتی گیاه گوشت‌خوار

در مقالات مختلف، پژوهش‌های زیادی در زمینه نحوه حرکت گیاهان گوشت‌خوار، انجام گرفته است. به‌طور کلی می‌توان، مکانیسم[۵] تله‌گذاری گیاهان گوشت‌خوار را به پنج دسته تقسیم کرد که در ادامه مطرح شده است. به دلیل اینکه حرکت یا واکنش گیاهان گوشت‌خوار در برابر محیط اطرافشان برای شکار موجودات زنده است، الگوی حرکتی این‌گونه گیاهان، تله‌گذاری[۶] نام دارد (Schleicher, 2015).

- تله[۷] (گیاهان پارچ)، در این تله شکار به‌وسیله برگ لوله شده که حاوی استخری از آنزیم‌های گوارشی یا باکتری است، شکار می‌شود؛
- تله کاغذ دیواری[۸]، استفاده از لعاب چسبنده؛
- تله ضربه سریع[۹]، استفاده از حرکات سریع برگ؛
- تله مثانه‌دار[۱۰]، مکش شکار با مثانه که باعث ایجاد خلاء درونی می‌شود؛
- نیروی تله خرچنگی[۱۱]، باعث حرکت طعمه به سمت اندام گوارشی با پرزهای درونی می‌گردد (Hedrich & Neher, 2018).

در پژوهش حاضر، گیاه گوشت‌خوار با سبک تله‌گذاری ضربه سریع (حرکت سریع و برگشت‌پذیر) برای الهام گرفتن از الگوی حرکتی در طراحی سایبان هوشمند نما، انتخاب شده که در (تصویر۳) نشان داده شده است. به دلیل اینکه این نوع حرکت به‌صورت باز و بسته شونده است و برای طراحی سایبان متحرک، مناسب می‌باشد.

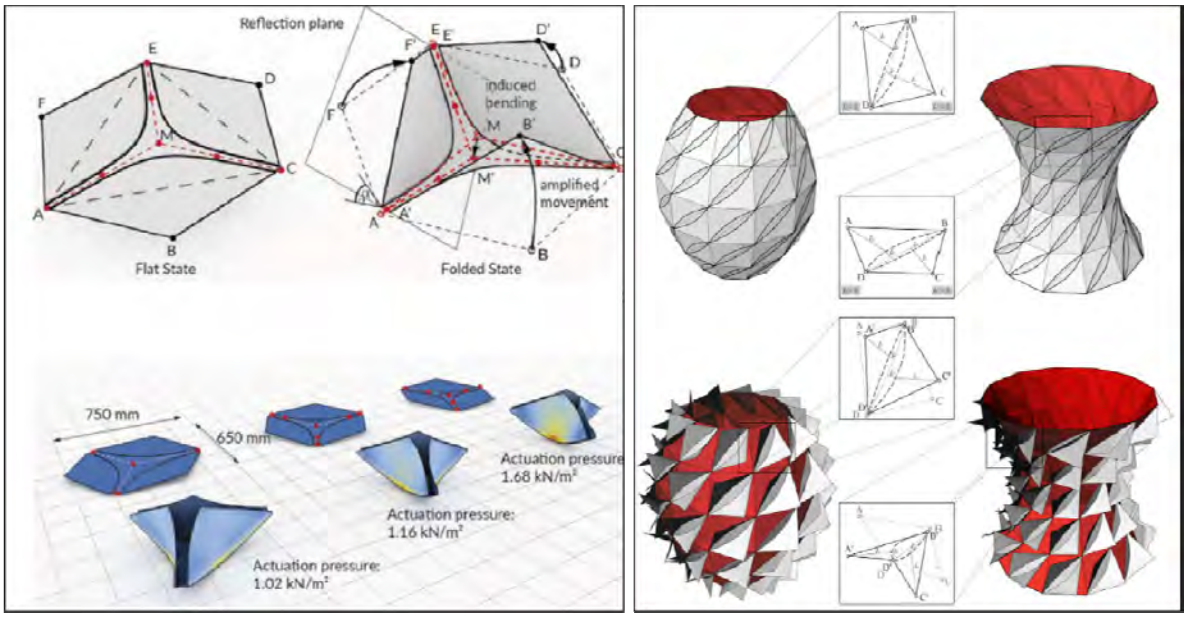


تصویر۳. رفتار حرکتی گیاه گوشت‌خوار (Scorza & Dornelas, 2011)

در اینجا، حرکت به‌صورت هیدرولیکی توسط سطح مرکزی با یک نوار میانی هدایت می‌شود که هر دو باعث تغییر دو جهته در مکانیسم گیاه می‌شود. این مکانیسم سازگار، عملکرد جالبی دارد، زیرا با یک حرکت اولیه کوچک می‌تواند یک حرکت بزرگ که شامل کل اندام گیاه است را انجام دهد. درحقیقت حرکت بخش میانی، باعث حرکت دو لایه‌ی مجاور گیاه می‌شود (Schleicher et al., 2011).

تصویر۴. زاویه حرکتی گیاه گوشت‌خوار (Westermeier et al., 2018)

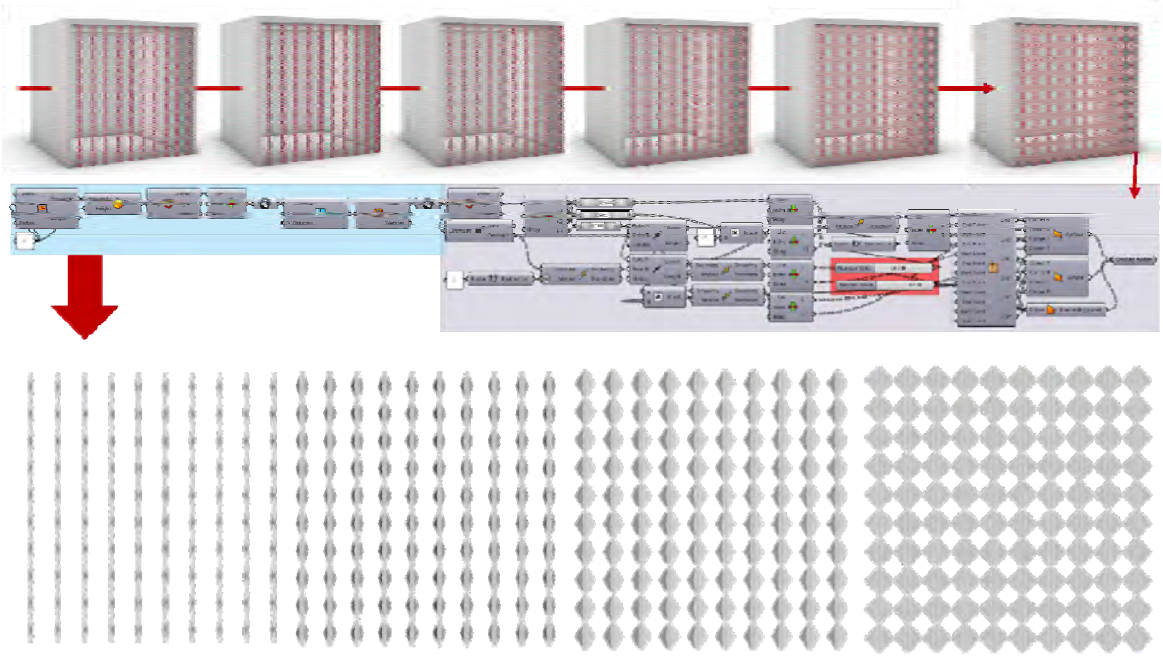
سایمون و همکاران در سال ۲۰۱۵، مکانیزم حرکتی گیاه گوشت‌خوار در راستای رسیدن به پوسته‌ی متحرک، مورد بررسی قرار دادند. جالب‌ترین یافته در آزمایش‌های صورت گرفته حاکی از آن است که مکانیزم حرکتی حتی زمانی که از نظر اندازه، کوچک می‌شود و یا شکل آن تغییر می‌کند، همچنان فعال است. بنابراین برای استفاده در مدول طراحی پوسته‌های باز و بسته شونده، بسیار انعطاف‌پذیر است. در ادامه تصویر۵، قرار دارد که نشان‌دهنده بهره‌گیری از مکانیزم حرکتی گیاه گوشت‌خوار در فرم متفاوت است. در پژوهش حاضر هندسه مربع به عنوان سطح مقطع پوسته انتخاب شده است.



تصویر۵. فرم متفاوت پوسته با الگوی حرکتی گیاه گوشت‌خوار (Schleicher et al., 2015) و (Korner et al., 2016)

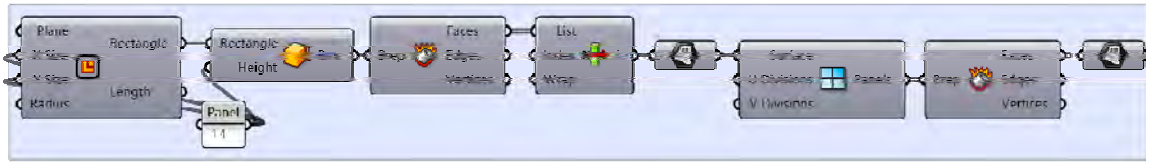
■ الگوریتم حرکتی گیاه گوشت‌خوار

در ابتدا توسط نرم افزار راینو۶ و افزونه گرس‌هاپر، فرم گیاه گوشت‌خوار به‌صورت پارامتریک مدل شده تا بتوان از آن به‌عنوان مدل سایبان متحرک نما بهره گرفت. پس از آن نقاط مدل که باز و بسته می‌شوند، پارامتریک طراحی شده است. در (تصویر۶) الگوریتم حرکتی گیاه گوشت‌خوار مطرح شده است.



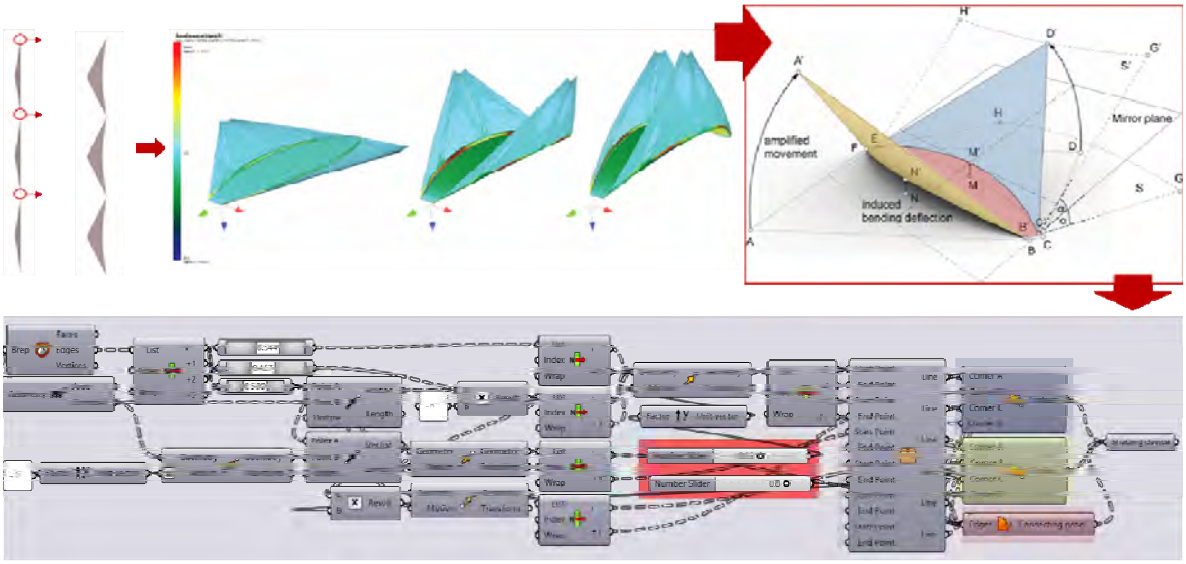
تصویر۶. الگوریتم حرکتی گیاه گوشت‌خوار (نگارندگان)

باتوجه به تصویر۶، مراحل مدل‌سازی به دو بخش تقسیم شده که با رنگ آبی و خاکستری مشخص شده است. در بخش اول (رنگ آبی)، به مدل‌سازی ساختمان که یک مکعب ساده با ضلع ۱۴ متر می‌باشد، پرداخته شده است. به این صورت که پس از تولید مکعب مورد نیاز، نمای جنوبی انتخاب و به پنل‌های مربعی تقسیم شده است.



تصویر۷. الگوریتم مدل‌سازی ساختمان (نگارندگان)

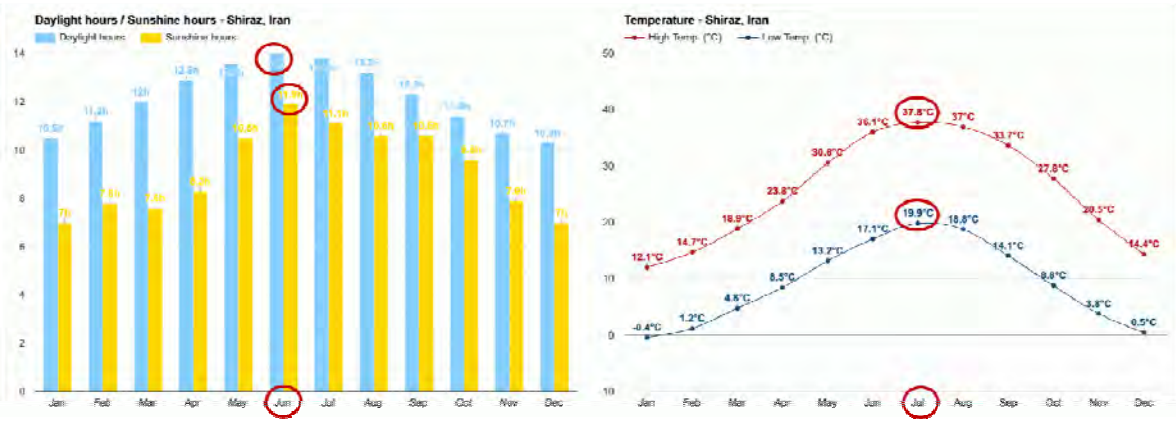
پس از آن در بخش دوم (رنگ خاکستری) مدل‌سازی، خطوط پنل‌های مربعی نمای جنوبی انتخاب شده و با نقطه‌گذاری بر روی هر خط، نقاط پنل‌های سایبان جانمایی شده است. در نهایت این نقاط بهم وصل شده و صفحه پنل‌های سایبان را تولید کرده است. این پنل‌ها به سه دسته تقسیم شدند که شامل: پنل‌های راست، چپ و پنل اتصال‌دهنده می‌باشد که در وسط قرار دارد. در ادامه با جابه‌جا کردن راس پنل‌های چپ و راست و نقاط بالا و پایین پنل اتصال دهنده در راستای محور Y، به‌صورت پارامتریک، می‌توان کنترل باز و بسته کردن پنل‌های سایبان در راستای مسیر حرکت خورشید و تابش کم یا زیاد در ساعات مختلف روز را بدست آورد. بخش پارامتریک سایبان با رنگ قرمز مشخص شده است. در حالت صفر سایبان کاملا بسته، در حالت ۰.۵ سایبان نیمه‌بسته و در حالت ۱، سایبان کاملا باز است.



تصویر۸. الگوریتم مدل‌سازی سایبان متحرک (نگارندگان)

اقلیم شیراز

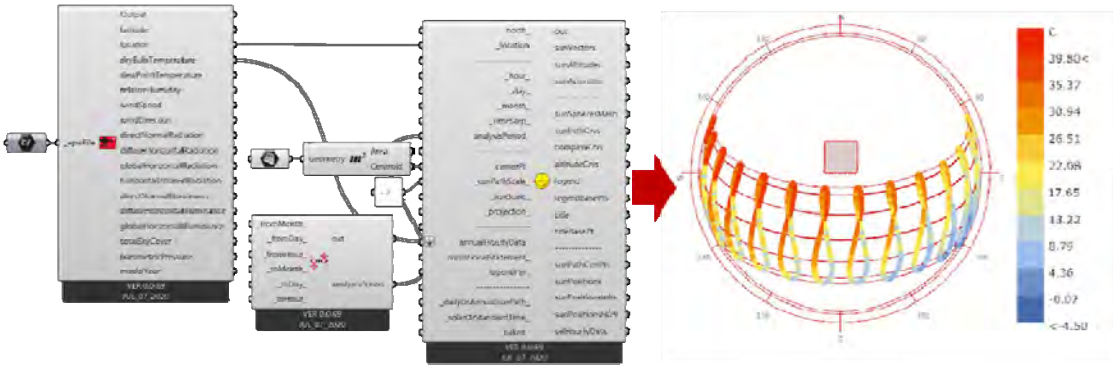
شیراز مرکز استان فارس و در عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۲۵ دقیقه و طول جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۹ دقیقه قرار دارد (کسمایی، ۱۳۹۲). اقلیم شیراز از نظر تقسیم‌بندی کوپن، گرم و نیمه‌خشک است (Barzegar & Mirshamsi, 2014). همانطور که در جدول هواشناسی نشان داده شده است، حداکثر دمای شیراز ۳۷/۸ درجه سانتی‌گراد در ماه تیر است (محمدی و مضطرزاده، ۱۳۹۷). بنابراین ساختمانی که در این شهر قرار دارد، در فصل گرم سال نیازمند سایبان نما برای کنترل انرژی تابشی، نور روز و جلوگیری از گرمای بیش از حد فضای داخلی است. در ادامه نمودارهای مربوط به حداکثر مدت تابش نور خورشید و دمای شهر شیراز، در تصویر۹، مطرح شده است.



تصویر۹. به ترتیب از راست به چپ، درجه حرارت و ساعت‌های آفتابی در اقلیم شیراز، فارس، ایران (URL1)

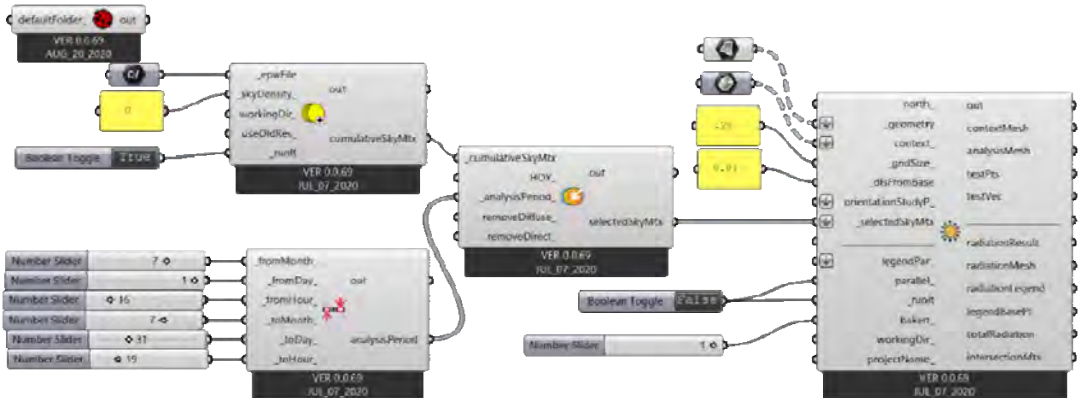
مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش ابتدا ساختمانی با هندسه مکعب با ابعاد ۱۴ در ۱۴ متر و ارتفاع ۱۴متر، مدل‌سازی شده و سپس الگوی سایبان متحرک بر روی نمای جنوبی طراحی شده است. ساختار سایبان متشکل از ۱۰۰ عدد مدول تکرار شونده و۲۰۰قطعه متحرک از نوع تاشونده است. (ابعاد و تعداد مدول سایبان توسط نگارندگان فرض شده و پژوهشگران آتی می‌توانند متناسب با پروژه یا پژوهش خود، ابعاد بنا، تقسیم‌بندی و ابعاد سایبان را تغییر دهند. این ابعاد صرفا برای آزمایش و رسیدن به اهداف پژوهش حاضر انتخاب شده است). همانطور که در بخش اقلیم شیراز نشان داده شده، شیراز دارای اقلیم گرم و نیمه‌خشک است، به همین دلیل در ماه‌های گرم سال، مانند تیرماه، کنترل ورود نور خورشید به درون ساختمان در جهت جلوگیری از افزایش بیش از حد دمای فضای داخلی ساختمان، ضروری است. به‌همین دلیل در پژوهش حاضر روز ۱۵ تیرماه از ساعت ۷ صبح تا ۱۹ عصر، سطح شفاف نمای جنوبی از نظر میزان دریافت انرژی تابشی و نور روز مورد تحلیل قرار گرفته است. در ادامه تصویر۱۰، نشان دهنده مسیر حرکت خورشید است.



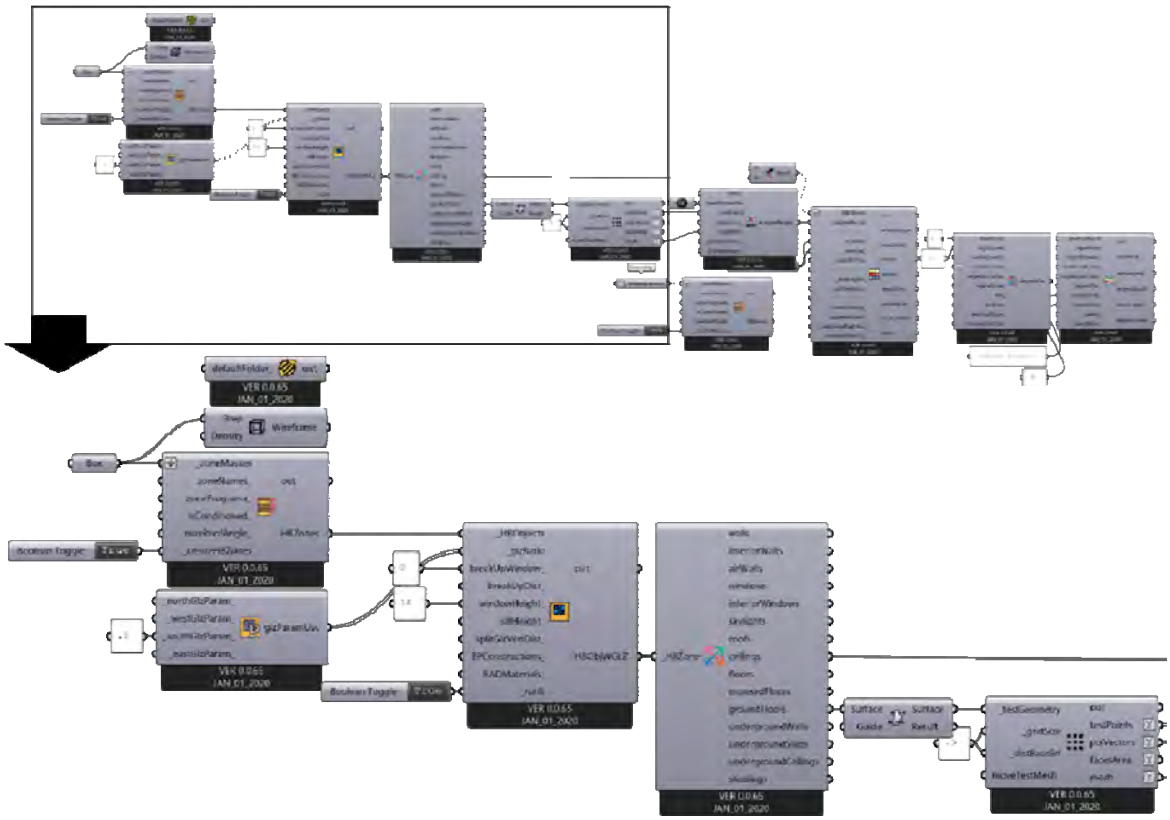
تصویر۱۰. مسیر حرکت خورشید و جانمایی ساختمان (نگارندگان)

داده‌های آب و هوایی از سایت انرژی پلاس با پسوند epw برای شهر شیراز استخراج شده و در نهایت (تصویر۱۱) الگوریتم آنالیز انرژی تابشی در محیط گرس‌هاپر و با افزونه‌ی لیدی‌باگ انجام شده است. این الگوریتم ثابت بوده و پژوهشگران آتی می‌توانند با تغییر داده‌های آب و هوایی، استفاده از داده‌های اقلیمی پژوهش خود با تغییر بخش پارامتریک الگوریتم متناسب با مسیر حرکت خورشید از آن برای تحلیل‌های محیطی طرح بهره گیرند.



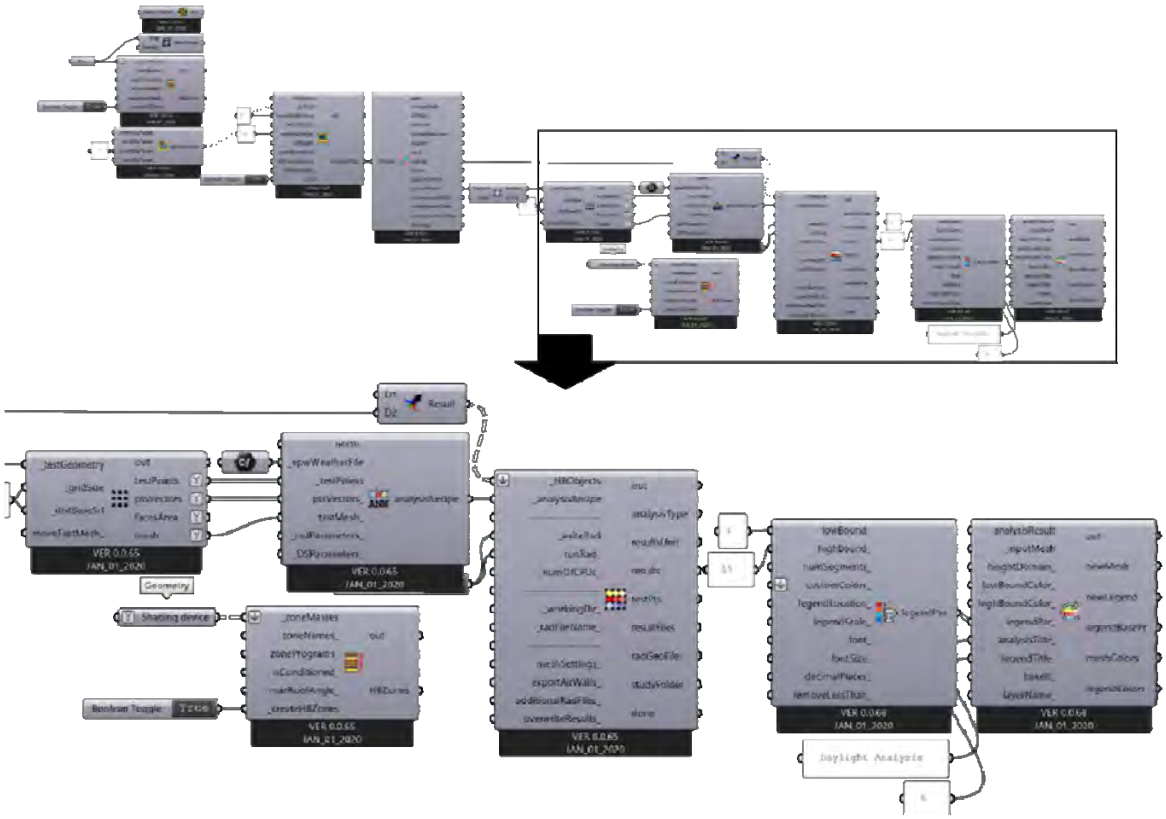
تصویر۱۱. الگوریتم تحلیل انرژی تابشی سایبان هوشمند سازگار با اقلیم شیراز، الهام گرفته شده از الگوی حرکتی گیاه گوشت‌خوار (نگارندگان)

بنابراین در الگوریتم تصویر۱۱، در بخش یافته‌های پژوهش حاضر، انرژی تابشی جذب شده توسط سطح شفاف نما بدست آمده و در آخر با حالت بدون سایبان مقایسه شده است. پس از آن جهت شبیه‌سازی و تحلیل میزان کنترل ورود نور روز به درون ساختمان نیاز است که از افزونه هانی‌بی، جهت تحلیل نور روز بهره گرفته شده است که در تصویر ۱۲ و ۱۳، الگوریتم این بخش نیز مطرح شده است.



تصویر۱۲. الگوریتم شبیه‌سازی نور روز توسط افزونه هانی‌بی (نگارندگان)

تصویر۱۲، نشان‌دهنده بخش مشخص کردن زون و بازشو بر روی نمای جنوبی ساختمان است. پس از آن کف ساختمان جهت تحلیل میزان کنترل ورود نور روز مشخص و تقسیم‌بندی شده است. در ادامه تصویر۱۳، قرار دارد که نشان دهنده سایر فرآیند شامل: داده‌ی اقلیم شیراز، تحلیل نور روز و نتایج بدست آمده است.



تصویر ۱۳. الگوریتم شبیه‌سازی نور روز توسط افزونه هانی‌بی (نگارندگان)

تحلیل یافته‌ها

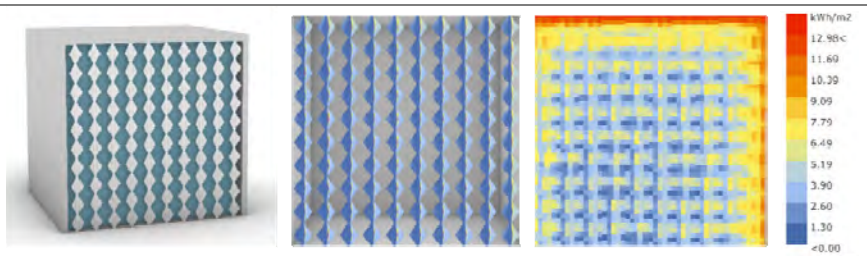
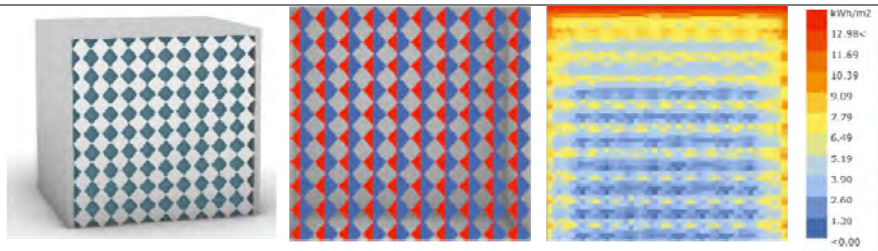
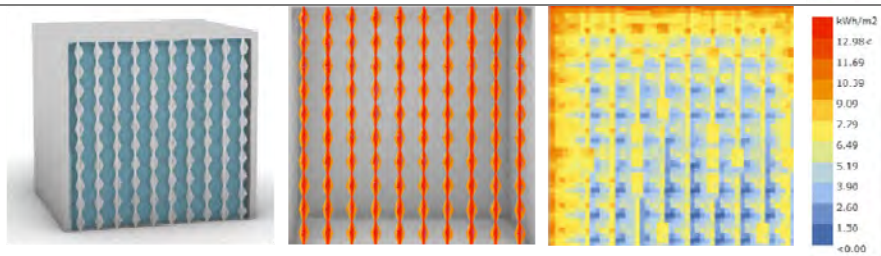
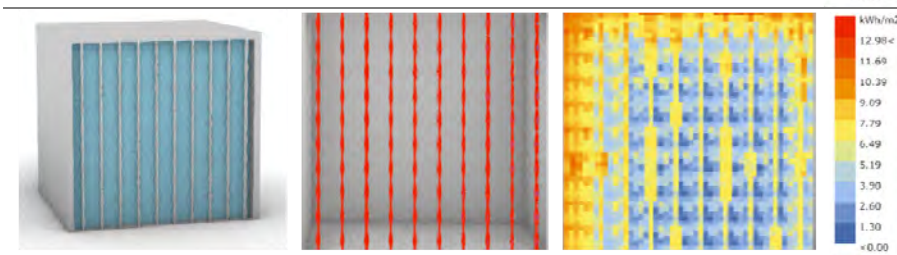
بخش تحلیل یافته‌ها، شامل بررسی میزان جذب انرژی تابشی توسط سطح شفاف نمای جنوبی و میزان کنترل ورود نور روز به فضای داخلی ساختمان به درصد در اقلیم شیراز می‌باشد. این بخش نشان‌دهنده عملکرد مطلوب سایبان هوشمند نما در اقلیم گرم و نیمه‌خشک است.

آنالیز انرژی تابشی[۱۲]

همان‌طور که در (جدول۲) مشخص است. آنالیز انرژی تابشی سطح شفاف نمای جنوبی ساختمان در شهر شیراز که توسط افزونه لیدی‌باگ در محیط گرس‌هاپر انجام شده، از یک طیف رنگی تشکیل شده که از آبی به سمت قرمز در حرکت است. هر چه رنگ جداره شفاف نما به قرمز نزدیک‌تر شود، به‌معنای آن است که به انرژی ۱۸ کیلووات ساعت بر مترمربع نزدیک شده و هر چه به سمت آبی متمایل شود، در واقع به ۹ کیلووات ساعت بر مترمربع نزدیک می‌شود. نتایج حاصل از طیف رنگی سایبان نشان می‌دهند که سطح شفاف نما تا حد زیادی به رنگ آبی تمایل دارد، اما رنگ زرد و نارنجی نیز به میزان مطلوب مشاهده می‌شود. همین امر باعث می‌شود که انرژی تابشی لازم تاحدی برای فضاهای داخلی تامین شود و جلوی ورود بیش از حد انرژی نیز گرفته شود. در نهایت تمام عوامل نشان‌دهنده عملکرد مطلوب سایبان متحرک الهام گرفته شده از مکانیزم حرکتی گیاه گوشت‌خوار است.

سایبان متحرک متناسب با مسیر حرکت خورشید در چهار حالت باز، بسته، نیمه‌باز و نیمه‌بسته تحلیل شده است. آنالیز انرژی تابشی سایبان با توجه به اقلیم شیراز از ساعت ۷ تا ۱۹، روز ۱۵ تیرماه انجام گرفته است. به این صورت که در ابتدا ساعت‌های آنالیز به ۴دسته با بازه زمانی ۳ ساعت تقسیم شده و پس از آن، طبق مسیر حرکتی خورشید که از شرق به غرب است؛ از ساعت ۷ تا ۱۰ سایبان در حالت نیمه بسته قرار گرفته و هر چه به ساعت ۱۳ نزدیک‌تر می‌شود به دلیل بالا آمدن خورشید و داشتن حداکثر میزان ورودی خورشید، پنل‌های سایبان بازتر شده است. در این حالت جلوی ورود انرژی تابشی به میزان لازم گرفته می‌شود. پس از آن با نزدیک شدن به ساعت ۱۶ و مایل شدن تابش خورشید، زاویه پنل‌های سایبان به حالت نیمه باز تغییر کرده و در نهایت با رسیدن به ساعت ۱۹ به دلیل کاهش انرژی تابشی، پنل‌های سایبان در حالت کاملا باز قرار می‌گیرند؛ تا دید به بیرون ساختمان برای استفاده‌کنندگان از فضای داخلی فراهم شود.

جدول۲. آنالیز انرژی تابشی نمای جنوبی ساختمان با سایبان متحرک الهام گرفته شده از الگوی حرکتی گیاه گوشت‌خوار (نگارندگان)

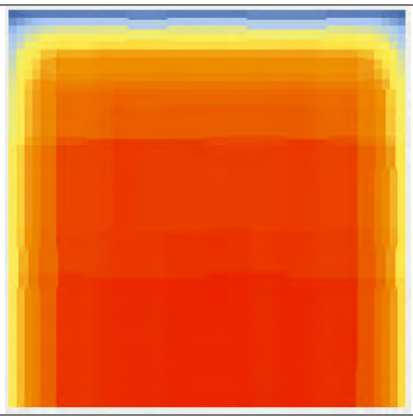
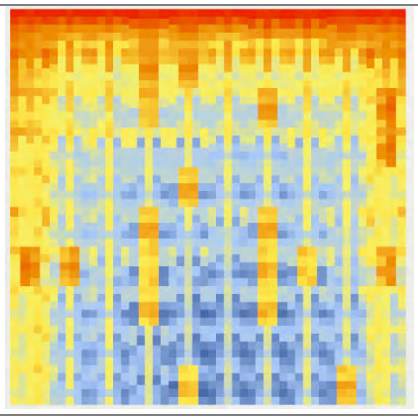
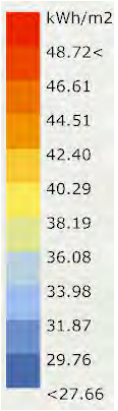
ساعت	حالت سایبان	تحلیل انرژی تابشی
۷تا۱۰	نیمه‌بسته	
۱۰تا۱۳	بسته	
۱۳تا۱۶	نیمه باز	
۱۶تا۱۹	باز	

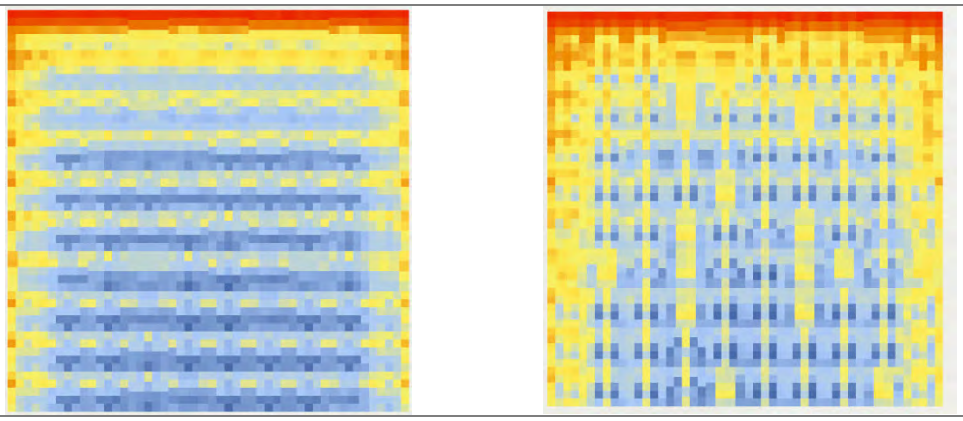
در ادامه تصویر۱۴، قرار دارد که آنالیز انرژی تابشی جدول۲ را با حالت بدون سایبان مقایسه کرده است. باتوجه به تصویر۱۴، وجود سایبان برای نمای جنوبی و باز و بسته شدن آن متناسب با مسیر حرکت خورشید باعث کنترل انرژی تابشی و نور روز ساختمان شده است.

تصویر۱۴. مقایسه انرژی تابشی نمای شفاف جنوبی در ساعات و حالت‌های مختلف سایبان (نگارندگان)

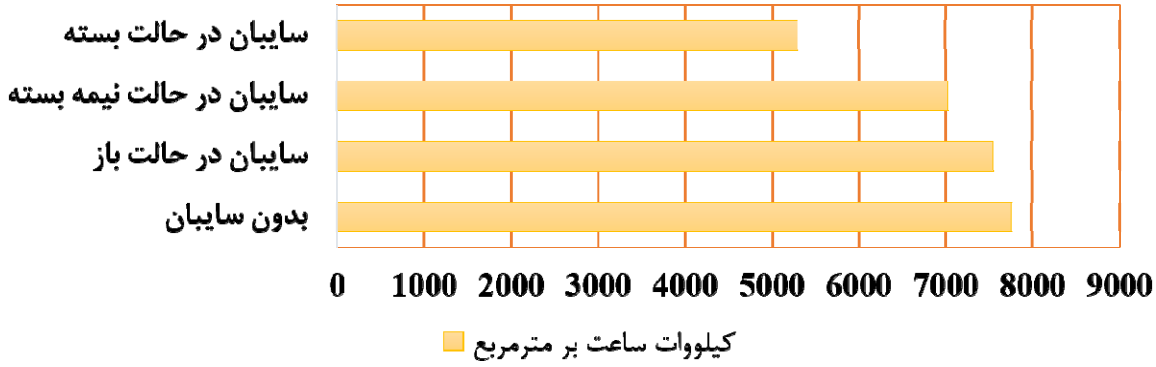
در ادامه برای مقایسه بهتر عملکرد سایبان در حالت‌های مختلف، ساعت ۱۰ تا ۱۶ برای تحلیل انرژی تابشی ثابت در نظر گرفته شده و صرفا حالت سایبان نمای جنوبی ساختمان تغییر کرده که در جدول۳، نشان داده شده است.

جدول۳. تحلیل انرژی تابشی بین ساعت ۱۰ تا ۱۶ در حالت‌های مختلف سایبان (نگارندگان)

بدون سایبان	سایبان باز	
		
سایبان نیمه بسته	سایبان بسته	



در این قسمت تصویر۱۵، قرار دارد که نشان‌دهنده مقایسه حالت‌های مختلف سایبان بین ساعت ۱۰ تا ۱۶ با حالت بدون سایبان است. نتایج حاصل از جدول۳، حاکی از آن است که سایبان نما می‌تواند تا ۳۷ درصد باعث کاهش انرژی تابشی نمای شفاف جنوبی ساختمان شود که خود نشان‌دهنده عملکرد مطلوب سایبان در اقلیم گرم و نیمه‌خشک شیراز است.

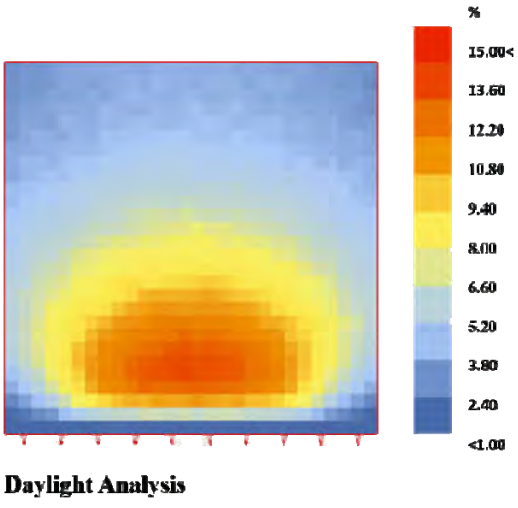
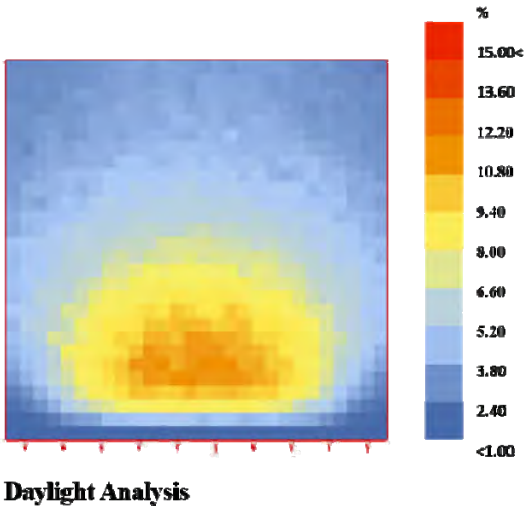
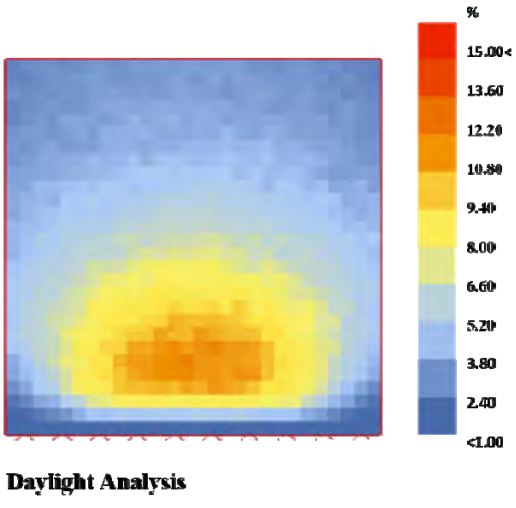
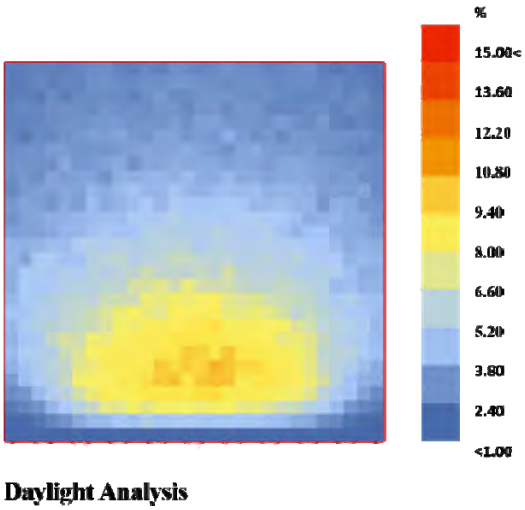


تصویر۱۵. مقایسه تحلیل انرژی تابشی بین ساعت ۱۰ تا ۱۶ در حالت‌های مختلف سایبان (نگارندگان)

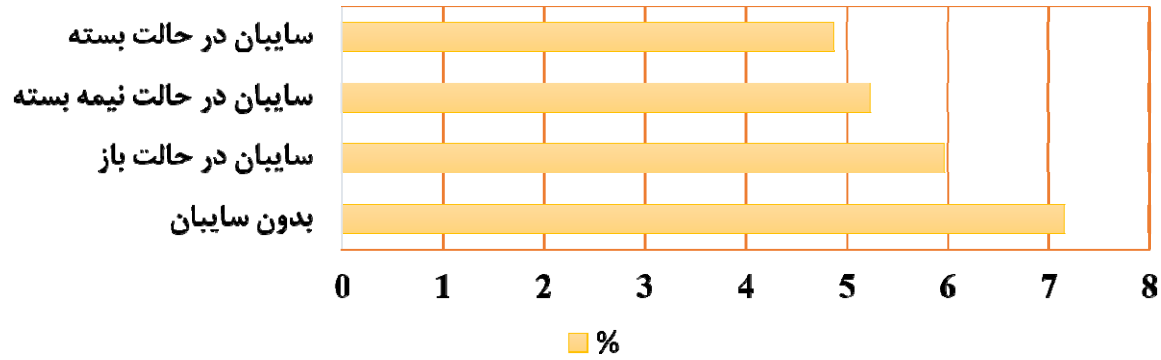
آنالیز نور روز[۱۳]

در این بخش با استفاده از افزونه هانی‌بی، میزان ورود نور روز به فضای داخلی ساختمان به درصد مورد تحلیل قرار گرفته است. به این صورت که در چهار حالت که شامل: نما بدون سایبان، با سایبان در حالت پنل‌های باز، سایبان در حالت بسته و سایبان در حالت نیمه‌بسته، است، آنالیز نور روز انجام گرفته است.

جدول۴. تحلیل نور روز در حالت‌های مختلف توسط افزونه هانی‌بی به درصد (نگارندگان)

بدون سایبان	سایبان باز
	
سایبان نیمه بسته	**سایبان بسته**
	

باتوجه به اینکه آنالیز نور روز در کل سال، ساعت، روز و غیره انجام گرفته شده و داده زمانی خاصی به الگوریتم داده نشده است، بنابراین تحلیل نور روز در حالت باز و نیمه‌باز برای تمام فصول سال کاربردی است؛ زیرا علاوه‌بر، کاهش ورود نور روز به فضای داخلی، می‌تواند روشنایی مطلوب را فراهم کند (نکته حائز اهمیت دیگر در خصوص طراحی سایبان متحرک این است که در الگوی مربعی به صورت یک در میان، پنل‌های سایبان طراحی شده و از فضاهای خالی در صورت بسته بودن کامل پنل‌های سایبان، تا حدی نور روز قابلیت ورود به فضای داخلی ساختمان را دارد). در نهایت باتوجه به جدول۴، میانگین درصد نور دریافتی توسط سطح شفاف نمای جنوبی ساختمان، بدست آمده و در ادامه تصویر۱۶، قرار دارد که نشان‌دهنده مقایسه میزان دریافت نور در حالت‌های مختلف سایبان با حالت بدون سایبان است.

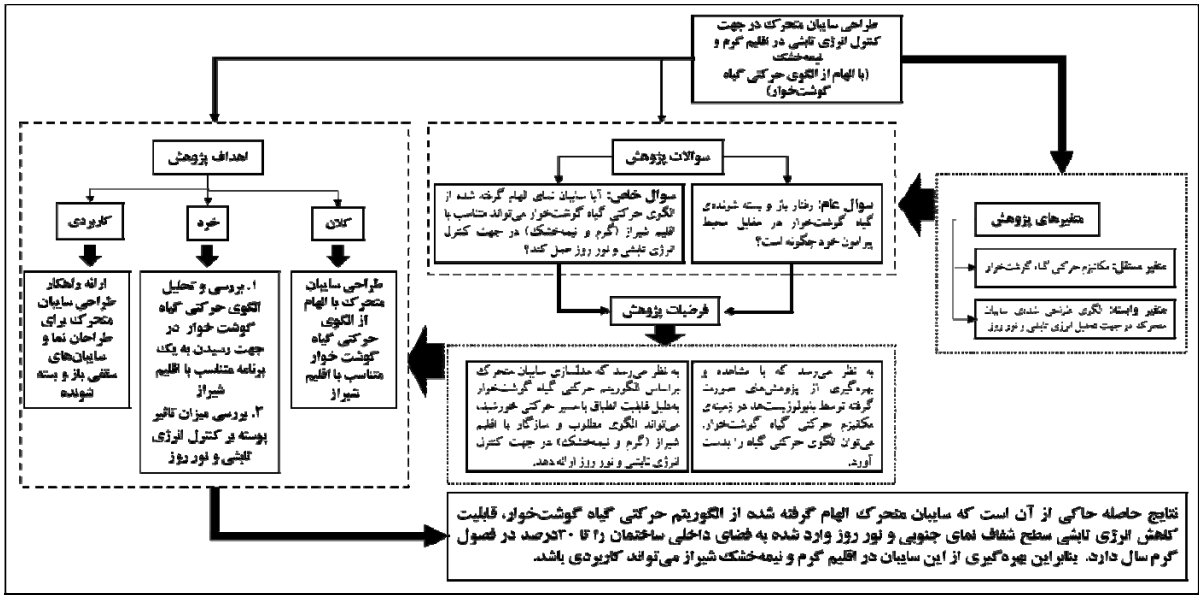


تصویر۱۶. مقایسه تحلیل نور روز در حالت‌های مختلف سایبان با حالت بدون سایبان (نگارندگان)

نتایج حاصل از تصویر۱۶، حاکی از آن است که سایبان در حالت بسته می‌تواند تا ۳۰٪ باعث کنترل نفوذ نور به فضای داخلی ساختمان شود. همین امر باعث عملکرد مطلوب سایبان در فصول گرم سال شده و در فصول سرد نیز، سایبان می‌تواند در حالت باز دارای عملکرد بهینه باشد و باعث افزایش آسایش کاربران شود.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر برپایه رویکرد معماری بیونیک به‌معنای الهام از طبیعت پیش رفته است. فرآیند طراحی نیز درواقع نحوه رسیدن به یک طرح بیونیکی را از ابتدا تا انتها نشان می‌دهد. الهام از طبیعت خود به سه دسته‌ی گیاه، حیوان و انسان تقسیم می‌شود که در پژوهش حاضر گیاه گوشت‌خوار به عنوان منبع الهام سایبان متحرک انتخاب شده است. نحوه الگوبرداری از طبیعت نیز خود به سه دسته تقسیم می‌شود که شامل الگوبرداری ساختاری، عملکردی و رفتاری است. در تحقیق حاضر، رفتار حرکتی یا الگوی حرکتی گیاه گوشت‌خوار مورد بررسی قرار گرفته است. به این صورت که الگوریتم حرکتی سایبان برمبنای داده‌های بدست آمده از مطالعه الگوی حرکت گیاه طراحی شده است. بنابراین پژوهش حاضر کاملا نوآورانه است. در نهایت نتایج حاصله حاکی از آن است که سایبان متحرک الهام گرفته شده از گیاه گوشت‌خوار در اقلیم گرم و نیمه‌خشک سازگار عمل کرده و باتوجه به زاویه و مسیر حرکت خورشید، باز و بسته می‌شود. همین امر موجب کاهش ۳۰ درصدی انرژی تابشی و نور روز در ماه‌های گرم سال شده و از گرمای بیش از حد فضای داخلی ساختمان کاسته می‌شود. در ادامه (تصویر۱۷) قرار دارد که نشان‌دهنده جمع‌بندی فرآیند پژوهش حاضر است. پژوهشگران آتی می‌توانند از این ساختار در جهت رسیدن به یک طرح بیونیکی بهره‌مند شوند.



تصویر ۱۷. جمع‌بندی پژوهش (نگارندگان)

لازم به ذکر است که در طراحی سایبان هوشمند نما، بهتر است که نکات زیر جهت بازدهی بیشتر نمای ساختمان در طراحی، تولید و اجرا، در نظر گرفته شود:

- سایبان متحرک نما بهتر است که با روش ساخت دیجیتال جهت افزایش کیفیت و انطباق با طراحی، تولید شود.
- بهره‌گیری از اتصالات ساده و طراحی به‌صورت مدولار باعث می‌شود که طرح به راحتی توسط کارگران ساده، اجرا شود و هزینه ساخت را کاهش دهد.
- بهره‌گیری از مصالح هوشمند مانند: آلیاژ حافظه‌دار می‌تواند باعث ساده‌سازی و کاهش وزن سیستم سازه‌ای سایبان نما شود.

در نهایت با رعایت نکات ذکر شده در طراحی، تولید و اجرای سایبان هوشمند نما، می‌توان باعث سهولت اجرا و حمل و نقل، کاهش هزینه، افزایش زیبایی و کارایی و قابلیت تعمیر و نگهداری سایبان هوشمند نما شد. سایبانی که با این شرایط طراحی، تولید و اجرا شود، دارای خصوصیات، تطبیق‌پذیری، انعطاف‌پذیری، گسترش‌پذیری و پویایی است که باعث افزایش بازده عملکردی نمای ساختمان، کاهش مصرف انرژی و افزایش آسایش کاربران می‌شود.

پی نوشت

1. Origami pattern
2. Bionic
3. Thomas Speck (University of Freiburg, Faculty of Biology)
4. Dionaea (Droseraceae)
5. Mechanism
6. loading Trap
7. Pitfall
8. Flypaper
9. Snap
10. Bladder
11. Pot– Lobster
12. Radiation Analysis

13. Daylight Analysis

فهرست منابع

- تقی زاده، کتایون، متینی، محمدرضا، کاکوئی، الناز. (۱۳۹۸). ***ساختارهای انعطاف پذیر؛ راهکاری در جهت کاهش معضلات عملکردی پوسته‌های متحرک***. *نشریه هنرهای زیبا- معماری و شهرسازی*، ۲۴(۲)، ۳۹-۴۸.
- رسولی، مسعود، شهبازی، یاسر، متینی، محمدرضا. (۱۳۹۸). ***عملکرد سایه‌اندازهای کرکره‌ای افقی و قائم متحرک در نمای دوپوسته ساختمان‌های اداری؛ ارزیابی و شبیه سازی پارامتریک***. *نقش جهان - مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی*، ۹(۲)، ۱۳۵-۱۴۴.
- کسمایی، مرتضی. (۱۳۹۲). ***اقلیم و معماری***. تهران: خاک.
- محمدی، محسن، مضطرزاده، حامد. (۱۳۹۷). ***تاثیر رعایت مبحث نوزده مقررات ملی ساختمان بر آسایش حرارتی فضاهای مسکونی شیراز به روش PMV***. *نشریه انرژی ایران*، ۲۱(۲)، ۵-۳۱.
- نصر، طاهره، یارمحمودی، زهرا. (۱۴۰۱). ***مقایسهٔ عملکرد انواع سایبان ثابت در جهت کنترل نور روز ساختمان (مطالعه موردی: جبههٔ جنوبی در اقلیم یزد)***. *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۴(۵)، ۳۳-۴۵.
- نصر، طاهره، یارمحمودی، زهرا، احمدی، سیدمحمد. (۱۳۹۹). ***تاثیر هندسه پوسته متحرک بر بهینه سازی مصرف انرژی با الهام از الگوریتم حرکتی گیاه قهر و آشتی***. *نقش جهان - مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی*، ۱۰(۳)، ۲۱۹-۲۳۰.
- نوروزیان، نرگس. (۱۳۹۵). ***الگوی بومی‌سازی شده برای ارزیابی کارایی انرژی در ساختمان‌های شهر تهران***. *نقش جهان - مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی*، ۶(۳)، ۶۳-۷۴.

- Attia, S., Bilir, S., Safy, T., Struck, C., Loonen, R., & Goia, F. (2018). ***Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems***. *Energy and Buildings*, 179, 165–182.
- Barzegar, Z., & Mirshamsi, M. (2014). ***Drawing the Timetable of Climatic Need by Means of Determining the Olgyay Method Thermal Comfort Zone in Shiraz Semi Arid Climate in Iran***. *ICSAUD 2014: International Conference on Sustainable Architecture and Urban Design to Be Held in Istanbul, Turkey, July*, 30–31.
- Fazeli, N., Mahdavinejad, M., & Bemaniyan, M. R. (2019). ***Dynamic Envelope and Control Shading Pattern for Office Buildings Visual Comfort in Tehran***. *Space Ontology International Journal*, 8(3), 31–40.
- Hedrich, R., & Neher, E. (2018). ***Venus flytrap: how an excitable, carnivorous plant works***. *Trends in Plant Science*, 23(3), 220–234.
- Heidari, A., Taghipour, M., & Yarmahmoodi, Z. (2021). ***The Effect of Fixed External Shading Devices on Daylighting and Thermal Comfort in Residential Building***. *Journal of Daylighting*, 8(2), 165–180.
- Hosseini, S. M., Mohammadi, M., & Guerra-Santin, O. (2019). I***nteractive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes***. *Building and Environment*, 165, 106396.
- Hosseini, S. M., Mohammadi, M., Rosemann, A., Schröder, T., & Lichtenberg, J. (2019). ***A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort***. *Building and Environment*, 153, 186–204.
- Hosseini, S. M., Mohammadi, M., Schröder, T., & Guerra-Santin, O. (2020). ***Integrating interactive kinetic façade design with colored glass to improve daylight performance based on occupants' position***. *Journal of Building Engineering*, 101404.
- Kirkegaard, P. H., & Foged, I. W. (2011). ***Development and evaluation of a responsive building***

envelope. *Adaptive Architecture-An International Conference at the Building Centre*.

- Korner, A., Mader, A., Saffarian, S., & Knippers, J. (2016). ***Bio-inspired kinetic curved-line folding for architectural applications***. *ACADIA*: Posthuman Frontiers: Data, Designers, and Cognitive Machines [Proceedings of the 36th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-0-692-77095-5] Ann Arbor 27-29 October, 270-279.
- López, M., Rubio, R., Martín, S., & Croxford, B. (2017). ***How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes***. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 692–703.
- Lopez, M., Rubio, R., Martín, S., Croxford, B., & Jackson, R. (2015). ***Active materials for adaptive architectural envelopes based on plant adaptation principles***. *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(1), 27–38.
- Mahmoud, A. H. A., & Elghazi, Y. (2016). ***Parametric-based designs for kinetic facades to optimize daylight performance: Comparing rotation and translation kinetic motion for hexagonal facade patterns***. *Solar Energy*, 126, 111–127.
- Mashayekh Faridani S. (2013). ***Art of Engineering Inspired by Nature***. *JHRE*, 32 (143),3-14.
- Moulaii, M., Pourjafar, M., & Bemanian, M. (2016). I***ntroduction of Interactive Architecture and Its Role in the Adaption of Architecture***. *Naqshejahan-Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*, 5(4), 61-70.
- Omrany, H., & Marsono, A. K. (2016). ***Optimization of building energy performance through passive design strategies.*** *Current Journal of Applied Science and Technology*, 1–16.
- Pesenti, M., Masera, G., & Fiorito, F. (2015). ***Shaping an origami shading device through visual and thermal simulations.*** *6th International Building Physics Conference, IBPC 2015*, 346–351.
- Poppinga, S., Hartmeyer, S. R. H., Seidel, R., Masselter, T., Hartmeyer, I., & Speck, T. (2012). ***Catapulting tentacles in a sticky carnivorous plant.*** *PLoS One*, 7(9), e45735.
- Rahbar, M., Mahdavinejad, M., Bemanian, M., Davaie Markazi, A. H., & Hovestadt, L. (2019). G***enerating Synthetic Space Allocation Probability Layouts Based on Trained Conditional-GANs.*** *Applied Artificial Intelligence*, 33(8), 689–705.
- Samadi, S., Noorzai, E., Beltrán, L. O., & Abbasi, S. (2020). ***A computational approach for achieving optimum daylight inside buildings through automated kinetic shading systems.*** *Frontiers of Architectural Research*, 9(2), 335–349.
- Schleicher, S. (2015). ***Bio-inspired compliant mechanisms for architectural design: transferring bending and folding principles of plant leaves to flexible kinetic structures.*** http://dx.doi.org/10.18419/opus-123.
- Schleicher, S., Lienhard, J., Knippers, J., Poppinga, S., Masselter, T., & Speck, T. (2011). ***Bio-inspired kinematics of adaptive shading systems for free form facades.*** In *Proceedings of the IABSE-IASS Symposium, Taller Longer Lighter, London, UK.*
- Schleicher, S., Lienhard, J., Poppinga, S., Speck, T., & Knippers, J. (2015). ***A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture.*** *Computer-Aided Design*, *60*, 105–117. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.01.005.
- Scorza, L. C. T., & Dornelas, M. C. (2011). ***Plants on the move: towards common mechanisms governing mechanically-induced plant movements.*** *Plant Signaling & Behavior*, 6(12), 1979–1986.
- Tabadkani, A., Banihashemi, S., & Hosseini, M. R. (2018). ***Daylighting and visual comfort of oriental sun responsive skins: A parametric analysis.*** *Building Simulation*, 11(4), 663–676.
- Tabadkani, A., Shoubi, M. V., Soflaei, F., & Banihashemi, S. (2019). ***Integrated parametric design of adaptive facades for user's visual comfort.*** *Automation in Construction*, 106, 102857.
- URL 1: Weather Atlas. (n.d.). ***Shiraz, Iran - Detailed climate information and monthly weather forecast***. Retrieved December 7, 2020, from https://www.weather-atlas.com/en/iran/shiraz-climate#daylight_sunshine

- Vorobyeva, O. I. (2018). ***Bionic architecture: back to the origins and a step forward.*** *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 451(1), 12145.
- Westermeier, A. S., Sachse, R., Poppinga, S., Vögele, P., Adamec, L., Speck, T., & Bischoff, M. (2018). ***How the carnivorous waterwheel plant (Aldrovanda vesiculosa) snaps.*** *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *285*(1878), 20180012.
- Yi, H., Kim, D., Kim, Y., Kim, D., Koh, J., & Kim, M.-J. (2020). ***3D-printed attachable kinetic shading device with alternate actuation: Use of shape-memory alloy (SMA) for climate-adaptive responsive architecture.*** *Automation in Construction*, 114, 103151.
- Yi, Y. K., Yin, J., & Tang, Y. (2018). ***Developing an advanced daylight model for building energy tool to simulate dynamic shading device.*** *Solar Energy*, 163, 140–149.