یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

# طراحی پوسته های هوشمند در معماری با الهام از میوه درخت کاج

علیرضا مشبکی اصفهانی[۱]، کیوان ملک زاد[۲](مسئول مکاتبات)

[۱] عضو هیئت علمی دانشگاه پیام نور تهران،ایران alirezamoshabaki@yahoo.com

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد معماری بایونیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب kevin.malekzad@gmail.com

**۱-چکیده**

نیاز به وجود یک سرپناه موجب شده است تا انسانها همواره در پی یافتن راهی جهت رفع این نیاز مهم باشند. آنها در ابتدا با نگاه به اطراف خود و لانه و سرپناه دیگر حیوانات و پرندگان سعی در الهام گیری از آنها کرده و زندگی خود را کم کم با طبیعت و اطراف خود هماهنگ می کردند.در این مقاله سعی شده با الهام از میوه درخت کاج در ساخت مواد و متریالهای متنوع در صنایع گوناگون و با توجه به عملکرد باز و بسته شدن فلسهای کاج در شرایط گوناگون آب و هوایی به بررسی پوسته های هوشمند نماهای پارامتریک ساختمانی پرداخته شود و ساختمان سوئیس ری مورد مطالعه قرار گیرد.هدف از انجام این پژوهش، تحقیق درباره این نکته است که چگونه میتوان از فرم فراکتال گونه ی میوه درخت کاج در معماری استفاده کرد. روش تحقیق در این مطالعه با رویکرد کیفی و هدف آن از نوع کاربردی توسعه ای بوده و با روش تحلیل محتوا از طریق گردآوری کتابخانه ای انجام شده است.

**کلمات کلیدی:** فراکتال، طبیعت، میوه درخت کاج، معماری،پوسته هوشمند

## Smart shell design in architecture inspired by pine fruit

**Abstract**

The need for a shelter has led humans to always find a way to meet this important need. At first, they tried to be inspired by looking around and the nests and shelters of other animals and birds, and gradually harmonized their lives with nature and their surroundings. In this article, we tried to be inspired by the fruit of the pine tree in Manufacture of various materials and materials in various industries and according to the performance of opening and closing pine scales in different climatic conditions, the smart shells of parametric building facades should be studied and the Swiss Ray building should be studied. The research is on how to use the fractal form of the pine fruit species in architecture. The research method in this study is a qualitative approach and its purpose is developmental applied and the content analysis method is done through library collection.

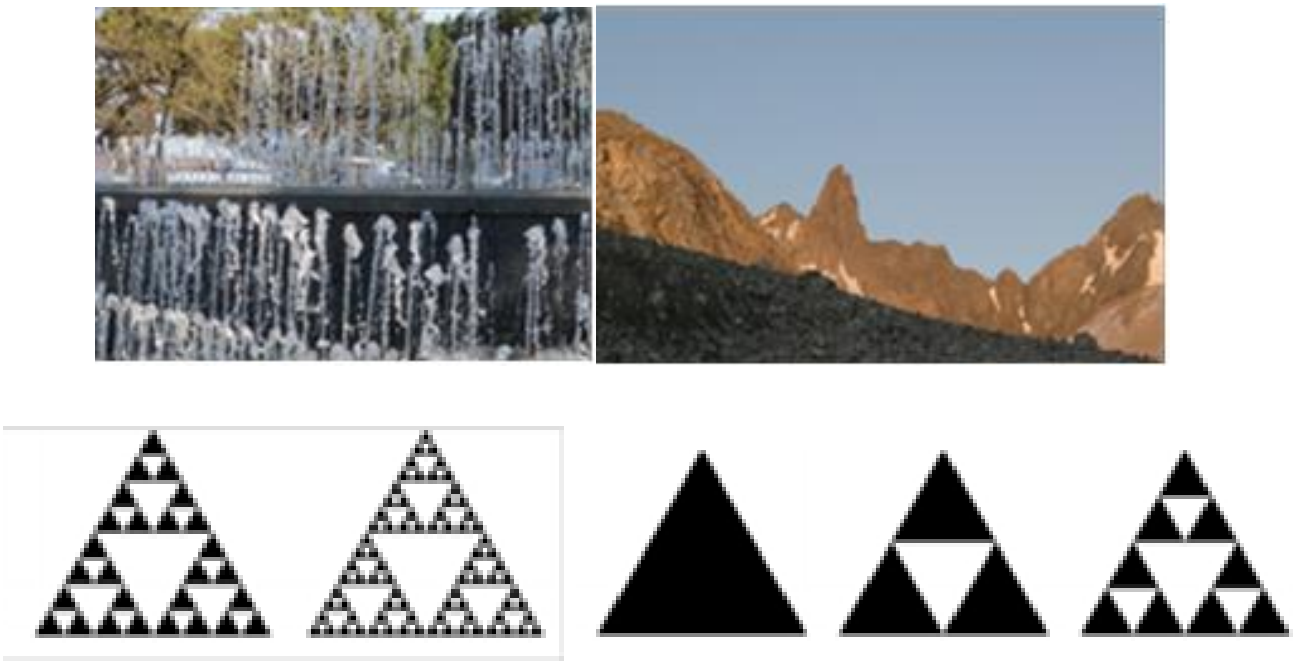
**Keywords:**

fractal, nature, pine tree fruit, architecture, smart shell

**۲-مقدمه**

همواره طبیعت بهترین و بزرگترین سرچشمه الهام انسان برای زندگی بوده است. او با دخل و تصرف در طبیعت توانسته شرایط بهتری برای زندگیش ایجاد کند، چه زمانی که به غارها پناه می برد و چه هنگامی که از کوچ کردن مدام به سکنی گرفتن در کنار رودهای بزرگ رسید. با نگاه و بررسی ژرفتر در طبیعت پی به روابطی عمیق در میان عناصر طبیعت برد و شروع به رشد و گسترش آن در جهت بهبود زندگی خود کرد. از لئوناردو داوینچی که با نگاه و تفکر در نوع حرکت و پرواز سنجاقک و کار روی آن ایده به طرح اولیه هلی کوپتر و در اصل پرواز انسان رسید تا بعد ها این ایده به ساخت هلی کوپتر برسد تا مطالعه و بررسی روی ماهی ها که منجر به ساخت زیر دریایی ها گردید.آثار معماری برجا مانده در سراسر دنیا که موجبات تحسین همگان را بر انگیخته دارای تناسبات و هماهنگی ویژه ایست و برای پاسخ به این پرسش که زیبایی این شاهکارهای معماری گذ شته از چیست، در قرن بیستم بنوا ماندلبر[۱] در کتاب خود به نام "هندسه فرکتال طبیعت" شکل۱ که در سال ۱۹۷۷ منتشر شد، اصطلاح "فرکتال" را معرفی کرد[۱]. بر این اساس پرسشهای پژوهش حاضر به شرح ذیل می باشد:

- چه مکانیسمی باعث باز شدن پولک های میوه کاج می شود ؟
- چگونه می توان از این مکانیسم در طراحی پوسته های هوشمند در معماری پارامتریک الگوبرداری کرد؟



شکل ۱. فراکتال کلاسیک، فراکتال پویا، فراکتال تصادفی

**۳-مبانی نظری:**

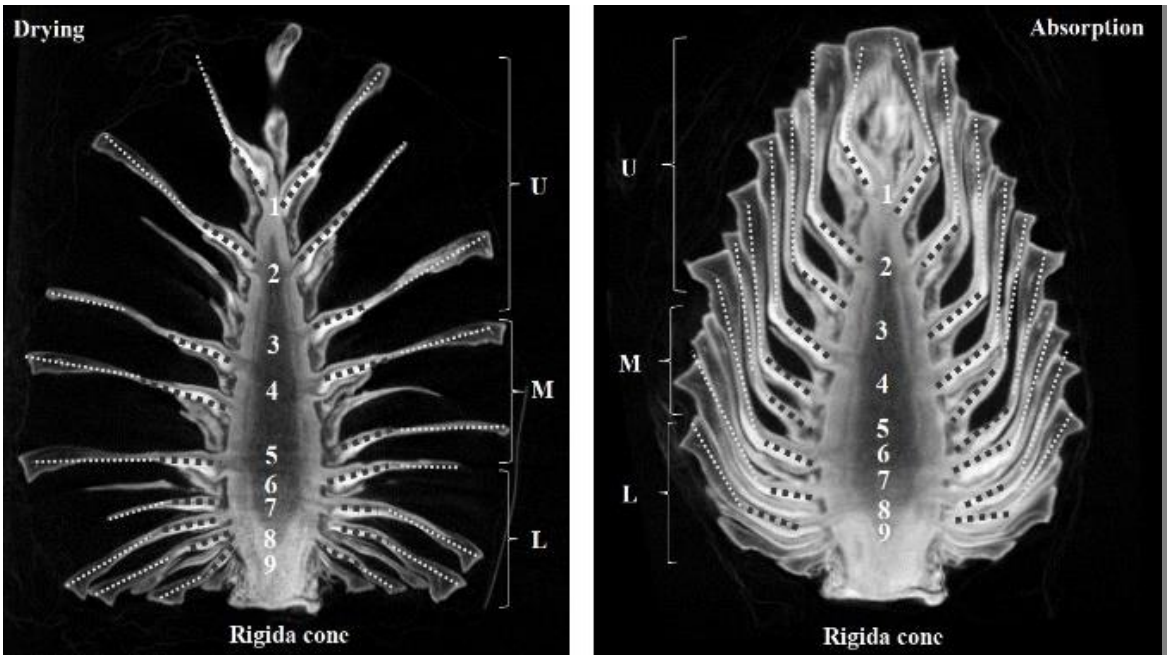
امروزه بحث بازگشت به طبیعت و الگوبرداری از آن به عنوان یکی از چالش های مهم در دنیا مطرح شده است. فرم های پایدار طبیعی و فراکتالی این قابلیت را دارند که با کمترین مقدار، بیشترین بازدهی و کارایی را حاصل کنند؛ چراکه با طبع بشر هماهنگی داشته و کمترین آسیب را به محیط زیست وارد می کنند[۲]. فراکتال از کلمه لاتین فرکتیس[۲] به معنی شکسته یا نامنظم یا ناصاف برگرفته شده است[۳]. یک فراکتال ناهموار است، شبیه به خود است، بی نهایت پیچیده است و از طریق تکرار ایجاد می شود. بی شک الگوهای فراکتالی جز اصلی زندگی ما هستند. به عنوان مثال می توان به رعد و برق، ابر، درخت، رودخانه و کوه اشاره کرد[۴]. از آنجاییکه ویژگیها و صفات گیاهان همواره تحت تاثیر تغییرات و شرایط محیطی قرار می گیرد[۵]. بدست آوردن این ویژگیهای گیاهان با بررسی مکانیسم

های درونی آنها برای درک بهتر ساختارشان اهمیت فراوان دارد. ساختار گیاهی میتواند از طریق تغییرات مورفولوژیکی حرکات پیچیده ای ایجاد کرده و این حرکان ارتباط نزدیکی با ساختار پیچیده هر گونه گیاهی دارد[۶].

کاج ها به دلیل ماهیت انعطاف پذیر و حرکت فلسهایشان مورد توجه تحقیقات قرار گرفته اند. هنگامی که رطوبت زیاد باشد، بافت الیاف فلسهای کاج منقبض می شند و برعکس در حالتیکه رطوبت کم باشد(خشک)، این الیاف منبسط شده و باز می شوند. حدس زده می شود که این رفتار مکانیکی مخروط کاج است که ساختار و اجزای فیبر گونه آنرا فرم می دهد. بنابراین درخت کاج در رطوبت نسبی بالا خم می شود[۷]. بنابراین مکانیسم های خاص باز و بسته شدن کاج به استراتژی بقا مربوط می شود که به کاج اجازه می دهد دانه ها را در فواصل طولانی تری پخش کند[۸].

در نتیجه شکل مخروط کاج در محیط بخاطر اینکه مخروط به رطوبت جای گرفته در خودش مرتبط است، تغییر می کند[۹]. تغییر شکل درخت کاج به مقدار آبی که در بین عوامل محیطی خارجی وجود دارد مربوط می شود. مخروط درخت کاج زمانی که روی درخت هست زنده است، در حالی که زمانی که می افتد سلول های مرده را تشکیل می دهد [۱۰].

بنابراین، عملیات اجرای مکانیزم رطوبت سنجی فلس های کاج را می توان به عنوان یک مکانیسم غیرفعال طبقه بندی کرد. از آنجایی که بافتی وجود دارد که فلس های مخروطی را در پایه نگه می دارد، تشکیل سلول های مرده کاج باعث حفظ شکل ها می شوند. زوایای مقیاس از نظر تئوری با استفاده از برنامه ای برای مقایسه تفاوت‌های باز (باز کردن) و بسته شدن (تا کردن) اندازه‌گیری شدند. تجزیه و تحلیل زوایای باز و بسته شدن مقیاس های مخروطی حداقل اطلاعات را برای اندازه گیری پارامترهای ساختاری مخروط ها فراهم می کند. در این تحقیق مقیاس مخروطی به دو بخش براکت و فلس طبقه بندی شدند. داوسون و همکاران به تفصیل توضیح دادند که این مقیاس از یک مقیاس براکتی و مقیاس تخمک‌ساز شامل فیبرها و اسکلریدها تشکیل شده است [۱۱]. زاویه حرکت براکت ها (نقطه های پررنگ) و مقیاس ها (نقاط) مخروط هایی که اندازه گیری شد را معین می کنند شکل۲[۱۲].



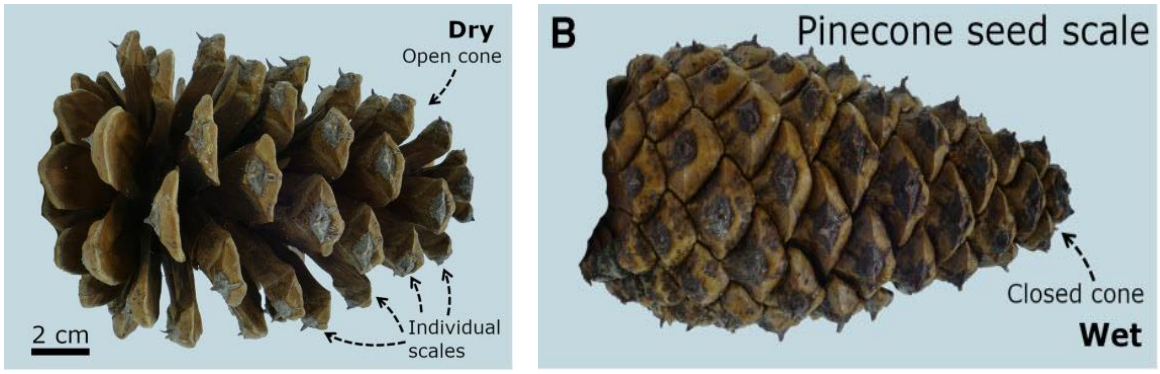

شکل ۲. اعداد و مکان های اندازه گیری زوایای باز و بسته شدن مخروط های "ریگیدا" و "گومسول" با توجه به خشک شدن و جذب آب. براکت (•••••)، مقیاس (·····)

**۴-پیشینه پژوهش**

به منظور درک بهتر عملکرد گیاهان، تجزیه و تحلیل ساختار داخلی گیاهان با ساختار پیچیده و همچنین نظارت موثر بر مورفولوژی گیاهانی که توسط محیط خارجی تاثیر پذیرفته یا تغییر شکل می دهند بسیار مهم است.تشریح ویژگیهای ساختاری مخروط کاج در در نحوه الگوی باز و بسته شدن فلسهای آن مورد مطالعه قرار گرفته و با توجه به اینکه رطوبت خارجی محیط منجر به چنین حرکتی می شود می توان یک سیستم علمی برای تغییر شکل مخروط کاج برای سازه های متغیر به دلیل تغییرات رطوبت نسبی و همچنین به کارگیری فناوری پیشنهاد داد. این مطالعه با کاوش در خواص مورفولوژیکی و ساختارهای تشریحی درخت کاج، یک اصل کاربردی برای یک رویکرد چند رشته ای ارائه می کند. بنابراین، نتایج یک کاربرد بالقوه را برای استفاده در مواد با انرژی کارآمد و با ترکیب اصول رطوبت سنجی در فناوری مهندسی و همچنین ارائه داده های اساسی برای تحقیقات بیومیمیک پیشنهاد می کند[۱۳]. در بررسی فرایند مدل سازی دیجیتالی که هدفش دستیابی به انعطاف پذیری و سازگاری معماری است با الهام از حرکت فلسهای کاج، یک طرح مدولار انعطاف پذیر با استفاده از روشهای مختلف از جمله الگوهای پارامتریک ریاضی و یا شبیه سازی ساخت مبتنی بر اوریگامی پیشنهاد و ارزیابی شده است. از طریق این سیستم طراحی مدولار، یک سایت انتخاب و با الزامات محیطی در نظر گرفته شده و نتایج آن نشان می دهد که چگونه این حرکت فلسهای کاج ممکن است به طراحی و ساخت معماری تطبیقی منجر شود[۱۴].

حرکات گیاهی برای رویکردهای بیومیمتیک که مکانیسم‌های سازگار بدون لولا (ساختارهای انعطاف‌پذیر) برای کاربردهایی، به عنوان مثال، در معماری، رباتیک و پزشکی توسعه می‌یابند، مورد توجه فزاینده‌ای هستند. در ابتدا به طور خلاصه در مورد اصول حرکتیه چنین گیاهانی بحث شده و نشان داده شده که چگونه می‌توان از حالت‌های مختلف تحریک، یعنی نیروهای محرکه حرکت در رویکردهای بیومیمتیک برای توسعه سیستم‌های فنی متحرک استفاده کرد. سپس بر پیشرفت‌ها و پیشرفت‌های فعلی در این زمینه، یعنی اجرای فنی اصول حرکت گیاه از طریق ساخت افزودنی، توسعه ساختارهایی با قابلیت ردیابی حرکات (تروپیسم) و توسعه ساختارهایی که می‌توانند مراحل حرکتی چندگانه را انجام دهند، تأکید شده است. با توجه به بخش تولید مواد افزودنی، نتایج اصلی را در مورد انتقال موفقیت آمیز چندین اصل حرکت گیاه به ساختارهای تغییر شکل رطوبت سنجی چاپ سه بعدی ("چاپ ۴ بعدی") ارائه می شود. سیستم های به دست آمده عبارتند از: تحریک مبتنی بر رشد لبه (همانطور که از گلبرگ های گل زنبق شناخته می شود)، ساختارهای فلس مانند خمشی با تنظیمات دولایه کاربردی (الهام گرفته از مخروط کاج)، معماری های دیافراگم مدولار (همانطور که می توان به طور مشابه در پریستوم های خزه مشاهده کرد). تحریک ناپایداری الاستیک با ضربه محکم و ناگهانی (همانطور که از تله مگس بند ناهید شناخته شده است)، و تقویت حرکتی تاشو منحنی مانند اوریگامی (الهام گرفته از گیاه چرخ آب گوشتخوار). مکانیسم‌های سازگار با بیومیمتیک جدید، امکان‌پذیری تکنیک‌های چاپ مدرن را برای طراحی و توسعه پاسخ‌های حرکتی متناسب را برای کاربردهای فنی برجسته می‌کند. سپس بر روی چالش‌های پایدار در این زمینه تمرکز شده، یعنی چگونگی افزایش سرعت سازه‌های هیدرولیکی آهسته ذاتی و چگونگی دستیابی به انعطاف‌پذیری و استحکام عملکردی، پیش از پیشنهاد ایجاد یک کاتالوگ طراحی حرکت، مورد بررسی قرار گرفته است[۱۲].

هیگرومورف های طبیعی و مصنوعی، اشیایی که با تغییر شکل خود به رطوبت محیط پاسخ می دهند در نظر گرفته شده و با استفاده از مخروط کاج به عنوان مثالی که هنگام خشک شدن باز می شود و در صورت خیس شدن بسته می شود، هندسه، مکانیک و دینامیک بسته و باز شدن را در سطوح سلول، بافت و اندام، بر اساس دانش ساختاری قبلی خود، مورد پژوهش قرار گرفته است. یک نظریه مقیاس بندی ساده به ما امکان می دهد تا کیفیت پویایی چرخه ای باز و بسته شدن بدست آورده شود. همچنین نشان داده شده که چگونه هیگرومورف‌های دولایه ساده کاغذ و پلیمر رفتار مشابهی را نشان می‌دهند که می‌توان آن را از طریق نظریه‌ای اندازه‌گیری کرد که سیال را در یک محیط متخلخل و شار تبخیری به مکانیک و هندسه جفت می‌کند. اینکار مشاهدات متنوعی از هیگرومورف‌های طبیعی را متحد کرده و آنالوگ‌های بیومیمتیک جالبی را پیشنهاد می‌کند که با استفاده از یک گل مصنوعی با واکنش گلدهی و بسته شدن قابل کنترل نشان داده میشود شکل۳ [۱۵].




شکل۳. میوه درخت کاج را در دو حالت خیس و خشک نشان می دهد.

سیستم‌های ناستیک گیاه‌شناسی واکنش‌های ساختاری غیر جهت‌دار به محرک‌هایی مانند رطوبت، فشار، نور، مواد شیمیایی یا دما نشان می‌دهند. هیگروناستی به سیستم هایی اطلاق می شود که به طور خاص به رطوبت پاسخ می دهند. بسیاری از مکانیسم های پراکندگی بذر مانند ریشک گندم، غلاف حبوبات، صنوبر و کاج در این طبقه بندی قرار می گیرند. تنوع رفتارها از باز و بسته شدن تا در خود فرو رفتن به شدت متفاوت است، اما مکانیسم بر اساس تورم مشتق شده از رطوبت بین دو ناحیه مجاور بافت است. ما کاربرد اصول هیگروناستیک را به طور خاص در چارچوب منسوجات از طریق دریچه سلسله مراتب ساختاری توصیف می‌کنیم. دو نمونه اولیه جدید ارائه شده است.یکی برای افزایش نفوذپذیری در برابر جریان هوا در شرایط مرطوب و کاهش نفوذپذیری در محیط خشک به میزان ۲۵ تا ۳۰ درصد طراحی شده است، این ویژگی در مقایسه با منسوجات معمولی پنبه، پشم و ابریشم مصنوعی است که با افزایش رطوبت، نفوذپذیری خود را در برابر جریان هوا کاهش می‌دهند قرار دارد. نمونه دوم طراحی و توسعه یک فیبر با تغییر شکل رطوبت سنجی را توصیف می کند که قادر است طولش را در شرایط مرطوب تا ۴۰ درصد در مقایسه با شرایط خشک کاهش دهد[۱۶].

بیومیمتیک فرصتی برای توسعه سیستم های ساختمانی کارآمد در حوزه انرژی است. چندین پوسته ساختمانی بیومیمتیک (Bio-BS) در دهه گذشته ساخته شده‌اند، با این حال تعداد کمی از آنها به موضوعات گوناگون پرداخته‌اند، اگرچه سیستم‌های بیولوژیکی که از آنها الهام گرفته‌اند دارای ویژگی‌های چند عملکردی هستند. مطالعات اخیر نشان داده اند که علیرغم ابزارها و روش های متعددی که برای توسعه سیستم های بیومیمتیک توضیح داده شده است، استفاده از آنها برای طراحی پوسته ساختمانی بسیار نادر است. برای ارزیابی چالش‌های اصلی فرآیندهای طراحی بیومیمتیک و تأثیر آنها بر طراحی نهایی، یک تحلیل مقایسه‌ای از چندین پوسته ساختمانی موجود ارائه شده است. تجزیه و تحلیل ها با ابزار توصیفی تک متغیره و چند متغیره به منظور برجسته کردن روندهای اصلی، شباهت ها و تفاوت های بین پروژه ها انجام شد. نویسندگان فرآیند طراحی پوسته ساختمانی موجود را، از جمله تمرکز بر مراحل مربوط به درک مدل‌های بیولوژیکی، ارزیابی کردند. داده ها در طول مصاحبه جمع آوری شدند. تجزیه و تحلیل تک متغیره نشان داد که پوسته ساختمانی به میزان بسیار کمی از چارچوب طراحی بیومیمتیک (۵٪) پیروی می کند. هیچ یک از پوسته ساختمانی به اندازه مدل(های) الهام گرفته شده ی بیولوژیکی آنها چند کارکردی نبودند. نتیجه گیری بیشتر نشان می دهد که پوسته های ساختمانی بیشتر از ارگانیسم های بیولوژیکی منفرد (۸۲٪) الهام گرفته شده است که عمدتاً به قلمرو حیوانات (۵۳٪) و گیاهان (۳۷٪) تعلق دارند. تجزیه و تحلیل چند متغیره نشان داد که پوسته های ساختمانی به دو گروه اصلی تقسیم شده اند: (۱) پروژه های دانشگاهی که همبستگی قوی با ورودی های زیست شناسی در فرآیندهای طراحی خود دارند و منجر به نوآوری ریشه ای می شوند. (۲) پروژه های ساختمان های عمومی که از روش های طراحی و ساخت متعارف برای نوآوری تدریجی با بهبود سیستم های ساختمانی موجود استفاده می کنند. این پروژه‌ها شامل زیست‌شناسان و درک کامل مدل‌های بیولوژیکی در طول فرآیند طراحی آن‌ها نمی‌شد. از آنجایی که برخی از ابزارهای بیومیمتیک در دسترس هستند و پوسته ساختمانی محدودیت هایی را از نظر چند کارکردی نشان داده است، نیاز به ترویج استفاده از ابزارهای چند رشته ای در فرآیند طراحی پوسته های ساختمانی و نیازهای طراحان برای افزایش کاربرد قابلیت های چندمنظوره برای بهبود عملکرد وجود دارد[۱۷].

**جدول۱. پیشینه پژوهش**

| نظریه پرداز | سال | اسم مقاله یا کتاب | هدف پژوهش | نتایج کلی |
|---|---|---|---|---|
| Haejin Bae and Jinhee Kim[۱۳] | ۲۰۲۰ | اصول عملکردی ساختارهای مورفولوژیکی و تشریحی در کاج | تجزیه و تحلیل داده‌های اسکن مقطع و الگوهای حرکت داخلی در باز و بسته کردن کاج‌ها، که با توجه به رطوبت محیط خارجی آن تغییر می‌کند | یک کاربرد بالقوه برای استفاده در مواد کم مصرف با ترکیب اصول رطوبت سنجی در فناوری مهندسی و همچنین ارائه داده های اساسی برای تحقیقات بیومیمیک را پیشنهاد میدهد. |
| Huang, W., et al[۱٤]. | ۲۰۱۸ | پارامترسازی حرکت ناستیک کاج برای طراحی معماری قابل تطبیق | به بررسی یک فرآیند مدل‌سازی دیجیتالی می‌پردازد که هدف آن دستیابی به انعطاف‌پذیری و سازگاری معماری است | نشان می‌دهد که چگونه حرکت ناستیک مانند کاج ممکن است به طراحی و ساخت معماری تطبیقی منجر شود |
| Poppinga, Simon, et al[۱۲]. | ۲۰۲۰ | حرکات گیاه به عنوان مولدهای مفهومی برای توسعه مکانیسم های سازگار با بیومیمتیک | در مورد اصول حرکت گیاهان بحث و بررسی شده | انتقال موفقیت آمیز حرکت گیاه به ساختارهای تغییر شکل رطوبت سنجی چاپ سه بعدی ("چاپ ۴ بعدی") ارائه می دهد |
| Reyssat, E., & Mahadevan, L[۱٥]. | ۲۰۰۹ | از مخروط کاج تا لایه های بیومیمتیک | اشیایی که با تغییر شکل به رطوبت محیط پاسخ می دهند. | پیشنهاد آنالوگ های بیومیمتیک که با استفاده از یک گل مصنوعی، واکنش گلدهی و بسته شدن قابل کنترلش را نشان می دهد. |
| Kapsali, Veronika, and Julian Vincent [۱٦]. | ۲۰۲۰ | از کاج تا طراحی یک پارچه فعال | کاربرد اصول هیگروناستیک(پاسخگو به رطوبت) به طور خاص در چارچوب منسوجات | ارائه دو نمونه اولیه منسوجات پاسخگو به رطوبت |
| Cruz, Estelle, et al[۱۷]. | ۲۰۲۱ | فرآیندهای طراحی و تنظیم چندگانه پوسته های ساختمانی بیومیمتیک | ارزیابی چالش‌های اصلی فرآیندهای طراحی بیومیمتیک و تأثیر آنها بر طراحی نهایی با تحلیل مقایسه ای از چندین Bio-BS | نتیجه گیری بیشتر نشان می دهد که Bio-BS بیشتر از ارگانیسم های بیولوژیکی منفرد (۸۲٪) الهام گرفته شده است که عمدتاً به قلمرو حیوانات (۵۳٪) و گیاهان (۳۷٪) تعلق دارند. |
| Abdullah, A., Said, I. B., & Ossen, D. R[۲۷]. | ۲۰۱۸ | کاربرد تکنیک تطبیقی فرم در طبیعت در معماری | بر کاربردهای بیومیمتیک اخیر در معماری، به‌ویژه استراتژی‌های تنظیم حرارت تاکید می‌کند | این بررسی نشان می دهد که معماران به طور قابل توجهی به راه حل های طبیعت به عنوان منبع سیستم بدون زباله، صرفه جویی در انرژی و کنترل محیط حرارتی روی می آورند. |
| Loka, S., et al[۲۸]. | ۲۰۱۹ | الهام بخش معماری داخلی پاسخگو از رفتار رطوبت سنجی ذاتی مخروط های کاج | دستیابی به سطح جدیدی از مطالعات در زمینه انتقال بیومیمتیک اصول حرکت گیاه به سیستم های فنی متحرک است. | اهمیت «رفتار رطوبت‌سنجی مخروط‌های کاج» در طراحی فضاهایی که برای تولید الگوهای مورفولوژیکی پاسخگو که در آن لایه‌های مختلف چوب شروع به واکنش می‌کنند، تحلیل |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | می‌شود |
| Kapsali, Veronika[۲۹]. | ۲۰۰۹ | بیومیمتیک و طراحی لباس در فضای باز | بر روی کاربردهای خاص لباس در فضای باز تمرکز دارد. | طرح کلی الزامات عملکرد لباس که به‌طور خاص برای محافظت در شرایط سرد بیرون طراحی شده است و نمونه‌هایی از فناوری بیومیمتیک که چنین عملکردی را ارائه می‌دهد، دنبال شده است. |
| Andres, Christine M., et al[۳۰]. | ۲۰۱۴ | اوریگامی نانوکامپوزیتی شکل‌دهنده | گزارش یک مکانیسم شکل‌گیری شکل مشابه با استفاده از تورم دیفرانسیل جوهر افشان‌های چندلایه پلی‌الکترولیت آبدوست که روی یک کامپوزیت نانولوله کربنی LBL (CNT) رسوب کرده‌اند. | فرصت‌های جدیدی را برای طراحی و ساخت ساختارهای نانومقیاس شکل‌دهنده شکل و ساختارهای میکرومقیاس پاسخگو به محرک‌های کاربردی برای کاربردهای مختلف ارائه می‌کند. |
| Erb, Randall M., et al[۳۱]. | ۲۰۱۳ | کامپوزیت های خود شکل دهی با ریزساختارهای قابل برنامه ریزی الهام گرفته از طبیعت | پیشنهاد مکانیسم تغییر شکل غیرمعمول سیستم‌های طبیعی در کامپوزیت‌های مصنوعی الهام‌گرفته از طبیعت است | تولید کامپوزیت‌هایی با برگشت‌پذیری غیرمعمول، اثرات پیچ‌خوردگی و تغییرات شکل قابل برنامه‌ریزی خاص است |

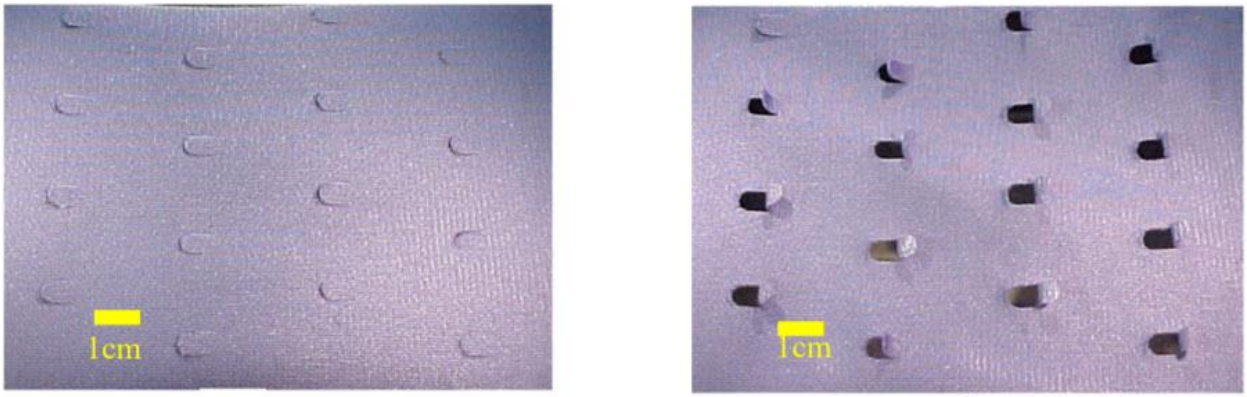
**۵-نمونه های موردی**

**محصولاتی که با الهام گیری از میوه درخت کاج در صنعت تولید می شوند**

**-لباس هوشمند**

ساختار گیاهان و کنترل حرکت آنها فرصت های قابل توجهی را برای بیومیمتیک، به ویژه در زمینه سیستم های مواد فعال و روباتیک نرم ایجاد می کند، زیرا دیدگاه کاملاً جدیدی در مورد اینکه چه چیزی یک ماشین را تشکیل می دهد و چگونه می توان آنها را تغذیه کرد، ارائه می دهد. حرکت ناستیک(اجزای گیاه) به طور کامل با استفاده از منابع جایگزین و در عین حال فراوان انرژی، مانند نور (فوتوناستیک/نیکتیناستی)، دما (ترموناستی) و لمس (زلزله) برای تحریک پاسخ های فیزیکی به دست می آید. ما بر روی هیگروناست تمرکز می کنیم - حرکت گیاه که توسط دستکاری رطوبت ایجاد می شود[۱۶].

کاربرد این مکانیسم در نمونه اولیه نساجی توسط داوسون، وینسنت و روکا نشان داده شد[۱۱]. آنها یک منسوجات تجاری متشکل از یک پارچه پلی استر محکم بافته شده بر روی صورت (سمت پارچه که برای استفاده به عنوان سطح در نظر گرفته شده است یا در محصول نهایی قابل مشاهده است) را شناسایی کردند که توسط یک غشای کوپلیمر بلوک پلی اتر استر هیدروفیل غیر متخلخل پوشانده شده است. مانند آنهایی که با نام تجاری سیمپتکس تی ام[۳] به بازار عرضه می شوند. این دو ماده با استفاده از یک فرآیند لمینیت صنعتی با استفاده از چسب های پلیمری هیدروفیل به هم متصل می شوند. چنین لمینت‌هایی در سیستم‌های پوشاک استفاده می‌شوند تا اجازه دهند بخار رطوبت از منسوجات خارج شود اما از نفوذ قطرات آب خارجی به سیستم لباس جلوگیری می‌کند. الیاف پلی استر هنگامی که در معرض رطوبت قرار می گیرند کمی متورم می شوند. جزء پلی اتر در حضور رطوبت به طور قابل توجهی متورم می شود. برش های قالب U شکل که در سراسر صفحه پارچه دولایه قرار گرفته اند، با افزایش و کاهش رطوبت باز می شوند شکل b۴ و بسته می شوند شکل a۴. بنابراین، لایه متخلخل می شود.




a b

شکل ۴. عکس از پارچه کاج اصلی در شرایط خشک (a) و مرطوب (b). اندازه نمونه ۱۰×۵ سانتی متر است. هنگامی که لایه پلی اتر رطوبت گیر در معرض بخار رطوبت متورم می شود، منافذ باز می شوند.

بر اساس این کار منتشر شده، نایک (مارک پوشاک ورزشی) به طور مستقل این اصل دولایه را به عنوان یک ساختار پارچه‌ای دولایه توسعه داد. پارچه بافتنی که با استفاده از دستگاهی ساخته می‌شود که دارای مجموعه‌ای از سوزن‌ها برای تولید دو لایه موازی پارچه است که با بخیه‌های به هم پیوسته به هم متصل می‌شوند. سیستم نساجی فعال از نظر ترکیب الیاف نخ اجرا شد. روی (لایه بالا، رو به بیرون) منسوجات از نخ های حاوی الیاف پلی استر آبگریز استفاده می شود. لایه دوم یا پشت منسوجات از نخ های حاوی الیاف ساخته شده از پلی آمید آبدوست تشکیل شده بود. الیاف پلی آمید در صورت مرطوب شدن منبسط می شوند [۱۶]. سیستم به دست آمده در یک لباس تنیس پیاده سازی شد. ترازوهایی، شبیه به بال‌های U شکل در پارچه‌های افکت کاج، در پشت لباس معرفی شدند. فناوری حاصل با نام تجاری مایکرو ری اکت[۴] به بازار عرضه شد شکل ۵.

شکل ۵. جزئیات سیستم پارچه دوتایی فعال پوشاک ورزشی نایک مایکرو ری اکت[۴] در شرایط مرطوب. منبع Getty Images

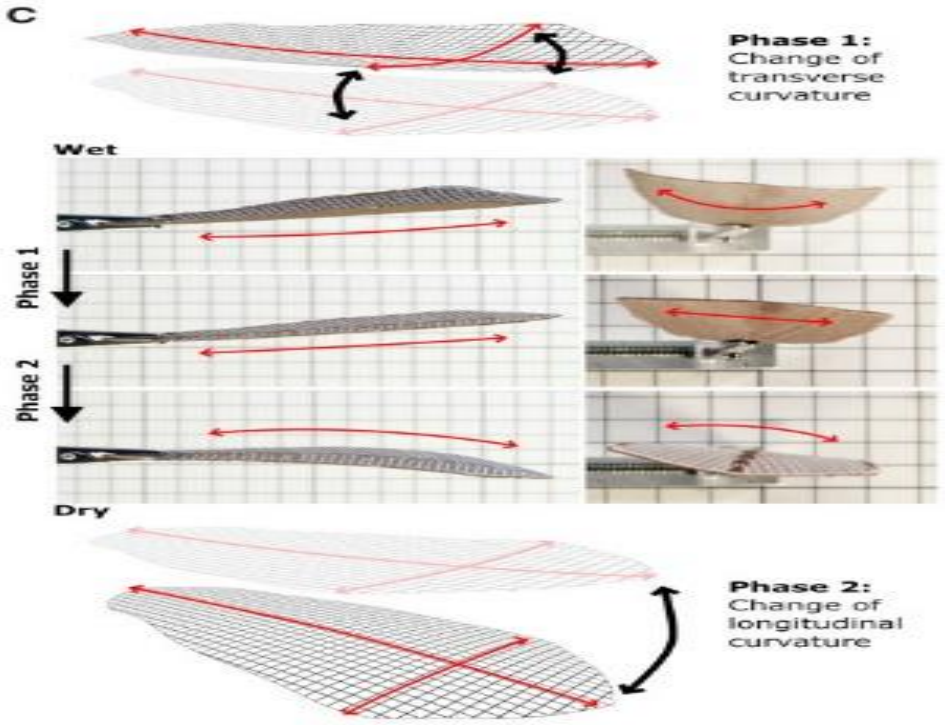
یک فیلم دو لایه اولیه توسط کپسالی با استفاده از دو شکل مختلف سلولز ایجاد شد. یک پلی وینیل الکل برای جزء متورم و یک اتیل سلولز برای قسمت مواد غیر متورم مورد استفاده قرار گرفت. یک فیلم به طول ۲۵ متر در یک مرکز آزمایشی رول به رول در مک‌درمید اتوتایپ، آکسفورد، انگلستان تولید شد که به تک رشته‌هایی با عرض ۰٫۸ میلی‌متر شکاف داده شد و توسط شرکت لورکس[۵] ، لستر، بریتانیا، روی بوبین‌ها برای پردازش در منسوجات پیچیده شد. به دلیل استحکام کششی کم، نخ های تک رشته ای بدون تکیه گاه به تنهایی در تار (نخ های طولی در منسوجات بافته شده) استفاده نمی شوند، بلکه عمدتاً در بافت استفاده می شوند (نخ هایی که در عرض ۹۰ درجه به تار منسوجات بافته شده اعمال می شوند). یک ساختار بافته جدید برای میزبانی از نخ تک رشته‌ای تطبیقی و به حداقل رساندن محدودیت‌ها بر روی تغییر شکل بالقوه تک رشته‌ای که در نقاط در هم تنیده بین نخ‌های تار و پود معرفی شده‌اند، طراحی شده است. نخ پلی استر استاندارد ریسیده شده در تار و تک رشته فعال در پود استفاده شد. نمونه اولیه نساجی شکل ۶ با پشتیبانی فنی از بخش نساجی بافته شده در کالج هنر و طراحی چلسی، بخشی از دانشگاه هنر لندن، روی یک بافندگی دستی تولید شد[۱۶].

شکل ۶. عکس از جزئیات منسوجات فعال خشک. نخ دولایه فعال نوارهای شفاف در بافت (افقی) پارچه را تشکیل می دهد و نخ سفید نخ پلی استر تار پارچه (عمودی) است.

**-پوسته ی هوشمند حساس به آب با الهام از میوه کاج**

پوسته های ساختمانی سیستم هایی با عملکردهای گوناگون هستند که نیاز به کنترل چندین عامل محیطی مانند گرما، نور، رطوبت، تهویه و استرس مکانیکی دارند. عملکرد آنها به شدت بر مصرف کل انرژی ساختمان تأثیر می گذارد، زیرا آنها محدودیت های محیطی را فیلتر می کنند [۱۸]. به منظور بهبود کارایی پوسته های ساختمانی، دانشگاهیان و صنعتگران راه حل های الهام گرفته از طبیعت را بررسی کرده اند که به Bio-BS (پوست های ساختمانی با الهام از زیستی) اشاره می شود. بیومیمتیک یک رویکرد میان رشته ای مبتنی بر ادغام زیست شناسی و فناوری، با انتقال اصول طبیعت به یک راه حل تکنولوژیکی است [۱۶]. حرکات هیدرولیک غیرفعال نیازی به انرژی متابولیک ندارند. آنها توسط محرک تحریک نمی شوند، بلکه تنها با تغییر شرایط محیطی، عمدتاً نوسانات رطوبت، برانگیخته می شوند. به عنوان مثال، ویژگی‌های متمایز تورم/کوچک شدن رطوبت بافت‌ها مستلزم فرآیندهای حرکتی است که می‌توان آن‌ها را در بسیاری از مکانیسم‌های آزادسازی دیاسپور یافت، به عنوان مثال، در درخت کاج شکل۷B [۱۹] .

شکل۷B.عنصر سایه انداز نمای فلکتو فولد[۶] نیز از دو باله و یک ستون فقرات تشکیل شده است. در اینجا، تغییر شکل خمشی ستون فقرات به دلیل جفت شدن سینماتیک در امتداد چین‌های منحنی، مستلزم تکان دادن بالـه‌ها است. تصویر یک نصب فلکتوفولد را در موزه تاریخ طبیعی اشتوتگارت، قلعه روزنشتاین نشان می دهد. تصویر © توسط ITKE Stuttgart

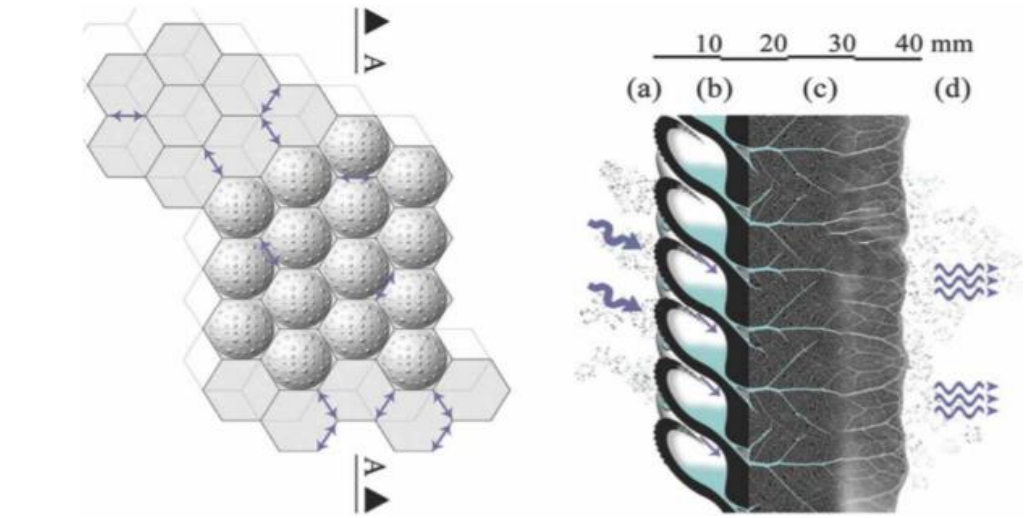



شکل ۸. با الهام از میوه درخت کاج ، یک اندازه مصنوعی چاپ شده ۴ بعدی، یک حرکت را در دو فـاز و دو محـور پـس از خشـک شـدن انجام می دهد. در فاز ۱، اندازه انحنای عرضی خود را تغییر می دهد و در فاز ۲، انحنای طولی تغییر می کند (اندازه از طول خم می شود) [۲۱].

این واقعیت که ساختارهای درگیر حسگر، محرک و عنصر متحرک هستند همه آنها را به مولدهای مفهومی بسیار جالبی برای کاربردهای بیومیمتیک تبدیل می‌کند. پاسخ‌دهی محرک‌های فنی توسعه‌یافته، به‌عنوان مثال، به رطوبت، گرما یا pH را می‌توان با ترکیب مواد متناسب «برنامه‌ریزی» و تنظیم کرد شکلC۸ [۲۰].

**-سیستم هوشمند برداشت آب**

بادارنا و کادری [۲۲] یک دیوار تطبیقی را ارائه کردند که به عنوان یک سیستم برداشت آب با استفاده از مفهوم بیومیمیکری عمل می کند. از اقدامات مبتکرانه برای جمع آوری قطره های آب از روی سطوح دیوار ناهموار استفاده می کند شکل ۹.الف. همچنین هولستوو [۲۳] یک مدل را به عنوان سیستم بیومیمیکری، همانند توانایی میوه درخت کاج با سازگاری و تغییر شکل به رطوبت، برگرفته از همین سازوکار ارائه داد. وی ایده استفاده از مواد هوشمند مشابه با حرکت مخروط کاج را به عنوان یک پوشش معماری برای ساختمان پیشنهاد داد شکل.ب۹.




(الف)

(ب)

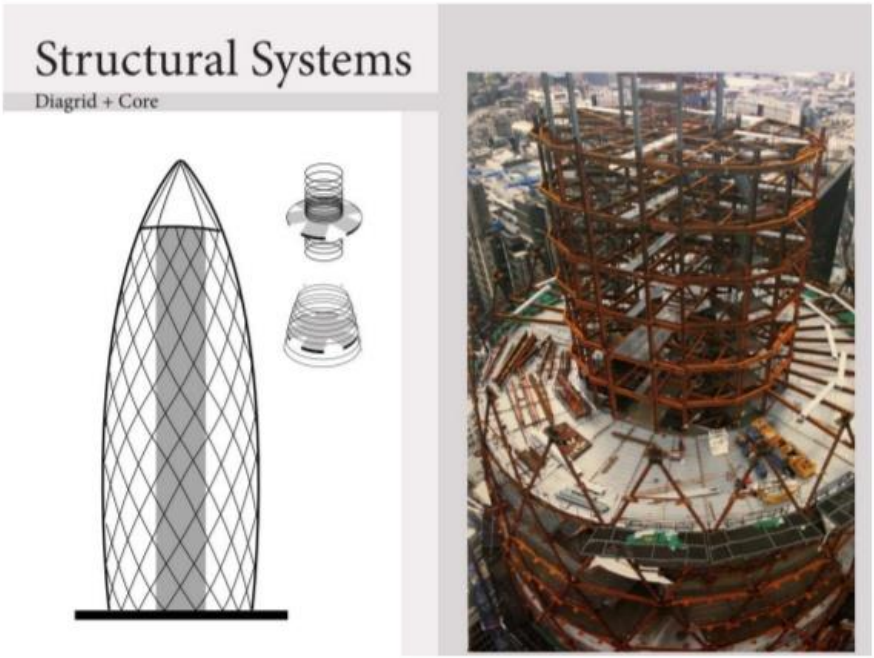
شکل ۹ (الف) سیستم برداشت آب، (ب) تشکیل یک پوسته معماری.

**-طراحی ساختمان سوئیس ری با الهام گیری از میوه درخت کاج**

شاید ۲۰ سال قبل، هیچ کس گمان نمی کرد از ویرانه های ساختمان بورس بالتیک در ماری اکس[۷] لندن برجی ۱۸۰ متری با ظاهری بسیار غیرمتعارف سربرآورد. این ساختمان که اکنون به نام ساختمان سوئیس ری شناخته می شود توسط سر نورمن فاستر[۸] ششمین بنای بلند لندن است و طرحی شبیه به میوه کاج دارد که با کمک تکنیک مدل سازی پارامتری رایانه ای به دست آمده است شکل ۱۰. این برج، با الهام از اندیشه های باکمینستر فولر[۸] و با مد نظر قرار دادن پیوند جدید بین طبیعت و محیط کار، طراحی شده است.

شکل ۱۰. نمایی از ساختمان سوئیس ری[۲۴]

نخستین ساختمان بلند مرتبه ی سازگار با محیط زیست در لندن از لحاظ تکنیکی، معماری و اجتماعی، ساختمانی ساختارشکن و متهورانه به شمار می رود و چه از دید بیرونی و چه از دید داخلی، مشابه هیچ یک از ساختمان های اداری که تاکنون ساخته شده اند نیست. ساختمان برج سوئیس ری، نو آوری های برج های بانک هنگ کنگ [۹]و کومرزبانک[۱۰] را استحکام بخشیده و بسط می دهد تا ازنظر اجتماعی و بوم شناختی، ساختمانی مناسب با نیازهای قرن بیست و یکم را به وجود آورد. فاستر در مورد پتانسیل های پروژه و نحوه طراحی آن می نویسد: این طرح رابطه دوستانه جدیدی بین طبیعت و محل کار پیشنهاد می کند. موقعیت باغچه آن، اقلیم کوچکی را در درون فضای محصور و حساس به انرژی به وجود می آورد، در حالی که دیوارها و سقف آن، در پوسته مثلثی شکل پیوسته ای حل می شوند. از لحاظ بصری، این ساختمان به بافت منحصر به فرد خود در منظر خیابانیِ به شدت به هم تنیده ی موقعیت شهریِ تاریخی اش واکنش نشان می دهد. طراحی فرم کاج گونه ساختمان سوئیس ری علاوه بر آنکه دید ساختمان های مجاور را محدود نمی کند، به دلیل ساختار آیرودینامیکی مناسب خود، موجب می شود تا جریان باد به سادگی از اطراف آن عبور کرده و به این ترتیب، بار باد بر سازه و بدنه ی ساختمان کمتر شود. از این رهگذر، طراحان توانسته اند سازه ی ساختمان را به نحو موثرتری طراحی کنند. شبیه سازی ها و آزمایش ها نشان داد که در سطح طبقات پایین و نزدیکی زمین، باد تغییر مسیر رو به پایین نخواهد داشت و از این رو آسایش و ایمنی رهگذران در پیاده روهای پیرامون ساختمان حفظ خواهد شد. برج سوییس ری دارای پلانی مدور است و با شروع شدن از زمین، عریض شده و از میانه برج به بعد و به سوی راس آن، از عرض آن کاسته می شود؛ چنین فرمی در پاسخ به ساختگاه محدود و کوچکش انتخاب گردید؛ ساختمان باریک تر از یک بلوک مستطیل شکل هم اندازه ی خود است، انعکاس ها کمترند و باریک شدن مقطع آن نسبت به پایه، محدوده ی فضاهای عمومی در طبقه همکف را به حداکثر رسانده است. سازه ی این برج دارای بادبندهای موربی در دیواره ساختمان است و بدین طریق، فضایی بدون ستون در طبقات به وجود آورده است شکل ۱۱ [۲۵].




شکل ۱۱. سازه ساختمان سوئیس ری[۲۶]

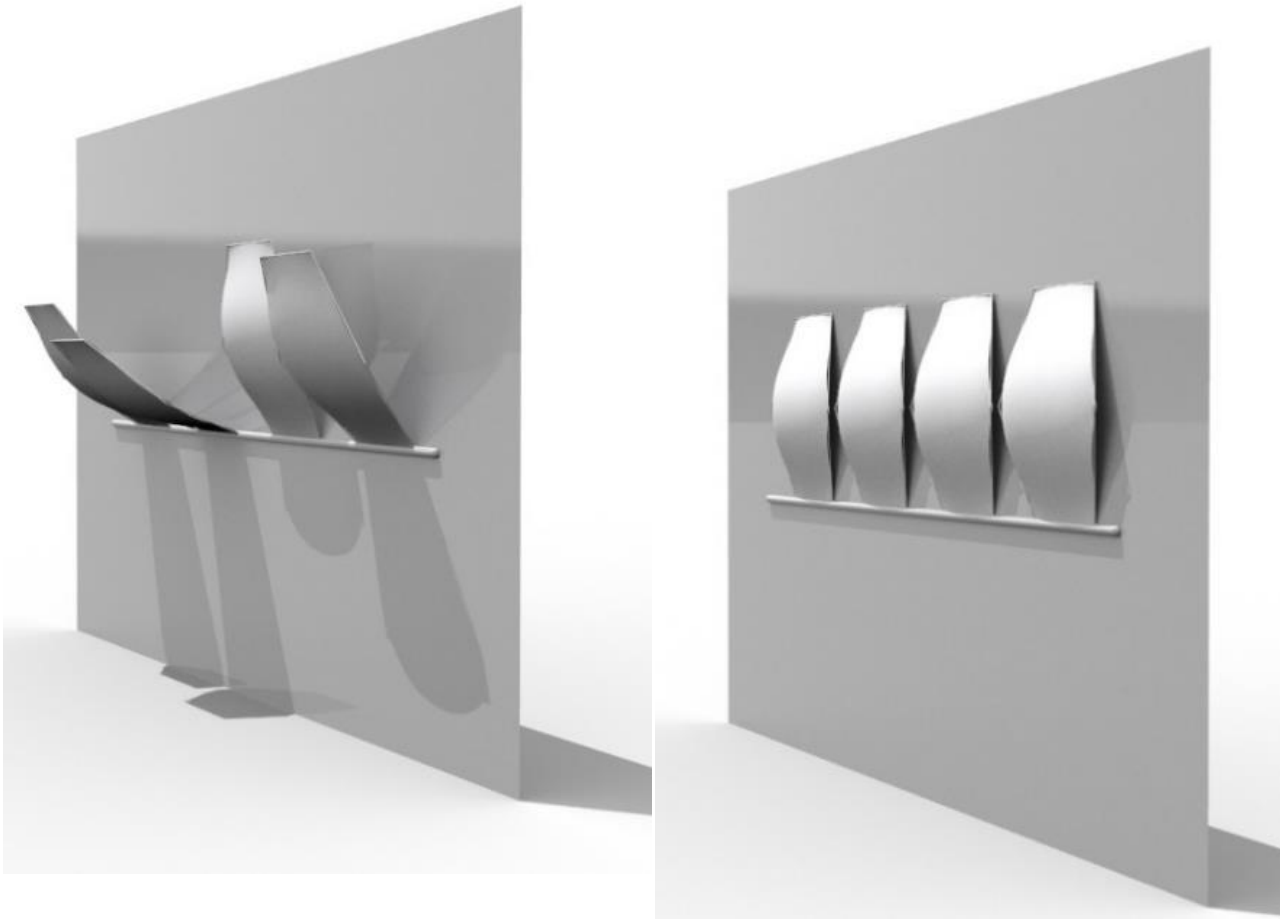
چرخش طبقات باعث می شود، فضاهای بین شعاع های هر طبقه با یکدیگر ترکیب شود و باغ مارپیچی شکلی در فضا به وجود آید. این فضاها، مقیاس اجتماعی ساختمان را کوچک تر می کنند و همچون "شش های" ساختمان، هوای داخلی را تنظیم کرده، محیط مطلوبی به وجود می آورند. دریچه های تعبیه شده در طبقات و پوسته ی ساختمان، نقش هدایت هوای تازه به داخل ساختمان را بر عهده دارند. در روند بازیافت، از هوای نامطلوب می توان در گرمایش ساختمان استفاده کرد، یا آن را به بیرون ساختمان هدایت نمود. فرم مارپیچی شکلی که به وسیله دهلیز سر گشاده طبقات به وجود آمده است، با ایجاد اختلاف فشار، به جریان طبیعی هوا کمک می کند.
ویژگی بارز این بنا، به کارگیری روشهای صرفه جویی انرژی است؛ طراحی این بنا از عوامل طبیعی (مشخصا تابش نور خورشید و جریان باد) به گونه ای بهره برده که هم آسایش بیشتری برای ساکنان آن به وجود بیاورد و هم با کاهش مصرف انرژی، سازگاری با محیط زیست را به حداکثر برساند؛ این برج نسبت به یک ساختمان مستطیل شکل اداری هم قواره خود، انرژی بسیار کمتری مصرف می کند. با بهره مندی از سیستم تهویه طبیعی ایجاد شده و نمای دو پوسته آن، در ۴۰ درصد از روزهای سال سیستم تهویه این ساختمان خاموش است و بهره مندی از نور طبیعی وابستگی به سیستم نورپردازی را کاهش داده است؛ نمای دو پوسته ای تمام شیشه ای ساختمان با هوایی که از دفاتر کاری بیرون می آید، خنک می شود و به این ترتیب، بار حرارت کلی ساختمان کاهش می یابد، ضمن آنکه هوای میان دوجداره شیشه ای، ساندویچ می شود و فضای اداری داخلی را عایق کاری می کند. هسته ی مرکزی ساختمان، هوای تازه را میان طبقات توزیع می کند و لایه داخلی نما موجب نگهداری گرما و توزیع مجدد آن در ساختمان می شود؛ این مکانیزم، مانند ریه های ساختمان عمل می کند، در تابستان هوای گرم بیرون کشیده می شود و در زمستان با استفاده از تابش خورشید، ساختمان گرم می شود؛ این سیستم اتکای ساختمان به تهویه مطبوع را کاهش می دهد و در کنار سایر اقدامات سازگار با محیط زیست، موجب کاهش مصرف انرژی تا ۵۰ درصد، نسبت به برج های اداری با سیستم تهویه مطبوع می شود[۲۵].

**۶-بحث ها و یافته ها**

در این پژوهش سعی شده تا از مکانیزم باز شدن فلس میوه کاج به عنوان پوسته ای هوشمند بهره برد تا با توجه به اقلیم های مختلف از نظر هوا شناسی این پوسته بتواند عملکردی چند جانبه داشته باشد. ایده کلی طرح در این است تا بتوان با استفاده از یک مکانیزم

هوشمند از انرژیهای طبیعی و در دسترس که به خصوص در کشورهای جهان سوم به راحتی هدر می شود، نهایت استفاده را برد و متعاقبا" مصرف سوخت های فسیلی را به حداقل رساند. نمایی شماتیک از طرح در شکل۱۲ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود این پوسته با الهام از فلس های میوه درخت کاج طراحی گردیده و مانند طرح الهام گرفته شده دارای چیدمانی فراکتالی هستند که این چیدمان بر روی نمای ساختمان، پوسته دوم نما را شکل می دهند. همچنین در شکل۱۲ باز شدن این پوسته نشان داده شده است. با توجه به اینکه هرکدام از فلس های قرار گرفته بر روی پوسته نما بصورت منفرد جابجا شده و به ساکنین این امکان را می دهند که هرکدام از این المانها را بصورت دلخواه باز و بسته نموده و مورد بهره برداری قرار دهند.

(ب) (الف)



شکل۱۲. نمایی از طرح پیشنهادی ارائه شده در حالت (الف) بسته و (ب) باز.

این پوسته علاوه بر اینکه امکان ورود و خروج هوا را فراهم می کند، به عنوان سایه بان نیز قابل استفاده است. همچنین با بکارگیری متریال های نوین در این پوسته ها که به تازگی رواج یافته اند می توان با نور خورشید عبوری از این پوسته الکتریسیته تولید کرد. به کار گیری این طراحی انطباق پذیر می تواند به کاهش پیچیدگی ها و هزینه ها و اتلاف گرمایش، سرمایش، تهویه یا نورپردازی منجر شود و بنابر این در مدیریت ذخایر انرژی ساختمان بسیار با اهمیت است. طراحی این سیستم به گونه ای صورت گرفته که در اقلیم های معتدل

و مرطوب مثل شمال ایران که دارای میزان بارندگی زیادی در طول سال است مزایای جانبی ای دیگری نیز فراهم می کند. به این صورت که می توان آب بارانی که بر سطح ساختمان جاری می شود را جمع آوری نموده و از طریق کانالهایی به مخزن ذخیره آب هدایت نمود. از این آب می توان برای مصارف گوناگون مانند آبیاری گیاهان آپارتمانی، شستشو و یا پر کردن فلاش تانکها در این نوع اقلیم ها استفاده نمود. شایان ذکر است که درکشورهایی نظیر ایران که با بحران آب دست به گریبان هستند ذخیره آب از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

## ۷-نتیجه گیری

پوسته های ساختمانی سقف و نما یکی از مهم ترین بخش های ساختمانی محسوب می شوند، چنانکه این پوسته ها در ایجاد شرایط بهینه همچون میزان نور، آسایش حرارتی و رطوبتی نقش مهمی را ایفا می کنند. امروزه پوسته های هوشمند نسبت به انواع شرایط قابلیت تغییر شکل و انطباق پذیری را دارند. در این پژوهش پوسته هوشمندی طراحی شد که از مکانیسم میوه درخت کاج در راستای بهینه سازی انرژی الهام گرفته است. به این منظور سیستم باز و بسته شونده پوسته نمای ساختمان نیز همانند مکانیسم باز و بسته شدن میوه درخت کاج عمل میکند و این سیستم این قابلیت را فراهم میکند تا در درجه نخست با کنترل روشنایی و انرژی حرارتی ساختمان مصرف انرژی بطور موثر و قابل توجهی بهینه سازی گردد. به علاوه از این سیستم می توان به عنوان سایه بان و سیستم ذخیره آب استفاده نمود.

## ۸-پانویس ها

۱. Benoit Mandelbrot
۲. Fractus
۳. SympatexTM
۴. Macro React
۵. Lurex
۶. Flectofold
۷. Mary Axe
۸. Buckminster Fuller
۹. Hongkong Bank Headquarters
۱۰. Commerzbank Headquarters

## ۹-منابع

[۱] Yazyeva, S. B., Mayatskaya, I. A., Kashina, I. V., & Nesterova, A. N. (۲۰۱۹, December). The manifestation of fractality in the architecture of buildings and structures. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. ٦٩٨, No. ٣, □. ٠٣٣٠٤٦). □□□ □□□□□□□□□□.
[۲] Mirmoradi, S. S. (۲۰۱۷). Recognition of the role of nature in the formation of fractal architecture. *Organization, technology & management in construction: an international journal*, *9*(۱), ١٥٧٤-١٥٨٣.
[۳] Mayatskaya, I., Yazyev, B., Yazyeva, S., & Kulinich, P. (۲۰۱۷). Building Constructions: architecture and nature. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. ١٠٦, p. ٠١٠٣١). EDP Sciences.
[٤] Joye, Y. (۲۰۰۷). Fractal architecture could be good for you. *Nexus network journal*, *9*(۲), ٣١١-٣٢٠.
[٥] Tafforeau, M., Verdus, M. C., Norris, V., Ripoll, C., & Thellier, M. (۲۰۰٦). Memory processes in the response of plants to environmental signals. *Plant signaling & behavior*, *1*(۱), ٩-١٤.
[٦] Guo, Q., Dai, E., Han, X., Xie, S., Chao, E., & Chen, Z. (۲۰۱٥). Fast nastic motion of plants and bioinspired structures. *Journal of the Royal Society Interface*, *12*(١١٠), ٢٠١٥٠٥٩٨.
[٧] Nezarati, R. M., Eifert, M. B., & Cosgriff-Hernandez, E. (۲۰۱۳). Effects of humidity and solution viscosity on electrospun fiber morphology. *Tissue Engineering Part C: Methods*, *19*(١٠), ٨١٠-٨١٩.
[٨] Aniszewska, M., & Słowiński, K. (۲۰۱٦). Effects of microwave irradiation by means of a horn antenna in the process of seed extraction on Scots pine (Pinus sylvestris L.) cone moisture content and seed germination energy and capacity. *European Journal of Forest Research*, *135*(٤), ٦٣٣-٦٤٢.
[٩] Lin, S., Xie, Y. M., Li, Q., Huang, X., & Zhou, S. (۲۰۱٦). On the shape transformation of cone scales. *Soft matter*, *12*(٤٨), ٩٧٩٧-٩٨٠٢.

[۱۰] Walling, N. P., Philamore, H., Landenberger, K. B., & Matsuno, F. (۲۰۱۹, July). Towards a Temperature-Responsive Pinecone-Inspired Actuator Using Silicone Encapsulated Hydrogels. In *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems* (pp. ۳٦۹-۳۷۳). Springer, Cham.

[۱۱] Dawson, C., Vincent, J. F., & Rocca, A. M. (۱۹۹۷). How pine cones open. *Nature*, *390*(٦٦٦۱), ٦٦۸-٦٦۸.

[۱۲] Poppinga, S., Correa, D., Bruchmann, B., Menges, A., & Speck, T. (۲۰۲۰). Plant movements as concept generators for the development of biomimetic compliant mechanisms. *Integrative and comparative biology*, *60*(٤), ۸۸٦-۸۹٥.

[۱۳] Bae, H., & Kim, J. (۲۰۲۰). Functional Principles of Morphological and Anatomical Structures in Pinecones. *Plants*, *9*(۱۰), ۱۳٤۳.

[۱٤] Huang, W., Williams, M., Luo, D., Wu, Y., & Lin, Y. PARAMETERISING PINECONE NASTIC MOVEMENT FOR ADAPTABLE ARCHITECTURE DESIGN.

[۱٥] Reyssat, E., & Mahadevan, L. (۲۰۰۹). Hygromorphs: from pine cones to biomimetic bilayers. *Journal of the Royal Society Interface*, *6*(۳۹), ۹٥۱-۹٥۷.

[۱٦] Kapsali, V., & Vincent, J. (۲۰۲۰). From a Pinecone to Design of an Active Textile. *Biomimetics*, *5*(٤), ٥۲.

[۱۷] Cruz, E., Hubert, T., Chancoco, G., Naim, O., Chayaamor-Heil, N., Cornette, R., ... & Aujard, F. (۲۰۲۱). Design processes and multi-regulation of biomimetic building skins: A comparative analysis. *Energy and Buildings*, *246*, ۱۱۱۰۳٤.

[۱۸] Herzog, T., Krippner, R., & Lang, W. (۲۰۱۲). *Facade construction manual*. Walter de Gruyter.

[۱۹] Elbaum, R. (۲۰۱۸). Structural principles in the design of hygroscopically moving plant cells. In *Plant biomechanics* (pp. ۲۳٥-۲٤٦). Springer, Cham.

[۲۰] Bargardi, F. L., Le Ferrand, H., Libanori, R., & Studart, A. R. (۲۰۱٦). Bio-inspired self-shaping ceramics. *Nature communications*, *7*(۱), ۱-۸.

[۲۱] Correa, D., Poppinga, S., Mylo, M. D., Westermeier, A. S., Bruchmann, B., Menges, A., & Speck, T. (۲۰۲۰). ٤D pine scale: biomimetic ٤D printed autonomous scale and flap structures capable of multi-phase movement. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, *378*(۲۱٦۷), ۲۰۱۹۰٤٤٥.

[۲۲] Badarnah, L., & Kadri, U. (۲۰۱٥). A methodology for the generation of biomimetic design concepts. *Architectural Science Review*, *58*(۲), ۱۲۰-۱۳۳.

[۲۳] Holstov, A., Bridgens, B., & Farmer, G. (۲۰۱٥). Hygromorphic materials for sustainable responsive architecture. *Construction and Building Materials*, *98*, ٥۷۰-٥۸۲.

[۲٤] https://www.e-architect.com/london/swiss-re-building

[۲٥] Munro, D. (۲۰۰٤). Swiss Res Building, London. *Nyheter Stålbyggnad*, *3*, ۳٦-٤۳.

[۲٦] https://www.slideshare.net/VikramBengani/the-gherkin-case-study

[۲۷] Abdullah, A., Said, I. B., & Ossen, D. R. (۲۰۱۸). Applications of Thermoregulation Adaptive Technique of form in Nature into Architecture: A Review. *International Journal of Engineering & Technology*, *7*(۲,۲۹), ۷۱۹-۷۲٤.

[۲۸] Loka, S., Design, I., Alabassy, D. S., Design, I., Suzan, H., Design, I., ... & Design, I. (۲۰۱۹). Inspiring Responsive Interior Architecture from the Inherent Hygroscopic Behavior of Pine Cones. *Journal of Biosciences and Medicines*, *7*(۱۱), ۱۷۳.

[۲۹] Kapsali, V. (۲۰۰۹). Biomimetics and the design of outdoor clothing. In *Textiles for cold weather apparel* (pp. ۱۱۳-۱۳۰).

[۳۰] Andres, C. M., Zhu, J., Shyu, T., Flynn, C., & Kotov, N. A. (۲۰۱٤). Shape-morphing nanocomposite origami. *Langmuir*, *30*(۱۹), ٥۳۷۸-٥۳۸٥.

[۳۱] Erb, R. M., Sander, J. S., Grisch, R., & Studart, A. R. (۲۰۱۳). Self-shaping composites with programmable bioinspired microstructures. *Nature communications*, *4*(۱), ۱-۸.