Journal of Architectural and Environmental Research, Volume 4, Issue 6, September 2026, pp.46-62.

Journal of Architectural and Environmental Research

DOI: 10.30470/jaer.2026.2097065.1239

Inspiration from the Sunflower's Adaptive Mechanisms for Enhancing the Sense of Place in Architectural Space

Melika Mahmoodan[1*], **Babak Alemi**[2]

1. Master's Degree in Architectural Technology, Bionic Architecture, University of Kashan, Kashan, Iran, MelikaMahmoudan@grad.kashanu.ac.ir
2. Associate Professor, Faculty of Architecture and Art, University of Kashan, Kashan, Iran, Alemi@kashanu.ac.ir

Research Article

***Corresponding Author:**
Melika Mahmoodan
MelikaMahmoudan@grad.kashanu.ac.ir

Received: 2026/08/09
Accepted: 2026/09/01

Keywords: Bionic architecture, Interactive architecture, Sunflower, Sense of place, Architectural Design.

Abstract

Increasing energy consumption, decreasing environmental quality, and uniformity of contemporary architectural spaces have made the necessity of reviewing design approaches and utilizing efficient natural patterns more evident than ever. In the meantime, bionic architecture, inspired by mechanisms found in nature, provides a suitable basis for achieving innovative and sustainable solutions. Sunflower plant, due to its characteristics such as heliotropism, responsiveness to environmental conditions, coherent structure of components, and special geometric proportions, can be used as a suitable model in interactive architecture. The aim of this research is to identify and extract transferable design principles from sunflower adaptive mechanisms and explain their application in interactive architecture with an emphasis on enhancing the sense of place. The present research is of an applied type and has been conducted with a descriptive-analytical approach. Data collection was carried out using a library method, and then by examining the biological and structural characteristics of sunflower, principles that can be exploited in architecture were extracted and analyzed. The findings of the study show that features such as movement dynamics, adaptation to environmental conditions, structural coherence, structural compactness, and geometric proportions of sunflowers have the potential to be transformed into design strategies in interactive architecture. Also, the results of adapting these principles to the dimensions of interactive architecture and components of sense of place show that these strategies can be effective in enhancing the sense of place by increasing the flexibility and responsiveness of space, improving environmental comfort, and the quality of spatial experience. Finally, this study provides a conceptual framework to transform the adaptive mechanisms of sunflowers into design strategies in interactive architecture with an emphasis on enhancing the sense of place.

Cite this article: Mahmoodan, M., & Alemi, B. (2026). Inspiration from the Sunflower's Adaptive Mechanisms for Enhancing the Sense of Place in Architectural Space. *Journal of Architectural and Environmental Research*, *4*(6), 46-62. https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2097065.1239

Print ISSN: 2588-6363
Online ISSN: 2981-247X

Authors

نشریه پژوهش‌های معماری و محیط، دوره ۴ ، شماره ۶، شهریور ۱۴۰۵ ، صفحات ۴۶-۶۲.

دوفصلنامه پژوهش های معماری و محیط

دانشگاه زنجان

DOI: 10.30470/jaer.2026.2097065.1239

الهام از سازوکارهای تطبیقی گیاه آفتاب‌گردان در تقویت حس مکان فضای معماری

ملیکا محمودان[۱]* ، بابک عالمی[۲]

۱. دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد، فناوری معماری، معماری بیونیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، MelikaMahmoudan@grad.kashanu.ac.ir

۲. دانشیار، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، Alemi@kashanu.ac.ir

مقاله پژوهشی

*** نویسنده مسئول:**

ملیکا محمودان

MelikaMahmoudan@grad.kashanu.ac.ir

دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۵/۱۸

انتشارمقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۱۰

واژگان کلیدی:

معماری بیونیک، معماری تعاملی، آفتابگردان، حس مکان، طراحی معماری.

چکیده:

افزایش مصرف انرژی، کاهش کیفیت‌های محیطی و یکنواختی فضاهای معماری معاصر، ضرورت بازنگری در رویکردهای طراحی و بهره‌گیری از الگوهای کارآمد طبیعی را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این میان، معماری بیونیک با الهام از سازوکارهای موجود در طبیعت، زمینه مناسبی برای دستیابی به راهکارهای نوآورانه و پایدار فراهم می‌آورد. گیاه آفتابگردان به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی نظیر خورشیدگردی، واکنش‌پذیری نسبت به شرایط محیطی، ساختار منسجم اجزا و تناسبات هندسی ویژه، می‌تواند به عنوان الگویی مناسب در معماری تعاملی مورد استفاده قرار گیرد. هدف این پژوهش، شناسایی و استخراج اصول طراحی قابل انتقال از مکانیسم‌های تطبیقی آفتابگردان و تبیین کاربرد آن‌ها در معماری تعاملی با تأکید بر تقویت حس مکان است. پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و با رویکرد توصیفی ـ تحلیلی انجام شده است. گردآوری اطلاعات به روش کتابخانه‌ای صورت گرفته و در ادامه با بررسی ویژگی‌های زیستی و ساختاری آفتابگردان، اصول قابل بهره‌برداری در معماری استخراج و تحلیل شده‌اند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که ویژگی‌هایی نظیر پویایی حرکتی، سازگاری با شرایط محیطی، انسجام ساختاری، فشردگی سازه‌ای و تناسبات هندسی آفتابگردان قابلیت تبدیل به راهبردهای طراحی در معماری تعاملی را دارند. همچنین، نتایج تطبیق این اصول با ابعاد معماری تعاملی و مؤلفه‌های حس مکان نشان می‌دهد که این راهبردها می‌توانند با افزایش انعطاف‌پذیری و پاسخگویی فضا، بهبود آسایش محیطی و کیفیت تجربه فضایی، در تقویت حس مکان مؤثر باشند. در نهایت، این پژوهش با ارائه چارچوبی مفهومی، زمینه تبدیل مکانیسم‌های تطبیقی آفتابگردان به راهبردهای طراحی در معماری تعاملی با تأکید بر تقویت حس مکان را فراهم می‌کند

استناد به این مقاله: محمودان، ملیکا و عالمی، بابک (۱۴۰۵) الهام از سازوکارهای تطبیقی گیاه آفتاب‌گردان در تقویت حس مکان فضای معماری، *نشریه پژوهش‌های معماری و محیط*، ۴ (۶)، ۴۶-۶۲.

https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2097065.1239

شاپا چاپی: ۲۵۸۸-۶۲۶۳

شاپا الکترونیکی: ۲۴۷۸-۲۹۸۱

پدیدآورندگان

مقدمه

قرن بیستم را می‌توان دوره غلبه الگوهای مبتنی بر ماشین و فناوری در معماری دانست. در این دوران، بسیاری از فضاهای زیستی، با وجود تفاوت‌های فرهنگی و اقلیمی، به سمت یکنواختی پیش رفتند و بخشی از ویژگی‌های بومی و منطقه‌ای خود را از دست دادند. همچنین، اتکای گسترده به راه‌حل‌های فنی، مصرف بالای انرژی و کاهش توجه به ظرفیت‌های طبیعی محیط، چالش‌هایی را در زمینه کیفیت محیطی و پایداری فضاهای معماری ایجاد کرد. در مقابل، معماری پیش از عصر مدرن در بسیاری از موارد با توجه به طبیعت، اقلیم و شرایط محیطی شکل می‌گرفت و از طریق فرم، مصالح و سازمان فضایی، به نیازهای انسان و محیط پاسخ می‌داد. از این منظر، بهره‌گیری از طبیعت به‌عنوان منبعی برای شناخت الگوها و سازوکارهای عملکردی، می‌تواند زمینه‌ای برای بازنگری در فرایند طراحی معماری و دستیابی به راهکارهای سازگارتر با محیط فراهم آورد.

در این راستا، معماری بیونیک با مطالعه ساختارها، الگوها و سازوکارهای موجود در طبیعت، امکان انتقال ویژگی‌های قابل بهره‌برداری از الگوهای طبیعی به معماری را فراهم می‌کند. با این حال، بهره‌گیری مؤثر از طبیعت در معماری، نیازمند فراتر رفتن از تقلید صوری و شناسایی ویژگی‌های عملکردی و ساختاری آن است. فرایند تبدیل این ویژگی‌ها به اصول قابل استفاده در طراحی، مستلزم رویکردی نظام‌مند برای شناسایی، تحلیل و انتزاع الگوهای طبیعی است. در این راستا، دو رویکرد «مسئله‌محور» و «راه‌حل‌محور» مطرح شده است. در پژوهش حاضر رویکرد راه‌حل‌محور (از پایین به بالا) مبنای مطالعه قرار گرفته است؛ به‌گونه‌ای که ابتدا یک الگوی زیستی مشخص مورد بررسی قرار گرفته، سپس ویژگی‌ها و مکانیسم‌های عملکردی آن تحلیل و در نهایت اصول و راهبردهای طراحی قابل انتقال به معماری استخراج شده‌اند.

هم‌زمان با گسترش فناوری‌های دیجیتال، معماری تعاملی نیز به‌عنوان رویکردی برای ایجاد فضاهای پویا و پاسخگو مطرح شده است. در این نوع معماری، فضا و اجزای آن می‌توانند در برابر تغییرات محیطی و نیازهای کاربران واکنش نشان داده و با شرایط متغیر سازگار شوند. چنین قابلیتی، علاوه بر ارتقای انعطاف‌پذیری و آسایش محیطی، می‌تواند بر کیفیت تجربه فضایی و نحوه ارتباط کاربران با مکان اثرگذار باشد. از این منظر، پیوند میان سازوکارهای تطبیقی طبیعت و قابلیت پاسخگویی معماری تعاملی می‌تواند زمینه‌ای برای ایجاد فضاهایی فراهم کند که نه‌تنها از نظر عملکردی با محیط و کاربران تعامل دارند، بلکه تجربه فضایی معنادارتری نیز ایجاد می‌کنند.

در این میان، آفتابگردان به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی همچون خورشیدگردی، واکنش‌پذیری نسبت به شرایط محیطی، انسجام ساختاری، فشردگی سازه‌ای و تناسبات هندسی، ظرفیت مناسبی برای مطالعه به‌عنوان یک الگوی زیستی دارد. با وجود مطالعات انجام‌شده در زمینه معماری بیونیک، معماری تعاملی و حس مکان، چگونگی استخراج و تبدیل مکانیسم‌های تطبیقی آفتابگردان به اصول طراحی قابل استفاده در معماری تعاملی و ارتباط آن با تقویت حس مکان، به‌صورت یک چارچوب منسجم کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

ازاین‌رو، تمرکز این پژوهش بر شناسایی مکانیسم‌های تطبیقی آفتابگردان و بررسی قابلیت انتزاع و انتقال آن‌ها به معماری تعاملی است؛ به‌گونه‌ای که حاصل این فرایند بتواند در قالب اصول طراحی معماری مورد استفاده قرار گیرد و از طریق افزایش پاسخگویی، انعطاف‌پذیری و کیفیت تجربه فضایی، زمینه تقویت حس مکان را فراهم آورد.

پرسش‌های پژوهش

با توجه به هدف پژوهش، بررسی قابلیت انتقال ویژگی‌ها و مکانیسم‌های تطبیقی آفتابگردان به حوزه معماری تعاملی و نقش آن‌ها در تقویت حس مکان، در قالب پرسش‌های زیر دنبال می‌شود:

۱. کدام ویژگی‌های گیاه آفتابگردان قابلیت انتقال به معماری تعاملی را دارند؟

۲. اصول استخراج‌شده از مکانیسم‌های تطبیقی آفتابگردان چگونه می‌توانند در طراحی به کار گرفته شوند؟

۳. به‌کارگیری این اصول چگونه می‌تواند به تقویت حس مکان کمک کند؟

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، توصیفی ـ تحلیلی است و با بهره‌گیری از مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده است. فرایند پژوهش در چند مرحله صورت گرفته است. در مرحله نخست، منابع علمی مرتبط با معماری بیونیک، بیومیمیکری، سازوکارهای تطبیقی گیاهان، ویژگی‌های زیستی و ساختاری آفتابگردان، معماری تعاملی و حس مکان بررسی و مبانی نظری و مفهومی پژوهش تدوین شد. در مرحله دوم، ویژگی‌های زیستی، ساختاری و هندسی ۳۴ گونه آفتابگردان مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های مربوط به ابعاد، تناسبات و ویژگی‌های قابل مشاهده گونه‌های مورد مطالعه گردآوری و به‌منظور شناسایی الگوهای مشترک و ویژگی‌های قابل تعمیم، مورد مقایسه قرار گرفتند. بررسی این داده‌های کمی با هدف ارائه تحلیل صرفاً عددی از آفتابگردان انجام نشده، بلکه به‌عنوان مبنایی برای شناسایی ویژگی‌ها و مکانیسم‌های قابل انتقال به حوزه طراحی مورد استفاده قرار گرفته است. در مرحله سوم، بر اساس تحلیل ویژگی‌های شناسایی‌شده، مکانیسم‌های تطبیقی و اصول قابل انتقال از آفتابگردان استخراج و در قالب مفاهیم طراحی معماری انتزاع شدند. در مرحله چهارم، اصول استخراج‌شده با مؤلفه‌های معماری تعاملی تطبیق داده شدند تا نحوه تبدیل مکانیسم‌های طبیعی به راهبردهای طراحی پاسخگو و سازگار با شرایط محیطی و نیازهای کاربران مشخص شود. در نهایت، ارتباط این راهبردها با مؤلفه‌های مؤثر بر حس مکان، مورد تحلیل قرار گرفت و بر مبنای نتایج حاصل، چارچوب مفهومی پیشنهادی پژوهش تدوین شد.

پیشینه پژوهش

استفاده از طبیعت به‌عنوان منبع الهام در معماری، از تقلید ظاهری فرم‌های طبیعی به سوی شناخت و انتقال اصول، فرایندها و سازوکارهای عملکردی آن‌ها حرکت کرده است. در دیدگاه‌های معماری نیز طبیعت صرفاً به‌عنوان مجموعه‌ای از فرم‌های قابل تقلید مطرح نبوده، بلکه به‌عنوان منبعی برای شناخت نظم، عملکرد و سازمان‌یافتگی مورد توجه قرار گرفته است. لوکوربوزیه طبیعت را منبعی برای تأمین نور، هوا و پوشش گیاهی می‌داند و آلوار آلتو آن را راهنمای فرایند طراحی معرفی می‌کند؛ در حالی که فرانک لوید رایت طبیعت را یکی از مهم‌ترین منابع مطالعه و الگوی طراحی معماری می‌داند. همچنین، استفاده از ساختارها و تناسبات موجود در طبیعت می‌تواند هم‌زمان در بهبود عملکرد، کارایی سازه‌ای و کیفیت زیبایی‌شناختی معماری مؤثر باشد (تقی‌زاده، ۱۳۸۵). در این چارچوب، طبیعت نه‌تنها به‌عنوان منبع فرم، بلکه به‌عنوان منبعی برای یادگیری و حل مسائل طراحی مطرح شده است. علیپور، فیضی و محمدمرادی (۱۳۹۶) نیز طبیعت را یکی از منابع مهم ایده‌پردازی در معماری دانسته و این ظرفیت را در قالب رویکرد بیونیک مورد توجه قرار داده‌اند. از این منظر، بهره‌گیری از طبیعت می‌تواند از سطح بازنمایی ظاهری فراتر رفته و به شناسایی اصول و سازوکارهایی منجر شود که قابلیت انتقال به فرایند طراحی معماری را دارند. این تحول در رویکردهای معاصر بیومیمیکری نیز دنبال شده است؛ به‌گونه‌ای که طبیعت به‌عنوان منبعی برای حل مسائل طراحی و دستیابی به راهکارهای سازگار، کارآمد و پایدار مورد توجه قرار می‌گیرد. وربروخه و همکاران(۲۰۲۳) در بررسی روش‌ها و نمونه‌های معماری بیومیمیک نشان می‌دهند که انتقال دانش از طبیعت می‌تواند در سطوح مدل، سیستم و فرایند انجام شود و هدف آن فراتر از بازنمایی ظاهری موجودات طبیعی باشد. در همین راستا، مجاهدی و اسمعیلی برنتی (۱۳۹۸) بر اهمیت بهره‌گیری از قوانین و ساختارهای حاکم بر طبیعت، به‌ویژه الگوهای عملکردی و سازوکارهای سازگاری با محیط، تأکید کرده‌اند. همچنین، سومسه و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی پوسته‌های ساختمانی بیومیمتیک، ظرفیت سازوکارهای سازگاری گیاهان را برای انتقال به فناوری‌های معماری و ایجاد سامانه‌های واکنش‌گرا نسبت به تغییرات محیطی بررسی کرده‌اند. بنابراین، در ادبیات این حوزه، مسیر اصلی الهام‌گیری از طبیعت را می‌توان حرکت از «شکل طبیعی» به سوی «منطق عملکردی و سازگاری طبیعی» دانست؛ رویکردی که زمینه مناسبی برای مطالعه گیاهان به‌عنوان سامانه‌های پویا و پاسخ‌گو فراهم می‌کند.

در ادامه این تحول، گیاهان به دلیل برخورداری از سازوکارهای متعدد برای سازگاری با تغییرات محیطی، به یکی از منابع مهم پژوهش‌های معماری زیست‌الهام تبدیل شده‌اند. می و همکاران (۲۰۲۴) در یک مرور جامع از معماری گیاه‌الهام، پژوهش‌های این حوزه را در سه زمینه عملکرد، ساختار و مواد دسته‌بندی کرده و نشان می‌دهند که ویژگی‌هایی مانند سازمان‌یافتگی ساختاری، سازگاری با محیط و پاسخ به

محرک‌های طبیعی می‌توانند به راهکارهای معماری انتقال یابند. همچنین، بیجاری و همکاران (۲۰۲۵) با بررسی معماری الهام‌گرفته از گیاهان، بر ظرفیت گیاهان برای پاسخ به تغییرات نور، دما و رطوبت و امکان تبدیل این رفتارها به راهکارهای معماری پویا و سازگار تأکید کرده‌اند. در همین راستا، سومسه و همکاران (۲۰۲۲) نشان می‌دهند که سازوکارهای تطبیقی گیاهان می‌توانند مبنایی برای طراحی پوسته‌ها و اجزای ساختمانی پاسخ‌گو به محرک‌های محیطی قرار گیرند. مجموعه این مطالعات نشان می‌دهد که ارزش گیاهان برای معماری تنها در فرم و هندسه آن‌ها نیست، بلکه در چگونگی پاسخ آن‌ها به محیط و سازمان‌دهی این پاسخ در ساختار و عملکرد نیز قرار دارد. در میان نمونه‌های گیاهی، آفتابگردان از دو منظر هندسی و عملکردی ظرفیت قابل توجهی برای الهام معماری دارد. از نظر ساختاری، آرایش مارپیچی دانه‌ها و الگوهای فیبوناچی در گل‌آذین آفتابگردان مورد توجه مطالعات زیست‌ریاضی قرار گرفته است و از منظر معماری نیز ویژگی‌های هندسی، تناسبات و سازمان‌یافتگی این گیاه به‌عنوان زمینه‌ای برای شکل‌گیری فرم‌های بیونیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند (نجفی مهیاری و همکاران، ۱۳۹۴). با این حال، ظرفیت آفتابگردان تنها به فرم و هندسه آن محدود نمی‌شود. ویژگی شاخص دیگر این گیاه، حرکت خورشیدگرای آن در مرحله رشد است که نشان‌دهنده نوعی پاسخ پویا به شرایط نوری محیط است. کوچرا و بریگز (۲۰۱۶) حرکت روزانه بخش‌های رویشی آفتابگردان را در ارتباط با جهت نور و سازوکارهای رشد بررسی کرده‌اند و آتامیان و همکاران (۲۰۱۶) نیز نقش تنظیم شبانه‌روزی و رشد جهت‌دار ساقه را در این رفتار نشان داده‌اند. از این منظر، آفتابگردان را می‌توان نه صرفاً به‌عنوان یک الگوی هندسی، بلکه به‌عنوان سامانه‌ای زیستی و پویا در نظر گرفت که ویژگی‌های ساختاری و سازوکارهای پاسخ آن قابلیت مطالعه و انتقال به طراحی معماری را دارند. در همین راستا، پژوهش‌های جدید معماری نیز ظرفیت رفتارهای گیاهی را برای ایده‌پردازی در زمینه سامانه‌های متحرک و پاسخ‌گو مورد توجه قرار داده‌اند (Bijari et al. 2025). قابلیت انتقال سازوکارهای طبیعی به معماری، ارتباط مستقیمی با شکل‌گیری معماری تعاملی و پاسخ‌گو دارد. در چنین رویکردی، عناصر معماری می‌توانند در برابر محرک‌های محیطی یا تغییر شرایط استفاده، وضعیت یا عملکرد خود را تغییر دهند و از این طریق رابطه‌ای پویا میان محیط و کاربر ایجاد کنند. نگوین و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه تجربی یک دیوار رباتیک متحرک نشان دادند که نحوه سازگاری فضایی می‌تواند بر کیفیت‌های موقعیتی و ذهنی مرتبط با حس مکان اثرگذار باشد. یافته‌های آنان نشان می‌دهد که معماری پاسخ‌گو نباید صرفاً با هدف کنترل عملکرد فضا طراحی شود، بلکه نحوه تغییرپذیری آن باید به شکل‌گیری تجربه‌ای معنادار از مکان نیز توجه داشته باشد. بر این اساس، تغییر وضعیت عناصر معماری در پاسخ به محیط می‌تواند از طریق ایجاد تجربه‌ای پویا، قابل ادراک و متمایز، رابطه کاربر با فضای معماری را تحت تأثیر قرار دهد و زمینه‌ای برای تقویت حس مکان فراهم کند. با وجود گسترش پژوهش‌های مرتبط با معماری بیومیمیک، گیاهان و سامانه‌های پاسخ‌گو، بررسی پیشینه نشان می‌دهد که این مطالعات عمدتاً در یکی از سه مسیرِ فرم و هندسه، عملکرد و سازگاری محیطی، یا توسعه فناوری‌های پاسخ‌گو متمرکز بوده‌اند و ارتباط میان این سه سطح، به‌ویژه در مورد آفتابگردان، کمتر به‌صورت یک چارچوب یکپارچه بررسی شده است. از یک سو، مطالعاتی مانند نجفی مهیاری و همکاران (۱۳۹۴) ظرفیت هندسی و فرمی آفتابگردان را برای معماری مطرح کرده‌اند و از سوی دیگر، پژوهش‌های جدید بر سازوکارهای عملکردی، سازگاری و پاسخ‌گویی گیاهان تأکید دارند (Mei et al., 2024; Bijari et al., 2025). همچنین، مطالعات معماری پاسخ‌گو نشان داده‌اند که تغییرپذیری عناصر فضایی می‌تواند علاوه بر پاسخ به شرایط محیطی، بر تجربه و کیفیت ادراکی مکان نیز اثرگذار باشد (Nguyen et al., 2022). با این حال، پیوند منسجم میان ویژگی‌های زیستی، ساختاری و هندسی یک الگوی گیاهی مشخص، استخراج اصول طراحی قابل انتقال از آن و ارتباط این اصول با معماری تعاملی و حس مکان، همچنان نیازمند بررسی بیشتر است. بر این اساس، پژوهش حاضر با تمرکز بر آفتابگردان، در پی شناسایی و استخراج اصول قابل انتقال از ویژگی‌های زیستی، ساختاری و هندسی آن و تبیین قابلیت به‌کارگیری این اصول در معماری تعاملی، با تأکید بر نقش سازوکارهای پاسخ‌گو در شکل‌گیری تجربه و حس مکان است.

مفاهیم نظری پژوهش

در این بخش، مفاهیم نظری مرتبط با پژوهش شامل معماری بیونیک، معماری تعاملی، حس مکان و گیاه آفتابگردان بررسی می‌شوند. ارتباط میان این مفاهیم، زمینه‌ای برای بهره‌گیری از سازوکارهای تطبیقی آفتابگردان در طراحی معماری تعاملی و بررسی تأثیر آن بر تقویت حس مکان را فراهم می‌کند.

۱. معماری بیونیک

انسان از آغاز تاکنون همواره در تعامل با طبیعت بوده و این رابطه از وابستگی اولیه به بهره‌برداری و در نهایت به الهام‌گیری از آن تکامل یافته است. در این رویکرد، طبیعت علاوه بر تأمین نیازهای زیستی، به‌عنوان منبعی برای الهام در طراحی و معماری مطرح می‌شود و شناخت آن می‌تواند به ارتقای کیفیت زندگی منجر شود. استفاده از فرم‌های طبیعی در معماری نشان‌دهنده توجه انسان به الگوهای آفرینش بوده و در فرهنگ‌های مختلف نیز به دلیل کارکرد و زیبایی، جایگاه ویژه‌ای داشته است؛ به‌گونه‌ای که تقلید از طبیعت دارای مزایای متعددی است (Hagan, 2001). در رویکردهای معاصر، تقلید از طبیعت صرفاً به جنبه‌های زیبایی‌شناختی محدود نیست، بلکه به‌عنوان راهکاری کارآمد، پایدار و اقتصادی در طراحی مطرح می‌شود. در همین راستا، معماران تلاش می‌کنند قواعد ساختاری موجود در طبیعت را در طراحی‌های خود به‌کار گیرند. این نگاه در قالب معماری بیونیک مورد توجه قرار گرفته است (سبزی‌پور و شعبانی، ۱۴۰۰). معماری بیونیک با الهام از فرایندهای زیستی مانند رشد، متابولیسم و انتقال نیرو در موجودات زنده، به خلق فضاهای معماری با رویکرد فناوری و پایداری می‌پردازد و با ترکیب زیست‌شناسی و تکنولوژی، زمینه‌ساز نوآوری در حوزه انرژی، اکولوژی و اقتصاد در معماری شده است (Kelly, 1994). از این منظر، در پژوهش حاضر تأکید بر شناسایی و انتقال ویژگی‌های عملکردی و ساختاری طبیعت است و نه صرفاً بازنمایی فرمی آن؛ بنابراین، مکانیسم‌های تطبیقی آفتابگردان به‌عنوان مبنای استخراج اصول طراحی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲. معماری تعاملی

معماری تعاملی در پاسخ به این که چطور یک فضا میتواند به صورت پایدار به وجود آید یا بازطراحی شود مطرح می‌شود. معماری تعاملی یک معامله هوشمندانه است که نه تنها اثر می‌گذارد بلکه اثر هم می‌پذیرد و هم کاربر هم فضا تغییر می‌کنند. هدف از معماری تعاملی طراحی و ساخت فضاهایی است که قابلیت انطباق با نیازها و شرایط متغییر افراد، محیط پیرامون و جامعه ای که در آن زندگی می‌کنند را داشته باشد. معماری تعاملی نه تنها به جنبه‌های بصری و عملکردی توجه دارد، بلکه به احساسات و تجربیات انسانی نیز اهمیت می‌دهد. به طور کلی معماری تعاملی به طراحی فضاهایی اطلاق می‌شود که به طور فعال با کاربران خود تعامل دارند (پناهی و آذری،۱۳۹۳). تغییر در ساختمان می‌تواند در ظرفیت، کارایی یا عملکرد رخ دهد و بر همین اساس، معماری تعاملی در سه بعد اصلی تنوع‌پذیری، تطبیق‌پذیری و تغییرپذیری تعریف می‌شود. تنوع‌پذیری بر امکان استفاده‌های چندگانه از فضا، تطبیق‌پذیری بر پاسخگویی به نیازها و شرایط متغیر با حداقل تغییرات کالبدی، و تغییرپذیری بر امکان افزایش، کاهش یا بازسازماندهی فضاها با قابلیت بازگشت به وضعیت اولیه تأکید دارد (چگنی و همکاران، ۱۳۹۸؛ فرجی و نوری، ۱۳۹۸). این ابعاد، از ارکان اصلی معماری تعاملی بوده و زمینه‌ساز طراحی فضاهای انعطاف‌پذیر و پاسخگو به نیازهای متغیر کاربران هستند. قابلیت تنوع‌پذیری، تطبیق‌پذیری و تغییرپذیری در معماری تعاملی، علاوه بر پاسخگویی عملکردی، می‌تواند نحوه ادراک و تجربه کاربران از فضا را تحت تأثیر قرار دهد. تغییر وضعیت عناصر، پاسخ به شرایط محیطی و امکان تعامل کاربر با فضا، زمینه شکل‌گیری تجربه‌های متنوع و ارتباط عاطفی و ادراکی با محیط را فراهم می‌کند. از این منظر، معماری تعاملی می‌تواند به‌عنوان حلقه ارتباطی میان مکانیسم‌های تطبیقی طبیعت و شکل‌گیری حس مکان در نظر گرفته شود.

۳. حس مکان

حس مکان به ادراک ذهنی افراد از محیط و احساسات آگاهانه یا نیمه‌آگاهانه آن‌ها نسبت به فضا اشاره دارد که موجب شکل‌گیری ارتباطی درونی میان انسان و محیط می‌شود. در این حالت، فهم و ادراک فرد با زمینه معنایی مکان پیوند یافته و یکپارچه می‌گردد. این مفهوم سبب می‌شود یک فضا به مکانی با ویژگی‌های حسی و رفتاری خاص برای افراد تبدیل شود.

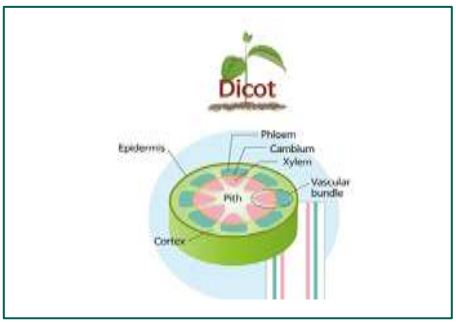
حس مکان حاصل تعامل میان تجربه‌های ذهنی انسان مانند خاطره، فرهنگ، تاریخ و سنت و ویژگی‌های عینی محیط همچون طرح، منظر، بو و صدا است. در نتیجه، این مفهوم را می‌توان مجموعه‌ای پیچیده از احساسات و دلبستگی انسان نسبت به محیط دانست که در فرآیند تعامل روزمره با مکان شکل می‌گیرد و از پیش تعیین‌شده نیست (فلاحت، ۱۳۸۵). بر اساس دیدگاه‌های مطرح در حوزه روان‌شناسی محیطی و

پدیدارشناسی، حس مکان از دو دسته مؤلفه اصلی، شامل مؤلفه‌های کالبدی و مؤلفه‌های ادراکی ـ شناختی، شکل می‌گیرد. مؤلفه‌های کالبدی به ویژگی‌های فیزیکی و فضایی محیط، از جمله فرم، نور، رنگ، مصالح، بافت و تناسبات اشاره دارند؛ در حالی که مؤلفه‌های ادراکی ـ شناختی شامل معانی، ارزش‌ها، خاطرات، تجربه‌های زیسته، ادراک ذهنی و پیوندهای عاطفی افراد با مکان هستند. تعامل این دو دسته مؤلفه موجب می‌شود فضا به مکانی معنادار تبدیل شده و احساس تعلق، دلبستگی و در نهایت تعهد نسبت به مکان در افراد شکل گیرد (دشتی، ۱۴۰۳).

در چارچوب این پژوهش، معماری بیونیک بستر انتقال مکانیسم‌های طبیعی به حوزه طراحی، آفتابگردان منبع شناسایی این مکانیسم‌ها و معماری تعاملی بستر کاربرد آن‌ها در قالب عناصر و فضاهای پاسخگو است. از سوی دیگر، پاسخگویی و تغییرپذیری این فضاها می‌تواند بر نحوه ادراک و تجربه کاربران اثر گذاشته و از طریق ارتقای کیفیت تجربه فضایی، انعطاف‌پذیری و تعامل انسان و محیط، با شکل‌گیری حس مکان ارتباط یابد.

٤. آفتابگردان و مکانسیم‌های تطبیقی آن

آفتابگردان نوعی گیاهی علفی و یک‌ساله است. گونه‌های وحشی آن معمولاً منشعب هستند، در حالی که فرم‌های زراعی رایج اغلب بدون انشعاب بوده و از یک ساقه منفرد تشکیل می‌شوند که ارتفاع آن می‌تواند به بیش از دو متر برسد. وجود یک سرگل بزرگ در انتهای ساقه، از رشد شاخه‌های جانبی جلوگیری می‌کند (Smith, 2014). بخش عمده ساقه را مغز[1] آن تشکیل می‌دهد، اما استحکام اصلی گیاه از حلقه دسته‌های آوندی پیرامونی حاصل می‌شود؛ این ساختار دارای کامبیوم آوندی[2] است، اما چوب ثانویه[3] تولید نمی‌کند و سلول‌های آوند چوبی[4] و آوند آبکش[5] آن به‌صورت فشرده در کنار هم قرار گرفته‌اند که درشکل ۱ قابل مشاهده است (Byju's, 2019). این آرایش متراکم و فشرده بافت‌ها، ساختار مقاومی را ایجاد می‌کند که توانایی تحمل وزن سرگل[6] را به گیاه می‌دهد، به‌طوری که قطر ساقه در بسیاری از نمونه‌ها به بیش از پنج سانتی‌متر می‌رسد (Popov et al. 2010). سرگل آفتابگردان از صدها گلچه کوچک تشکیل شده که به‌صورت منظم در کنار هم قرار گرفته‌اند. جوان‌ترین گلچه‌ها در مرکز و بالغ‌ترین آن‌ها در حاشیه قرار دارند و آرایشی مارپیچی از مرکز به پیرامون ایجاد می‌کنند. این الگو تصادفی نیست و از دنباله فیبوناچی پیروی می‌کند؛ به‌طوری‌که تعداد مارپیچ‌های راست‌گرد و چپ‌گرد معمولاً دو عدد متوالی از این دنباله هستند. از این رو، سرگل آفتابگردان یکی از نمونه‌های مهم نظم هندسی در طبیعت بوده و با مفاهیمی مانند نسبت طلایی و هندسه مارپیچی ارتباط دارد که در شکل ۲ قابل مشاهده است (Kashyap & Kumar, 2026).



شکل ۱. ساختار آناتومیک مقطع عرضی ساقه و آرایش حلقوی دسته‌های آوندی. (BYJU'S, 2019)



شکل ۲. الگوهای مارپیچی مشاهده شده در سر گل آفتابگردان. (Kashyap & Kumar, 2026)

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آفتابگردان، پدیده خورشیدگرایی یا هلیوتروپیسم[7] است. در مرحله رشد، سرگل در طول روز از شرق به غرب حرکت کرده و در شب مجدداً به سمت شرق بازمی‌گردد. این رفتار توسط ساعت زیستی شبانه‌روزی کنترل می‌شود. در روز، رشد سریع‌تر در سمت شرقی ساقه موجب حرکت به سمت غرب و در شب رشد سریع‌تر در سمت غربی باعث بازگشت به سمت شرق می‌شود. همچنین فعالیت ژن‌ها در دو سوی ساقه متناسب با این چرخه تغییر می‌کند که در شکل ۳ قابل مشاهده است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد این سازوکار بر رشد و موفقیت تولیدمثلی گیاه اثر مستقیم دارد؛ گیاهان دنبال‌کننده خورشید زیست‌توده و سطح برگ بیشتری تولید می‌کنند (Atamian et al. 2016). از سوی دیگر، آفتابگردان‌های رو به شرق دانه‌های درشت‌تری تولید می‌کنند؛ دمای سرگل نیز در این فرایند مؤثر است و گرم کردن مصنوعی سرگل‌های رو به غرب نتایجی مشابه نمونه‌های رو به شرق ایجاد می‌کند (Creux et al. 2021).



شکل ۳. بازنمایی شماتیک مکانیسم فیزیولوژیکی حرکت شبانه‌روزی آفتابگردان بر اساس رشد نامتقارن ساقه و تنظیمات ساعت زیستی.
اقتباس از Gigazine, 2017؛ بر اساس یافته‌های علمی. (Atamian et al., 2016)

آزمایش‌ها نقش ساعت زیستی را تأیید کرده‌اند؛ در چرخه‌های نوری حدود ۲۴ ساعت، گیاه توان ردیابی نور را حفظ می‌کند اما تغییر این چرخه عملکرد آن را مختل می‌سازد. نور مداوم نیز ساعت زیستی را برهم زده و الگوی باز شدن گلچه‌ها را طبق شکل ۴ تغییر می‌دهد، به‌گونه‌ای که به‌جای باز شدن حلقه‌ای، بر اساس سن از حاشیه به مرکز باز می‌شوند (Marshall et al. 2023). با وجود شناخت نقش ساعت زیستی، سازوکار دقیق حرکت آفتابگردان هنوز کاملاً مشخص نیست و به عواملی مانند رشد نامتقارن سلولی یا تغییرات فشار آب در بافت‌ها نسبت داده می‌شود. با این حال، تمامی پژوهش‌ها بر نقش تعامل میان ساعت زیستی داخلی و عوامل محیطی در رفتار حرکتی آفتابگردان تأکید دارند.



شکل ۴. الگوی باز شدن گلچه ها. (Marshall et al., 2023)

پدیده چرخش به سمت نور محدود به آفتابگردان نیست و در بسیاری از گیاهان و حتی برخی قارچ‌ها نیز مشاهده می‌شود. با این حال، در آفتابگردان به دلیل قرارگیری گل بزرگ در رأس ساقه، این تغییر جهت به‌صورت واضح‌تری قابل مشاهده است و با حرکت نوک ساقه، موقعیت سرگل نیز تغییر می‌کند. نورگرایی[۸] نوعی جهت‌گیری رشد به سمت نور است که عمدتاً در نواحی در حال رشد ساقه رخ می‌دهد. این فرایند تحت تأثیر هورمون‌های گیاهی اکسین[۹] انجام می‌شود؛ اکسین‌ها در سمت تاریک تجمع یافته و با فعال‌سازی پمپ‌های پروتونی[۱۰] و آنزیم‌های اکسپانزین[۱۱]، موجب طویل‌شدن سلول‌ها در آن سمت می‌شوند و در نتیجه ساقه به سمت نور خم می‌شود (Byju's, 2019). در کنار نورگرایی، خورشیدگرایی نیز در آفتابگردان دیده می‌شود که به کمک سلول‌های حرکتی ساقه‌های جوان و با جابه‌جایی یون پتاسیم و تغییر فشار تورگر[۱۲] سلولی ایجاد می‌شود. فشار تورگر ناشی از آب موجود در واکوئل[۱۳] سلول‌ها بوده و نقش مهمی در حفظ استحکام و ایجاد تغییرات حرکتی دارد. تفاوت اصلی نورگرایی و خورشیدگرایی در این است که نورگرایی وابسته به رشد سلولی است، در حالی که خورشیدگرایی می‌تواند مستقل از رشد و بر اساس تغییرات فشار تورگر رخ دهد.

همچنین در آفتابگردان، دریافت یک محرک نوری اولیه می‌تواند ساعت زیستی گیاه را فعال کرده و باعث تداوم حرکت‌های دوره‌ای ساقه در چرخه‌های شبانه‌روزی شود این رفتار تنها در مرحله رشد فعال گیاه دیده می‌شود و پس از رسیدن سرگل و سخت‌شدن ساقه، حرکت روزانه متوقف شده و گل به‌طور ثابت به سمت شرق قرار می‌گیرد؛ در این مرحله تنها برگ‌ها توانایی تغییر جهت در پاسخ به نور را حفظ می‌کنند (Atamian et al. 2016).

با توجه به ویژگی‌های ساختاری و عملکردی آفتابگردان، از جمله نظم هندسی، سازوکارهای حرکتی، واکنش به نور و قابلیت سازگاری با شرایط محیطی، می‌توان این گیاه را نمونه‌ای مناسب برای استخراج الگوهای الهام‌بخش در معماری بیونیک دانست. ازاین‌رو، در ادامه ویژگی‌های قابل الگوبرداری این گیاه در معماری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تحلیل مفاهیم

به‌منظور شناسایی و استخراج اصول طراحی قابل انتقال از آفتابگردان، ویژگی‌های این گیاه در دو سطح کمی و کیفی مورد بررسی قرار گرفت. در سطح کمی، ویژگی‌های مورفولوژیکی و هندسی گونه‌های مورد مطالعه از نظر ابعاد و نسبت‌های ساختاری بررسی و مقایسه شدند و در سطح کیفی، ویژگی‌های عملکردی و مکانیسم‌های تطبیقی گیاه با هدف شناسایی الگوها و اصول قابل انتزاع برای طراحی معماری تحلیل شدند. در ادامه، نتایج این دو سطح تحلیل در راستای استخراج اصول طراحی و بررسی قابلیت انتقال آن‌ها به معماری تعاملی مورد استفاده قرار گرفت.

تحلیل ویژگی‌های زیستی آفتابگردان نشان می‌دهد که این گیاه فراتر از یک الگوی فرمی، مجموعه‌ای از اصول عملکردی را در خود جای داده است که می‌توانند در طراحی معماری تعاملی به کار گرفته شوند. بر اساس یافته‌های حاصل از مطالعه ساختار و رفتار آفتابگردان، چهار اصل شامل پویایی، انسجام، پاسخگویی و کارایی استخراج شد:

اصل پویایی از قابلیت ردیابی خورشید توسط گل آفتابگردان الهام گرفته شده است. حرکت مستمر گل در راستای دریافت نور بیشتر، نشان‌دهنده توانایی انطباق با شرایط متغیر محیطی است. در معماری تعاملی نیز این اصل می‌تواند در قالب عناصر متحرک و تغییرپذیر نمود یابد؛ عناصری که متناسب با شرایط اقلیمی یا نیاز کاربران تغییر وضعیت می‌دهند. چنین ویژگی‌ای موجب افزایش جذابیت فضایی، تقویت حس کشف و ارتقای ادراک پویایی در محیط می‌شود.

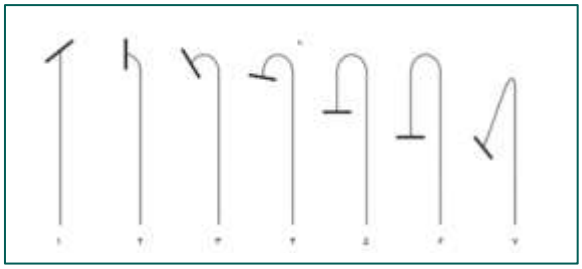
اصل انسجام از نحوه سازماندهی گلچه‌های آفتابگردان استخراج شده است. صدها گلچه با وجود تفاوت در عملکرد، در قالب یک سامانه واحد عمل می‌کنند و بقای گیاه را تضمین می‌نمایند. این ویژگی در معماری به معنای هماهنگی میان اجزای مختلف پروژه از جمله معماری، سازه و تأسیسات است. انسجام میان اجزا علاوه بر افزایش کیفیت عملکردی، موجب ارتقای خوانایی فضا و تقویت حس نظم و هویت در ذهن کاربران می‌شود.

اصل پاسخگویی از توانایی آفتابگردان در واکنش به تغییرات محیطی الهام گرفته شده است. این گیاه با تغییر شرایط نور، دما و چرخه‌های زمانی رفتار خود را تنظیم می‌کند. در معماری تعاملی نیز پاسخگویی به شرایط محیطی و نیازهای کاربران از طریق سامانه‌های هوشمند و تطبیق‌پذیر امکان‌پذیر است. این ویژگی با ایجاد آسایش محیطی و افزایش کیفیت تجربه فضایی، حس تعلق و رضایت کاربران را تقویت می‌کند.

اصل کارایی از ساختار فشرده آوندهای ساقه آفتابگردان استخراج شده است. این ساختار با وجود مصرف حداقل منابع، مقاومت و پایداری مناسبی ایجاد می‌کند. در معماری، این اصل می‌تواند در انتخاب مصالح فشرده، سبک و پایدار نمود یابد. بهره‌گیری از مصالح کارآمد، ضمن کاهش مصرف منابع و افزایش دوام و پایداری کالبدی بنا، می‌تواند کیفیت ادراک کاربران از استحکام و ماندگاری محیط را نیز ارتقا دهد.

گیاه آفتابگردان با حدود ۶۷ گونه شناخته‌شده، از نظر ویژگی‌های ریخت‌شناسی تنوع قابل‌توجهی دارد. ساقه این گیاه قطور، دارای مقطعی تقریباً دایره‌ای و بافتی تاردار است و ارتفاع آن، بسته به ژنوتیپ و شرایط محیطی، معمولاً بین ۱ تا ۶ متر متغیر است؛ بااین‌حال، در شرایط استثنایی، نمونه‌هایی با ارتفاع ۹/۱۷ متر نیز گزارش شده‌اند. قطر ساقه در ناحیه طوقه بین ۲ تا ۶ سانتی‌متر بوده و مقطع آن در این بخش دایره‌ای‌شکل است، اما با افزایش ارتفاع، به‌تدریج به فرمی زاویه‌دار تغییر می‌یابد. بر اساس ارتفاع، ارقام آفتابگردان به چهار گروه بسیار بلند (بیش از ۲ متر)، بلند (۱/۷۵ تا ۲ متر)، نیمه‌کوتاه (۱/۲۰ تا ۱/۷۵ متر) و کوتاه (کمتر از ۱/۲۰ متر) تقسیم می‌شوند.گل‌آذین آفتابگردان از نوع طبق (کلاپرک) است و قطر آن در ارقام مختلف بین ۱۰ تا ۴۵ سانتی‌متر تغییر می‌کند. هندسه سطح طبق در مرحله رسیدگی، بسته به رقم، می‌تواند مسطح، محدب یا مقعر باشد. در ارقام دارای طبق مقعر، به دلیل قرارگیری مناسب‌تر دانه‌ها درون طبق، میزان خسارت ناشی از عوامل محیطی، به‌ویژه حمله پرندگان، کاهش می‌یابد. با آغاز مرحله رسیدگی و افزایش وزن طبق، زاویه اتصال گل‌آذین به ساقه اصلی به‌تدریج افزایش یافته و در تیپ‌های مطلوب معمولاً در محدوده ۱۲۰ تا ۱۸۰ درجه قرار می‌گیرد. شکل و نحوه اتصال ساقه به گل انتهایی نیز تحت تأثیر رقم و مدیریت زراعی

متفاوت است. از میان تیپ‌های مختلف که در شکل ۵ نمایش داده شده است، تیپ شماره ۳ به دلیل ایجاد پایداری بیشتر برای طبق و حفظ مناسب‌تر جهت‌گیری آن، مطلوب‌ترین وضعیت را نشان می‌دهد (اکبری و همکاران، ۱۳۹۷؛ Hladni et al. 2018، DeValk et al. 2024).



شکل ۵. اشکال مختلف نحوه اتصال ساقه به طبق. (اکبری و همکاران، ۱۳۹۷).

به‌منظور تحلیل ویژگی‌های هندسی، ابعاد مورفولوژیکی ۳۴ رقم منتخب آفتابگردان شامل ارتفاع ساقه، قطر طبق و نسبت ارتفاع به قطر طبق به‌عنوان یک پارامتر طراحی–ساختاری بررسی و در جدول ۱ ارائه شده است:

جدول ۱. ابعاد و نسبت‌های رقم های منتخب آفتابگردان. (Gillette, 2024, Drago, 2023).

گونه	ارتفاع ساقه(سانتی متر)	قطر طبق(سانتی متر)	نسبت ارتفاع به قطر
شفق	۱۷۰	۲۰	۸.۵
شمس	۱۶۰ تا ۱۸۰	۲۰	۸ تا ۹
رکود	۱۸۹ تا ۲۱۰	۲۲	۸.۶ تا ۹.۵
زاریا	۱۶۰ تا ۱۶۵	۲۲	۷.۲ تا ۷.۵
زیبای پاییزی	۲۰۰	۱۵	۱۳.۳
سان بیم	۱۳۰	۱۳	۱۰
اچ. ماکسیمیلیانی	۱۰۰تا ۳۰۰	۱۲	۸.۳ تا ۲۵
آنگوستیفولیوس	۱۰۰ تا ۲۰۰	۸	۱۲.۵ تا ۲۵
سالیسیفولیوس	۱۲۰	۱۳	۹.۲
غول مغولی	۳۶۵ تا ۴۲۶	۳۵ تا ۴۵	۹.۴ تا ۱۰.۵
پروکات	۱۲۱تا ۱۸۲	۷.۶ تا ۱۰	۱۵.۹ تا ۱۸.۲
تایو	۱۵۲تا ۲۱۳	۲۵	۷.۳
تدی بلند	۱۸۲	۲۵	۷.۳
ایتالیایی سفید	۱۲۱تا ۱۵۲	۱۰	۱۳.۶
ملکه مخملی	۱۲۱ تا ۱۸۲	۱۵تا ۲۰	۸ تا ۹.۱
خورشید عصر	۱۸۲ تا ۲۴۳	۱۵تا ۲۵	۹.۷ تا ۱۲
فشفشه	۶۰ تا ۹۰	۱۰تا ۱۵	۶
ملکه لیمو	۲۴۳	۱۲	۲۰
راه راه خاکستری ماموت	۲۷۴ تا ۳۶۵	۳۰	۱۰.۶
قله پایک	۳۶۵ تا ۴۵۷	۳۵	۱۱.۷
روژ رویال	۱۲۱تا ۱۸۲	۱۵	۱۰
ثریا	۱۸۲	۱۵	۱۲

بلوند توت فرنگی	۱۵۲ تا ۱۸۲	۱۵	۱۱
دسته آفتابی	۹۱	۱۷	۵.۳
زرد پرتو خورشید	۶۱	۱۰	۶.۱
صورتی خورشیدی	۶۱	۱۵	۴
خرس عروسکی	۶۱ تا ۹۱	۱۵	۵
چشم یبر	۶۱ تا ۹۱	۱۲	۶.۳
ولنتاین	۱۵۲	۱۸	۸.۴
یخ وانیلی	۱۵۲	۱۳تا۸	۱۴.۵
سونگولد غول پیکر	۱۵۲ تا ۱۸۲	۲۵	۶.۷
خرس عسل طلایی	۱۵۲ تا ۱۸۲	۱۷	۹.۸
افسونگر کولی	۱۲۱ تا ۱۸۲	۲۰	۷.۵
کنگ	۴۲۶ تا ۵۱۸	۲۵	۱۸.۸

با در نظر گرفتن وزن تقریبی طبق (حدود ۲ کیلوگرم) و نیاز به پایداری مکانیکی ساقه، مقایسه نسبت ارتفاع ساقه به قطر طبق در گروه‌های مختلف نشان داد که این نسبت در ارقام مورد بررسی دامنه متفاوتی دارد و در برخی گروه‌ها مقادیر شاخصی مشاهده می‌شود.

در آفتابگردان‌های بسیار بلند حدود ۱۳، در آفتابگردان‌های بلند حدود ۹/۸، در آفتابگردان‌های نیمه‌کوتاه حدود ۱۰/۵ و در آفتابگردان‌های کوتاه حدود ۵/۳. به‌طور میانگین، ارتفاع آفتابگردان در گونه‌های مختلف حدود ۱۰ برابر قطر طبق آن است. با این حال، نسبت ارتفاع ساقه به قطر خود ساقه به مراتب بزرگ‌تر بوده و در بسیاری از گونه‌ها به بیش از ۶۰ می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد که ساقه آفتابگردان در مقایسه با ارتفاع گیاه و وزن گل‌آذین، عضوی نسبتاً باریک محسوب می‌شود. با وجود این، گیاه قادر است وزن طبق را تحمل کرده و پایداری خود را در برابر نیروهای محیطی حفظ کند. بنابراین کارایی سازه‌ای آفتابگردان نه در افزایش ابعاد عضو باربر، بلکه در نحوه سازماندهی هندسه، توزیع ماده و انتقال نیرو در ساختار آن نهفته است. تحلیل هندسی این گیاه نشان داد که ویژگی‌های ساقه، طبق و زاویه اتصال آن‌ها در پاسخ به بارگذاری، نور و نیاز به پایداری شکل گرفته‌اند. بر اساس این تحلیل، مجموعه‌ای از اصول طراحی قابل استخراج است این اصول شامل موارد ذیل می‌باشد:

- **تناسب ساختاری میان عضوباربر و سطح بارگیر**

تحلیل نسبت ارتفاع ساقه به قطر طبق نشان داد که در گونه‌های مختلف آفتابگردان، رابطه نسبتاً ثابتی میان ابعاد عضو باربر و بخش بارگیر برقرار است. این موضوع بیانگر اهمیت تناسب هندسی در حفظ تعادل کلی گیاه است. با این حال، پایداری سازه‌ای آفتابگردان تنها حاصل این نسبت نبوده و در کنار عواملی نظیر تغییر تدریجی مقطع ساقه، توزیع مناسب ماده و انعطاف‌پذیری ساختار، امکان تحمل وزن گل‌آذین و نیروهای محیطی را فراهم می‌کند. از این رو، اصل استخراج‌شده را می‌توان توجه به تناسب میان ابعاد اجزای باربر و بارگیر در کنار سایر راهبردهای افزایش کارایی سازه‌ای دانست.

- **اتصال زاویه‌دار با رفتار نیمه‌مفصلی**

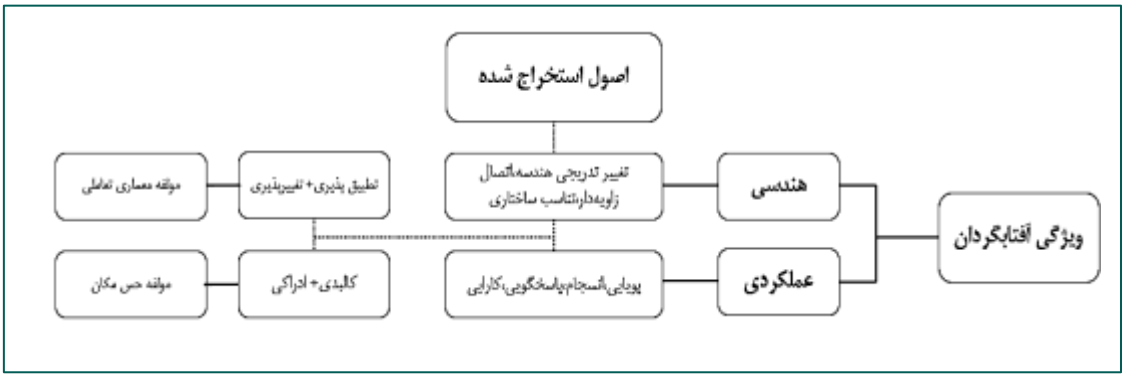
در محل اتصال ساقه و گل‌آذین، زاویه‌ای در محدوده ۱۱۵ تا ۱۳۵ درجه شکل می‌گیرد که ضمن حفظ پایداری، امکان تغییر جهت و انطباق با شرایط محیطی را فراهم می‌سازد. این ویژگی بیانگر الگویی از اتصال نیمه‌مفصلی است که ضمن انتقال نیرو، از تمرکز تنش جلوگیری کرده و انعطاف‌پذیری سازه را افزایش می‌دهد.

- **تغییر تدریجی هندسه در راستای توزیع بهینه نیرو**

بررسی ساقه آفتابگردان نشان داد که شکل و ابعاد مقطع در طول ارتفاع ثابت نیست و متناسب با شرایط بارگذاری تغییر می‌کند. مقطع ساقه از فرم دایره‌ای در ناحیه پایه به تدریج به فرم زاویه‌دار در بخش‌های بالاتر تبدیل می‌شود. این تغییرات بیانگر آن است که ساختار گیاه به جای استفاده از یک مقطع یکنواخت، هندسه خود را متناسب با نیازهای عملکردی هر بخش سازماندهی می‌کند. از این رو، اصل استخراج‌شده بر استفاده از تغییرات تدریجی در فرم و ابعاد اجزای سازه‌ای به منظور توزیع مناسب نیروها و افزایش بهره‌وری ساختاری تأکید دارد.

تفسیر، تبیین و بحث

یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که بهره‌گیری از طبیعت در معماری زمانی می‌تواند به تولید راهکارهای مؤثر منجر شود که از سطح تقلید صوری فراتر رفته و به شناسایی اصول، روابط و سازوکارهای عملکردی موجود در نظام‌های طبیعی بپردازد. این رویکرد با دیدگاه وربروگه و همکاران (۲۰۲۳) درباره استخراج اصول و سازوکارهای طبیعت و نیز با تأکید می و همکاران (۲۰۲۴) بر قابلیت انتقال ویژگی‌های عملکردی و ساختاری گیاهان به معماری هم‌راستا است. در همین راستا، بررسی آفتابگردان در پژوهش حاضر نشان داد که ویژگی‌هایی همچون پویایی، پاسخگویی، انسجام، کارایی و تغییر تدریجی هندسه را می‌توان نه صرفاً به‌عنوان ویژگی‌های زیستی گیاه، بلکه به‌عنوان اصول قابل ترجمه به راهبردهای طراحی معماری در نظر گرفت. از این منظر، یافته‌های پژوهش حاضر ضمن تأیید ظرفیت طبیعت به‌عنوان منبع الهام، این رویکرد را با تمرکز بر یک گیاه مشخص و بررسی قابلیت انتقال مکانیسم‌های آن به معماری تعاملی توسعه می‌دهد. در پاسخ به پرسش نخست، پویایی، انسجام، پاسخگویی و کارایی، در کنار تناسب ساختاری میان عضو باربر و سطح بارگیر، اتصال زاویه‌دار و تغییر تدریجی هندسه، به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌ها و اصول قابل انتقال از آفتابگردان شناسایی شدند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت آفتابگردان برای الهام‌بخشی معماری تنها به هندسه مارپیچی، تناسبات یا سازمان ظاهری آن محدود نیست، بلکه روابط میان اجزا و نحوه سازگاری ساختار گیاه با شرایط محیطی نیز می‌تواند مبنای شکل‌گیری راهبردهای طراحی قرار گیرد. بنابراین، آفتابگردان در این پژوهش نه صرفاً به‌عنوان یک الگوی فرمی، بلکه به‌عنوان یک نظام پویا و سازگار با محیط مورد توجه قرار گرفته است. در پاسخ به پرسش دوم، اصول استخراج‌شده قابلیت تبدیل به راهبردهای طراحی در عناصر سازه‌ای، پوسته‌های معماری، اجزای متحرک و سامانه‌های پاسخگو را دارند. در این فرآیند، پویایی و پاسخگویی می‌توانند در طراحی اجزایی به کار گرفته شوند که متناسب با شرایط محیطی یا نحوه استفاده دچار تغییر شوند؛ انسجام و تناسب ساختاری نیز می‌توانند در سازمان‌دهی و اتصال اجزای معماری مورد استفاده قرار گیرند. بدین ترتیب، مکانیسم‌های طبیعی آفتابگردان از سطح مشاهده زیستی به سطح منطق طراحی منتقل شده و امکان شکل‌گیری معماری تعاملی و سازگار با شرایط متغیر را فراهم می‌کنند. در پاسخ به پرسش سوم، ارتباط میان معماری تعاملی و حس مکان را می‌توان در قابلیت این معماری برای ایجاد تغییرپذیری، پاسخگویی و تعامل میان فضا، محیط و کاربر تبیین کرد. نگوین و همکاران (۲۰۲۲) نیز با بررسی یک دیوار متحرک و سازگارشونده نشان دادند که تغییرپذیری پیکربندی فضایی در معماری پاسخگو می‌تواند با کیفیت‌های فضایی، موقعیتی و ذهنی مرتبط با حس مکان پیوند داشته باشد. بر این اساس، هنگامی که عناصر معماری متناسب با شرایط محیطی و نیازهای کاربران تغییر می‌کنند، فضا از یک ساختار ثابت و منفعل به محیطی پویا و قابل تجربه تبدیل می‌شود. در نتیجه، سازمان فضایی خوانا، تداوم ارتباط میان کاربر و محیط و امکان تجربه و مشارکت در تغییرات فضا می‌تواند زمینه تقویت هویت، تعلق و در نهایت حس مکان را فراهم کند. از این منظر، یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که الهام از مکانیسم‌های تطبیقی آفتابگردان می‌تواند به ایجاد معماری تعاملی‌ای منجر شود که علاوه بر پاسخگویی عملکردی و محیطی، ظرفیت تقویت کیفیت‌های ادراکی و معنایی فضا و حس مکان را نیز داراست. برآیند این یافته‌ها نشان می‌دهد که رابطه میان آفتابگردان، معماری تعاملی و حس مکان را می‌توان در یک زنجیره مفهومی از «مکانیسم‌های تطبیقی طبیعی» به «اصول قابل انتقال طراحی»، از آنجا به «راهبردهای معماری تعاملی» و در نهایت به «تقویت کیفیت‌های ادراکی، هویتی و تعلق به مکان» تبیین کرد. مدل مفهومی حاصل از این ارتباطات در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶. مدل مفهومی ارتباط مکانیسم‌های تطبیقی آفتابگردان با معماری تعاملی و حس مکان. تدوین: نگارندگان.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف شناسایی ویژگی‌ها و مکانیسم‌های قابل انتقال گیاه آفتابگردان به معماری تعاملی و تبیین ظرفیت آن‌ها در تقویت حس مکان انجام شد. نتایج نشان داد که ظرفیت آفتابگردان برای الهام‌بخشی معماری، فراتر از ویژگی‌های فرمی و هندسی آن، در سازوکارهای عملکردی، ساختاری و تطبیقی آن نهفته است. بر این اساس، ویژگی‌های استخراج‌شده در دو گروه کلی اصول عملکردی و اصول هندسی ـ ساختاری دسته‌بندی شدند. اصول عملکردی شامل پویایی، پاسخگویی، انسجام و کارایی و اصول هندسی ـ ساختاری شامل تناسب ساختاری میان عضو باربر و سطح بارگیر، اتصال زاویه‌دار با رفتار نیمه‌مفصلی و تغییر تدریجی هندسه در راستای توزیع بهینه نیرو هستند. این اصول با تبدیل مکانیسم‌های طبیعی به راهبردهای طراحی، قابلیت به‌کارگیری در عناصر متحرک، پوسته‌های پاسخگو، سامانه‌های هوشمند، سازه‌ها و اجزای انعطاف‌پذیر معماری را دارند. همچنین، به‌منظور تبیین چگونگی ارتباط اصول استخراج‌شده با معماری تعاملی و حس مکان، هر یک از این اصول از نظر ظرفیت ایجاد تعامل، تغییرپذیری و پاسخگویی فضایی و نیز تأثیر آن بر کیفیت‌های کالبدی و ادراکی فضا مورد تطبیق قرار گرفت. حاصل این تطبیق، مجموعه‌ای از راهبردهای طراحی است که ارتباط میان مکانیسم‌های آفتابگردان، ابعاد معماری تعاملی و مؤلفه‌های حس مکان را نشان می‌دهد. این ارتباطات و راهبردهای حاصل در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. ارتباط اصول استخراج‌شده از مکانیسم‌های تطبیقی آفتابگردان با ابعاد معماری تعاملی، مؤلفه‌های حس مکان و تأثیر آن‌ها در طراحی معماری. تدوین: نگارندگان.

اصل استخراج شده از ویژگی‌های آفتابگردان		مولفه معماری تعاملی	مولفه حس مکان	راهبرد طراحی معماری
عملکردی	پویایی (ردیابی خورشید و حرکت)	تطبیق‌پذیری	ادراکی	استفاده از عناصر متحرک و قابل تنظیم
	انسجام (سازماندهی هماهنگ گلچه‌ها)	–	کالبدی+ ادراکی	یکپارچه‌سازی اجزای معماری
	پاسخگویی (واکنش به نور و شرایط محیطی)	تطبیق‌پذیری	ادراکی	استفاده از سامانه‌های هوشمند و پاسخگو
	کارایی (ساختار بهینه ساقه)	–	کالبدی+ ادراکی	استفاده از مصالح و سازه‌های سبک و پایدار
هندسی	تناسب ساختاری عضو باربر و بارگیر	–	کالبدی	طراحی متناسب ابعاد اعضای باربر و بارگیر بر اساس الزامات عملکردی
	اتصال زاویه‌دار با رفتار نیمه‌مفصلی	تطبیق‌پذیری، تغییرپذیری	کالبدی	استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر با قابلیت انتقال نیرو و تغییر شکل کنترل‌شده
	تغییر تدریجی هندسه	تغییرپذیری	کالبدی	طراحی مقاطع و هندسه متغیر متناسب با توزیع نیرو و شرایط بارگذاری

مطابق جدول ۲، اصول استخراج‌شده از آفتابگردان را می‌توان از سطح ویژگی‌های زیستی و ساختاری به راهبردهای مشخص طراحی معماری انتقال داد. در این میان، اصولی مانند پویایی و پاسخگویی، بیشترین ارتباط را با قابلیت تطبیق‌پذیری و تغییرپذیری در معماری تعاملی دارند و امکان شکل‌گیری عناصر و سامانه‌هایی را فراهم می‌کنند که متناسب با شرایط محیطی و نحوه استفاده تغییر می‌یابند. از سوی دیگر، انسجام، تناسب ساختاری، اتصال زاویه‌دار و تغییر تدریجی هندسه، بیشتر بر سازمان فضایی، کیفیت کالبدی و هماهنگی اجزای معماری تأثیر می‌گذارند. این تطبیق نشان می‌دهد که انتقال مکانیسم‌های آفتابگردان به معماری صرفاً به بازتولید ویژگی‌های ظاهری آن محدود نمی‌شود، بلکه می‌تواند به شکل‌گیری راهبردهایی منجر شود که هم‌زمان عملکرد، پاسخگویی و کیفیت تجربه فضایی را مورد توجه قرار می‌دهند. در مجموع، یافته‌های

پژوهش در سه سطح قابل جمع‌بندی است: نخست، ویژگی‌ها و مکانیسم‌های عملکردی، هندسی و ساختاری آفتابگردان به‌عنوان ظرفیت‌های قابل انتقال شناسایی شدند؛ دوم، این مکانیسم‌ها به اصول و راهبردهای قابل استفاده در طراحی معماری تعاملی تبدیل شدند؛ و سوم، ارتباط این راهبردها با کیفیت‌های فضایی و مؤلفه‌های حس مکان تبیین شد. بر این اساس، می‌توان گفت که بهره‌گیری از مکانیسم‌های تطبیقی آفتابگردان ظرفیت آن را دارد که با ارتقای تعامل میان فضا، کاربر و محیط، زمینه شکل‌گیری فضاهایی پویا، پاسخگو، منسجم و دارای کیفیت ادراکی و هویتی را فراهم کند و از این طریق به تقویت حس مکان کمک نماید.

دستاورد پژوهش

دستاورد اصلی پژوهش، ارائه چارچوبی برای تبدیل مکانیسم‌های عملکردی، ساختاری و هندسی آفتابگردان به اصول و راهبردهای طراحی در معماری تعاملی با تأکید بر حس مکان است. نوآوری پژوهش در عبور از رویکردهای مبتنی بر تقلید صرف فرم آفتابگردان و تمرکز بر شناسایی، تحلیل و سازمان‌دهی مکانیسم‌های عملکردی و هندسی آن در قالب اصول قابل انتقال به فرآیند طراحی معماری است. بر این اساس، چارچوب پیشنهادی می‌تواند مبنایی برای طراحی عناصر متحرک و پاسخگو، سازمان‌دهی منسجم اجزای معماری و بهره‌گیری هدفمند از تناسبات، هندسه و منطق ساختاری آفتابگردان قرار گیرد. با توجه به ماهیت کیفی و تبیینی پژوهش حاضر، نتایج به‌عنوان چارچوبی مفهومی برای هدایت فرآیند طراحی ارائه شده‌اند و سنجش تجربی میزان تأثیر این راهبردها بر تجربه فضایی و حس مکان در این پژوهش انجام نشده است. ازاین‌رو، مطالعات آینده می‌توانند با استفاده از شبیه‌سازی، ساخت نمونه‌های اولیه و ارزیابی تجربی، قابلیت اجرایی راهبردهای استخراج‌شده و تأثیر آن‌ها بر کیفیت تجربه فضایی، تعامل کاربر با محیط و حس مکان را مورد سنجش قرار دهند.

ملاحظات اخلاقی و اطلاعات تکمیلی

برگرفته از پایان نامه/رساله: «نویسندگان اعلام می‌دارند که این مقاله حاصل پژوهش مستقل بوده و مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد یا رساله دکتری نیست.»

حمایت مالی: «این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است»

تعارض منافع: «نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع شخصی، مالی یا حرفه‌ای در رابطه با پژوهش حاضر و انتشار این مقاله ندارند»

استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی: «نویسندگان اعلام می‌دارند در این پژوهش از هیچ‌گونه ابزار هوش مصنوعی استفاده نشده است».

پی‌نوشت

1. Pith
2. Vascular Cambium
3. Secondary Wood
4. Xylem
5. Phloem
6. Capitulum
7. Heliotropism
8. Phototropism
9. Auxin
10. Proton Pumps
11. Expansin
12. Turgor Pressure
13. Vacuole

منابع

اکبری، ح.، هرویه، ع.، و عشری، و. (۱۳۹۷). *کشت آفتابگردان*. سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی، وزارت آموزش و پرورش.

پناهی، س.، و آذری، ا. (۱۳۹۳). ارزیابی توسعه معماری تعاملی با تأثیرپذیری از رویکرد تکنولوژی دیجیتال در طراحی. *اولین کنگره بین‌المللی افق‌های جدید در معماری و شهرسازی*، تهران.

تقی‌زاده، ک. (۱۳۸۵). آموزه‌هایی از سازه‌های طبیعی، درس‌هایی برای معماران. *فصلنامه هنرهای زیبا: معماری و شهرسازی*، ۲۸ (۲۸)، ۷۵.

چگنی، ف.، دیده‌بان، م.، و حصاری، پ. (۱۳۹۹). تبیین مدل فرآیند علّی مؤلفه‌ها و استراتژی‌های انعطاف‌پذیری. *دوفصلنامه اندیشه معماری*، ۴ (۸)، ۵–۶۸.

دشتی، م. (۱۴۰۳). تأثیر فضای معماری بر احساس در مقایسه دو رویکرد روان‌شناسی محیطی و پدیدارشناسی. *پژوهش‌های معماری و محیط*، ۲ (۲). https://doi.org/10.30470/jaer.2025.2044222.1163

سبزی‌پور، ه.، و شعبانی، ش. (۱۴۰۰). معماری بیونیک و شیوه الهام گرفتن از طبیعت. *چهارمین همایش ملی فناوری‌های نوین در مهندسی معماری، عمران و شهرسازی ایران*، تهران.

علیپور، ل.، فیضی، م.، و محمدمرادی، ا. (۱۳۹۶). آفرینش معماری به روش قیاس با طبیعت. *نشریه مطالعات معماری ایران*، ۶ (۱۱)، ۸۵–۱۰۱.

فرجی، ا.، و نوری، ف. (۱۳۹۸). راهکارهای معمارانه در ارتقای انعطاف‌پذیری فضا در معماری داخلی. *مجله معماری‌شناسی*، ۲ (۱۲).

فلاحت، م. ص. (۱۳۸۵). *مفهوم حس مکان و عوامل شکل دهنده آن*. *هنرهای زیبا*، ۴ (۲۶)، ۵۷–۶۶.

مجاهدی، محمدرضا، اسمعیلی برتنی، عرفان (۱۳۹۸). بررسی الهام‌گیری از الگوهای سازه‌ای طبیعت و ارتباط آن با طراحی معماری پایدار. *دومین کنفرانس بین‌المللی معماری، عمران، شهرسازی، محیط زیست و افق‌های هنر اسلامی در بیانیه گام دوم انقلاب*، تبریز.

نجفی مهیاری، ا.، لاری بقال، س. ک.، فرشچی، ح. ر.، و صادق‌پور، ا. ح. (۱۳۹۴). بررسی تطبیقی هندسه گل آفتابگردان بر هندسه کاربندی معماری ایرانی (با رویکرد بایونیک). *چهارمین کنفرانس ملی مصالح و سازه‌های نوین در مهندسی عمران*، یاسوج.

Atamian, H. S., Creux, N. M., Brown, E. A., Fankhauser, C., & Harmer, S. L. (2016). Circadian regulation of sunflower heliotropism, floral orientation, and pollinator visits. *Science, 353*(6301), 587–594. https://doi.org/10.1126/science.aaf9793

Bijari, M., Aflaki, A., & Esfandiari, M. (2025). Plants inspired biomimetics architecture in modern buildings: A review of form, function and energy. *Biomimetics, 10*(2), 124. https://doi.org/10.3390/biomimetics10020124

Byju's. (2019). To prepare a temporary stained mount of a transverse section of dicot and monocot stem and root to study various plant tissues. *BYJU'S Biology*. https://byjus.com/biology/preparation-and-study-of-transverse-section-of-dicot-and-monocot-roots-and-stems/

Cheng, T., Tahouni, Y., Sahin, E. S., Ulrich, K., Lajewski, S., Bonten, C., Wood, D., Rühe, J., Speck, T., & Menges, A. (2024). Weather-responsive adaptive shading through biobased and bioinspired hygromorphic 4D-printing. *Nature Communications, 15*, 10366. https://doi.org/10.1038/s41467-024-54808-8

Creux, N. M., Brown, E. A., Atamian, H. S., & Harmer, S. L. (2021). Flower orientation influences floral temperature, pollinator visits and plant fitness in sunflower. *New Phytologist, 232*(1), 168–181. https://doi.org/10.1111/nph.17627

DeValk, E. M., Koehler, B. D., & Hulke, B. S. (2024). Precision, quantitative measurement of sunflower capitulum inclination: A trigonometry-based approach. *Agronomy Journal, 116*, 2783–2790. https://doi.org/10.1002/agj2.21708

Drago, J. (2023). 27 stunning sunflower varieties to grow this season. *Epic Gardening*. https://www.epicgardening.com/sunflower-varieties/

Gigazine. (2017). *How does a sunflower chase the sun?* https://gigazine.net/gsc_news/en/20170804-why-sunflowers-follow-the-sun/

Gillette, B. (2024). 25 types of sunflowers you should grow in your garden this season. *The Spruce*. https://www.thespruce.com/types-of-sunflowers-8657115

Hagan, S. (2001). *Taking shape: A new contract between architecture and nature*. Architectural Press.

Hladni, N., Terzić, S., Miklič, V., & Radić, V. (2018). Sunflower genetics from ancestors to modern hybrids—A review. *Genes, 9*(11), 528. https://doi.org/10.3390/genes9110528

Kashyap, A., & Kumar, P. (2026). A mathematical study of Fibonacci sequence and golden ratio in sunflower spirals. *International Journal of Sciences and Innovation Engineering, 3*(1), 628–634. https://doi.org/10.70849/ijsic0301260726640

Kelly, K. (1994). *Out of control: The rise of neo-biological civilization*. Addison-Wesley.

Kutschera, U., & Briggs, W. R. (2016). Phototropic solar tracking in sunflower plants: An integrative perspective. *Annals of Botany, 117*(1), 1–8. https://doi.org/10.1093/aob/mcv141

Marshall, C. M., Brooks, C. J., & Harmer, S. L. (2023). The circadian clock controls temporal and spatial patterns of floral development in sunflower. *eLife, 12*, e80984. https://doi.org/10.7554/eLife.80984

Mei, X., Liu, C., & Li, Z. (2024). Research progress on functional, structural and material design of plant-inspired green bionic buildings. *Energy and Buildings, 316*, 114357. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114357

Nguyen, B. V. D., Han, J., & Vande Moere, A. (2022). Towards Responsive Architecture that Mediates Place: Recommendations on How and When an Autonomously Moving Robotic Wall Should Adapt a Spatial Layout. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction, 6(CSCW2),* 467, 1–27. https://doi.org/10.1145/3555568

Popov, A., Radanović, A., & Miladinović, D. (2010). Structure of wild annual sunflower (Helianthus annuus L.) accessions based on agro-morphological traits. *Genetic Resources and Crop Evolution, 57*(1), 27–39.

Sommese, F., Badarnah, L., & Ausiello, G. (2022). A critical review of biomimetic building envelopes: Towards a bio-adaptive model from nature to architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 169*, 112850. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112850

Smith, B. D. (2014). The domestication of Helianthus annuus L. (sunflower). *Vegetation History and Archaeobotany, 23*(1), 57–74. https://doi.org/10.1007/s00334-013-0393-3

Verbrugghe, N., Rubinacci, E., & Khan, A. Z. (2023). Biomimicry in architecture: A review of definitions, case studies, and design methods. *Biomimetics, 8*(1), 107. https://doi.org/10.3390/biomimetics8010107