ISSN: 2538-2594; Naqshejahan - Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2027;16(4): 39-64

Feasibility of Designing and Fabricating a Soft Robotics-Based Responsive Facade for Daylight Response in Contemporary Iranian Architecture

ARTICLE INFO

Article Type
Analytic Study

Authors

Majid Sehati [1]
Rouhollah Rahimi [2*]
Mostafa Gholipour Geshniani[3]

How to cite this article

F….

ABSTRACT

Aims: This study investigates the feasibility of applying soft robotics technology in the design of responsive architectural facades. The research focuses on integrating an origami-inspired folding geometry with a silicone pneumatic soft actuator to enable a gradual and adaptive opening–closing behavior in response to daylight.

Methods: A mixed methodological approach combining theoretical analysis and experimental investigation was employed. In the theoretical phase, literature on responsive facades, origami structures, and soft robotics was reviewed, leading to the development of a conceptual facade model. In the experimental phase, a laboratory-scale prototype was developed using three-dimensional modeling, mold fabrication, and silicone casting to produce the soft robotic actuator. The control system consisted of an Arduino microcontroller, a light sensor, and a compressed air supply. The prototype's behavior was evaluated under controlled simulated light conditions.

Findings: The integration of origami geometry with a pneumatic soft actuator enabled a gradual and controllable transformation between open and closed states. The prototype responded to variations in light intensity with flexible movement and relatively low energy demand. Observations also indicated that air pressure levels and the characteristics of the silicone membrane influence the range of motion of the facade and its responsiveness to daylight.

Conclusion: The results indicate that combining soft robotic actuators with origami-based geometries has potential for developing responsive facade systems. Although the findings are limited to a laboratory-scale prototype and represent a feasibility study, the approach may contribute to the development of lightweight, adaptive, and energy-efficient systems for daylight control.

Keywords: Responsive Facade, Soft Robotics, Origami, Physical Prototyping, Responding to Daylight, Contemporary Iranian architecture, Architectural Technologies.

CITATIONLINKS

1- M.Sc. in Architecture, Department of Architecture, Faculty of Arts and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.
2 - Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Arts and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.
3-Mostafa Gholipour Geshniani, Assistant Professor, Department of Architecture, Faculty of Arts and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

Correspondence
Address: Department of Architecture, Faculty of Arts and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.
Email:
r.rahimi@umz.ac.ir

Article History
Received:
Accepted:
Published:

[1]. Wang X, Sun X, Yu CW. Building envelope with variable thermal performance….[2]. Harvey LDD. Reducing energy use in the buildings sector:… [3]. Bekler C, Ayçam İ, Gökşen F. Evaluation of climate adaptive…[4]. Heshmati P. Design of an Intelligent Transformable Skin…[5]. Taghizadeh K, Matini M, Kakouei A. Flexible Structures…[6]. Loonen RCGM, Trčka M, Cóstola D, Hensen JLM. Climate adaptive…[7]. Kretzer M. Information Materials: Smart Materials.. [8]. Badarnah L, Kadri U. A methodology for the design…[9]. Tabadkani A, Banihashemi SA, Hosseini MR. A simulation-based…[10]. Brzezicki M. Architectural design of smart facades: A review…[11]. Rezazi S, Mozaffari F. Adaptive and Compatible Building Skins…[12]. Amirian M. Design of a Responsive Skin to Environmental…[13]. Asgari S. Design of a Multi-Functional Space with an Interactive…[14]. Rezaeicherati A, Mahdavinejad M. SoRo Responsive Wall -…[15]. Xiao F, Wei Z, Wang H, Li J, Zhu J. Embedded 3D [17]. Mehrvarz F, Bemanian M, Nasr T, Mansoori R, Al-Kazee M, A…printing of silicone…[16]. Liu CH, Chen YT, Tsai MC. Design, characterization and optimization…[18]. Deveci E. Adaptive Architecture and Smart Materials: Designing…[19]. Akşar S, Öztürk RB. Adaptif Cephelerin Sürdürülebilir Yapı Tasarımındaki…[20]. Schnädelbach H. Adaptive Architecture – A Conceptual Framework…[21]. Hasan M, Al-Tameemi O. The effect of…[22]. Fattahi Tabasi S, Banihashemi S. Design and mechanism of building responsive.. [23]. Aelenei L, Aelenei D, et al. Adaptive Facade Network: Moving...[24]. Andrade T, Beirão J, Arruda A, Eysen C. Toward adaptable…[25]. Kim M, Kim B, Koh J, Yi H. Flexural biomimetic responsive…

Copyright© 2021, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-Non-Commercial terms.

eISSN:2538-2594 نقش جهان - مطالعات نظری و فناوری های نوین معماری و شهرسازی-۱۴۰۵؛ (۴) ۱۶:۶۴-۳۹

امکان‌سنجی طراحی و ساخت پوسته پاسخگو مبتنی بر رباتیک نرم جهت واکنش به نور روز در معماری معاصر ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: تحقیق بنیادی

نویسندگان

مجید صحتی [۱]،

روح‌اله رحیمی [۲]،

مصطفی قلی‌پور گشنیانی [۳]

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

۲- دانشیار، مهندسی معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

۳- استادیار، مهندسی معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

نویسنده مسئول *

r.rahimi@umz.ac.ir

تاریخ مقاله

تاریخ دریافت:

تاریخ پذیرش:

تاریخ انتشار:

ارجاع‌دهی

چکیده

اهداف: پژوهش حاضر با هدف امکان‌سنجی به‌کارگیری فناوری رباتیک نرم در طراحی پوسته‌های پاسخگوی معماری انجام شده است. تمرکز مطالعه بر بررسی قابلیت ادغام یک هندسه تاشو الهام‌گرفته از اوریگامی با محرک نرم پنوماتیک سیلیکونی به‌منظور ایجاد رفتاری باز و بسته‌شونده، تدریجی و تطبیق‌پذیر در پاسخ به نور روز است.

روش ها: این پژوهش با روش ترکیبی شامل تحلیل نظری و آزمایش تجربی انجام شد. در بخش نظری، ادبیات مرتبط با پوسته‌های پاسخگو، اوریگامی و رباتیک نرم بررسی شد و بر این اساس یک مدل مفهومی برای پوسته طراحی گردید. در بخش تجربی، نمونه اولیه‌ای در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی، ساخت قالب، و ریخته‌گری سیلیکون برای تولید محرک رباتیک نرم ساخته شد. سامانه کنترل شامل میکروکنترلر آردوینو، سنسور نور، و منبع هوای فشرده بود و عملکرد نمونه تحت تابش کنترل‌شده نور شبیه‌سازی‌شده مورد آزمون قرار گرفت.

یافته‌ها: ترکیب اوریگامی با رباتیک نرم، امکان ایجاد تغییر شکل تدریجی و کنترل‌پذیر بین حالت‌های باز و بسته را فراهم می‌کند. نمونه ساخته‌شده توانست در پاسخ به تغییر شدت نور، رفتاری منعطف و از خود نشان دهد. همچنین مشاهده شد که تنظیم فشار هوا و ویژگی‌های جداره سیلیکونی بر دامنه حرکت پوسته و در پاسخ به نور روز اثرگذار است.

نتیجه‌گیری: استفاده از رباتیک نرم در ترکیب با هندسه‌های اوریگامی، ظرفیت قابل‌توجهی برای توسعه پوسته‌های پاسخگوی دارد. اگرچه نتایج در سطح نمونه اولیه آزمایشگاهی و امکان‌سنجی قابل تفسیر است، اما این رویکرد می‌تواند زمینه‌ساز توسعه سامانه‌های سبک، تطبیق‌پذیر و کم‌مصرف برای کنترل نور روز باشد.

کلید واژگان: پوسته پاسخگو، روباتیک نرم، اوریگامی، نمونه‌سازی فیزیکی، واکنش به نور روز، معماری معاصر ایران، فناوری معماری.

این نشریه ی دارای دسترسی باز، تحت قوانین گواهینامه بین‌المللی Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License منتشر می‌شود که اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

مقدمه

پوسته ساختمان به‌عنوان لایه‌ای میان محیط داخلی و خارجی، نقشی اساسی در عملکرد انرژی ساختمان ایفا می‌کند. مطالعات نشان می‌دهد که بهینه‌سازی طراحی این بخش می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش مصرف انرژی داشته باشد؛ به‌گونه‌ای که در برخی پژوهش‌ها میزان صرفه‌جویی حاصل از بهبود عملکرد پوسته ساختمان بین ۲۰ تا ۵۰ درصد گزارش شده است [۲,۱]. نسل‌های اولیه پوسته‌های متحرک اغلب بر سازوکارهای صلب مانند ریل‌های مکانیکی یا سیستم‌های تاشونده متکی بودند که ممکن است انعطاف‌پذیری یا کارایی لازم برای پاسخ‌گویی به نیازهای انرژی امروز را فراهم نکنند [۳]. این سیستم‌ها عمدتاً از طریق عناصر صلب و مفاصل سخت مانند لولاها و ریل‌ها عمل می‌کنند که به دلیل پیچیدگی، وزن زیاد، استهلاک بالا و نیاز به تعمیر و نگهداری مداوم، مستعد شکست بوده و هزینه‌های عملیاتی گزافی را به پروژه تحمیل می‌کنند [۵,۴]. در پاسخ به این محدودیت‌ها، پوسته‌های پاسخگو به عنوان نسل پیشرفته‌ای از سیستم‌های پوششی با قابلیت انطباق پویا معرفی شده‌اند که با استفاده از سنسورها و محرک‌ها، کیفیت نور طبیعی و آسایش حرارتی را بهینه می‌سازند. [۷,۶] این سیستم‌ها با الهام از مفاهیم بایونیک و مکانیزم‌های طبیعی، به دنبال ایجاد رفتاری مشابه «سازه‌های زنده» هستند [۸]. در سال‌های اخیر، تمرکز پژوهش‌ها از مکانیزم‌های مکانیکی صرف به سمت سیستم‌های هیبریدی و مفاصل انعطاف‌پذیر سوق یافته است[۹]. در این میان، هندسه‌های الهام‌گرفته از اوریگامی به دلیل قابلیت تغییر شکل بالا و کاهش وزن سازه، پتانسیل قابل توجهی برای بهبود طول عمر و عملکرد پوسته‌های متحرک نشان داده‌اند [۱۰].

با وجود پیشرفت در هندسه‌های تاشو، همچنان نیاز به محرک‌هایی که با ماهیت انعطاف‌پذیر این پوسته‌ها همخوانی داشته باشند، احساس می‌شود. فناوری رباتیک نرم به عنوان جایگزینی نوین برای عناصر سخت و غیرمنعطف، امکان سبک‌سازی و حذف اتصالات مکانیکی پیچیده را فراهم می‌آورد. این فناوری با حذف مفاصل صلب، دستیابی به یک پوسته‌ی پاسخگوی ایمن، ارزان و با عملکرد تدریجی را ممکن می‌سازد. با این حال، ادبیات موضوع نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌ها، همچنان شکاف تحقیقاتی قابل‌توجهی در زمینه ارزیابی عملکردی و ساخت نمونه‌های اولیه‌ای که به طور مشخص از ترکیب «محرک رباتیک نرم» و «هندسه اوریگامی» برای کنترل نور روز استفاده کنند، وجود دارد [۹,۷].

پژوهش حاضر با هدف کمک به رفع این شکاف و به منظور امکان‌سنجی به‌کارگیری رباتیک نرم در معماری، به طراحی و ساخت یک نمونه اولیه از پوسته پاسخگو می‌پردازد. فرض بر این است که ادغام محرک‌های نرم سیلیکونی با یک ساختار تاخورده، می‌تواند منجر به سیستمی سبک و تطبیق‌پذیر برای کنترل نور روز شود که فاقد مشکلات رایج سیستم‌های صلب باشد. در ادامه، پس از تبیین مبانی نظری رباتیک نرم و معیارهای طراحی اوریگامی، فرآیند طراحی، ساخت قالب و تست عملکردی نمونه ساخته شده تحت شرایط تابش کنترل شده تشریح می‌گردد تا کارایی این رویکرد در پاسخ به نور روز ارزیابی شود.

پرسش‌های پژوهش

۱. تا چه حد می‌توان یک پوسته پاسخگوی نرم‌رباتیک با هندسه اوریگامی‌الهام طراحی و ساخت که در پاسخ به نور روز، رفتار باز و بسته‌شونده از خود نشان دهد؟
۲. میزان کارایی نمونه اولیه ساخته‌شده در ایجاد پاسخ تدریجی و کنترل‌پذیر به تغییرات نور روز، با اتکا بر سامانه پنوماتیک و کنترل حسگرمحور، چگونه است؟

فرضیه‌های پژوهش

۱. پوسته پاسخگوی مبتنی بر هندسه اوریگامی و محرک نرم پنوماتیک می‌تواند تغییر فرم تدریجی و قابل کنترل را در پاسخ به نور روز ایجاد کند.
۲. سامانه کنترل حسگرمحور مبتنی بر آردوینو و سنسور نور بی اچ ۱۷۵۰، امکان باز و بسته شدن تنظیم‌پذیر پروتوتایپ را در محدوده آزمایشگاهی فراهم می‌سازد.

توسعه نماهای پاسخگو، حاصل نیاز به انطباق‌پذیری پویا با متغیرهای محیطی و ارتقای عملکرد انرژی ساختمان‌ها است. پوسته‌های پاسخگو در پاسخ به محرک‌هایی نظیر تابش

خورشید، نور روز، دما و شرایط اقلیمی، وضعیت کالبدی خود را تغییر داده و در کنترل فعال بارهای حرارتی و نوری نقش ایفا می‌کنند. در این راستا، رزازی و مظفری (۱۳۹۷) ضرورت گذار از پوسته‌های ایستا به سازگار را تبیین کرده‌اند. یکی از چالش‌های اساسی نماهای متحرک متداول، اتکا به مفاصل صلب و اجزای مکانیکی پیچیده است که با افزایش وزن، استهلاک، خرابی‌های پی‌درپی و هزینه نگهداری بالا همراه‌اند. تقی‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) با نقد این رویکرد مکانیکی، سازوکارهای انعطاف‌پذیر و یکپارچه را به دلیل کاهش تمرکز تنش و حذف اتصالات مفصلی، جایگزینی کارآمد معرفی کردند. این چرخش مفهومی، زمینه بهره‌گیری از فناوری رباتیک نرم و مواد تغییرشکل‌پذیر را در مقیاس معماری فراهم آورد.

بهره‌گیری از منطق اوریگامی نیز راهکاری کلیدی برای عبور از محدودیت‌های هندسی سازه‌های صلب است که امکان تغییر فرم کنترل‌پذیر، تدریجی و تکرارپذیر را فراهم می‌کند. امیریان (۱۴۰۰) با ابزارهای تحلیل پارامتریک، قابلیت صفحات تاشونده را در بهبود عملکرد اقلیمی پوسته‌ها نشان داده است. با این حال، در اکثر مطالعات اوریگامی، تمرکز اصلی بر هندسه بوده و سازوکار فعال‌سازی کمتر بررسی شده است. ادغام فناوری رباتیک نرم با سازه‌های اوریگامی، افق تازه را در طراحی پوسته‌های پاسخگوی سبک، پیوسته و کم‌استهلاک گشوده است. عسگری‌تپه (۱۳۹۸) در پژوهشی داخلی، پیوند میان اوریگامی و رباتیک نرم را برای کنترل تابش خورشید بررسی کرده است. انتقال این مفاهیم به مقیاس معماری، نیازمند بومی‌سازی مکانیزم‌های فعال‌سازی است؛ در همین راستا، رضایی‌چراتی (۲۰۲۰) با طراحی یک دیوار نرم مدولار مبتنی بر محرک‌های پنوماتیک شبکه‌ای و سنسورهای حرارتی، نوری و حرکتی (تحت کنترل آردوینو)، امکان‌سنجی تعامل پوسته با حضور کاربر و شرایط محیطی را در قالب یک نمونه فیزیکی ۱:۱۵ اثبات نمود. با این حال، ارزیابی این سامانه در مقیاس واقعی (۱:۱)، بررسی دوام متریال در فضای باز و ارزیابی چرخه عمر آن همچنان به عنوان یک خلاء تحقیقاتی مطرح است.

محرک‌های پنوماتیک نرم سیلیکونی به دلیل وزن کم و انعطاف‌پذیری بالا، نسبت به مکانیسم‌های صلب، ظرفیت بیشتری برای ایجاد حرکت‌های پیوسته و کنترل‌پذیر دارند. لیو چان و ژیو آنگ (۲۰۱۹) با معرفی محرکی با قابلیت خمش در چند صفحه نشان دادند که از طریق بازطراحی شبکه پنوماتیکی می‌توان به رفتارهای حرکتی پیچیده‌تر دست یافت. در زمینه فناوری ساخت این محرک‌ها نیز، روش‌های سنتی نظیر قالب‌گیری با محدودیت‌هایی در ایجاد حفره‌های پیچیده داخلی مواجه‌اند. ژیو آ و همکاران (۲۰۲۴) با ارائه رویکرد «چاپ سه‌بعدی تعبیه‌شده» برای سیلیکون و استفاده از هد اختلاط فعال، امکان ایجاد گرادیان سختی هدفمند را بدون نیاز به مواد پشتیبان فراهم کردند که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم فناوری ساخت بر برنامه‌ریزی رفتار حرکتی سامانه‌های نرم است.

در کنار طراحی هندسه و محرک، نوع منطق کنترل و ارزیابی عملکرد نوری نیز در کارایی نماهای پاسخگو تعیین‌کننده است. شبیه‌سازی‌های پارامتریک نشان می‌دهند که سامانه‌های پاسخگو با قابلیت تغییر تدریجی و مداوم میزان بازشدگی، عملکرد به مراتب بهتری در تامین آسایش بصری نسبت به سیستم‌های خاموش/روشن دارند. در همین راستا، مهرورز (۲۰۲۴) با شبیه‌سازی عملکرد یک نمای پاسخگوی تاشونده در محیط گرسهاپر نشان داد که تنظیم تدریجی میزان بازشدگی پوسته (بین ٪۹ تا ٪۱۰۰) متناسب با تغییرات موقعیت خورشید، می‌تواند شاخص خیرگی دی جی پی را در اقلیم‌های معتدل و گرم تا ٪۲۹ کاهش دهد و توزیع نور روز اس دی ای و یو دی آی را بهبود بخشد. با این وجود، سیستم بررسی‌شده در پژوهش مذکور همچنان مبتنی بر مکانیزم‌های صلب مکانیکی، صفحات تاشونده سنتی و اتصالات لولایی شبیه‌سازی شده است. این موضوع علاوه بر افزایش پیچیدگی ساختار، امکان تغییر شکل‌های ارگانیک، پیوسته و سازگار با فرم‌های آزاد را سلب می‌کند. این امر، ضرورت تحقیق روی پوسته‌های پاسخگوی نرم را که بدون نیاز به مفاصل صلب، توانایی تغییر شکل پیوسته و انطباق‌پذیر با نور روز را دارند، دوچندان می‌سازد.

بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که علی‌رغم پیشرفت‌های نظری در زمینه‌های اوریگامی، رباتیک نرم، محرک‌های پنوماتیکی و ساخت، خلاء بزرگی در ارائه یک چارچوب جامع برای ارزیابی عملکردی این سامانه‌های نرم وجود دارد. بیشتر

پژوهش‌های حوزه رباتیک نرم به نمونه‌های آزمایشگاهی و مفاهیم مکانیکی محدود مانده و عملکرد نوری آن‌ها در مقیاس معماری سنجیده نشده است؛ در مقابل، مطالعات عملکرد نوری (مانند شبیه‌سازی‌های نماهای متحرک) کماکان بر سیستم‌های صلب و سنتی تمرکز دارند، جدول ۱. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این شکاف، به توسعه و امکان‌سنجی یک نمای پاسخگوی مبتنی بر رباتیک نرم پرداخته و می‌کوشد پیوندی منسجم میان رفتار حرکتی محرک‌های نرم، منطق کنترل سنسورمحور و ارزیابی واکنش به نور روز برقرار سازد.

مواد و روش ها

با توجه به نوظهور بودن کاربرد رباتیک نرم در معماری و به‌ویژه در طراحی پوسته‌های پاسخگو، پژوهش حاضر با رویکردی طراحی‌محور و تجربی انجام شده است. مسئله پژوهش صرفاً ارزیابی یک سامانه فنی موجود نیست، بلکه امکان‌سنجی اولیه به‌کارگیری رباتیک نرم در ایجاد تغییر شکل کنترل‌شده در پوسته معماری و بررسی قابلیت آن برای پاسخ به تغییرات نور است. ازاین‌رو، «پژوهش از طریق طراحی» به‌عنوان چارچوب روش‌شناختی تحقیق انتخاب شد و توسعه مفهومی، نمونه‌سازی فیزیکی و آزمون عملکردی در قالب فرایندی تکرارشونده به یکدیگر پیوند یافتند.

انتخاب این رویکرد با ماهیت اکتشافی پژوهش و ویژگی‌های سامانه مورد مطالعه ارتباط دارد. رفتار نمونه از برهم‌کنش میان هندسه اوریگامی، خواص ماده نرم، فشار پنوماتیک و منطق کنترلی حاصل می‌شود و ارزیابی آن، علاوه بر مطالعات نظری، مستلزم مشاهده مستقیم رفتار فیزیکی ماده و سازوکار تغییر شکل است. بر این اساس، نمونه‌سازی فیزیکی به‌عنوان ابزار اصلی توسعه و ارزیابی طراحی به کار رفت. این انتخاب به معنای نفی ظرفیت روش‌های شبیه‌سازی عددی نیست، بلکه با توجه به هدف پژوهش در مرحله امکان‌سنجی اولیه و ضرورت بررسی رفتار واقعی نمونه صورت گرفته است.

دامنه ارزیابی در این تحقیق بر بررسی قابلیت نمونه برای دریافت محرک نوری، فعال‌سازی سامانه، ایجاد تغییر شکل مکانیکی و اجرای چرخه‌های حرکتی متمرکز است. بنابراین، پژوهش حاضر ارزیابی جامع عملکرد نور روز در مقیاس ساختمان، شامل توزیع مکانی روشنایی، خیرگی، مصرف انرژی یا عملکرد سالانه پوسته را دنبال نمی‌کند. این متغیرها مستلزم توسعه نمونه در مقیاس واقعی و انجام شبیه‌سازی‌ها و آزمون‌های تکمیلی هستند. در مرحله حاضر، پاسخ‌پذیری سنسورمحور، دامنه حرکت، زمان پاسخ و تکرارپذیری چرخه‌های حرکتی به‌عنوان ابعاد اصلی ارزیابی عملکرد سامانه در نظر گرفته شدند.

فرایند تحقیق در دو بخش اصلی سازمان‌دهی شد. بخش نخست شامل مطالعه منابع مرتبط با پوسته‌های پاسخگوی معماری، سازوکارهای حرکتی متداول، محدودیت‌های مکانیزم‌های صلب، مبانی رباتیک نرم و ظرفیت هندسه‌های اوریگامی در هدایت تغییر شکل بود. بر اساس جمع‌بندی این مطالعات، معیارهای اولیه طراحی شامل قابلیت تغییر فرم، کاهش وابستگی به اجزای مکانیکی صلب، وزن پایین، امکان ساخت نمونه، پاسخ‌پذیری به محرک نوری و قابلیت تحریک پنوماتیک استخراج شدند. این معیارها مبنای توسعه نمونه مفهومی قرار گرفتند.

جدول ۱: جدول پیشینه تحقیق

یافته کلیدی و نوآوری	متغیرهای ارزیابی‌شده	رفرنس
تبیین ضرورت گذار از پوسته‌های ایستا به پاسخگو	—	[۱۱]
معرفی سازوکارهای انعطاف‌پذیر به عنوان جایگزین مفاصل صلب	تمرکز تنش، یکپارچگی ساختاری	[۵]
بهبود عملکرد اقلیمی پوسته‌ها با ابزار تحلیل پارامتریک	هندسه صفحات تاشونده، اقلیم	[۱۲]
بررسی پیوند اوریگامی و رباتیک نرم برای کنترل تابش	تابش خورشید	[۱۳]
توسعه محرک پنوماتیکی با قابلیت خمش در چند جهت	دامنه خمش چندصفحه‌ای	[۱۶]
چاپ سه‌بعدی تعبیه‌شده سیلیکون با هد اختلاط فعال	گرادیان سختی، تغییرشکل	[۱۷]
نمونه فیزیکی ۱:۱۵ دیوار نرم با محرک شبکه پنو و کنترل آردوینو	حضور انسان، نور روز، دما	[۱۴]
اثبات کاهش ۲۹ درصدی خیرگی با تغییر تدریجی بازشو پوسته	یو دی آی، اس دی ای، ای اس ایی، دی جی پی	[۱۸]

بخش دوم پژوهش به توسعه تجربی سامانه اختصاص یافت. در این مرحله، یک مدل مفهومی از پوسته پاسخگو بر پایه ترکیب هندسه اوریگامی و محرک نرم طراحی شد. هندسه نمونه، الگوی باز و بسته‌شدن، نحوه انتقال نیرو و ارتباط میان ماده نرم و سازوکار پنوماتیک طی فرایندی تکرارشونده توسعه یافتند. در هر مرحله، نمونه یا جزء آزمایشی ساخته و رفتار آن مشاهده شد و بازخورد حاصل از آزمون برای اصلاح طراحی، اتصالات و منطق عملکرد در مرحله بعد به کار رفت. بدین‌ترتیب، طراحی، ساخت، آزمون و اصلاح نه به‌صورت مراحل کاملاً منفصل، بلکه به‌عنوان یک چرخه پیوسته تولید و ارزیابی دانش طراحی انجام شدند.

پس از ساخت و مونتاژ نمونه، اجزای فیزیکی، حسگری، کنترلی و پنوماتیک سامانه به‌صورت یکپارچه مورد آزمون قرار گرفتند. در نمونه آزمایشگاهی، شدت نور به‌عنوان ورودی محیطی خوانده شد و فرمان فعال‌سازی سامانه بر اساس منطق آستانه‌ای تعریف‌شده به محرک پنوماتیک انتقال یافت. آزمون‌های عملکردی با هدف بررسی برقراری رابطه میان ورودی نوری و پاسخ مکانیکی، نحوه اجرای حرکت باز و بسته‌شدن و امکان تکرار چرخه‌های حرکتی طراحی شدند. داده‌های حاصل از این آزمون‌ها بر اساس شاخص‌های ازپیش‌تعریف‌شده ثبت و برای ارزیابی امکان‌پذیری اولیه سامانه تحلیل شدند.

در مجموع، روش اتخاذشده بستری فراهم کرد تا ظرفیت رباتیک نرم در پوسته‌های پاسخگو از طریق تعامل میان دانش نظری، طراحی هندسی، ساخت فیزیکی و آزمون تجربی بررسی شود. بااین‌حال، نتایج این مرحله باید در محدوده یک نمونه اولیه آزمایشگاهی تفسیر شوند و تعمیم آن‌ها به مقیاس ساختمانی مستلزم ارزیابی‌های تکمیلی در زمینه دوام ماده، شرایط اقلیمی، عملکرد نور روز، ایمنی، نگهداری و کنترل چندماژولی است.

مشخصات سامانه و مواد

سامانه آزمایشگاهی این پژوهش از چهار جزء اصلی تشکیل شد: ماده الاستومری نرم، حسگر نور، برد کنترلر و پمپ هوا. برای بخش نرم و تغییرشکل‌پذیر سامانه، از دو نوع سیلیکون آر تی وی استفاده شد؛ به‌گونه‌ای که آر تی وی با درجه سختی ۱ به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر در بخش اصلی محرک و آر تی وی با درجه سختی ۲ به دلیل سختی نسبی بالاتر در بخش‌های نیازمند پایداری بیشتر به‌کار رفت. این انتخاب با هدف ایجاد تعادل میان قابلیت تغییر شکل و کنترل‌پذیری مکانیکی انجام شد. برای دریافت داده‌های محیطی، سنسور دیجیتال بی اچ ۱۷۵۰ به‌عنوان حسگر شدت روشنایی انتخاب شد که از طریق پروتکل ارتباطی ای تو سی با کنترلر در ارتباط است و امکان اندازه‌گیری مستقیم شدت نور بر حسب لوکس را فراهم می‌کند. پردازش داده‌ها و اجرای فرمان‌های کنترلی توسط برد آردوینو اونو انجام شد. همچنین، برای تأمین فشار لازم جهت فعال‌سازی محرک پنوماتیک، از یک مینی‌پمپ هوا با دبی ۳ لیتر بر دقیقه استفاده شد که متناسب با مقیاس نمونه اولیه و نیاز سامانه برای بادشدن و تخلیه هوا در نظر گرفته شد.

فرآیند طراحی هندسی و ساخت فیزیکی

فرایند طراحی و ساخت نمونه در چند مرحله پیوسته انجام شد. در گام نخست، آلترناتیوهای مختلف پوسته مبتنی بر رباتیک نرم مورد بررسی قرار گرفت و از میان آن‌ها، یک الگوی اوریگامی به‌عنوان گزینه نهایی انتخاب شد و در محیط نرم‌افزار طراحی گردید. در گام دوم، جای‌گذاری و مکانیابی محرک رباتیک نرم در ساختار اوریگامی پوسته تعیین شد تا مسیر حرکت و نحوه انتقال نیرو با منطق هندسی پوسته هم‌راستا شود. در گام سوم، هندسه محرک رباتیک نرم در محیط سه‌بعدی مدل‌سازی شد تا امکان ساخت قالب و ارزیابی ابعاد نهایی فراهم گردد. پس از تکمیل مدل، قالب‌ها با استفاده از فناوری پرینت سه‌بعدی ساخته شدند و سپس فرایند ریخته‌گری سیلیکون در آن‌ها انجام گرفت. برای کنترل جهت حرکت و جلوگیری از تغییرشکل ناخواسته در جهات غیرهدف، یک لایه محدودکننده کرنش مانند یک لایه نازک کاغذ یا پارچه در وجه زیرین محرک تعبیه شد تا نیروی پنوماتیک عمدتاً به خمش یک‌طرفه بازوی رباتیک منجر شود. این راهبرد طراحی باعث شد رفتار مکانیکی محرک با منطق حرکتی پوسته اوریگامی هماهنگ شود و تغییر فرم به‌صورت کنترل‌شده و جهت‌دار رخ دهد.

پروتکل آزمون و ارزیابی عملکرد

پروتکل آزمون به‌منظور ارزیابی عملکرد مکانیکی و کنترلی نمونه طراحی شد و شامل ۵۰ چرخه متوالی باد شدن و تخلیه

باد پوسته مبتنی بر رباتیک نرم، اندازه‌گیری زاویه بازشدگی با تحلیل تصویر، ثبت زمان پاسخ سامانه و ارزیابی دقت سنسور روشنایی بود. در این فرایند، به‌منظور اندازه‌گیری زاویه بازشدگی در شرایط محدود آزمایشگاهی و با هدف حفظ سادگی و دسترس‌پذیری پروتکل، تمامی تصاویر در شرایط ثابت تصویربرداری، با دوربین در موقعیت ثابت و با مقیاس یکسان ثبت شدند. سپس زاویه بازشدگی با ارجاع به محور ثابت پوسته و به‌کمک ابزار اندازه‌گیری زاویه در محیط دیجیتال استخراج شد. هرچند این روش نسبت به سامانه‌های پیشرفته ضبط حرکت دقت کمتری دارد، اما برای ارزیابی تطبیقی عملکرد چرخه‌ای نمونه اولیه و تحلیل روند تغییرات زاویه در چارچوب این پژوهش مناسب تشخیص داده شد. زمان پاسخ نیز به‌عنوان فاصله میان صدور فرمان کنترلی و تکمیل تغییر شکل محرک اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، برای سنجش اعتبار داده‌های ورودی، مقادیر اندازه‌گیری‌شده توسط سنسور بی اچ ۱۷۵۰ با قرائت‌های یک لوکس‌متر مرجع مقایسه شد تا میزان خطای سنسور و ضرورت اعمال ضریب تصحیح مشخص گردد. این مجموعه آزمون‌ها به‌گونه‌ای طراحی شد که امکان ارزیابی هم‌زمان رفتار مکانیکی، قابلیت تکرارپذیری و صحت عملکرد حسگری سامانه فراهم شود.

مبانی نظری و عملیاتی پژوهش

از پوسته‌های پاسخگو تا روباتیک نرم :پوسته‌های پاسخگو به‌عنوان نسل پیشرفته‌ای از سامانه‌های پوششی ساختمان، با قابلیت تطبیق پویا با شرایط محیطی، نقش مهمی در بازتعریف رابطه میان معماری و پایداری ایفا کرده‌اند[۱۹, ۲۰] . در چارچوب معماری معاصر، این پوسته‌ها به‌منزله‌ی واسطه‌ای میان فضای داخلی و محیط بیرونی عمل می‌کنند و با بهره‌گیری از سنسورها، محرک‌ها و الگوریتم‌های پیش‌بینی‌کننده، قادرند به‌صورت فعال به محرک‌هایی نظیر تغییرات تابش خورشیدی، دما و سرعت باد واکنش نشان دهند. عملکرد چنین سامانه‌هایی با کاهش بارهای سرمایشی و گرمایشی همراه است و بدین ترتیب دستیابی به استانداردهای ساختمان‌های کم‌مصرف از نظر انرژی را تسهیل می‌کند. افزون بر این، ایجاد الگوهای متغیر سایه و نور توسط این پوسته‌ها می‌تواند کیفیت تجربه بصری کاربران را نیز ارتقا دهد[۲۱,۹].

یکی از عوامل تعیین‌کننده در عملکرد پوسته‌های ساختمانی و ویژگی‌های فنی آن‌ها، نحوه‌ی حرکت و الگوی واکنش پوسته در برابر محرک‌های محیطی است. در ادبیات پژوهشی، مطالعات متعددی به طبقه‌بندی انواع حرکت در پوسته‌های پاسخگو پرداخته‌اند که هر یک چارچوب‌های دسته‌بندی متفاوتی ارائه کرده‌اند.[۲۲-۲۵] با این حال، به‌طور کلی می‌توان الگوهای حرکتی را در سه گروه اصلی خلاصه کرد:

• حرکت انتقالی: در این نوع، پوسته یا اجزای تشکیل‌دهنده آن در امتداد یک یا چند مسیر خطی از پیش تعریف‌شده جابه‌جا می‌شوند.

• حرکت چرخشی: این الگو شامل دوران کل پوسته یا بخشی از آن حول یک محور مشخص، اعم از افقی یا عمودی، است.

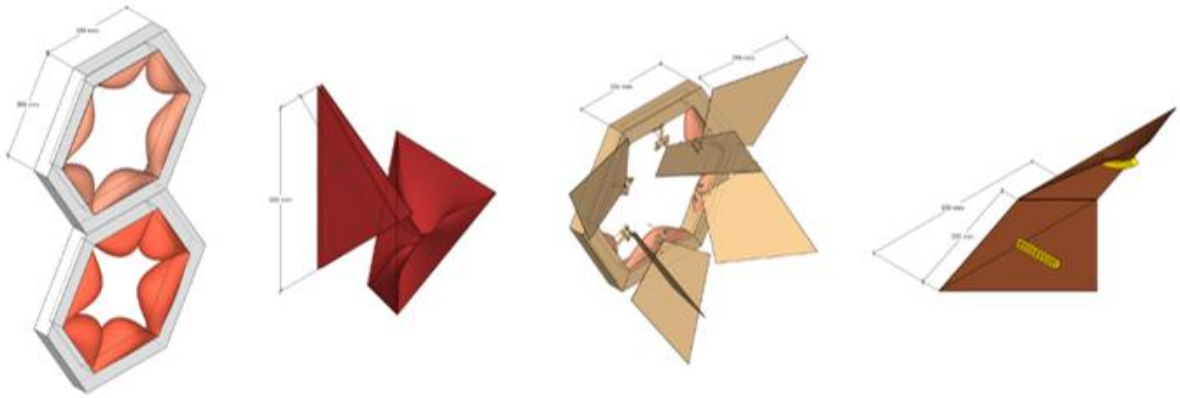
• تغییر شکل: در این رویکرد، بدون آنکه موقعیت کلی پوسته جابه‌جا شود، پاسخ به محرک‌های محیطی از طریق تغییر در هندسه ذاتی ساختار صورت می‌گیرد. این دگرگونی‌های هندسی می‌توانند فرآیندهایی همچون تاشوندگی، خمش یا انبساط حجمی را دربر گیرند.

بررسی ادبیات اخیر نشان می‌دهد که جهت‌گیری پژوهش‌ها به‌سوی توسعه سامانه‌های هیبریدی معطوف شده است؛ سامانه‌هایی که در آن‌ها مکانیزم‌های مکانیکی با مواد هوشمند ترکیب می‌شوند تا عملکرد تطبیق‌پذیرتری ایجاد شود [۹,۶]. با وجود مزایای بالقوه، گسترش گسترده پوسته‌های پاسخگو در عمل با چالش‌هایی مواجه است. از جمله این موانع می‌توان به هزینه‌های بالای نگهداری، پیچیدگی‌های فنی در فرآیند یکپارچه‌سازی سامانه‌ها و محدودیت‌های ناشی از مقررات ساختمانی اشاره کرد [۱۰]. که همگی در محدود شدن کاربرد این فناوری‌ها نقش داشته‌اند [۷]. در پاسخ به چنین محدودیت‌هایی، رویکردهای نوینی نظیر رباتیک نرم مطرح شده‌اند. این رویکرد با اتکا به مواد انعطاف‌پذیر و قابلیت تغییرشکل، امکان ایجاد حرکات پیوسته، ایمن و سازگار با محیط را فراهم می‌آورد. در این میان، ربات‌های نرم پنوماتیک به دلیل وزن کم، سادگی نسبی ساختار، قابلیت سازگاری بالا و زمان پاسخ مناسب، ظرفیت قابل‌توجهی برای به‌کارگیری در سامانه‌های معماری تطبیق‌پذیر دارند. این ویژگی‌ها زمینه‌ای برای بازنگری در منطق حرکتی پوسته‌های پاسخگو فراهم می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که تحقق حرکت نه از طریق دوران یا

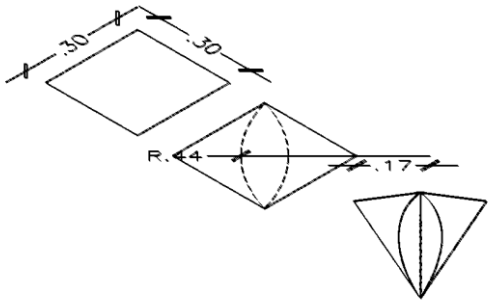
جابه‌جایی اجزای صلب، بلکه از طریق تغییر فرم یکپارچه ساختار امکان‌پذیر شود [۲۶].

انواع روش کنترل در رباتیک نرم :رباتیک نرم به دلیل برخورداری از ماهیتی انعطاف‌پذیر و سازگار با تغییرات محیطی، به راهبردهای کنترلی متفاوتی نسبت به روبات‌های سخت متداول نیاز دارد. در این سامانه‌ها، کنترل عملکرد عموماً از طریق تغییر در ویژگی‌های فیزیکی مواد فعال‌شونده یا شرایط محیطی مؤثر بر آن‌ها صورت می‌گیرد. به‌طور کلی، سه رویکرد اصلی برای تحریک و کنترل حرکت در رباتیک نرم قابل شناسایی است: بهره‌گیری از میدان الکتریکی، اعمال حرارت و استفاده از فشار سیال. در رویکرد نخست، از قابلیت مواد الکترواکتیو یا دی‌الکتریک برای ایجاد تغییر شکل در پاسخ به میدان الکتریکی استفاده می‌شود. رویکرد دوم بر تغییرات دمایی استوار است و در آن موادی نظیر آلیاژهای حافظه‌دار یا ژل‌های حرارتی به کار گرفته می‌شوند تا در اثر افزایش یا کاهش دما تغییر شکل دهند. در رویکرد سوم، فرایند تحریک از طریق اعمال یا تخلیه فشار سیال ــ معمولاً هوا یا مایع ــ انجام می‌شود که در بسیاری از سامانه‌های رباتیک نرم کاربرد گسترده‌ای دارد. با توجه به مزایای این شیوه، از جمله سادگی در اجرا، سرعت پاسخ‌گویی مناسب و امکان دستیابی به کنترل دقیق، در این پژوهش تمرکز بر کنترل رباتیک نرم مبتنی بر فشار سیال قرار گرفته است [۲۷،۲۸]. مهمترین نکته در تایید نتایج، هماهنگی آن با ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش [۲۹-۵۶] است. در میان الگوهای حرکتی مطرح‌شده، رویکرد مبتنی بر تغییر شکل به دلیل توانایی در ایجاد پاسخ‌های پیوسته، کاهش وابستگی به اتصالات و سازوکارهای صلب، و همچنین سازگاری بیشتر با سامانه‌های انعطاف‌پذیر نظیر رباتیک نرم، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای توسعه پوسته‌های پاسخگو شناخته می‌شود. بر این اساس، فرآیند طراحی مفهومی با تمرکز بر منطق حرکتی مبتنی بر تغییر فرم آغاز گردید و در این چارچوب ۵ آلترناتیو طراحی شد که با محرک رباتیک نرم ادغام شده‌اند، شکل ۱. در میان گزینه‌های توسعه‌یافته، ساختارهای اوریگامی به دلیل ظرفیت هندسی بالا در ایجاد الگوهای متنوع تغییر شکل، به‌عنوان بستری مناسب برای تبیین و سازمان‌دهی منطق حرکتی پوسته انتخاب شدند. از این رو، ادامه پژوهش با شناسایی، تحلیل و استخراج الگوهای حرکتی سازگار با هندسه‌های اوریگامی دنبال شد و طراحی نهایی پوسته نیز بر پایه این الگوها شکل گرفت.

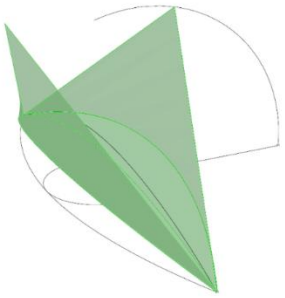
بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌های ارزیابی ترکیبی شامل سادگی در طراحی و ساخت، تعداد و میزان پیچیدگی اجزای مدولار، کیفیت بیان فرمی، کارایی حرکتی و امکان‌سنجی اجرایی، تمامی آلترناتیوهای توسعه‌یافته در یک چارچوب تحلیلی مقایسه شدند. نتایج این ارزیابی نشان داد که الگوی مبتنی بر اوریگامی با هندسه پایه مربع-شکل ۲- مناسب‌ترین گزینه برای ادامه توسعه است. در این الگو، با تعریف دو خط تای منحنی به فرم بیضی بر روی یکی از قطرهای مربع و تا کردن آن‌ها به سمت داخل، سازوکار تغییر شکل پوسته شکل می‌گیرد. با این منطق فرمی، طراحی در نرم‌افزار راینو و افزونه گرسهاپر انجام شده تا رویکردی پارامتریک بودن این فرم بررسی شود، شکل ۳ و ۴.



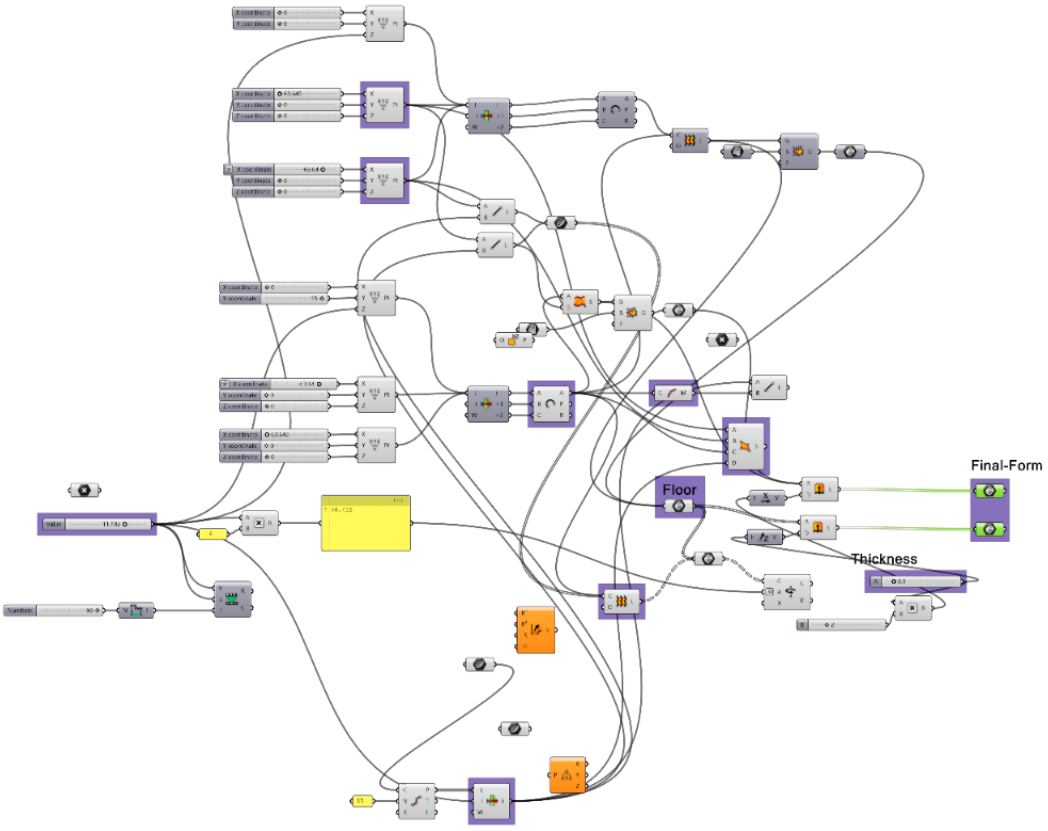
شکل ۱: طراحی مفهومی پوسته‌های مبتنی بر رباتیک نرم



شکل ۲: نحوه ایجاد پوسته با الهام از اوریگامی با استفاده یک هندسه مربع.



شکل ۳: پوسته با الهام از اوریگامی در نرم‌افزار راینو

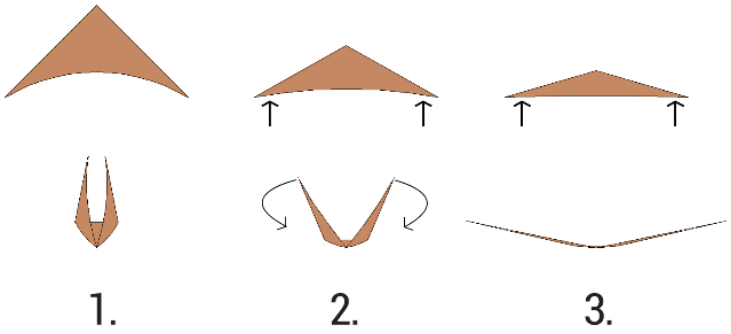


شکل ۴: منطق محاسباتی ایجاد پوسته با الهام از اوریگامی در افزونه گرس‌هاپر در نرم‌افزار راینو

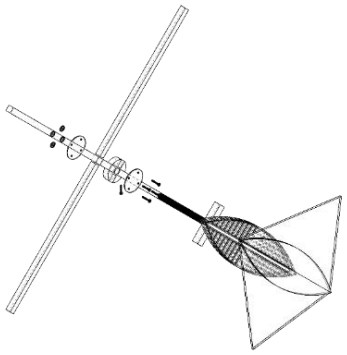
با انتخاب این هندسه، چالش اصلی پژوهش در مرحله بعدی به طراحی و جانمایی محرک رباتیک نرم برای تأمین نیروی لازم جهت کنترل الگوی اوریگامی مربوط شد، شکل ۵. از آنجا که تغییر فرم پوسته در امتداد خطوط تای منحنی رخ می‌دهد، به‌منظور هم‌راستاسازی رفتار مکانیکی محرک با منطق هندسی پوسته، محرک سیلیکونی نیز با تبعیت از مسیر منحنی ایجادشده در ساختار اوریگامی طراحی شد. این کار باعث می‌شود نیروی تولیدشده توسط محرک در امتداد ناحیه فعال پوسته به‌طور یکنواخت توزیع شود و از تمرکز تنش در یک نقطه محدود جلوگیری گردد. در نتیجه، اعمال بار در سطح وسیع‌تری منتشر می‌شود؛ موضوعی که علاوه بر کاهش احتمال خرابی و افزایش دوام سامانه، هماهنگی عملکردی میان محرک رباتیک نرم و منطق حرکتی پوسته اوریگامی را نیز تقویت می‌کند.

در شکل ۶، فرم نهایی پوسته الهام‌گرفته از اوریگامی مبتنی بر رباتیک نرم ارائه شده است. با توجه به ضرورت اتصال ماژول‌ها به بدنه ساختمان، پیش‌بینی یک سازه نگهدارنده متناسب با هندسه و منطق حرکتی پوسته امری ضروری بود. از آنجا که عملکرد این سامانه بر تغییر شکل آزادانه بازوی رباتیک نرم و جابه‌جایی کنترل‌شده پوسته برای ایجاد سایه‌اندازی متکی است، محل استقرار عضو نگهدارنده باید به‌گونه‌ای تعیین می‌شد که کمترین تداخل را با مسیر حرکت اجزای متحرک ایجاد کند. بر این اساس، عضو نگهدارنده در بخش مرکزی پوسته و بازوی رباتیک جانمایی شد؛ زیرا این موقعیت، ضمن تأمین پایداری اتصال به سازه، اثر قیود سازه‌ای بر دامنه حرکت پوسته را به حداقل می‌رساند و نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به عملکرد مطلوب دارد.

الگوی قرارگیری ماژول‌ها بر روی بدنه نما، صرفاً بر مبنای تکرار هندسی تعریف نشده، بلکه با در نظر گرفتن هم‌زمان الزامات عملکردی، حرکتی و سازه‌ای شکل گرفته است. همان‌گونه که در الگوی جانمایی در شکل ۷ مشاهده می‌شود، استقرار ماژول‌ها بر روی یک شبکه منظم، امکان توزیع کنترل‌شده واحدهای تاشونده را در سطح نما فراهم می‌سازد و بستر لازم برای تعمیم سامانه از مقیاس ماژول منفرد به مقیاس پوسته معماری را ایجاد می‌کند. این آرایش، علاوه بر حفظ نظم فضایی، باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که دامنه حرکت هر ماژول با واحدهای مجاور دچار تداخل نشود و هر واحد بتواند تغییر شکل خود را به‌صورت مستقل یا نیمه‌مستقل انجام دهد. از سوی دیگر، تراکم، فاصله‌گذاری و جهت‌گیری ماژول‌ها در این الگو مستقیماً بر کیفیت سایه‌اندازی، میزان نفوذ نور و یکنواختی پاسخ نما به شرایط محیطی اثر می‌گذارد. بنابراین، الگوی استقرار ماژول‌ها را می‌توان بخشی از منطق عملکردی پوسته دانست؛ منطقی که در آن هندسه، حرکت و سازه به‌صورت هم‌زمان در خدمت شکل‌گیری یک نمای پاسخگو قرار گرفته‌اند.



شکل ۵: تغییر فرم پوسته اوریگامی با اعمال حداقل نیرو و باز و بسته شدن آن.



شکل ۶: دیاگرام انفجاری از یک مازول پوسته

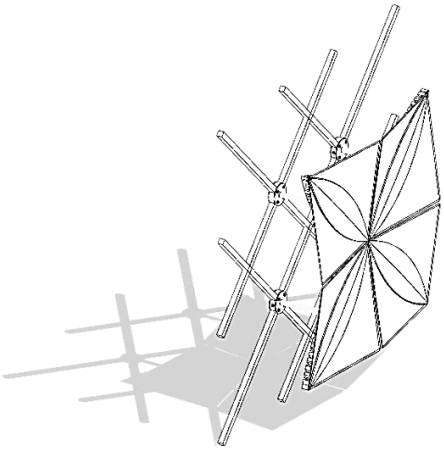
طراحی و ساخت قالب اولیه محرک رباتیک نرم :طراحی قالب با نرم‌افزار: در این مرحله، جانمایی بازوی رباتیک نرم در پوسته تعیین شد و هندسه آن با تبعیت از فرم بیضی‌شکل پوسته، به‌صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار اسکچاپ مدل‌سازی شد. بر پایه این مدل‌سازی، مطابق شکل ۸، دو نمونه قالب مجزا طراحی شد تا امکان مقایسه و ارزیابی کیفیت هر یک فراهم شود. نمونه حاصل از فرایند ریخته‌گری سیلیکون، یک محرک رباتیک نرم است که در شکل ۹ ارائه شده است. این محرک از یک کانال هوای مرکزی برای انتقال سیال عامل ــ هوا ــ به مجموعه‌ای از حفره‌های هوای جانبی تشکیل شده است. این حفره‌ها با آرایشی منظم و در انطباق با هندسه سایه‌انداز طراحی شده‌اند تا توزیع فشار در امتداد محرک به‌صورت متعادل‌تری صورت گیرد.

منطق حرکتی بازوی رباتیک نرم، به‌عنوان مبنای طراحی محرک، باید پیش از مرحله ساخت به‌صورت دقیق تعریف شود؛ به این معنا که جهت حرکت، هدف عملکردی و الگوی تغییر شکل مورد انتظار به‌روشنی مشخص باشند. در نتیجه، پیکربندی هندسی محرک، نحوه جانمایی مخازن هوا و توزیع ضخامت در لایه‌های مختلف، همگی باید در راستای تحقق این منطق حرکتی تنظیم شوند.

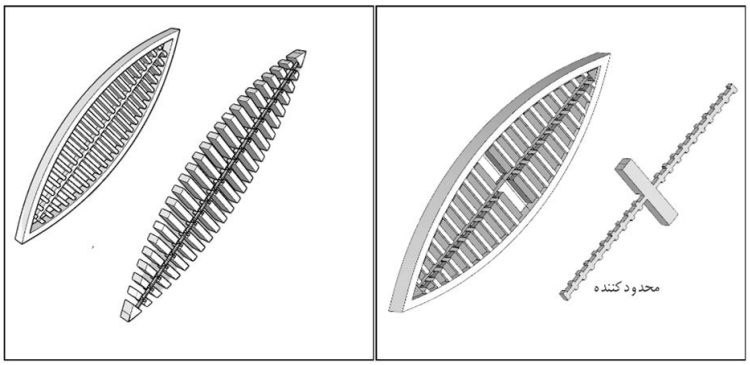
بر این اساس، طراحی محرک باید متناسب با این الزامات حرکتی و عملکردی انجام پذیرد. در طراحی حاضر، هوای تولیدشده توسط پمپ از طریق لوله ورودی به کانال هوای اصلی منتقل می‌شود و سپس از راه روزنه‌های تعبیه‌شده در بدنه بازو، به مجموعه‌ای از مخازن هوا که با فواصل منظم در امتداد بازو قرار گرفته‌اند، توزیع می‌گردد (شکل۱۰) با ورود هوا، این مخازن به‌تدریج منبسط شده و فرایند تغییر شکل بازو آغاز می‌شود. با ادامه افزایش حجم، فاصله میان مخازن کاهش یافته و برهم‌کنش مکانیکی میان آن‌ها شکل می‌گیرد؛ برهم‌کنشی که در نهایت به ایجاد نیروی لازم برای حرکت و تغییر فرم بازوی رباتیک منجر می‌شود.

بر همین اساس، در طراحی بازوی رباتیک نرم از ضخامت‌های متفاوت در بخش‌های مختلف استفاده شد تا الگوی بادشدگی به‌صورت هدفمند کنترل شود. به‌طور مشخص، ضخامت لایه‌های مجاور مخازن هوا در مقایسه با سایر نواحی کمتر و در حدود ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد _شکل ۱۱_ تا این بخش‌ها مقاومت کمتری در برابر فشار داخلی داشته باشند و در نتیجه، بادشدگی ابتدا و با سرعت بیشتری در این نواحی رخ دهد. این راهبرد طراحی به هدایت بهتر تغییر شکل و بهبود عملکرد حرکتی بازو کمک می‌کند.

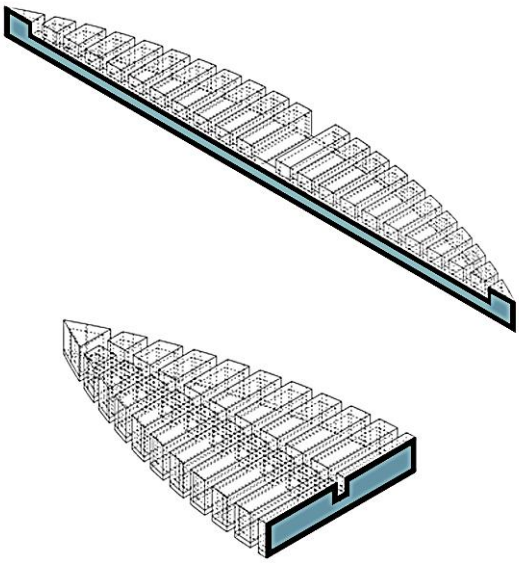
علاوه بر تعیین ابعاد هندسی و تنظیم ضخامت جداره‌ها، یکی دیگر از عوامل مؤثر در هدایت منطق حرکتی بازوی رباتیک نرم، استفاده از لایه محدودکننده کرنش در بخش زیرین بازو است (شکل۱۲). این لایه که می‌تواند از موادی مانند کاغذ یا پارچه تشکیل شود، با ایجاد مقاومت بیشتر در برابر تغییر طول در یک سمت محرک، مانع از انبساط یکنواخت در تمام جهات می‌شود. در نتیجه، هنگام تزریق هوا، تغییر شکل بازو به‌صورت جهت‌دار رخ داده و خمش در مسیر مطلوب هدایت می‌شود. به بیان دیگر، لایه محدودکننده کرنش نقش تعیین‌کننده‌ای در تبدیل فشار داخلی به حرکت کنترل‌شده و هدفمند ایفا می‌کند و در کنار هندسه، ضخامت و آرایش مخازن هوا، از عوامل اصلی شکل‌دهنده به رفتار حرکتی محرک به شمار می‌آید.



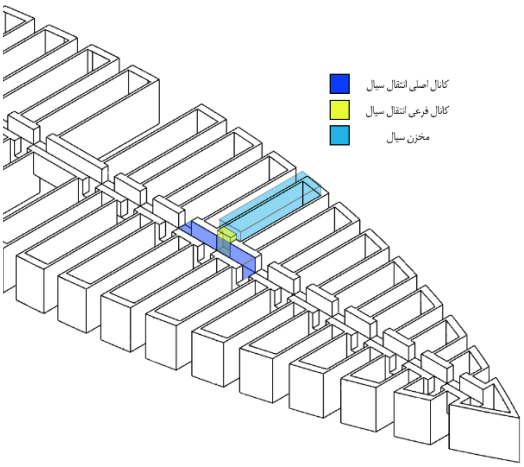
شکل ۷: الگوی قراگیری ماژولهای پوسته پاسخگو مبتنی بر رباتیک نرم در نما به همراه سازه پشتیبانی



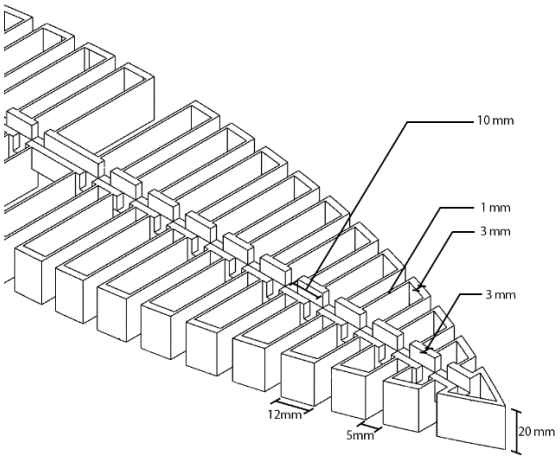
شکل ۸: طراحی دو قالب مختلف بازوی رباتیک نرم در نرم‌افزار اسکچاپ، قالب اول دو بخشی و قالب دوم یک بخشی.



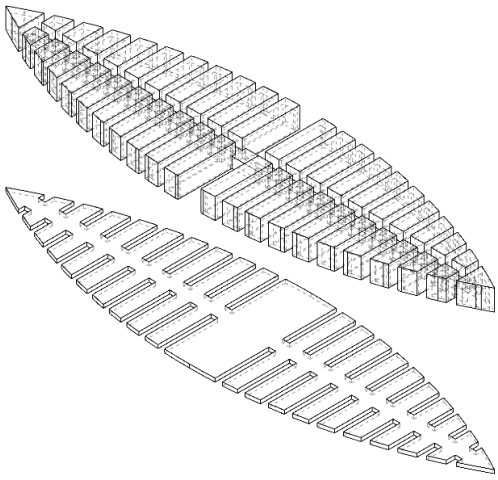
شکل ۹: محصول مورد انتظار پس از ریخته‌گری سیلیکون. شکل بالا: کانال اصلی توزیع هوا در محرک رباتیک نرم
شکل پایین: مخازن هوای دوتایی محرک رباتیک نرم برای ایجاد نیرو در پوسته



شکل ۱۰: نحوه طراحی کانال‌های ارتباطی و مخازن هوا و ارتباط این دو با هم



شکل ۱۱: ابعاد و ضخامت جداره‌ها و فاصله بین هر مخزن هوا از هم در ماژول رباتیک نرم



شکل ۱۲: دیاگرام انفجاری از بازوی رباتیک نرم، بخش اصلی بازو و بخش زیرین با ترکیب محدودکننده کرنش

ساخت قالب با پرینتر سه‌بعدی: به‌منظور دستیابی به دقت ابعادی مطلوب، پس از بررسی روش‌های مختلف ساخت، فناوری چاپ سه‌بعدی (شکل ۱۳) برای تولید قالب انتخاب شد و فرآیند ساخت آغاز گردید. در این مرحله، از دو نوع فیلامنت ای بی اس و پی ال ای برای ساخت قالب‌ها استفاده شد تا کیفیت ساخت و عملکرد قالب‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد (شکل۱۴).

ریخته‌گری سیلیکون: پس از آماده‌سازی قالب‌های پوسته، فرآیند ریخته‌گری با استفاده از سیلیکون آر تی وی ۲ برای بخش زیرین بازوی رباتیک ـ که نیازمند سختی و انعطاف‌پذیری کمتر است یک لایه محدود کننده کرنش مانند کاغذ یا پارچه به سلیکون اضافه می‌شود ـ و سیلیکون آر تی وی ۱ برای بخش اصلی بازو ـ که به انعطاف‌پذیری بیشتری نیاز دارد ـ انجام شد(شکل ۱۵). به‌منظور عمل‌آوری مناسب سیلیکون، نسبت‌های مختلف هاردنر شامل ۱۵ درصد، ۲۰ درصد، ۲۵ درصد و ۳۰ درصد مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که در دمای محیطی ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد، نسبت اختلاط مناسب هاردنر برای آر تی وی ۱ برابر با ۱۵ درصد و برای آر تی وی ۲ معادل ۲۰ درصد است.

سیستم کنترل و منطق بازخورد: به‌منظور فراهم‌سازی قابلیت واکنش پوسته به تغییرات شرایط محیطی نظیر شدت نور، دما و سایر پارامترهای اقلیمی، بهره‌گیری از یک بستر سخت‌افزاری قابل برنامه‌ریزی ضروری است. در این پژوهش، برای دریافت و پردازش داده‌های محیطی و همچنین کنترل اجزای مکانیکی پوسته، از بُرد آردوینو او نو استفاده شده است. این بُرد به دلیل ساختار ماژولار، هزینه مناسب، سهولت راه‌اندازی و دسترسی گسترده به کتابخانه‌های آنلاین، گزینه‌ای کارآمد برای پژوهش‌های مرتبط با معماری واکنش‌گرا محسوب می‌شود. برنامه‌نویسی و بارگذاری کدهای کنترلی از طریق نرم‌افزار آردوینو آی دی ای انجام گرفته است که محیطی ساده و در عین حال توانمند برای ایجاد ارتباط میان سخت‌افزار و نرم‌افزار فراهم میکند. برای تأمین نیروی لازم جهت فعال‌سازی محرک‌های پنوماتیکی مورد استفاده در طراحی پوسته، از پمپ تولیدکننده هوای فشرده بهره گرفته شده است. ظرفیت پمپاژ این سامانه برابر با ۳ لیتر در دقیقه است که این دبی حجمی برای ایجاد فشار کافی به‌منظور بادکردن محرک‌های نرم در نمونه‌های مقیاس کوچک طراحی‌شده کفایت دارد و امکان کنترل فرآیند باز و بسته‌شدن پوسته را فراهم می‌سازد. انتخاب پمپ با توجه به پارامترهایی نظیر نیاز حجمی، فشار کاری محرک‌ها، میزان صدای تولیدی و ابعاد فیزیکی متناسب با کاربرد نهایی صورت گرفته است؛ این معیارها در مراحل توسعه آتی می‌توانند مورد بهینه‌سازی بیشتر قرار گیرند. در این پروژه، برای اندازه‌گیری شدت نور محیطی از سنسور دیجیتال بی اچ ۱۷۵۰ استفاده شده است. این سنسور قادر است شدت روشنایی را با دقت بالا و در واحد لوکس اندازه‌گیری کند و از طریق پروتکل ارتباطی آی ۲ سی به آردوینو متصل می‌شود. ویژگی‌هایی همچون مصرف انرژی پایین، سرعت پاسخ‌گویی مناسب و سهولت راه‌اندازی، در کنار اندازه‌گیری مستقیم شدت نور بر حسب لوکس، این سنسور را به گزینه‌ای مناسب برای کنترل نور در پوسته‌های معماری واکنش‌گرا تبدیل کرده است (شکل۱۶).

شکل ۱۳: قالب حال ساخت با پرینتر سه بعدی





شکل ۱۴: قالب‌های ساخته شده با پرینتر سه بعدی از چپ به راست با متریال ای بی اس و پی ال ای.



شکل ۱۵: محرک‌های ساخته شده با سیلیکون



شکل ۱۶: از چپ به راست برد آردوینو او نو، پمپ هوا، سنسور بی اچ ۱۷۵۰.

به‌طور کلی، ساخت نمونه پوسته پاسخگو با الهام از هندسه اوریگامی و مبتنی بر فناوری رباتیک نرم، فرایندی چندبخشی است که به استفاده از ابزارها، تجهیزات و اجزای متنوع نیاز دارد (جدول۲). این اجزا را می‌توان در سه دسته اصلی تفکیک کرد: دسته نخست شامل ابزارها و مصالح لازم برای ساخت محرک یا بازوی رباتیک نرم، دسته دوم شامل تجهیزات مرتبط با سامانه کنترل، تأمین و هدایت عملکرد محرک، و دسته سوم شامل بخش سایه‌انداز یا پوسته‌ای است که نقش تنظیم و تعدیل عوامل اقلیمی را ایفا می‌کند.

یافته‌ها

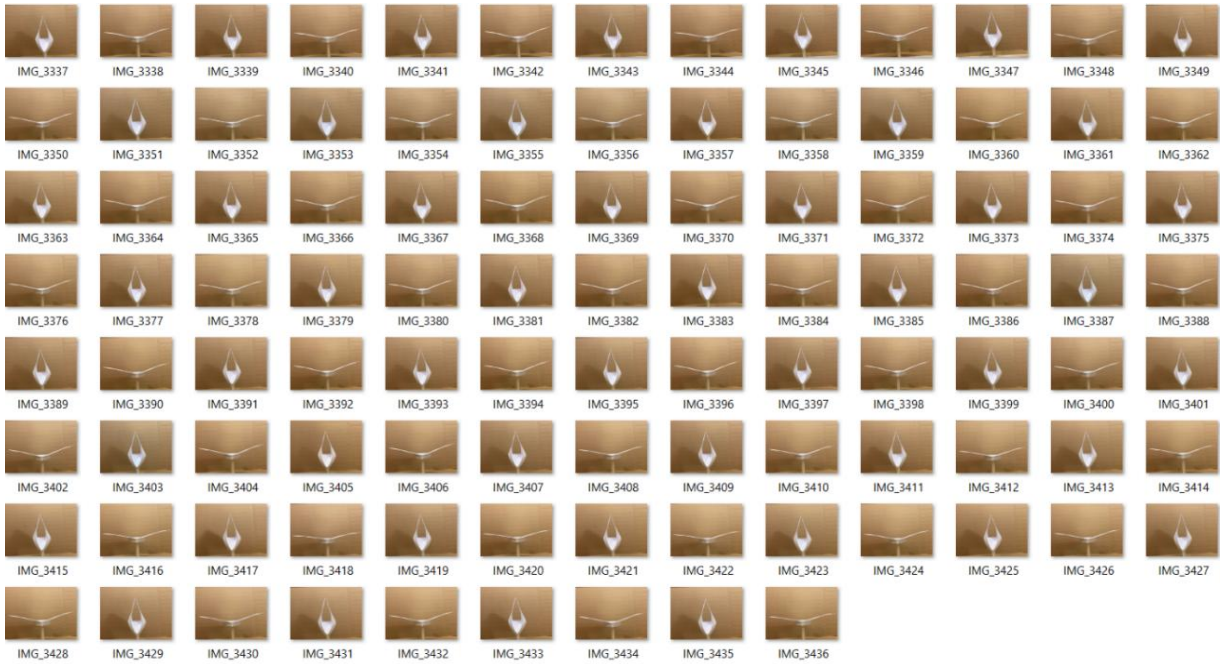
تحلیل مکانیزم : به‌منظور ارزیابی عملکرد پوسته اوریگامی مبتنی بر رباتیک نرم، بررسی پارامترهای مکانیکی آن در شرایط آزمایشگاهی ضروری است. این تحلیل با هدف سنجش دامنه زاویه‌های حرکتی، زمان چرخه عملکرد، میزان تکرارپذیری و دوام مکانیزم انجام شد. افزون بر این، شاخص‌های کلیدی شامل وزن پوسته، تعداد اجزای تشکیل‌دهنده در کنار داده‌های حاصل از آزمون‌های تکرارشونده به‌صورت نظام‌مند در جدول ۳ ثبت و مقایسه شدند. شواهد حاصل از ۵۰ تکرار متوالی باز و بسته‌شدن (شکل۱۷) نشان می‌دهد که طراحی محرک و جانمایی متقارن کانال‌ها و مخازن هوا، در انطباق با هندسه بیضوی پوسته، زمینه ایجاد حرکتی نسبتاً یکنواخت و هماهنگ با منطق فرمی الگوی اوریگامی را فراهم کرده است (شکل ۱۸) آرایش کانال‌ها و حفره‌های هوا در محرک نیز به‌گونه‌ای بود که در جریان آزمون، توزیع متعادل‌تر فشار و در پی آن، تغییر شکل نسبتاً متقارن بازوی رباتیک نرم حاصل شود. با این حال، دامنه حرکت پوسته با درجاتی از تغییرپذیری همراه بود و میانگین زاویه بازشدگی آن ۱۵۱ درجه ثبت شد. این مقدار نشان می‌دهد که سامانه، با وجود فاصله از زاویه ایده‌آل بازشدگی کامل، در مقیاس نمونه اولیه توانسته است به بخش قابل‌توجهی از دامنه حرکتی مورد انتظار دست یابد. اهمیت این یافته در آن است که این تغییر شکل بدون استفاده از مفاصل صلب، چرخ‌دنده‌ها یا موتورهای الکتریکی متداول و صرفاً از طریق برهم‌کنش میان رفتار ماده نرم سیلیکونی و هندسه اوریگامی حاصل شده است. از این رو، می‌توان گفت منطق طراحی محرک و نحوه اتصال آن به پوسته در ایجاد حرکت باز و بسته‌شدن سامانه مؤثر بوده است. در پوسته‌های پاسخگو، افزایش دامنه بازشدگی می‌تواند ظرفیت سامانه را برای تنظیم نور ورودی، کنترل خیرگی و ایجاد وضعیت‌های متنوع سایه‌اندازی افزایش دهد. از این منظر، دستیابی به زاویه‌ای بیش از ۱۵۰ درجه در یک نمونه اولیه نرم را می‌توان نشانه‌ای از ظرفیت حرکتی مناسب سامانه برای کاربردهای معماری پاسخگو دانست.

جدول ۲: ابزارها و تجهیزات مورد استفاده در سیستم پوسته پاسخگو مبتنی بر رباتیک نرم

ردیف	تجهیزات
۱.	سیلیکون آر تی وی۱ و آر تی وی ۲
۲.	پرینتر سه بعدی
۳.	فیلامنت ای بی اس
٤.	فیلامنت پی ال ای
۵.	برد آردوینو اونو اس ام دی
۶.	ماژول سنجش شدت نور بی اچ ۱۷۵۰
۷.	سیم جامپر
۸.	برد بورد مینی
۹.	دیود هرزگرد ۱ان۴۰۰۷
۱۰.	مقاومت ۱۰ کیلو اهم
۱۱.	ترانزیستور تی آی پی۱۲۰
۱۲.	منبع تغذیه ۱۲ ولت
۱۳.	پمپ هوا مینی ۱۲ ولت
۱٤.	کابل پرینتری
۱۵.	پوسته مقوایی به ابعاد ۳۰ در ۳۰
۱۶.	پایه نگهدارنده چوبی
۱۷.	لوله انتقال هوا

جدول ۳: جدول داده‌های عملکرد پوسته پاسخگو مبتنی بر رباتیک نرم

شاخص ارزیابی	زوایه بازشدن	زوایه بسته شدن	زمان چرخه عملکرد	تکرارپذیری	دوام	میزان خطا	وزن پوسته	تعداد اجزا
واحد اندازه‌گیری	درجه	درجه	ثانیه	درصد	۵۰ چرخه	درصد	گرم	-
مقدار ثبت شده	۱۵۱	۰	۱۶	۰.۶۵	۵۰	۱۶.۱۱	۳۰۰	۷ عضو
توضیحات	میانگین زوایه بازشوندگی در ۵۰ چرخه باز شدن	میانگین زوایه بازشوندگی در ۵۰ چرخه بسته شدن	چرخه کامل و باز و بسته شدن	حاصل اختلاف زاویه میانگین چرخه کامل نسبت به اولین چرخه	تعداد چرخه قابل اجرا بدون خرابی قابل مشاهده	اختلاف بین زوایه میانگین با ایده آل ۱۸۰ درجه	-	-



شکل ۱۷: پنجاه دوره به ثبت رسیده باز و بسته شدن پوسته مبتنی بر رباتیک نرم



شکل ۱۸: نمونه اولیه پوسته پاسخگو مبتنی بر روباتیک نرم با الهام از الگو اوریگامی در حالت کاملا باز و در حالت کاملا بسته

با این حال، اختلاف میانگین زاویه ثبت‌شده، یعنی ۱۵۱ درجه، با زاویه ایده‌آل بازشدگی کامل، و همچنین تغییرات زاویه در بازه ۱۴۶ تا ۱۶۰ درجه طی ۵۰ چرخه باز و بسته‌شدن (نمودار۱) نشان می‌دهد که پاسخ حرکتی سامانه کاملاً ثابت نبوده است. این تغییرپذیری را می‌توان در چارچوب ویژگی‌های سامانه و شرایط آزمون تفسیر کرد. از آنجا که حرکت حاصل از تعامل میان هندسه تاشونده پوسته و محرک پنوماتیک نرم است، پاسخ سامانه، برخلاف سامانه‌های صلب، به یک مفصل یا مسیر حرکتی کاملاً تثبیت‌شده محدود نمی‌شود. همچنین، هرچند تقارن کانال‌ها و مخازن هوا به ایجاد حرکت کلی هماهنگ کمک کرده است، این تقارن الزاماً به تثبیت کامل زاویه نهایی در همه چرخه‌ها منجر نمی‌شود. افزون بر این، اندازه‌گیری زاویه در این پژوهش مبتنی بر خوانش تصویری و تحلیل دستی بوده است؛ بنابراین بخشی از اختلاف مشاهده‌شده می‌تواند به محدودیت دقت این روش نیز مربوط باشد. بر این اساس، تغییرپذیری زاویه بازشدگی را باید حاصل مجموعه‌ای از عوامل، شامل ماهیت نرم محرک، هندسه تاشونده پوسته و روش اندازه‌گیری، دانست، نه صرفاً یک نقص موضعی در عملکرد نمونه.

در ارزیابی زمانی، چرخه ۱۶ ثانیه‌ای سامانه باید متناسب با ماهیت عملکردی پوسته‌های پاسخگو به نور روز تفسیر شود. برخلاف بسیاری از سامانه‌های صنعتی که به پاسخ‌های بسیار سریع نیاز دارند، پوسته‌های معماری عمدتاً با تغییرات تدریجی تابش خورشید، زاویه تابش و شرایط روشنایی مواجه‌اند. از این رو، زمان ۱۶ ثانیه را می‌توان برای نمایش امکان‌پذیری عملکرد سامانه در مقیاس نمونه اولیه قابل قبول دانست. با این حال، در کاربردهایی که به واکنش سریع‌تر در برابر شرایط گذرا نیاز دارند، این زمان می‌تواند یک محدودیت محسوب شود. این یافته نشان می‌دهد که در طراحی پوسته‌های پاسخگو، صرف دستیابی به حرکت کافی نیست، بلکه باید میان سرعت پاسخ، دامنه تغییر شکل و پایداری فرمی تعادل برقرار شود. همچنین انتظار می‌رود با بهینه‌سازی دبی دمنده، تنظیم قطر لوله‌های انتقال و بازطراحی هندسه کانال‌های داخلی محرک، زمان پاسخ سامانه کاهش یابد.

در مجموع، اجرای ۵۰ چرخه متوالی باز و بسته‌شدن بدون مشاهده گسیختگی آشکار یا تغییر شکل ماندگار محسوس، بیانگر پایداری اولیه سامانه در مقیاس آزمایشگاهی است. با این حال، با توجه به تغییرات مشاهده‌شده در زاویه بازشدگی و محدودیت‌های روش اندازه‌گیری، این نتایج بیش از آنکه مؤید دوام بلندمدت سامانه باشند، شواهدی از امکان‌پذیری عملکرد و قابلیت کارکرد اولیه آن فراهم می‌کنند.

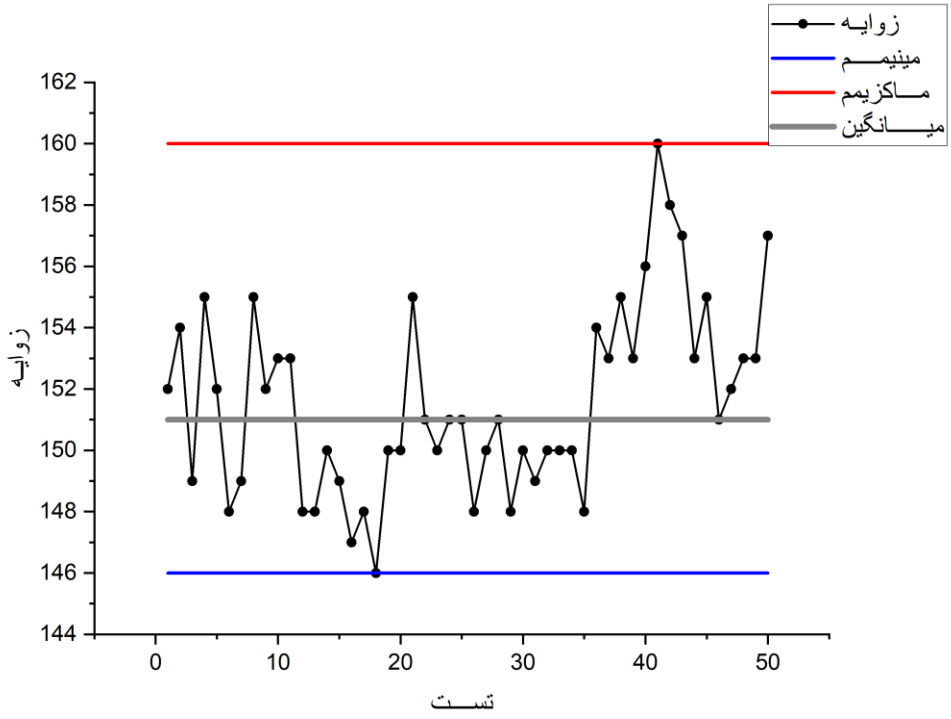
وزن پوسته به تنهایی برابر با ۳۰۰ گرم و تعداد اجزا و کل قطعات به‌کاررفته در آن ۷ قطعه است که این ویژگی‌ها موجب سهولت در حمل، مونتاژ و همچنین کاهش احتمال بروز خرابی می‌شود. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم طراحی‌شده، با وجود برخی محدودیت‌ها در دستیابی به زاویه بازشدگی کامل و سرعت چرخه عملکرد، از نظر تکرارپذیری، دوام، وزن عملکرد قابل قبولی دارد و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای توسعه‌های آتی مورد استفاده قرار گیرد.

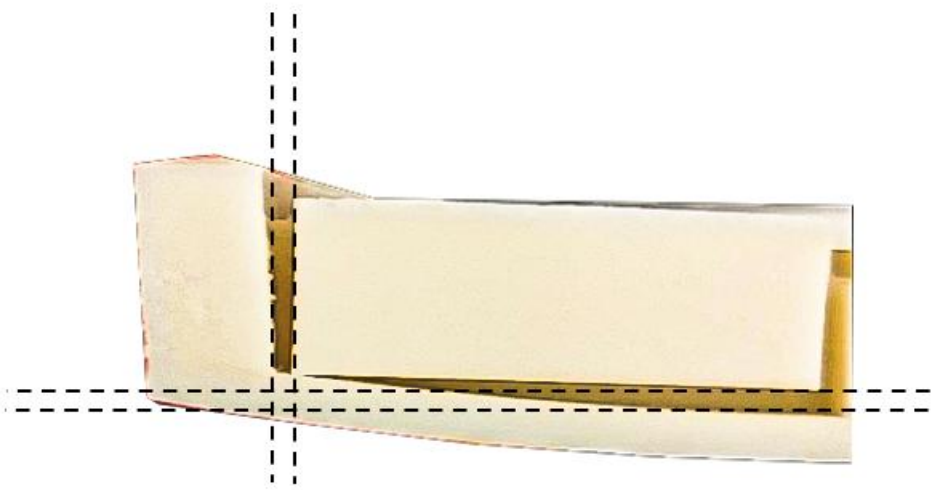
ارزیابی کیفیت قالب و ریخته‌گری : در فرآیند ریخته‌گری سیلیکون، قالب اولیه با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی و با متریال ای بی اس ساخته شد بررسی‌های اولیه نشان داد که ابعاد قطعه نهایی اندکی با مقادیر طراحی‌شده اختلاف دارد، شکل ۱۹. این اختلاف ابعادی عمدتاً ناشی از ویژگی‌های ذاتی متریال ای بی اس و تغییر شکل‌های حرارتی آن پس از فرآیند چاپ سه‌بعدی بوده است که این تغییر در ابعاد تاثیر مستقیمی بر ضخامت جداره‌های بازوی رباتیک گذاشته در نتیجه موجب تغییر شکل ناهماهنگ پس از اعمال فشار هوا می‌شود . قالب ای بی اس مورد استفاده در این مرحله از دو بخش مجزا تشکیل شده بود. هرچند این ساختار امکان جداسازی سلیکون از قالب را فراهم می‌کرد، اما در حین عملیات ریخته‌گری باعث ایجاد حباب‌های هوا درون سیلیکون شد. از این جهت مناسب ترین قالب در این بخش قالب یک تکه با متریال پی ال ای است.

سیستم کنترل و منطق کد آردوینو: سامانه‌ای برای کنترل عملکرد یک پمپ بر اساس شدت نور محیط طراحی و پیاده‌سازی شد. در این سامانه، سنسور بی اچ ۱۷۵۰ وظیفه اندازه‌گیری شدت روشنایی محیط را با دقت بالا بر عهده دارد.. فرآیند نمونه‌برداری در بازه‌های زمانی دو ثانیه‌ای انجام می‌شود و تصمیم‌گیری کنترلی بر اساس دو آستانه مشخص، متناسب با شرایط محیطی محل نصب پوسته، صورت می‌گیرد. برای نمونه، در یک محیط اداری و بر اساس

استانداردهای نوری، در صورتی که شدت روشنایی از ۵۰۰ لوکس بیشتر شود، پمپ برای دمیدن هوا فعال می‌شود و در صورتی که مقدار روشنایی کمتر از ۳۰۰ لوکس باشد، پمپ جهت تخلیه هوا به کار می‌افتد. در بازه میان این دو آستانه، پمپ در حالت خاموش باقی می‌ماند. این منطق کنترلی، به‌عنوان روشی ساده و سریع، امکان واکنش مناسب پمپ به تغییرات شدت روشنایی را فراهم می‌کند. همچنین استفاده از زمان‌بندی غیرمسدودکننده موجب می‌شود حلقه اصلی برنامه همواره پاسخ‌گو باقی بماند.

نمودار ۱: نمودار خطی زوایه بازشوندگی پوسته در چرخه کامل باز و بسته شدن.





شکل۱۹: اختلاف در ابعاد و اندازه قالب ای بی اس

دقت سنسورها و میزان خطا: به‌منظور ارزیابی دقت سنسور بی اچ ۱۷۵۰، قرائت‌های آن با یک لوکس‌متر مرجع کالیبره‌شده مقایسه شد (شکل ۲۰). در این آزمون، هر دو ابزار در یک موقعیت مکانی ثابت و تحت شرایط نوری یکسان قرار گرفتند و داده‌های ثبت‌شده به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سنسور مورد استفاده دارای خطای سیستماتیک در قرائت شدت نور است؛ به‌گونه‌ای که مقادیر خام آن، به‌طور میانگین، کمتر از مقادیر ثبت‌شده توسط لوکس‌متر مرجع بوده است. بر این اساس، ضریب تصحیح ۱.۳۱ برای اصلاح داده‌های خام سنسور در نظر گرفته شد. اعمال این ضریب موجب شد قرائت‌های سنسور به مقادیر مرجع نزدیک‌تر شوند و در نتیجه، اعتبار داده‌های ورودی سامانه کنترلی افزایش یابد. با این حال، باید توجه داشت که دقت اندازه‌گیری شدت نور، افزون بر کالیبراسیون، تحت تأثیر عواملی مانند زاویه قرارگیری سنسور نسبت به منبع نور، بازتاب سطوح اطراف، تغییرات موضعی شدت روشنایی و نویزهای محیطی نیز قرار دارد. از این‌رو، ضریب تصحیح به‌دست‌آمده در این پژوهش عمدتاً برای شرایط آزمایشگاهی حاضر معتبر است و در صورت تغییر محیط یا محل نصب سنسور، کالیبراسیون مجدد توصیه می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف امکان‌سنجی طراحی و ساخت یک پوسته پاسخگو مبتنی بر رباتیک نرم و با بهره‌گیری از منطق هندسه اوریگامی، کوشید نشان دهد که چگونه می‌توان یک سامانه معماری تطبیقی را نه بر پایه مکانیزم‌های صلب متعارف، بلکه از طریق هم‌افزایی میان فرم، ماده و محرک پنوماتیک توسعه داد. اهمیت این رویکرد در آن است که پاسخ‌گویی پوسته به نور روز، صرفاً به‌عنوان یک تغییر شکلی مکانیکی در نظر گرفته نشده، بلکه به‌مثابه یک فرایند طراحی-ساختِ یکپارچه بررسی شده است که در آن هندسه، جنس ماده، منطق تاخوردگی، و رفتار محرک همگی در تولید عملکرد نهایی نقش دارند. از این منظر، پژوهش حاضر بیش از آن‌که بر ارائه یک محصول نهایی متمرکز باشد، بر اعتبارسنجی یک مسیر پژوهشی و ساختی نو در مقیاس نمونه اولیه تأکید دارد.

یافته‌های تجربی نشان دادند که نمونه ساخته‌شده توانست به بازشدگی قابل توجهی در حدود ۱۵۱ درجه دست یابد و این تغییر شکل را در زمانی نزدیک به ۱۶ ثانیه انجام دهد. این دو شاخص، در کنار تکرارپذیری قابل قبول حرکت، نشان می‌دهند که سامانه از ظرفیت لازم برای ایجاد واکنش حرکتی معنادار به محرک محیطی برخوردار است. اهمیت این نتیجه صرفاً در مقدار عددی بازشدگی یا زمان پاسخ خلاصه نمی‌شود، بلکه در آن است که سامانه توانسته است در یک ساختار نرم-هیبریدی، پیوندی میان عملکرد مکانیکی، هدایت‌پذیری محرک و خوانش محیطی برقرار کند. این پیوند در سامانه حاضر از طریق یک زنجیره ورودی–پاسخ شکل گرفته است: شدت نور روز توسط سنسور بی اچ ۱۷۵۰ به‌عنوان مؤلفه خوانش محیطی اندازه‌گیری شده و داده‌ها مبنای فعال‌سازی آستانه‌ای سامانه پنوماتیک قرار می‌گیرند. در نهایت، فشار اعمال‌شده موجب تغییر شکل در ساختار اوریگامی-سیلیکونی می‌شود. باید اشاره کرد که قابلیت کنترل در این مرحله از پژوهش، در قالب مکانیسم قطع و وصل مبتنی بر آستانه نور (و نه کنترل پیوسته حلقه بسته) پیاده‌سازی شده و عملکرد مکانیکی سامانه نیز با متغیرهای زاویه بازشدگی و زمان پاسخ به‌صورت کمی ثبت شده است.



شکل۲۰: لوکس متر مورد استفاده در آزمایش تجربی سنسور پرتوتایپ

با این حال، اختلاف میان بازشدگی تجربی (۱۵۱ درجه) و هندسه ایده‌آل (۱۸۰ درجه) نشان‌دهنده چالش‌های ذاتی مواد نرم است. عواملی مانند سفتی موضعی خطوط تای اوریگامی، ناهمگنی در توزیع ضخامت سیلیکون، و افت فشار در اتصالات پنوماتیک در این اختلاف نقش داشته‌اند. علاوه بر این، در سیستم‌های رباتیک نرم، رفتار غیرخطی و پدیده پسماند سیلیکون در چرخه‌های متوالی رفت و برگشت می‌تواند ثبات زاویه بازشدگی را تحت تأثیر قرار دهد؛ موضوعی که در این پژوهش با آزمون تکرارپذیری اولیه سنجیده شد، اما برای کاربرد بلندمدت نیازمند پایش دقیق‌تر است. بنابراین، عدم دستیابی به ۱۸۰ درجه نشانه شکست عملکردی نیست، بلکه بازتاب‌دهنده رفتار واقعی ماده و مرزهای فنی نمونه‌های اولیه رباتیک نرم است.

از منظر معماری، ارزش افزوده اصلی این پژوهش در آن است که پوسته پاسخگو را از سطح یک ایده مفهومی یا شبیه‌سازی صرف، به سطح یک نمونه ساخته‌شده و قابل ارزیابی منتقل کرده است. این انتقال، امکان بررسی هم‌زمان سه لایه را فراهم می‌سازد: نخست، لایه فرمی که در آن اوریگامی به‌عنوان سازوکار سازمان‌دهنده هندسه عمل می‌کند؛ دوم، لایه مادی که در آن سیلیکون و رفتار الاستیک آن زمینه‌ساز تغییر شکل هستند؛ و سوم، لایه کنترلی که از طریق تحریک پنوماتیک، پاسخ حرکتی را فعال می‌کند. هم‌نشینی این سه لایه نشان می‌دهد که طراحی پوسته‌های پاسخگو نمی‌تواند صرفاً با تکیه بر منطق فرمی یا صرفاً با انتخاب ماده مناسب پیش برود، بلکه نیازمند هم‌زمانی دقیق میان هندسه، ماده و مکانیسم فعال‌سازی است. نتیجه پژوهش حاضر همین هم‌زمانی را در سطح نمونه اولیه به اثبات رسانده است.

در سطح روش‌شناختی نیز، این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد امکان‌سنجی در معماری، زمانی ارزشمند است که صرفاً به توصیف ایده محدود نماند و به آزمون عملی آن در قالب ساخت نمونه، ثبت داده‌های عملکردی و تحلیل فنی نتایج منجر شود. به بیان دیگر، این مقاله نشان داد که اعتبار یک سامانه پاسخگو نه فقط از طریق ادعاهای نظری، بلکه از طریق مواجهه مستقیم با محدودیت‌های ساخت، رفتار ماده، و عملکرد واقعی قابل سنجش است. از این رو، دستاورد پژوهش در آن است که یک مسیر قابل دفاع برای گذار از طراحی مفهومی به ساخت تجربی را پیشنهاد و آزمون کرده است.

با وجود این دستاوردها، باید تأکید کرد که پژوهش حاضر هنوز در مقیاس آزمایشگاهی و در شرایط کنترل‌شده باقی مانده است. بنابراین، ارزیابی دوام بلندمدت، رفتار خستگی ماده، عملکرد در چرخه‌های مکرر، پاسخ در شرایط متغیر اقلیمی، و سنجش کارایی انرژی در مقیاس واقعی، همچنان به‌عنوان ضرورت‌های پژوهش‌های بعدی مطرح هستند. افزون بر این، بهینه‌سازی هندسه خطوط تا، ارتقای کیفیت قالب‌گیری، کاهش اتلاف فشار، و استفاده از راهبردهای کنترلی دقیق‌تر می‌توانند دامنه بازشدگی و سرعت پاسخ را بهبود دهند. همچنین، در مسیر توسعه آتی، مقایسه این رویکرد با سایر انواع پوسته‌های پاسخگو—اعم از مکانیکی، سایه‌اندازهای متحرک، یا سامانه‌های مبتنی بر مواد هوشمند—می‌تواند موقعیت این روش را در میان راه‌حل‌های موجود روشن‌تر سازد.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب رباتیک نرم و هندسه اوریگامی، در سطح نمونه اولیه آزمایشگاهی، ظرفیت مناسبی برای توسعه پوسته‌های پاسخگو به نور روز دارد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که این رویکرد از نظر طراحی، ساخت و پاسخ‌پذیری اولیه قابل تحقق است؛ با این حال، نمونه ساخته‌شده هنوز نیازمند بهینه‌سازی و ارزیابی در مقیاس واقعی است. بنابراین، پژوهش حاضر را می‌توان یک مطالعه امکان‌سنجی و اثبات مفهوم دانست که می‌تواند مبنایی برای توسعه‌های آتی در حوزه پوسته‌های تطبیقی و میان‌رشته‌ای فراهم آورد.

تشکر و قدردانی: این مقاله برگرفته از رساله کارشناسی ارشد نویسنده اول با عنوان "امکان سنجی کاربرد فناوری رباتیک نرم در طراحی پوسته‌های پاسخگو جهت کنترل نور روز در اقلیم گرم و خشک: طراحی مرکز تحقیقات فناوری نوری در شهر مشهد" در رشته معماری در دانشگاه مازندران می باشد که تحت راهنمایی نویسنده دوم و نویسنده سوم با موفقیت به پایان رسیده است. نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود از دانشگاه مازندران و بویژه دانشکده هنر و معماری به جهت فراهم آوردن شرایط پژوهشی مناسب اعلام میدارند.

تاییدیه‌های اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان در مقاله: نویسنده اول با گردآوری داده‌ها، نگارش متن اولیه و تدوین محتوا، با سهم ۳۳ ٪ و نویسنده دوم و سوم، با کنترل و نظارت بر روند پژوهش، مشارکت در تحلیل داده‌ها و هدایت روند طراحی تحقیق و نهایتا با بازنویسی متن نهایی با سهم ۶۷ ٪ در شکل‌گیری مقاله حاضر، همکاری داشته‌اند.

منابع مالی/حمایت‌ها: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

[1]. Wang X, Sun X, Yu CW. Building envelope with variable thermal performance: Opportunities and challenges. Indoor and Built Environment. 2018. https://doi.org/10.1177/1420326X18773928

[2]. Harvey LDD. Reducing energy use in the buildings sector: Measures, costs, and examples. Energy Efficiency. 2009. https://doi.org/10.1007/s12053-009-9041-2

[3]. Bekler C, Ayçam İ, Gökşen F. Evaluation of climate adaptive building skins in the last decade. Periodica Polytechnica Architecture. 2022. https://doi.org/10.3311/ppar.18279

[4]. Heshmati P. Design of an Intelligent Transformable Skin Inspired by Plants for Regulating Indoor Environmental Conditions, Design of a Botanical Garden and Research Center in Tehran [Master's thesis]. 2019. Available from: https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/fed338a3b701873cc34f6c868d4d67e8

[5]. Taghizadeh K, Matini M, Kakouei A. Flexible Structures: A Solution for Reducing the Functional Problems of Kinetic Building Skins. Fine Arts Journal: Architecture and Urban Planning. 2019;24(2). Available from: https://www.sid.ir/paper/408478/fa

[6]. Loonen RCGM, Trčka M, Cóstola D, Hensen JLM. Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013;25:483-493. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016

[7]. Kretzer M. Information Materials: Smart Materials for Adaptive Architecture. Springer International Publishing; 2017. Available from: https://www.researchgate.net/publication/312003876_Information_Materials

[8]. Badarnah L, Kadri U. A methodology for the design of biomimetic adaptive building envelopes. Architectural Science Review. 2015;58(3):252-264. Available from: https://www.researchgate.net/publication/263011100_A_methodology_for_the_generation_of_biomimetic_design_concepts

[9]. Tabadkani A, Banihashemi SA, Hosseini MR. A simulation-based framework to optimize responsive secondary facades for improving visual comfort and energy efficiency. Building and Environment. 2021;197:107846. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107846

[10]. Brzezicki M. Architectural design of smart facades: A review of current trends and future directions. Frontiers of Architectural Research. 2024. https://doi.org/10.1016/j.foar.2023.12.004

[11]. Rezazi S, Mozaffari F. Adaptive and Compatible Building Skins Inspired by Plants in Nature. Green Architecture. 2018;11(4):1-20. Available from: https://www.noormags.ir/view/fa/articlepage/1390012

[12]. Amirian M. Design of a Responsive Skin to Environmental Conditions in a Cold Climate for a High-Rise Commercial–Residential Building (Case Study: Kermanshah) [Master's thesis]. 2021.

Available from: https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/06e4f7b4e63efb46b39143a9f553f755

[13]. Asgari S. Design of a Multi-Functional Space with an Interactive and Responsive Skin (A Study on the Transformation of a Foldable Geometric System into a Shape-Memory System Using Soft Robotics) [Master's thesis]. 2019. Available from: https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/dc11807f879d42d0b424753ac8b62477

[14]. Rezaeicherati A, Mahdavinejad M. SoRo Responsive Wall - Soft robotics for human-oriented architecture. In: Proceedings of the 38th eCAADe Conference. 2020. p. 623-630. Available from: DOI:10.52842/conf.ecaade.2020.2.623

[15]. Xiao F, Wei Z, Wang H, Li J, Zhu J. Embedded 3D printing of silicone for soft actuator with stiffness gradient and programmable workspace. 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2024. p. 10801-10807. doi:10.1109/IROS58592.2024.10801545

[16]. Liu CH, Chen YT, Tsai MC. Design, characterization and optimization of multi-directional bending pneumatic artificial muscles. Journal of Bionic Engineering. 2021;18(6):1358-1368. https://doi.org/10.1007/s42235-021-00077-w

[17]. Mehrvarz F, Bemanian M, Nasr T, Mansoori R, Al-Kazee M, A.kh W, et al. Designerly Approach to Design Responsive Façade for Occupant Visual Comfort in Different Latitudes. 2024;11:149-164. https://doi.org/10.15627/jd.2024.9

[18]. Deveci E. Adaptive Architecture and Smart Materials: Designing Responsive Building Envelopes for Climate Resilience. 2026. https://doi.org/10.62802/cjvbe894

[19]. Akşar S, Öztürk RB. Adaptif Cephelerin Sürdürülebilir Yapı Tasarımındaki Rolü: Teknolojik Yenilikler ve Çevresel Etkiler. EKSEN Dokuz Eylül Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2025. https://doi.org/10.58317/eksen.1628771

[20]. Schnädelbach H. Adaptive Architecture – A Conceptual Framework. In: Proceedings of the MediaCity Conference. 2010. p. 523-555. https://www.researchgate.net/publication/235218510_Adaptive_Architecture_-_A_Conceptual_Framework

[21]. Hasan M, Al-Tameemi O. The effect of applying new facade technologies on the effective response of the building. 2023. https://doi.org/10.1063/5.0182511

[22]. Fattahi Tabasi S, Banihashemi S. Design and mechanism of building responsive skins: State-of-the-art and systematic analysis. Frontiers of Architectural Research. 2022;11(6):1151-1176. https://journal.hep.com.cn/foar/EN/10.1016/j.foar.2022.05.006

[23]. Aelenei L, Aelenei D, et al. Adaptive Facade Network: Moving from research to practice. 2018. https://doi.org/10.7480/abe.2018.25

[24]. Andrade T, Beirão J, Arruda A, Eysen C. Toward adaptable and responsive facades: using strategies for transforming of the material and bio-based materials in favor of sustainability. 2021. https://doi.org/10.18682/cdc.vi149.5515

[25]. Kim M, Kim B, Koh J, Yi H. Flexural biomimetic responsive building façade using a hybrid soft robot actuator and fabric membrane. Automation in Construction. 2023;145:104660. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104660

[26]. [26] Correa Zuluaga D, Menges A. 3D Printed Hygroscopic Programmable Material Systems. MRS Proceedings. 2015;1800. https://doi.org/10.1557/opl.2015.644

[27]. Yoshida S, Morimoto Y, Zheng L, Onoe H, Takeuchi S. Multipoint Bending and Shape Retention of a Pneumatic Bending Actuator by a Variable Stiffness Endoskeleton. Soft Robotics. 2018;5(6):718-725. https://doi.org/10.1089/soro.2017.0145

[28]. Kellaris N, Venkata V, Smith G, Mitchell S, Keplinger C. Peano-HASEL actuators: Muscle-mimetic, electrohydraulic transducers that linearly contract on activation. Science Robotics. 2018;3:eaar3276. https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar3276

[29]. Behnava B, Pourzargar M. Impact of New Materials on Dynamics of Four Recent Decades in Iranian Architecture 1980-2020. Naqshejahan - Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2021 Nov 10;11(3):49-66. [Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1400.11.3.5.2

[30]. Valitabar M. Mohammadjavad M. Henry S. Peiman P. A dynamic vertical shading optimisation to improve view, visual comfort and operational energy. Open House International. 2021 Jul 9;46(3):401-415. https://doi.org/10.1108/OHI-02-2021-0031 Available at: https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/OHI-02-2021-0031/full/html

[31]. Mahdavinejad GH, Moshari M. Healthy City and Responsible Citizen: A Comprehensive Framework for Synergizing Islamic Ethics and Environmental Education. Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2025; 15(4): 175-192. [Persian] Available from: https://bsnt.modares.ac.ir/article_28529.html?lang=en

[32]. Mehrvarz F, Bemanian M, Nasr T, Mansoori R, AL-Kazee MF, Khudhayer WA, Mahdavinejad M. Designerly Approach to Design Responsive Façade for Occupant Visual Comfort in Different Latitudes. Journal of Daylighting. 2024 Jun 29;11(1):149-64. https://doi.org/10.15627/jd.2024.9 Available at: https://solarlits.com/jd/11-149

[33]. Rezaeicherati A, Mahdavinejad M. SoRo responsive wall: soft robotics for human-oriented architecture. In: Proceedings of the 38th Annual Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe 2020); 2020 Sep 16–18; Berlin, Germany. Berlin: TU Berlin; 2020. p. 623–630. Available from: http://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2020_335.pdf

[34].

[35]. Talaei M, Mahdavinejad M, Azari R, Haghighi HM, Atashdast A. Thermal and energy performance of a user-responsive microalgae bioreactive façade for climate adaptability. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022 Aug 1;52:101894. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101894 Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138821009085?via%3Dihub

[36]. Azimi M, Mahdavinejad M, Hosseini SM, Zamani Z, Bazazzadeh H. Highperformance Office Building: A Novel, Designerly and Data-Driven Approach to Integrating Shading Types and HVAC System Details. Case Studies in Thermal Engineering. 2025 Oct 8:107108. https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.107108

[37]. Bazazzadeh H, Świt-Jankowska B, Fazeli N, Nadolny A, Safar Ali Najar B, Hashemi Safaei S, Mahdavinejad M. Efficient Shading Device as an Important Part of Daylightophil Architecture; a

Designerly Framework of High-Performance Architecture for an Office Building in Tehran. Energies. 2021 December 8;14(24), 8272. https://doi.org/10.3390/en14248272

[38]. Eskandari H, Saedvandi M, Mahdavinejad M. The impact of Iwan as a traditional shading device on the building energy consumption. Buildings. 2018 Jan; 8(1):3. https://doi.org/10.3390/buildings8010003

[39]. Heidarzadeh S, Mahdavinejad M, Habib F. External shading and its effect on the energy efficiency of Tehran's office buildings. Environmental Progress & Sustainable Energy. 2023 May 17:e14185. https://doi.org/10.1002/ep.14185 Available: https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ep.14185

[40]. Heidarzadeh S, Habib F. Bio-inspiration from sponge for highperformance building. Naqshejahan-Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, 2023 Sep 10; 13(3):86-101. Available: http://bsnt.modares.ac.ir/article-2-69443-en.html

[41]. Mahdavinejad M, Hosseini SA. Data mining and content analysis of the jury citations of the Pritzker Architecture prize (1977–2017). Journal of Architecture and Urbanism. 2019 Feb 1;43(1):71-90. https://doi.org/10.3846/jau.2019.5209 Available: https://journals.vilniustech.lt/index.php/JAU/article/view/5209

[42]. Mahdavinejad M, Hashemin SA, Nasr T, Galil MI, Shaeri J, Garcia EH, Bazazzadeh H. Effect of tree characteristics on visual-thermal comfort; case study: Retiro Park, Madrid. Results in Engineering. 2025 Oct 10:107673. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107673

[43]. Mahdavinejad M, Javanroodi K. Natural ventilation performance of ancient wind catchers, an experimental and analytical study–case studies: one-sided, two-sided and four-sided wind catchers. International journal of energy technology and policy, 2014 Jan 1;10(1):36-60. https://doi.org/10.1504/IJETP.2014.065036

[44]. Mahdavinejad M, Masoudi Tonekaboni S. Self-Shading and Highperformance Architecture; Case Studies: Configuration of Contemporary Buildings of Tehran. Armanshahr Architecture & Urban Development, 2019; 11(25): 201-208. Available: http://www.armanshahrjournal.com/article_85091_en.html

[45]. Mahdavinejad M, Zia A, Larki AN, Ghanavati S, Elmi N. Dilemma of green and pseudo green architecture based on LEED norms in case of developing countries. International Journal of Sustainable Built Environment, 2014 Dec 1;3(2):235-46. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.06.003

[46]. Mahdavinejad M, Shaeri J, Nezami A, Goharian A. Comparing universal thermal climate index (UTCI) with selected thermal indices to evaluate outdoor thermal comfort in traditional courtyards with BWh climate. Urban Climate. 2024 Mar 1;54:101839. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101839

[47]. Mahdavinejad M, Hepf C, Berardi U, Auer T. Data-Driven Prioritization of Visual–Thermal Comfort Hotspots: An Integrated Approach to Highperformance Office Buildings. Solar Compass, 19, pp. 100169–100169. Available at: https://doi.org/10.1016/j.solcom.2026.100169

[48]. Khayat Kholghy A, Sahragard Monfared NS, Yazdanfar SA. Identification of Effective Flexible Design Concepts for Affordable Housing through the Research by Design Method. Naqshejahan. 2026;16(1):1-26 (In Persian). https://bsnt.modares.ac.ir/article_27799.html?lang=en

[49]. Karimi Z, Zarkesh A. Cooling load reduction through the optimization of the external envelope of Qazvin high-rise residential buildings based on sensitivity analysis. Naqshejahan. 2026;16(1):27-56 (In Persian). https://bsnt.modares.ac.ir/article_27784.html?lang=en

[50]. Keikha H. From Criteria to Construction: An Integrated Multi-Criteria Decision-Making Model for Optimal Wall and Façade System Selection. Naqshejahan. 2026;16(1):57-74 (In Persian). https://bsnt.modares.ac.ir/article_28173.html?lang=en

[51]. Ramezani E, Mirzaei R, Vafamehr M, Seyedalhosseini SM. Interpretive Structural Modeling of Urban Form Elements for Developing a Theoretical Framework Grounded in Modern Construction Technologies. Naqshejahan. 2026;16(1):75-104 (In Persian). https://bsnt.modares.ac.ir/article_28619.html?lang=en

[52]. Salehi B, Mansouri R, Shafiie Baghbadrani M. Evaluating the impact of temporary accommodation quality on reducing psychological trauma after an earthquake (Case study: Khoy County Earthquake). Naqshejahan. 2026;16(1):105-118 (In Persian). https://bsnt.modares.ac.ir/article_28704.html?lang=en

[53]. Khaleghi Babaei A, Nasertorabi S, Kalantari Khalilabad H. Morphological Analysis of Yazd Historic Fabric via Voronoi Geometry. Naqshejahan. 2026;16(1):119-140 (In Persian). https://bsnt.modares.ac.ir/article_28920.html?lang=en