نشریهٔ علمی باغ نظر، ۲۲(۱۴۲)، ۵-۲۶ / فروردین ۱۴۰۴
DOI:10.22034/BAGH.2025.486616.5698

ترجمهٔ انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
Identifying Challenges and Opportunities for the Integration of Bionic Architecture with Traditional Vernacular Practices A Case Study of Bam City
در همین شمارهٔ مجله به‌چاپ رسیده است.

مقالهٔ پژوهشی

# شناسایی چالش‌ها و تحلیل فرصت‌های ادغام معماری بیونیک با شیوه‌های معماری بومی سنتی (مطالعه موردی: شهر بم)*

نوشین پورحق‌وردی[۱]، جمشید داوطلب[۲]**، محسن قاسمی[۳]، ملیحه نوروزی[۳]

**۱. دانشجوی دکتری معماری، گروه معماری، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران.**
**۲. دانشیار گروه معماری، دانشکدهٔ هنر و معماری، دانشگاه زابل، ایران.**
**۳. استادیار گروه معماری، واحد بم، دانشگاه آزاد اسلامی، بم، ایران.**

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

## چکیده

**بیان مسئله:** تحولات شتابان معماری شهر بم پس‌از زلزله مهیب سال ۱۳۸۲، شکافی عمیق میان شیوه‌های نوین ساخت‌وساز و میراث غنی فرهنگی و اقلیمی این نگین کویر ایجاد کرده است. عناصر معماری سنتی که طی سده‌ها در هم‌گرایی با اقلیم گرم‌وخشک منطقه تکامل یافته بودند، به‌تدریج جای خود را به طراحی‌های مدرن و بی‌توجه به ارزش‌های زیست‌محیطی و فرهنگی داده‌اند. این پژوهش در پی پاسخ به این پرسش کلیدی است که فرصت‌ها و چالش‌های ادغام معماری زیست‌میتیک با دانش بومی در بافت تاریخی بم چیست و چگونه می‌توان اصول طراحی اکولوژیک را برای ایجاد محیطی پایدار و همساز با فرهنگ منطقه در این اقلیم خاص به کار گرفت؟

**روش پژوهش:** برای واکاوی این مسئله، رویکردی تلفیقی برگزیده شد. با انجام مطالعات میدانی و مستندنگاری تصویری از بناهای تاریخی، ویژگی‌های معماری بومی به دقت تحلیل شد. مشاوره با متخصصان زیست‌شناسی، اطلاعاتی دربارهٔ سازگاری‌های زیستی گونه‌های بومی فراهم آورد و مصاحبه با ده نفر از معماران و سیزده نفر از ساکنان بومی، دانش سنتی و درک آن‌ها از طراحی الهام‌گرفته از طبیعت را آشکار ساخت. پیش‌پردازش تصاویر معماری با بهره‌گیری از نرم‌افزارOpenCV، تحلیل هندسی و بافتی را تسهیل کرد که سپس با نظر کارشناسی سه تن از متخصصان معماری ارزیابی شد. داده‌های کیفی حاصل از مصاحبه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Atlas.ti کدگذاری و مضامین مرتبط با تعامل اصول زیست‌میتیک و دانش بومی استخراج شد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج این پژوهش، هم‌خوانی میان معماری بومی بم و راهبردهای زیست‌میتیک ازجمله سامانه‌های سرمایشی غیرفعال و بهره‌وری بهینه از مواد را آشکار ساخت. بااین‌حال، چالش‌هایی همچون سازگاری مصالح نوین، محدودیت‌های اقتصادی و آسیب‌پذیری در برابر زلزله، به‌عنوان موانعی بر سر راه این هم‌گرایی شناسایی شدند. رفع این موانع، نیازمند تدوین راهکارهای ترکیبی شامل تلفیق مصالح نوین و سنتی، برنامه‌ریزی شهری مشارکتی و راه‌حل‌های مبتنی‌بر طبیعت است که با شرایط اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی خاص شهر بم سازگار باشند.

**واژگان کلیدی:** *معماری بیونیک، معماری سنتی، تاب‌آوری اکولوژیک، تداوم فرهنگی، بم.*

* این مقاله برگرفته از رسالهٔ دکتری «نوشین پورحق‌وردی» با عنوان « شناسایی چالش‌ها و تحلیل فرصت‌های ادغام معماری بیونیک با شیوه‌های معماری بومی سنتی (مطالعه موردی: شهر بم)» است که به راهنمایی دکتر «جمشید داوطلب» و مشاورهٔ دکتر «محسن قاسمی» و دکتر «ملیحه نوروزی» در سال ۱۴۰۳ در گروه معماری، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران در حال انجام است.

** نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۵۵۴۲۰۶۵۷، jdavtalab@uoz.ac.ir

## مقدمه و بیان مسئله

در سال‌های اخیر، توجه روزافزون به بحران‌های زیست‌محیطی نظیر تخریب محیط‌زیست، تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع طبیعی، طراحی اکولوژیک را به یکی از محورهای اصلی پژوهش در حوزهٔ برنامه‌ریزی شهری و معماری تبدیل کرده است (Bayulken et al., 2021). این اهمیت، با توجه به چالش‌های ناشی از شرایط اقلیمی سخت و تهدیدات جدی بر آسایش انسانی و پایداری زیست‌بوم در مناطق گرم‌وخشک بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است (Fallmann & Emeis, 2020; Heidari & Davtalab,2020; Oveisi Keikha et al., 2020, Heidari & Davtalab, 2024).

شهر بم، واقع در جنوب‌شرقی ایران، به‌عنوان نماد بارزی از اقلیم گرم‌وخشک، بستری مناسب برای بررسی راهکارهای معماری پایدار فراهم آورده است. میراث معماری خشتی و گلی این شهر که حاصل هزاران سال سازگاری با اقلیم سخت بوده، حاوی آموزه‌های ارزشمندی در خصوص طراحی معماری همساز با محیط است (Mokhtari et al., 2019). ازسوی‌دیگر، رویکردهای نوین همچون معماری بیونیک، با الهام از سیستم‌های طبیعی، نویدبخش ایجاد سازه‌هایی با کارکردی بهینه و هم‌خوان با محیط‌زیست را می‌دهند (Akrami & Damyar, 2017). با وجود پتانسیل‌های بالای تلفیق اصول بیونیک در معماری بومی بم، این فرایند با موانع متعددی روبرو است. محدودیت‌های اقتصادی و فنی، مقاومت‌های فرهنگی در برابر تغییرات و نبود چارچوب‌های قانونی مناسب ازجمله چالش‌های پیش روی این رویکرد هستند (Farina et al., 2023). بااین‌حال، به نظر می‌رسد، فرصت‌هایی در این بستر وجود دارد که با احترام به ارزش‌های معماری سنتی، می‌توان گام‌هایی در جهت ایجاد محیط‌های شهری پایدارتر برداشت. تحقق این مهم مستلزم تلفیق دانش بومی با رویکردهای نوین و ایجاد یک مدل جامع (Javanmard et al., 2024) است که ضمن حفظ هویت فرهنگی، نیازهای معاصر را نیز برآورده سازد که در این گفتمان بدان پرداخته می‌شود.

شهر بم، به‌عنوان یکی از ارزشمندترین میراث‌های معماری ایران، در تقاطع دو چالش اساسی قرار دارد: ضرورت حفظ هویت فرهنگی و نیاز به توسعهٔ پایدار در مواجهه با تغییرات اقلیمی. بافت قدیمی این شهر، با تکیه بر مصالح بومی همچون خشت و گل، به شکلی هوشمندانه با شرایط سخت اقلیمی سازگار شده است. لیکن، رشد بی‌رویه شهرنشینی و تحولات محیطی، این میراث ارزشمند را با تهدید جدی مواجه ساخته است. ازسوی‌دیگر، الزام به رعایت استانداردهای پایداری در ساخت‌وساز و بنا، ضرورت یافتن راهکارهای نوین را بیش از پیش آشکار می‌سازد. معماری بیونیک، با الهام از طبیعت و بهره‌گیری از سازوکارهای طبیعی، به‌عنوان یک رویکرد نوین در معماری پایدار در طی سال‌های اخیر در عرصهٔ آکادمیک مطرح شده است. این رویکرد، با تأکید بر کارآمدی انرژی و هماهنگی با محیط‌زیست، می‌تواند پاسخگوی بسیاری از چالش‌های پیش روی شهر بم باشد. بااین‌حال، فقدان چارچوبی مشخص برای تلفیق اصول بیونیک با معماری بومی این شهر، به‌عنوان یک شکاف دانش مطرح می‌شود. همچنین، بررسی دیدگاه‌های ساکنان محلی و متخصصان حوزهٔ معماری در خصوص این رویکرد نوین، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اهمیت حفظ میراث معماری بومی بم و ضرورت تطبیق آن با الزامات توسعهٔ پایدار، این پژوهش با هدف شناسایی و تحلیل چالش‌ها و فرصت‌های ادغام اصول طراحی اکولوژیک، به‌ویژه معماری بیونیک، در بافت این شهر انجام می‌شود. از طریق مطالعات میدانی، مصاحبه با متخصصان معماری، ساکنان محلی، این مقاله به‌دنبال ارائهٔ راهکارهایی برای توسعه مدلی جامع است که ضمن حفظ هویت فرهنگی شهر، به بهبود عملکرد انرژی و زیست‌محیطی ساختمان‌ها کمک کند. در این راستا سؤال اصلی پژوهش بدین شرح است:

فرصت‌ها و چالش‌های کلیدی در ادغام معماری بیونیک با شیوه‌های معماری بومی بم چیست و چگونه می‌توان اصول طراحی اکولوژیک را به کار گرفت تا محیط ساخته‌شده‌ای پایدار و هماهنگ با فرهنگ در اقلیم گرم‌وخشک این شهر ایجاد کرد؟

## پیشینهٔ پژوهش

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متمرکز بر معماری بیونیک و اکولوژیک در شهر تاریخی بم به‌ندرت انجام شده است. با توجه به محدودیتِ منابع تخصصی در این حوزه، پیشینهٔ این پژوهش عمدتاً بر مطالعات گسترده‌ای که بر معماری بومی شهر بم متمرکز بوده است، تکیه دارد. این مطالعات با بررسی دقیق ویژگی‌های تاریخی، فرهنگی و زیست‌محیطی معماری این شهر، چارچوبی برای درک اصول پایداری و هماهنگی با طبیعت فراهم آورده‌اند که می‌تواند به‌عنوان بستری مستحکم برای این پژوهش در حوزهٔ معماری بیونیک و اکولوژیک استفاده شود.

شهر تاریخی بم، نگینی درخشان در دامان کویر، با میراثی غنی از معماری و اکولوژی، نمادی بی‌بدیل از هم‌زیستی انسان و طبیعت است. ارگ بم، به‌عنوان بزرگ‌ترین سازهٔ خشتی جهان، قلب تپندهٔ این شهر تاریخی بوده و به همراه شارستان و ربض، طرحی شهری هوشمندانه و پایدار را شکل داده است (Mokhtari et al., 2019). سیستم‌های نوآورانهٔ مدیریت آب همچون قنات‌ها، ضمن

تأمین نیاز آبی کشاورزی، به شکوفایی تولیدات اقتصادی ازجمله پنبه و ابریشم یاری رسانده و اصول پایداری نهفته در طراحی بومی شهر را به نمایش گذاشته است (ibid.). چشم‌انداز فرهنگی شهر بم، در سه مقیاس خانه-باغ، کوچه-باغ و شهر-باغ، نمودی از هم‌زیستی مسالمت‌آمیز معماری و طبیعت است که به هویت فرهنگی این شهر عمق و غنا بخشیده است (Einifar & Eshrati, 2018). سازه‌هایی چون کوشک رحیم‌آباد، با ایوان‌های متقارن و باغ چهارگوش پیرامون آن، گواهی بر تسلط طراحان آن بر اصول طراحی پیشرفته‌ای است که به زیبایی هر دو وجه زیبایی‌شناسی و کارکردگرایی را در هم آمیخته است (Saremi Naeeni & Joodaki Azizi, 2014). همچنین، نخلستان‌های بم، علاوه‌بر کارکردهای عملی، نمادی از تداوم حیات و هویت فرهنگی این شهر بوده‌اند که احیای آن‌ها برای توسعهٔ پایدار و حفظ روح اصیل شهر، امری ضروری است (Aslani et al., 2019).

پژوهش‌های عمیق و گسترده در حوزهٔ معماری بیونیک در ایران، تاکنون به‌صورت موردی و جزئی به‌ندرت انجام شده است. اغلب پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه، رویکردی کلی و نظری داشته و به بررسی عمیق و جامع این حوزه نپرداخته‌اند. بااین‌حال، مطالعات مرتبطی که اصول بیونیک را در طراحی معماری واکاوی کرده‌اند، به‌عنوان پیشینهٔ داخلی برای این پژوهش بررسی شده‌اند.

مطالعات اخیر در حوزهٔ معماری بیونیک و اکولوژیک، به‌روشنی بر ظرفیت‌های شگفت‌انگیز الهام‌گیری از طبیعت برای ارتقای کیفی طراحی‌های معاصر تأکید دارند. عالمی (Alemi, 2022) در پژوهشی تطبیقی، شباهت‌های قابل‌تأملی میان پیچیدگی شبکه فضایی و سیستم تهویهٔ طبیعی لانه‌های موریانه و شهر زیرزمینی نوش‌آباد کشف کرده است که می‌تواند الگویی ارزشمند برای طراحی پایدار شهری باشد. نژادابراهیمی و تخمچیان (Nejad Ebrahimi & Tokhmchian, 2021) نیز با بررسی ساختارهای شبکه‌ای و تطبیق‌پذیر بازار تاریخی تبریز و مقایسهٔ آن با ریزوم‌های گیاهی، بر اهمیت بهره‌گیری از این اصول در طراحی‌های معاصر پایدار تأکید ورزیده‌اند. قارونی و همکاران (Gharooni et al., 2014) نیز با الهام از هندسهٔ مارپیچ طلایی صدف آبالون، به طراحی پوسته‌های ساختمانی بهینه‌تر و اقتصادی‌تر دست یافته‌اند. در پژوهشی دیگر، گلدوست و احمدنژاد کریمی (Goldust & Ahmadnejad Karimi, 2022) به واکاوی الگوهای باربری در طبیعت، از درختان تنومند گرفته تا بال‌های ظریف حشرات و لانه‌های پیچیدهٔ پرندگان پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مکانیزم‌های تطبیقی هوشمندانه‌ای در این ساختارهای طبیعی نهفته است، ازجمله آرایش‌های سلسله‌مراتبی و طراحی‌های مبتکرانه برای بهینه‌سازی مصرف انرژی.

پژوهش‌های خارجی در حوزهٔ معماری بیونیک، پتانسیل‌های قابل توجهی را در زمینهٔ بهینه‌سازی طراحی‌های معماری و ارتقای پایداری ساختمان‌ها آشکار ساخته‌اند. دلشادویچ (Dilshodovich, 2024) با بهره‌گیری از مفاهیم ایزومورفیسم و هومومورفیسم، پل ارتباطی میان علوم مختلف و معماری برقرار کرده و نشان داده است که چگونه می‌توان با الهام از طبیعت، فرم‌ها و عملکردهای بهینه‌ای را در معماری خلق کرد. فرخی‌زاد و صابرنژاد (Farokhizad & Sabernejad, 2016) نیز با تحلیل موزهٔ آب تهران، به پیوند میان علوم هیدرولوژی و معماری بیونیک را به تصویر کشیده‌اند و راهکارهایی عملی برای دستیابی به هماهنگی زیست‌محیطی و افزایش تاب‌آوری ساختمان‌ها ارائه داده‌اند. در پژوهشی دیگر، وانگ و همکاران (Wang et al., 2021) با الهام از سازوکار بال‌های کفشدوزک، به طراحی نماهای پویا و تطبیق‌پذیری پرداخته‌اند که قادرند شرایط محیطی را به‌طور خودکار تنظیم و به کاهش قابل توجه انتشار کربن کمک کنند. در پژوهشی دیگر، جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2024)، بیومیمتیک را به‌عنوان ابزاری برای خلق طراحی‌های پایدار و صنعتی معرفی کرده‌اند. بااین‌حال، جیانگ و همکاران به چالش‌هایی همچون پذیرش گستردهٔ این رویکرد در بازار و کمبود روش‌های استاندارد در این حوزه اشاره کرده‌اند. سولانو و همکاران (Solano et al., 2023) نیز با بررسی پروژه‌هایی نظیر مرکز ایست‌گیت زیمبابوه و پروژهٔ جنگل صحرا، به‌روشنی نشان داده‌اند که چگونه الهام‌گیری از طبیعت می‌تواند به‌طور چشمگیری به بهینه‌سازی مصرف انرژی و حفظ منابع آبی در مناطق گرم‌ومرطوب کمک کند.

## مبانی نظری

چارچوب نظری این گفتمان بر پایهٔ دو مفهوم بنیادین و درهم‌تنیدهٔ پایداری زیست‌محیطی و استمرار فرهنگی استوار شده است. این مفاهیم به‌عنوان زیربنای نظری، چارچوبی را برای بررسی تلفیق اصول معماری الهام‌گرفته از طبیعت با روش‌های سنتی ساخت‌وساز در بستر تاریخی شهر بم، ایران فراهم می‌آورند. هدف غایی این پژوهش دستیابی به طرح‌های معماری نوآورانه‌ای است که ضمن ریشه‌داربودن در فرهنگ بومی و پاسخگویی به چالش‌های زیست‌محیطی، هویت اصیل منطقه را پاس بدارد.

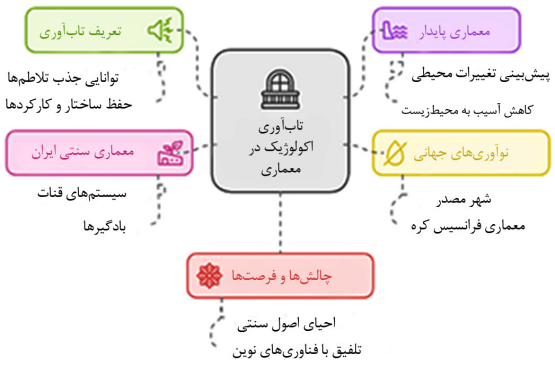
- **تاب‌آوری اکولوژیک: پارادایمی برای معماری پایدار**

تاب‌آوری اکولوژیک، به تعبیر گاندرسون (Gunderson, 2000)، توانایی ذاتی یک سامانه در جذب تلاطم‌ها و آشفتگی‌ها، ضمن حفظ ساختار و کارکردهای

بنیادین خود یا حتی تحول به‌سوی حالت‌هایی سازگارتر با شرایط نوین، تعریف می‌شود. در حوزهٔ معماری، این مفهوم به خلق محیط‌های مصنوعی اشاره دارد که قادرند تغییرات محیطی همچون کمبود منابع و نوسانات اقلیمی را پیش‌بینی و آثار مخرب آن‌ها را تعدیل کنند (Tian et al., 2018, 57). کن یانگ (Young & Duchicela, 2020, 882)، از پیشگامان اندیشهٔ طراحی اکولوژیک، بر این باور هستند که معماری باید فراتر از کاهش آسیب به محیط‌زیست رفته و به احیای اکوسیستم‌ها و ارتقای سلامت کلی محیط‌زیست کمک شایانی کند (تصویر ۱).

در مقیاس جهانی، جستجوی پیگیرانه برای دستیابی به پایداری زیست‌محیطی، به نوآوری‌های شگرفی در عرصهٔ معماری مناطق خشک و نیمه‌خشک انجامیده است؛ مناطقی که فشارهای زیست‌محیطی در آن‌ها به‌شدت محسوس است. به‌عنوان نمونه‌ای بارز، شهر مصدر در امارات، گواهی بر توانایی فناوری‌های تطبیقی و انرژی‌های تجدیدپذیر در تحول بنیادین طراحی شهری است (Rietmann, 2021). ازسوی‌دیگر، معمارانی همچون فرانسیس کره در دل صحرای آفریقا، با تلفیق راهبردهای سرمایش غیرفعال و فرایندهای طراحی مبتنی‌بر مشارکت جمعی، سنت و مدرنیته را در هم آمیخته‌اند (Deglon et al., 2024). این نمونه‌ها، گویای ماهیت جهان‌شمول تاب‌آوری در معماری بوده است و بستری مناسب برای تطبیق آن با شرایط محلی فراهم می‌آورند.

در گسترهٔ پهناور ایران، معماری سنتی همواره نمودی بارز از پایداری زیست‌محیطی بوده است (Davtalab et al., 2022; Heydari & Davtalab, 2020; Davtalab & Heidari, 2020 ). سیستم‌های پیچیدهٔ قنات و سازه‌های هوشمند بادگیر (Heidari & Davtalab, 2022) در مناطق مرکزی ایران، گواهی بر نوآوری پیشینیان در مدیریت بهینهٔ منابع آبی و سازگاری با شرایط اقلیمی سخت و طاقت‌فرسا هستند




تصویر ۱. مضامین کلیدی مرتبط با تاب‌آوری اکولوژیک در معماری. مأخذ: نگارندگان.

(Hashemi Zarj Abad & Masudi, 2013). این نمونه‌های تاریخی، نشانه‌ای از درک ایرانیان از همزیستی مسالمت‌آمیز با طبیعت است؛ درکی که در معماری معاصر ایران اغلب مغفول مانده است. شهر تاریخی خشتی بم، نمودی زنده از تاب‌آوری منفعل است که با بهره‌گیری از ظرفیت ذاتی خود در تنظیم دمای داخلی و مصرف بهینهٔ منابع، توانایی‌های شگفت‌انگیزی را به نمایش گذاشته است. بااین‌حال، زلزلهٔ مهیب سال ۱۳۸۲، آسیب‌پذیری این سازه‌ها در برابر نیروهای لرزه‌ای را آشکار ساخت و ضرورت اتخاذ تدابیر تاب‌آورانه و تطبیقی را بیش از پیش نمایان کرد.

در ادامه، شاخص‌های کلیدی تاب‌آوری اکولوژیک با تأکید ویژه بر تلفیق اصول معماری بیونیک و بومی در بافت تاریخی شهر بم، بررسی خواهد شد (تصویر ۲).

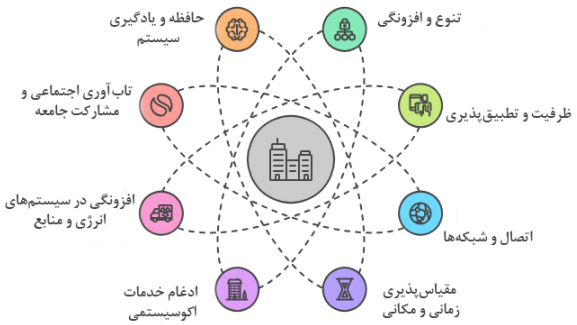
تنوع و افزونگی: تنوع، همچون ریشه‌های درهم‌تنیدهٔ یک درخت، به پایداری و استحکام یک سیستم می‌افزاید. در بافت پیچیدهٔ شهری، تنوع در تیپولوژی‌های معماری، سیستم‌های انرژی و شیوه‌های بهره‌برداری از منابع، به منزلهٔ تضمینی است بر پایداری و بقای آن. این تنوع، شبیه به یک شبکهٔ ایمنی عمل و از فروپاشی سیستم در برابر شوک‌های ناگهانی جلوگیری می‌کند.

ظرفیت تطبیق‌پذیری: سیستم‌های تاب‌آور، همچون موجودات زنده، توانایی انطباق با شرایط متغیر محیطی را دارند. در بافت تاریخی بم، این قابلیت به معنای استفاده از فرم‌های معماری انعطاف‌پذیر و ایجاد تعامل پویا با جامعهٔ محلی برای مقابله با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و زمین‌شناسی است.

اتصال و شبکه‌بندی: همان‌گونه که رگ‌های حیاتی بدن، مواد مغذی را به اندام‌ها می‌رسانند، شبکه‌های شهری نیز جریان منابع را تسهیل و به پایداری کل سیستم کمک می‌کنند. کریدورهای سبز، فضاهای عمومی و سیستم‌های توزیع آب، به‌عنوان رگ‌های حیاتی شهر، از تکه‌تکه‌شدن بافت شهری جلوگیری و به ایجاد یک کل یکپارچه و هماهنگ کمک می‌کنند.

مقیاس‌پذیری زمانی و مکانی: تاب‌آوری، پدیده‌ای است که در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی، خود را نشان می‌دهد. در شهر بم، رویکردهای ساخت‌وساز باید به‌گونه‌ای باشد که هم به مخاطرات آنی مانند زلزله پاسخ دهند و هم در برابر تغییرات اقلیمی بلندمدت تاب‌آور باشند.

هم‌افزایی خدمات اکوسیستمی: بهره‌گیری بهینه از خدمات ارزشمند اکوسیستم‌ها، همچون تأمین آب، تنظیم دما و تأمین نیازهای فرهنگی، تضمین‌کنندهٔ هم‌خوانی کامل طراحی شهری با الزامات زیست‌محیطی است. این رویکرد، نه‌تنها به پایداری محیط‌زیست کمک می‌کند بلکه کیفیت زندگی شهروندان را نیز ارتقا می‌بخشد.




تصویر ۲. شاخص‌های کلیدی در تاب‌آوری اکولوژیک. مأخذ: نگارندگان.

تنوع‌بخشی در منابع انرژی و مواد: اتکا به منابع انرژی تجدیدپذیر، توزیع‌شده و سیستم‌های مدیریت پسماند چرخه‌ای، مقاومت سیستم شهری را در برابر نوسانات و بحران‌ها افزایش می‌دهد. این تنوع‌بخشی، وابستگی به منابع متمرکز و آسیب‌پذیر را کاهش می‌دهد و امنیت انرژی را تضمین می‌کند.

هم‌گرایی اجتماعی و زیست‌محیطی: مشارکت فعالانهٔ شهروندان و ذی‌نفعان محلی در تصمیم‌گیری‌ها، تضمین‌کننده اجرای موفق استراتژی‌های تاب‌آوری است. این مشارکت، منجر به شکل‌گیری حس مالکیت و مسئولیت‌پذیری مشترک می‌شود و ظرفیت جامعه برای پاسخگویی به تغییرات و چالش‌های آینده را افزایش می‌دهد.

یادگیری از گذشته و آمادگی برای آینده: سیستم‌های تاب‌آور، همچون موجودات زنده، از تجربیات گذشته درس می‌گیرند و خود را با شرایط جدید سازگار می‌کنند. در مورد شهر بم، تجربیات تلخ زلزله، فرصتی برای تلفیق دانش سنتی با فناوری‌های نوین و ایجاد شهری مقاوم‌تر و پایدارتر فراهم آورده است (Scheffer et al., 2015; Dakos & Kéfi, 2022; Spears et al., 2015; Day et al., 2018; McGrath & Lei, 2021; Alberti & Marzluff,2004).

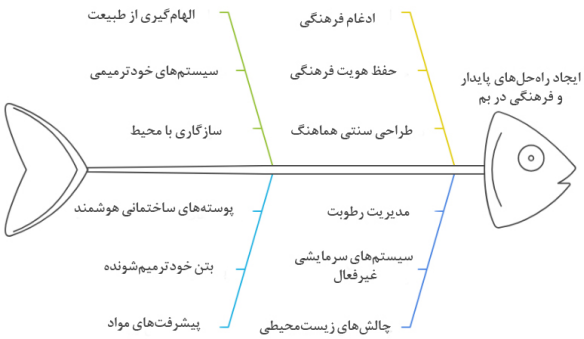
**• معماری بیونیک: رویکردی نوین برای ارتقای تاب‌آوری اکولوژیک**

معماری بیونیک، ریشه در تقلید از طبیعت دارد و با الهام از سیستم‌های پیچیده و کارآمد زیستی، به‌دنبال راهکارهایی نوآورانه برای چالش‌های معاصر است (Bantserova & Kasimova, 2023, 940). جین بن‌یوس (Benyus, 1997)، بیومیمتیک را فرایندی می‌داند که در آن، استراتژی‌های اثبات‌شدهٔ طبیعت به‌مثابهٔ الگویی ارزشمند برای حل مسائل پیچیدهٔ انسانی به کار گرفته می‌شود. پژوهش‌های پیشگامانی چون بارتلوت و همکاران (Barthlott et al., 2016, 19) نشان داده‌اند که اصول بنیادین حیات همچون خودترمیمی، تطبیق‌پذیری و بهینه‌سازی انرژی، می‌توانند الهام‌بخش آفرینش طرح‌های معماری بدیع و نوآورانه باشند. تلفیق اصول بیونیک با طراحی بومی می‌تواند به خلق فرم‌های معماری بدیعی در شهر بم بیانجامد که ضمن ارتقای پایداری زیست‌محیطی، میراث گرانسنگ فرهنگی این منطقه را نیز پاس می‌دارد. طراحی نماهای پویای خشتی که قادر به تنظیم دما براساس تغییرات محیطی باشند، سیستم‌های جمع‌آوری آب الهام‌گرفته از سازگاری گیاهان بیابانی و پی‌های مقاوم در برابر زلزله با الهام از الگوهای توزیع بار در موجودات زنده، نمونه‌هایی از این دستاوردهای نوآورانه خواهند بود. نوآوری‌های اخیر در عرصهٔ معماری بیونیک منجر به توسعهٔ موادی همچون بتن خودترمیم‌شونده شده است که با الهام از مکانیزم‌های ترمیم در موجودات زنده، توانایی ترمیم خودکار آسیب‌ها را دارا است. همچنین، ظهور پوسته‌های ساختمانی هوشمند که با الگوبرداری از سازه‌های طبیعی همچون مخروط کاج، قادر به تنظیم شرایط داخلی بنا براساس تغییرات محیطی هستند، گام مهمی در این حوزه محسوب می‌شود. پیشرفت‌های چشمگیر در علم مواد، ازجمله توسعهٔ مواد تغییر فازدهنده و بایوکامپوزیت‌ها، پتانسیل ایجاد تحولی شگرف در ادغام مفهوم پایداری در فرم‌های معماری را فراهم آورده است.

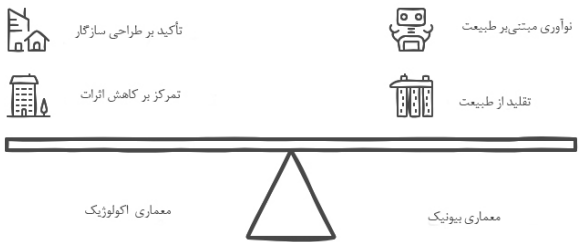
در پهنهٔ تاریخی بم، اصول بیونیک راهگشای ارائهٔ راهکارهای نوآورانه‌ای برای مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی است؛ راهکارهایی که ضمن حفظ هویت فرهنگی این شهر، به ارتقای پایداری آن نیز کمک شایانی می‌کند (تصویر ۳). به‌عنوان مثال، سازه‌های خشتی با بهره‌گیری از الهامات طبیعت، همچون پوشش‌های جاذب رطوبت الگوبرداری‌شده از گیاهان بیابانی یا پایه‌های توزیع‌کنندهٔ بار الهام‌گرفته از ساختارهای زیستی، می‌توانند به پایداری و استحکام بیشتری دست یابند. همچنین، پیاده‌سازی سیستم‌های سرمایشی غیرفعال الهام‌گرفته از هوشمندی تپه‌های موریانه‌ای، تحولی شگرف در تنظیم دمای داخلی ساختمان‌های بم ایجاد خواهد کرد. تلفیق این نوآوری‌ها با عناصر بومی نظیر حیاط‌های خنک و کوچه‌های سایه‌دار، به خلق ترکیبی هماهنگ از سنت و مدرنیته منجر خواهد شد و آینده‌ای پایدار را برای این شهر تاریخی رقم خواهد زد.

**• معماری بیونیک و معماری اکولوژیک: تفکیک مفاهیم و رویکردها**

اگرچه معماری بیونیک و معماری اکولوژیک، هر دو به‌دنبال ایجاد محیط‌های ساخته‌شده‌ای هستند که با طبیعت در تعامل سازگار باشند اما از نظر رویکرد نظری و روش‌شناسی عملی، تفاوت‌های قابل توجهی میان آن‌ها وجود دارد (تصویر ۴). معماری اکولوژیک با تمرکز بر کاهش اثرات مخرب انسان بر محیط‌زیست، به‌دنبال ایجاد بناها و




تصویر ۳. اصول و نوآوری‌های مرتبط با معماری بیونیک. مأخذ: نگارندگان.




تصویر ۴. تمایز بین اصول معماری بیونیک و اکولوژیک. مأخذ: نگارندگان.

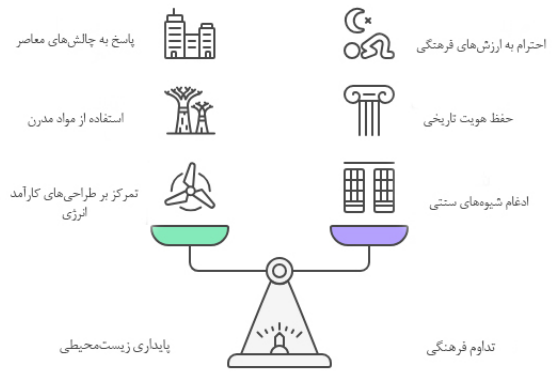
سازه‌هایی است که به‌طور پایدار با اکوسیستم‌های طبیعی همزیستی کنند (Williams, 2007). این رویکرد بر بهره‌وری از منابع، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و طراحی بناها متناسب با شرایط اقلیمی تأکید دارد. به‌عبارت‌دیگر، معماری اکولوژیک، بنا را به‌عنوان عضوی از یک سیستم اکولوژیکی بزرگ‌تر می‌بیند و به‌دنبال ایجاد تعادل بین نیازهای انسان و طبیعت است (Yannas, 2011). پیشگامانی چون کن یانگ (Young, 2021) بر اهمیت همسوکردن محیط‌های ساخته‌شده با اکوسیستم‌های طبیعی تأکید کرده‌اند و بر این باورند که با ایجاد روابط همزیستی میان انسان و طبیعت، می‌توان به بهبود سلامت زیست‌محیطی دست یافت. این رویکرد اغلب بر تحلیل تجربی سیستم‌های محیطی و استفاده از معیارهای عملکردی کمّی برای ارزیابی پایداری ساختمان‌ها متکی است (Orr, 2007).

در مقابل، معماری بیونیک با فراتر نهادن از محدودهٔ همزیستی با طبیعت، به‌طور فعالانه به تقلید از نبوغ و سازوکارهای موجودات زنده می‌پردازد (Yuan et al., 2017). این رویکرد با بهره‌گیری از دانش بیومیمتیک، به طراحی بناهایی می‌انجامد که مکانیزم‌های تطبیقی، خودکفایی و باززایی موجود در طبیعت را شبیه‌سازی می‌کنند (Vorobyeva, 2018). به‌عنوان مثال، بناهایی که با الهام از تپه‌های موریانه طراحی می‌شوند، قادر به تنظیم خودکار دمای داخلی هستند و موادی که با الگوبرداری از برگ‌های نیلوفر آبی تولید می‌شوند، خواص خودتمیزشوندگی و دفع آب را دارا هستند (Abd Ullah et al.,2018). این رویکرد، با اولویت قراردادن نوآوری‌های مبتنی‌بر اصول زیستی، پیشرفت‌های علمی در حوزه‌های مواد، رباتیک و مهندسی سیستم‌ها را یکپارچه می‌سازد و به خلق معماری‌ای می‌انجامد که نه‌تنها با محیط خود سازگار بلکه توانایی پیش‌بینی و تطبیق با شرایط متغیر محیطی را نیز دارا است (Sardá et al., 2023).

**• تداوم فرهنگی: پاسداری از هویت جمعی از طریق معماری**

تداوم فرهنگی، تضمینی است بر این که شیوه‌های معماری، ارزش‌های تاریخی، اجتماعی و زیبایی‌شناختی جامعه را گرامی داشته‌اند و به نسل‌های آینده منتقل سازد. آثار کریستوفر الکساندر (Alexander, 2004)، در کتابی چون «زبان الگو»، بر اهمیت گنجاندن روایت‌های فرهنگی و تاریخی در طراحی‌های معماری تأکید ورزیده است. این ادغام، نه‌تنها حس تعلق و هویت را در افراد تقویت می‌کند بلکه پاسخگوی نیازهای عملکردی و زیست‌محیطی نیز هست (Alexander, 2007, 14). میراث معماری شهر بم که با استفاده از خشت و طرح‌های حیاط‌محور شکل گرفته، آینه‌ای تمام‌نما از سازگاری چندین نسل با شرایط محیطی و اجتماعی است. این میراث ارزشمند، امروزه با چالش‌هایی همچون گسترش شهرنشینی، مدرنیزاسیون و جهانی‌شدن روبروست. آثار پیشگامانهٔ نادر خلیلی در ایران، پتانسیل تلفیق هوشمندانهٔ تکنیک‌های سنتی با نوآوری‌های معاصر را برای حفظ یکپارچگی فرهنگی این شهر به نمایش می‌گذارد. مفاهیم بدیع همچون «سوپرادوب» که توسط خلیلی ابداع شده است، نمونه‌های روشنی از احیای مواد و روش‌های سنتی برای کاربرد در این عصر هستند (داعی الله و انجم‌شعاع، ۱۳۸۸).

معماری بیونیک، با الهام از طبیعت، نقش پل ارتباطی میان حفاظت از میراث فرهنگی و دستیابی به پایداری زیست‌محیطی را ایفا می‌کند. طراحی‌های تطبیقی که با الهام از نقش‌مایه‌ها و مصالح بومی شکل می‌گیرند، نه‌تنها با هویت تاریخی شهر بم هم‌خوانی دارند بلکه به چالش‌های پیچیده معاصر نیز پاسخ می‌دهند (Wahl, 2006). اصول طراحی «گهواره تا گهوار» بر این باور استوار است که بازآفرینی صرف منابع کافی نبوده است و باید شیوه‌های فرهنگی و تعاملات اجتماعی نیز در فرایند طراحی و ساخت مدنظر قرار گیرند تا بتوان به معماری حقیقتاً پایدار دست یافت (Braungart et al., 2007). براساس دیدگاه بروکمایر و پیرس (Bruckmeier & Pires, 2018, 211)، معماری پایدار حقیقی، علاوه‌بر عملکرد زیست‌محیطی، باید به ارزش‌های فرهنگی ساختمان نیز توجه داشته باشد (تصویر ۵).

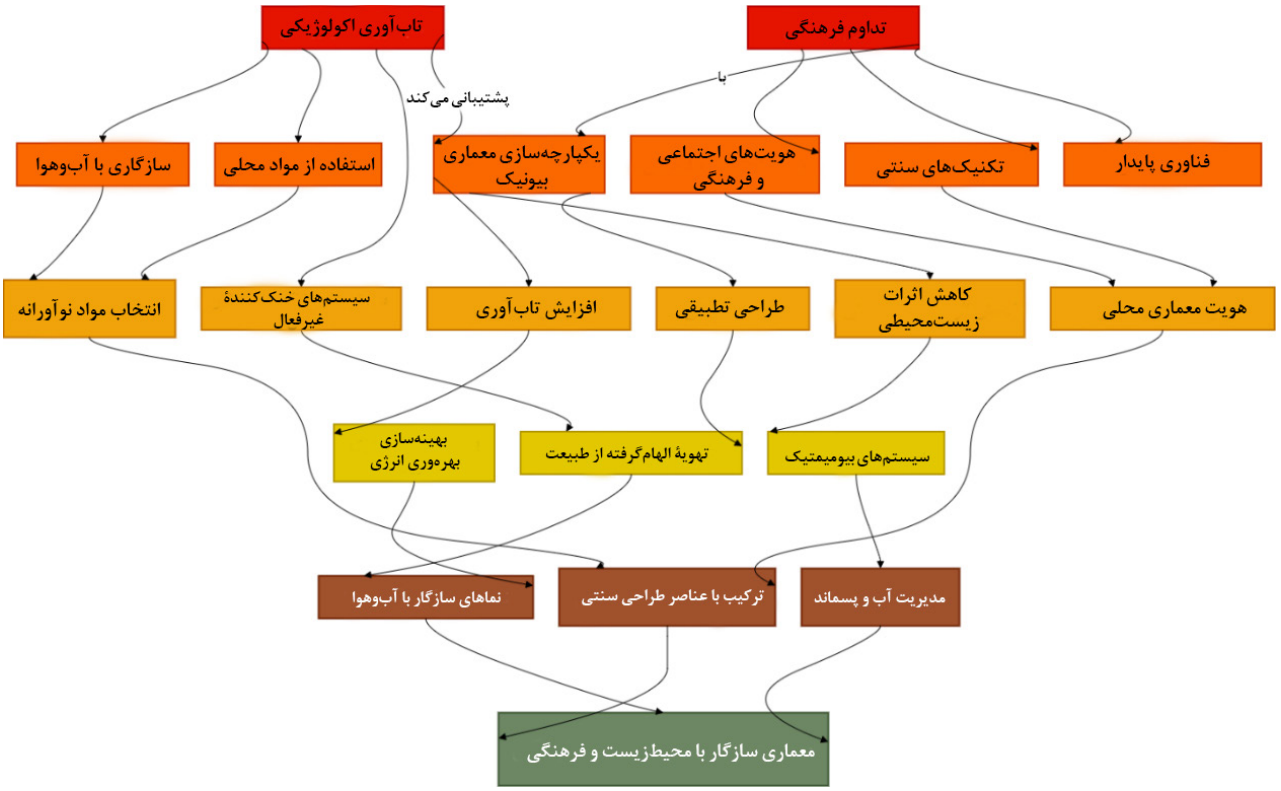



تصویر ۵. مدل مفهومی تعادل میان پایداری زیست‌محیطی و تداوم فرهنگی.
مأخذ: نگارندگان.

چارچوب نظری این گفتمان روی تلفیق دو اصل بنیادین تاب‌آوری اکولوژیک و تداوم فرهنگی در طراحی معماری، به‌ویژه در بافت تاریخی شهر بم، متمرکز شده است. این دو اصل، در تعامل با یکدیگر، رویکردی جامع برای ادغام اصول معماری بیونیک با معماری بومی فراهم می‌آورند. تاب‌آوری اکولوژیک تضمین می‌کند که ساختمان‌ها قادر به سازگاری با شرایط اقلیمی سخت منطقه باشند و درعین‌حال، اثرات زیست‌محیطی خود را به حداقل برسانند. ازسوی‌دیگر، تداوم فرهنگی نیز تضمین می‌کند که این طرح‌های نوین، با احترام به هویت تاریخی و فرهنگی شهر، به تقویت آن کمک کنند. در تصویر ۶ مدل نظری حاصل از مرور چارچوب نظری پژوهش نشان داده شده است. مدل پیشنهادی، تلفیقی بدیع از دانش معماری بیونیک، تاب‌آوری اکولوژیک و هویت فرهنگی است که با هدف ایجاد طرح‌های پایدار و همسو با بافت بومی شهر بم ارائه شده است. این مدل، با الهام از طبیعت و با تکیه بر دانش بومی، راهکاری نوین برای مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی و حفظ هویت فرهنگی شهرها ارائه می‌دهد. در این رویکرد، تاب‌آوری اکولوژیک از طریق استراتژی‌هایی همچون سازگاری با اقلیم خشک و کویری، بهره‌گیری از مصالح بومی و بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر محقق می‌شود. همزمان، تداوم فرهنگی با حفظ عناصر معماری سنتی و الگوهای رفتاری بومی تقویت می‌شود. معماری بیونیک، به‌عنوان پل ارتباطی این دو مؤلفه، با الهام از سازوکارهای طبیعی، راهکارهایی نوآورانه برای طراحی ساختمان‌ها و فضاهای شهری ارائه می‌دهد. این رویکرد، ضمن افزایش کارایی انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی، به احیای هویت فرهنگی و ایجاد حس تعلق در ساکنان نیز کمک می‌کند. در این مدل، بناها به‌عنوان موجودات زنده‌ای در نظر گرفته می‌شوند که با محیط اطراف خود تعامل پویا دارند. با استفاده از مصالح بومی و تکنیک‌های ساخت سنتی، ساختمان‌ها قادر خواهند بود تا با شرایط اقلیمی سخت منطقه سازگار شوند و آسایش حرارتی ساکنان را تأمین کنند. همچنین، با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و هوشمند، این بناها می‌توانند عملکرد انرژی خود را بهینه و به حداقل‌رساندن مصرف انرژی کمک کنند.

## روش پژوهش

در این مطالعه با اتخاذ رویکردی تلفیقی، تلاش شد به شناسایی چالش‌ها و تحلیل فرصت‌های ادغام معماری بیونیک با شیوه‌های معماری بومی سنتی در شهر بم به‌عنوان یکی از شهرهای اقلیم گرم‌وخشک ایران پرداخته شود. رویکرد اتخاذشده شامل شبیه‌سازی، مطالعات میدانی (مشاهده)، مصاحبه با متخصصان و افراد محلی است. در گام نخست، مطالعات میدانی به مدت یک هفته به انجام رسید تا داده‌های جامعی در خصوص گونه‌های زیستی منطقه، ازجمله گیاهان، جانوران و حشرات بومی شهر بم گردآوری شود. این داده‌ها با مشورت با سه تن از متخصصان زیست‌شناسی محلی و بهره‌گیری از منابع مکتوب تکمیل شد تا ویژگی‌های زیستی و بافتار منطقه و سازگاری آن‌ها با اقلیم گرم‌وخشک بم بررسی شود. افزون‌براین، مستندسازی تصویری از نمونه‌های برجای‌مانده از معماری سنتی شهر بم که عمدتاً در زلزلهٔ مهیب ۱۳۸۲ پابرجا مانده بودند، به انجام رسید. این تصاویر، تفاوت چشمگیری میان طراحی‌های معماری نوین و بقایای سبک‌های معماری بومی را به نمایش گذاشت. تصاویر ثبت‌شده، پس‌از گذراندن فرایند پیچیدهٔ پیش‌پردازش با نرم‌افزار OpenCV، برای تحلیل‌های تخصصی آماده شدند. در نخستین گام، تصاویر برای تعدیل تغییرات ناشی از نورپردازی و وضوح، نرمال‌سازی شدند. سپس، با بهره‌گیری از الگوریتم Canny ، ویژگی‌های ساختاری و تزئینی تصاویر استخراج شد. تکنیک‌های فیلترینگ، ازجمله فیلترهای گوسی و میانه، برای کاهش نویز و حفظ جزئیات کلیدی به کار گرفته شد. تحلیل بافت با استفاده از الگوهای باینری محلی (LBP)، به‌منظور کمّی‌سازی تغییرات بافتی منحصربه‌فرد در معماری بومی، به انجام رسید. الگوهای هندسی اصلی نیز با بهره‌گیری از تبدیل هوف[1] استخراج شده است تا اشکال غالب همچون طاق‌ها و گنبدها و نسبت‌های آن‌ها شناسایی شود. هدف از این پیش‌پردازش، استانداردسازی داده‌ها، حذف بایاس‌های احتمالی ناشی از شرایط محیطی هنگام عکاسی و افزایش دقت تحلیل‌های معماری و تخصصی توسط کارشناسان بود. در گام بعدی، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته‌ای با ۱۰ تن از متخصصان و معماران محلی انجام شد. از این تعداد، شش نفر در شهر بم ساکن بودند که شامل اعضای هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی و مهندسان مشاور متخصص




تصویر ۶. مدل نظری پژوهش. مأخذ: نگارندگان.

در معماری بومی می‌شدند. چهار نفر دیگر نیز از شهر کرمان بودند که سه نفر از آنها اعضای هیئت علمی دانشگاه کرمان و دانشگاه آزاد اسلامی کرمان با تخصص در معماری بیونیک و اکولوژیک بودند. تصاویر پیش‌پردازش‌شده همراه با داده‌های به‌دست‌آمده از گونه‌های زیستی بومی شهر بم، در اختیار این متخصصان قرار گرفت تا دربارهٔ هم‌خوانی الگوهای استخراج‌شده با اصول طراحی اکولوژیک و بیونیک، بحث‌ها و تحلیل‌های هدایت‌شده‌ای انجام شد. برای انتخاب نمونه‌های پژوهش از روش نمونه‌گیری هدفمند و گلوله برفی بهره گرفته شد. همچنین، برای تحلیل دقیق نقشهٔ معماری خانهٔ عامری‌ها، از دانش و تجربهٔ سه تن از متخصصان برجسته کرمانی بهره جسته شد. مشورت با این کارشناسان، دریچه‌ای نو به‌سوی درک نحوهٔ سازمان‌دهی فضایی، انتخاب مصالح و استراتژی‌های اقلیمی به‌کاررفته در این بنای تاریخی گشود. این رویکرد مشارکتی، دیدگاهی جامع از چگونگی پیاده‌سازی اصول معماری بیونیک و اکولوژیک در این بنا، چه به‌صورت آگاهانه و چه به‌صورت ناخودآگاه، فراهم آورد. جهت درک عمیق‌تر از ادراکات عمومی و دیدگاه‌های مردم محلی، مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته‌ای با ۱۳ تن از سالمندان ساکن شهر بم انجام شد. هدف از این مصاحبه‌ها، استخراج دانش بومی و تفاسیر محلی پیرامون تلفیق اصول زیستی در معماری بومی بود. داده‌های کیفی حاصل از هر دو گروه مصاحبه‌ها، با بهره‌گیری از نرم‌افزار ATLAS T.I تحلیل شد که امکان کدگذاری موضوعی و استخراج اصول کلیدی طراحی را فراهم آورد.

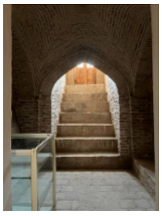
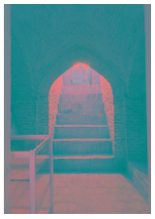
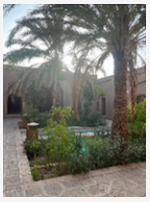
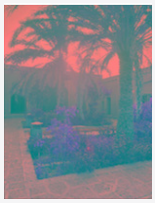
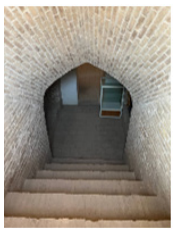
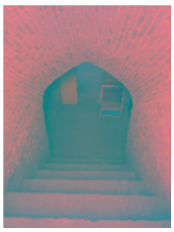
## یافته‌های پژوهش

در زیرمطالعهٔ نخست با بهره‌گیری از مطالعات میدانی، تحلیل محاسباتی تصاویر و مصاحبه با متخصصان، به بررسی گونه‌های زیستی و ویژگی‌های آن، معماری بومی شهر بم و نحوهٔ ادغام معماری بیونیک و اصول آن با معماری بومی شهر بم پرداخته شد. نتایج حاصل از این بخش در جدول ۱ ارائه شده است.

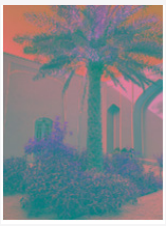
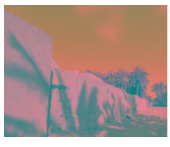
آمیزش هنر معماری بیونیک با بافت سنتی بم، افقی نوین را پیش روی می‌گشاید؛ افقی که در آن، محیطی پایدار و همساز با فرهنگ بومی در دل کویر پدید می‌آید. معماری بومی شهر بم، با دیوارهای خشتی، کوچه‌های تنگ، سقف‌های طاقی و گنبدی، گنجینه‌ای از راهکارهای خنک‌سازی طبیعی و بهره‌گیری از جرم حرارتی است. این عناصر، همسو با اصول بیونیک، از سیستم‌های زیستی چون تپه‌های موریانه، کاکتوس و حلزون‌های بیابانی الهام می‌گیرند؛ سیستم‌هایی که بر مدیریت جریان هوا، دفع گرما و ذخیرهٔ رطوبت در اقلیم‌های سخت، تسلط دارند.

برای نمونه، الگوبرداری از سیستم تهویهٔ تپه‌های موریانه و

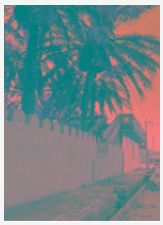
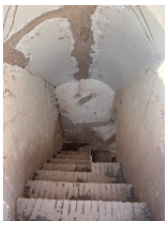
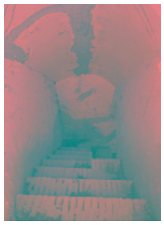
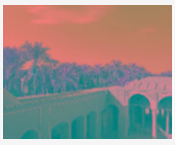
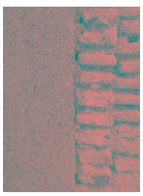
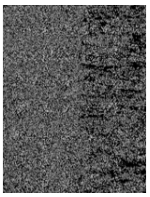
جدول ۱. الهامات زیستی و راهکارهای پیشنهادی بیونیک برای معماری بومی در شهر بم. مأخذ: نگارندگان.

| ردیف | مصداقی از معماری بومی شهر بم | الگوی زیستی (بیونیک) | ادغام معماری بیونیک با معماری بومی شهر بم | تصاویر پردازش‌شده | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | تصویر اصلی | فضای رنگ آزمایشگاهی | تشخیص لبه |
| ۱ | - در برابر باد مقاوم و توزیع بارهای سازه‌ای به‌صورت یکنواخت است.<br>- خنک‌سازی غیرفعال و گردش طبیعی هوا در فضای داخلی به‌سهولت انجام می‌شود.<br>- گردش کنترل‌شدهٔ هوا برای خنک‌سازی داخلی بدون ورود گرمای اضافی امکانپذیر است.<br>- در برابر نفوذ شن در اقلیم‌های بیابانی محافظت شده است. | - پوستهٔ لاک‌پشت: نسبت بهینهٔ استحکام به وزن<br>- شکل کاکتوس: سازگاری با اقلیم‌های سخت برای دفع گرما.<br>- تپه‌های موریانه‌ای: برج‌های تهویه برای حفظ تعادل حرارتی داخلی.<br>- لانه پرندگان: موقعیت استراتژیک بازشوها برای تنظیم جریان هوا. | - استفاده از مواد بازتاب‌دهندهٔ گرما الهام‌گرفته از پوست کاکتوس برای بهبود خنک‌سازی. طراحی گنبدهای آیرودینامیک برای مقاومت در برابر باد در مناطق خشک.<br>- طراحی بازشوهای تهویهٔ بهینه براساس مدل تپه‌های موریانه برای تنظیم جریان هوا.<br>- توسعهٔ مکانیسم‌های تهویهٔ قابل تنظیم الهام‌گرفته از لانهٔ پرندگان برای سازگاری اقلیمی. | | | |
| ۲ | - طاق‌ها و قوس‌ها در معماری بومی بم (مانند بازارها و خانه‌های تاریخی) از الگوهای آجری برای راحتی حرارتی و پایداری سازه‌ای استفاده می‌کنند.<br>- این فضاها با کاهش تجمع حرارت، دماهای خنک‌تری را حفظ می‌کنند. | - تپه‌های موریانه‌ای استفاده از کانال‌های داخلی برای تنظیم جریان هوا و کاهش تجمع حرارت.<br>- ریشه‌های نخل: ایجاد پایداری در خاک‌های سست از طریق ساختارهای متصل در زیرزمین. | - ایجاد مسیرهای تهویه در فضاهای طاق‌دار، الهام‌گرفته از سیستم‌های جریان هوای تپه‌های موریانه برای کاهش تجمع حرارت به‌صورت طبیعی.<br>- استفاده از الگوهای آجری متصل الهام‌گرفته از ریشه‌های نخل برای بهبود پایداری سازه‌ای و مقاومت در برابر زلزله. |  |  | |
| ۳ | - باغ‌های سنتی ایرانی، مانند باغ‌های واقع در بم، شامل حیاط‌هایی با آب‌نماها و پوشش گیاهی برای ایجاد خرداقلیم‌هایی هستند که گرما را کاهش می‌دهند.<br>- درختان نخل سایه‌اندازی می‌کنند، سرعت باد را کاهش می‌دهند و به خنک‌سازی محیط کمک می‌کنند. | - برگ‌های نخل (Gutterman,2002): ساختارهای هم‌پوشان سایه‌اندازی را بهینه می‌کنند و تهویه را ممکن می‌سازند.<br>- گیاهان بیابانی: سازگاری برای ذخیرهٔ آب و مقاومت در برابر گرما، مانند برگ‌های مومی و ریشه‌های عمیق. | - استفاده از سیستم‌های سایه‌اندازی الهام‌گرفته از نخل برای گسترش اثر سایه‌اندازی در نمای ساختمان و سقف‌ها.<br>- به‌کارگیری استراتژی‌های گیاهان بیابانی در طراحی محوطه‌سازی حیاط برای کاهش مصرف آب و حفظ مزایای خنک‌سازی |  |  | |
| ۴ | - سقف‌های طاقی در معماری ایرانی، مانند ساختمان‌های تاریخی بم، انتقال حرارت را کاهش و کارایی سازه‌ای را افزایش می‌دهند.<br>- مصالح آجری جرم حرارتی بالایی دارند که دماهای داخلی را پایدار می‌سازد. | - تپه‌های موریانه‌ای: استفاده از شبکه‌های تهویه برای خنک‌سازی غیرفعال.<br>- اسکلت بیرونی سوسک: لایه‌بندی‌های سبک اما مستحکم برای افزایش پایداری سازه. | - طراحی مسیرهای جریان هوا در سقف‌های طاق‌دار الهام‌گرفته از تهویهٔ تپه‌های موریانه برای بهبود جریان هوا و خنک‌سازی.<br>- تقویت سازه‌های طاقی با الگوهای آجری لایه‌ای شبیه اسکلت بیرونی سوسک برای افزایش مقاومت در برابر زلزله. |  |  | |

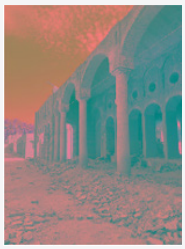
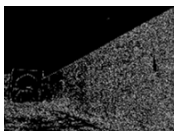
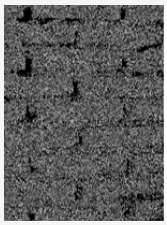
ادامهٔ جدول ۱.

| ردیف | مصداقی از معماری بومی شهر بم | الگوی زیستی (بیونیک) | ادغام معماری بیونیک با معماری بومی شهر بم | تصاویر پردازش‌شده | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | تصویر اصلی | فضای رنگ آزمایشگاهی | تشخیص لبه |
| ۵ | - حیاط‌های سنتی در بم از پوشش گیاهی مانند نخل‌ها و بوته‌ها برای کاهش گرما و ایجاد مناطق سایه‌دار استفاده می‌کنند.<br>- تاج درخت نخل به‌عنوان عنصری طبیعی برای سایه‌اندازی و بهبود شرایط خرداقلیم عمل می‌کند. | - تاج نخل: سایه هم‌پوشان فراهم می‌کند و تابش مستقیم خورشید را کاهش می‌دهد.<br>- درختان مرکبات: با تعریق تبخیری، هوا را خنک و در باغ‌های سنتی ایرانی میوه فراهم می‌کنند. | - توسعهٔ پرگولاهای سبک با طراحی‌های الهام‌گرفته از برگ‌های نخل برای گسترش سایه در حیاط‌ها.<br>- معرفی ترکیب گیاهان مقاوم به خشکی مانند مرکبات و بوته‌ها برای افزایش خنک‌سازی هوا و کاهش مصرف آب. | |  | |
| ۶ | - گنبدهای بم، مانند سازه‌هایی که در یخچال‌ها استفاده می‌شوند، با هندسهٔ فشرده و عایق‌بندی‌شده، جذب حرارت خورشیدی را به حداقل می‌رسانند.<br>- دیوارهای ضخیم خشتی با جرم حرارتی بالا، در روزهای گرم خنک و در شب‌های سرد گرم باقی می‌مانند. | - پوستهٔ حلزون بیابانی: جذب حرارت را با سطوح بازتابنده و شکل مارپیچی کاهش می‌دهد.<br>- خارهای کاکتوس: حرارت را دفع و سایه‌اندازی ایجاد می‌کند. | - اعمال پوشش‌های بازتابنده بر سطح گنبد، الهام‌گرفته از حلزون‌های بیابانی برای کاهش جذب خورشیدی.<br>- افزودن شیارها یا برجستگی‌هایی روی دیوارهای خارجی الهام‌گرفته از خارهای کاکتوس برای دفع حرارت، در عین حفظ زیبایی سنتی گنبد. | | | |
| ۷ | - مسیرهای باریک، نمونه‌ای از معماری سنتی بم، برای ایجاد سایه، کاهش تابش خورشید و خنک‌سازی طراحی شده‌اند و از تابش مستقیم جلوگیری می‌کنند.<br>- سنگ‌فرش دوام بالایی در شرایط خشک دارد و گردوغبار و بازتاب حرارت را کاهش می‌دهد.<br>- دیوارهای خشتی با جرم حرارتی بالا، دمای داخلی را تثبیت می‌کنند و نوسانات دمای شدید بیرون را کاهش می‌دهند. | - تونل‌های مورچه‌های صحرایی: این تونل‌ها جریان هوا و کنترل دما را در طراحی فشرده حفظ می‌کنند.<br>- پوست شتر: به‌عنوان عایق عمل می‌کند و جذب گرما و ازدست‌دادن رطوبت را کاهش می‌دهد.<br>- پوست مار: ساختار هم‌پوشان آن جذب حرارت را به حداقل رسانده و دوام و انعطاف را فراهم می‌کند. | - افزودن مسیرهای تهویه در دیوارهای خشتی الهام‌گرفته از تونل‌های مورچه‌های صحرایی برای بهبود جریان هوا و خنک‌سازی مسیرها.<br>- تقویت سنگ‌فرش با بافت‌های الهام‌گرفته از پوست مار برای کاهش خطر لغزش و بهبود دفع حرارت.<br>- استفاده از پوشش‌های زیستی الهام‌گرفته از پوست شتر برای بهبود عایق‌کاری دیوارها، کاهش ترک‌خوردگی و کاهش نیاز به نگهداری. | | | |
| ۸ | - دیوار خشتی نشان‌دهندهٔ عایق‌کاری حرارتی سنتی است که به‌طور مؤثر شرایط گرمای شدید را تعدیل می‌کند.<br>- سایه‌های درخت نخل با خنک‌سازی غیرفعال، دیوار را از تابش مستقیم خورشید محافظت می‌کنند.<br>- نزدیکی به پوشش گیاهی (نخلستان‌ها) خرداقلیم ایجاد می‌کند و دماهای محیطی را کاهش می‌دهد. | - پشم روباه بیابانی (whitford,2002): پشم متراکم و رنگ روشن نور خورشید را بازتاب می‌دهد و گرمای داخلی بدن را تنظیم می‌کند.<br>- دنده‌های کاکتوس: سایه ایجاد، گرما را دفع می‌کنند و جریان هوا را بهبود می‌بخشند.<br>- ریشه‌های درخت بائوباب: رطوبت را ذخیره می‌کنند و در دوره‌های خشک طولانی دوام می‌آورند. | - اعمال پوشش‌های زیستی با خواص بازتاب‌دهنده و عایق‌کاری، الهام‌گرفته از - پشم روباه بیابانی برای کنترل حرارت.<br>- معرفی طراحی‌های زیستی برای گسترش دیوار (مانند دنده‌های سایه‌زن براساس خارهای کاکتوس) برای بهبود جریان هوا و خنک‌سازی.<br>- افزودن مخازن ذخیرهٔ رطوبت در پایهٔ دیوارها الهام‌گرفته از ریشه‌های بائوباب برای تنظیم رطوبت محیط و بهبود خرداقلیم. | |  | |

ادامهٔ جدول ۱.

| ردیف | مصداقی از معماری بومی شهر بم | الگوی زیستی (بیونیک) | ادغام معماری بیونیک با معماری بومی شهر بم | تصاویر پردازش‌شده | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | تصویر اصلی | فضای رنگ آزمایشگاهی | تشخیص لبه |
| ۹ | - دیوارهای خشتی با جرم حرارتی بالا برای عایق‌بندی گرما بسیار مناسب هستند و در اقلیم‌های گرم‌وخشک مانند بم اهمیت بالایی دارند.<br>- سایه‌های ایجادشده توسط درختان نخل اثر خنک‌کنندگی ایجاد می‌کنند و دمای سطح را کاهش می‌دهند.<br>- ادغام پوشش گیاهی کیفیت هوا را بهبود بخشیده و به ایجاد خرداقلیم محلی کمک می‌کند. | - تار عنکبوت: ماده‌ای قوی اما سبک برای ایجاد سازه‌های کششی سایه‌دار.<br>- ساختار کاکتوس (Ward, 2009): بهینه‌سازی ذخیرهٔ آب و سایه‌اندازی. | - کاشت پوشش‌های گیاهی مقاوم به خشکی، الگوبرداری‌شده از سیستم‌های کاکتوسی، در نزدیکی دیوارها برای ایجاد یک سد خنک‌کنندهٔ مداوم.<br>- معرفی سازه‌های سایه‌دار کششی الهام‌گرفته از تار عنکبوت برای افزایش مناطق سایه و کاهش هزینه‌های مواد. | |  | |
| ۱۰ | - سقف‌های طاقی در پایداری سازه‌ای بسیار مؤثرند و بار را به‌صورت یکنواخت توزیع می‌کنند و نوسانات دمایی را کاهش می‌دهند.<br>- راه‌پله که به‌طور طبیعی خنک‌تر و کمتر در معرض نور خورشید است، آسیب به گچ دیوارها، قابلیت بازتاب و عایق‌کاری حرارتی آن‌ها را کاهش می‌دهد. | - ساختار کندوی زنبور عسل: ساختارهای شش‌ضلعی، بار را به‌طور کارآمد توزیع و تهویه را حفظ می‌کنند.<br>- تپه‌های موریانه‌ای: جریان هوای طبیعی و دفع حرارت را در طراحی‌های فشرده امکان‌پذیر می‌کنند. | - تقویت طاق‌ها با الگوهای ساختاری شش‌ضلعی براساس کندوهای زنبور برای افزایش استحکام و کاهش وزن سازه.<br>- ایجاد کانال‌های کوچک جریان هوا الهام‌گرفته از تپه‌های موریانه برای تهویهٔ مناسب و کاهش گرمای داخلی. |  |  | |
| ۱۱ | - نخلستان‌های متراکم به‌عنوان بادشکن طبیعی عمل می‌کنند و طوفان‌های شنی را کاهش می‌دهند و سایه‌ای خنک فراهم می‌کنند.<br>- معماری طاق‌دار پایداری سازه‌ای را تضمین می‌کند و نفوذ مستقیم نور خورشید به ساختمان را به حداقل می‌رساند.<br>- این ترکیب طبیعت و طراحی، رابطهٔ هماهنگ بین محیط ساخته‌شده و طبیعی را نشان می‌دهد. | - ساختار نخل: ذخیرهٔ آب کارآمد و مقاومت در برابر اقلیم‌های خشک.<br>- غشای بال خفاش: لایه‌های نازک اما بادوام که جریان هوا را با حداقل مواد به حداکثر می‌رسانند.<br>- پوستهٔ لاک‌پشت: ساختارهای لایه‌ای برای توزیع بار و عایق‌کاری حرارتی. | - طراحی غشاهای سقفی سبک الهام‌گرفته از بال خفاش برای بهبود جریان هوا در زیر طاق‌ها.<br>- معرفی مواد ترکیبی لایه‌ای الهام‌گرفته از پوستهٔ لاک‌پشت برای تقویت سقف و بهبود عایق‌کاری.<br>- استفاده از الیاف نخل در ساخت‌وساز برای کاربردهای سازگار با محیط‌زیست و اقلیم. | |  | |
| ۱۲ | - بافت دیوار نمایانگر آجرهای خشتی محلی است که تکنیک‌های سنتی سازگار با اقلیم گرم‌وخشک بم را برجسته می‌کند.<br>- فواصل و بی‌نظمی‌های طبیعی سطح، عایق‌کاری و تهویه را بهبود می‌بخشند. | - تپهٔ مورچه‌ها: تونل‌های پیچیده برای تنظیم حرارتی.<br>- ساختار منقار دارکوب: لایه‌بندی مقاوم در برابر ضربه. | - معرفی دیوارهای دولایه الهام‌گرفته از طراحی تپه‌های مورچه برای بهبود خنک‌سازی غیرفعال و عملکرد حرارتی.<br>- افزودن خواص جذب شوک به خشت با استفاده از ترکیبات زیستی مانند کاه و خاک رس، الهام‌گرفته از ساختار لایه‌ای منقار دارکوب. | |  |  |

ادامهٔ جدول ۱.

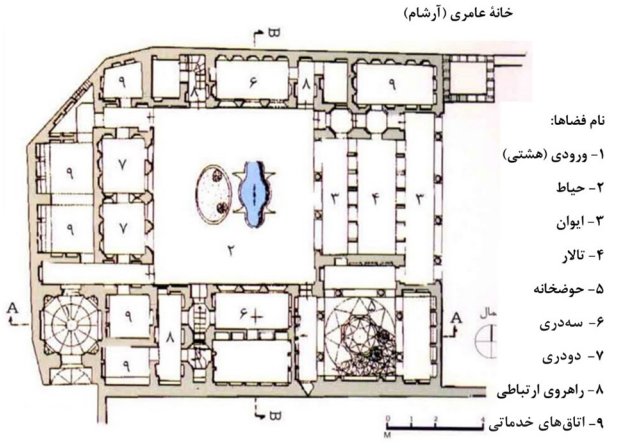
| ردیف | مصداقی از معماری بومی شهر بم | الگوی زیستی (بیونیک) | ادغام معماری بیونیک با معماری بومی شهر بم | تصاویر پردازش‌شده | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | تصویر اصلی | فضای رنگ آزمایشگاهی | تشخیص لبه |
| ۱۳ | - طراحی طاقی و چارچوب مبتنی‌بر ستون‌ها پایداری سازه‌ای و توزیع مؤثر بار را نشان می‌دهد.<br>- این طراحی، فضاهای سایه‌دار ایجاد می‌کند و تابش گرمای خورشید را در اقلیم‌های گرم‌وخشک مانند بم کاهش می‌دهد. | - هندسهٔ کندویی: نسبت مقاومت به وزن بالا و استفادهٔ کارآمد از مواد.<br>- کوهان شتر: ذخیرهٔ انرژی و حفظ دما. | - اعمال هندسهٔ کندویی برای بهبود یکپارچگی سازه‌ای در عین کاهش مصرف مواد و ساخت ستون‌های سبک‌تر و مقاوم‌تر.<br>- ادغام سیستم‌های ذخیرهٔ حرارت الهام‌گرفته از کوهان شتر که به دیوارها اجازه می‌دهد دماهای داخلی را به‌طور مؤثر تنظیم کنند. | |  | |
| ۱۴ | - جرم و ترکیب مواد دیوار (گل یا خشت) عایق حرارتی مطلوبی را فراهم می‌کند که برای اقلیم‌های گرم مانند بم مناسب است. - بازشوها به‌عنوان دریچه‌های ساده برای گردش هوا یا تخلیه عمل می‌کنند. | - تپه‌های موریانه‌ای: سیستم‌های تنظیم حرارتی و تهویهٔ کارآمد.<br>- خارهای کاکتوس: کاهش جذب حرارت و تأمین استحکام ساختاری. | - طراحی سیستم تهویهٔ غیرفعال پیشرفته الهام‌گرفته از تپه‌های موریانه، شامل شبکه‌ای از گذرگاه‌های هوای به‌هم‌پیوسته.<br>- افزودن الگوهای سطح خارجی الهام‌گرفته از خارهای کاکتوس برای کاهش جذب گرمای خورشیدی. | | |  |
| ۱۵ | - الگوی چیده‌شدهٔ آجر روش‌های ساخت سنتی را بازتاب می‌دهد که استحکام سازه‌ای و جرم حرارتی را فراهم می‌کند.<br>- فاصلهٔ بین آجرها پتانسیل تهویهٔ هوا یا حرکت مواد را افزایش می‌دهد و عایق‌بندی را بهبود می‌بخشد. | - کندوی عسل: آرایش کارآمد مواد برای استحکام و تهویه.<br>- پوست مار: الگوهای هم‌پوشان برای انعطاف‌پذیری و حفاظت حرارتی. | - استفاده از چیدمان الهام‌گرفته از کندو برای ایجاد مواد سبک اما بادوام و بهبود عایق‌بندی.<br>- توسعهٔ سیستم مدولار آجرهایی که الگوهای هم‌پوشان پوست مار را برای تنظیم حرارتی تطبیقی تقلید می‌کنند. | | |  |
| ۱۶ | - بارهای سازه‌ای را به‌طور کارآمد توزیع می‌کنند و در عین کاهش مصرف مواد، پایداری را حفظ می‌کنند.<br>- جریان هوا و نور طبیعی را ترویج می‌دهند که برای اقلیم‌های گرم مناسب است. | - تار عنکبوت: کارایی سازه‌ای با حداقل مواد.<br>- رگ‌برگ‌های برگ: توزیع بار از طریق الگوهای حداقلی اما قوی. | - استفاده از شکل‌های تطبیقی طاق الهام‌گرفته از رگ‌برگ‌های برگ برای ایجاد سیستم‌های باربر قوی‌تر و سبک‌تر.<br>- اجرای دستگاه‌های سایه‌اندازی خورشیدی در طاق‌ها برای تنظیم شدت نور خورشید. | | | |

ساختار لایه‌های خارجی سوسک‌ها در طراحی سقف‌های طاقی و گنبدی، نه‌تنها عملکرد حرارتی این سازه‌ها را ارتقا می‌بخشد بلکه استحکام ساختاری آن‌ها را نیز تضمین می‌کند. همچنین، به‌کارگیری خارهایی با الهام از کاکتوس برای دفع گرما و پوشش‌های بازتابنده‌ای با الهام از پوستهٔ حلزون‌ها برای کاهش جذب حرارت، ضمن حفظ زیبایی‌شناسی سنتی، راهکارهای نوینی را برای بهبود عملکرد اقلیمی بناها ارائه می‌دهد. این هم‌افزایی، نه‌تنها به پاسداری از میراث معماری این شهر کهن می‌انجامد بلکه تاب‌آوری آن را در برابر چالش‌های اقلیمی افزایش می‌دهد. بااین‌وجود، این هم‌گرایی با چالش‌هایی چندلایه مواجه است که می‌طلبد به سازگاری مواد، حفاظت از میراث فرهنگی و مقیاس‌پذیری توجهی ویژه مبذول شود. گذار از مصالح سنتی همچون خشت به کامپوزیت‌های زیست‌الهام یا پوشش‌های

نانو، نگرانی‌هایی را مبنی‌بر حفظ یکپارچگی زیبایی‌شناختی و اصالت ساختاری بناها بر می‌انگیزد. علاوه‌بر این، بهره‌مندی از سازگاری‌های بیونیک نظیر سیستم‌های جریان هوای الهام‌گرفته از طبیعت یا مواد خودترمیمی، مستلزم پژوهش‌ها و آزمایش‌های گسترده‌ای است تا از کارایی بلندمدت آن‌ها در شرایط سخت اقلیمی همچون دمای بالا، بادهای شدید و زلزله‌های محتمل در منطقهٔ بم اطمینان حاصل شود. چالش دیگر، برقراری تعادل میان مزایای زیست‌محیطی طراحی‌های بیونیک و مقرون‌به‌صرفه‌بودن اقتصادی اجرای این فناوری‌های نوین در منطقه‌ای تاریخی اما کم‌برخوردار است. مواجهه با این چالش‌ها، ضرورت رویکردی چندجانبه را می‌طلبد که حفاظت از میراث معماری را با پیشرفت‌های دانش مواد، مهندسی سازه و روانشناسی محیطی تلفیق کند و راهکارهایی ارائه دهد که هم با بافت بومی سازگار باشد و هم پایداری بلندمدت را تضمین کند.

از منظر زیست‌محیطی و فرهنگی، تلفیق اصول طراحی زیستی در معماری بم، فرصتی را برای بازاندیشی دربارهٔ پایداری شهری و پاسداری از میراث این شهر تاریخی فراهم می‌آورد. طراحی زیست‌محیطی الهام‌گرفته از نظام‌های طبیعی چون نخلستان‌ها و تپه‌های موریانه، می‌تواند بهینه‌سازی سایه‌اندازی، تهویه و مدیریت آب را در پی داشته و به‌طور مستقیم بر بهبود ریزاقلیم اثرگذار باشد. به‌عنوان مثال، طراحی حیاط‌هایی با پوشش گیاهی سازگار با خشکی و سامانه‌های سایه‌اندازی برگرفته از طبیعت، آسایش حرارتی را فزونی می‌بخشد و مصرف آب را کاهش می‌دهد. همچنین، تلفیق عناصری همچون دیوارهای سبز الهام‌گرفته از ریشه‌های درختان بائوباب و پوشش‌های بازتابندهٔ زیستی روی سطوح خشتی، می‌تواند به‌طور چشمگیری استرس گرمایی را کاهش و بهره‌وری انرژی و آسایش درونی را افزایش دهد. با بهره‌گیری از راهکارهای طبیعت‌محور که با ارزش‌های فضایی و زیبایی‌شناختی سنتی معماری بم هم‌خوانی دارد.

زلزلهٔ سال ۱۳۸۲، ضربه‌ای بر پیکرهٔ معماری سنتی شهر بم وارد کرد و شکافی عمیق بر هویت فرهنگی و زیست‌محیطی این نگین کویر نشاند. بازسازی‌های پس‌از زلزله، عمدتاً با اتکا بر رویکردهای نوین معماری انجام شد، رویکردهایی که اغلب اصول بنیادین معماری بومی را که طی قرون متمادی در هم‌آمیزی با اقلیم گرم‌وخشک بم و بافت فرهنگی غنی آن شکل گرفته بود، نادیده انگاشتند. در این میان، نمونه‌های برجای‌مانده از معماری کهن، همچون خانهٔ تاریخی عامری‌ها (تصویر ۷)، دریچه‌ای است به‌سوی درک استراتژی‌های زیست‌محیطی و الهام‌گیری از طبیعت در طراحی‌های تاریخی. در این بخش از مقاله با رویکردی تحلیلی بر نقشهٔ




تصویر ۷. نمایی از پلان معماری خانهٔ عامری‌ها در شهر بم. مأخذ: گلپایگانی، ۱۳۸۶.

معماری خانهٔ عامری‌ها یکی از نمونه‌های فاخر معماری بومی در شهر بم، میزان تطابق طراحی آن با اصول معماری بیونیک و اکولوژیک را، چه به‌صورت آگاهانه و چه به‌صورت ناخودآگاه، کنکاش می‌کنند.

طراحی خانهٔ عامری‌ها، با محوریت حیاط مرکزی (حوضخانه) به‌عنوان عنصری کلیدی، گواهی بر درک ژرف معماران ایرانی از اصول پایدار معماری است. این حیاط که به‌مثابهٔ قلب تپندهٔ بناست، با حوض آبی و باغچه، میکروکلیمایی را در دل ساختمان پدید آورده است. فرایند تبخیر آب از سطح حوض، در کنار سایه‌های گستردهٔ ایجادشده توسط بناهای پیرامونی، موجب خنک‌شدن قابل توجه هوای حیاط و فضاهای مجاور می‌شود. این شیوهٔ خنک‌سازی که بر پایهٔ اصول طبیعی استوار است، نه‌تنها وابستگی به سیستم‌های سرمایشی مصنوعی را به حداقل می‌رساند بلکه الگویی روشن از الهام‌گیری از طبیعت و تقلید از سازوکارهای طبیعی در معماری است.

پلان خانهٔ عامری‌ها، روایتی از یک توالی فضایی تدریجی است که از ورودی (هشتی) آغاز و به‌تدریج به فضاهای نیمه‌خصوصی و خصوصی منتهی می‌شود. این ترتیب فضایی هوشمندانه، همچون پوستی محافظ، از نفوذ مستقیم شرایط سخت اقلیمی به عمق بنا جلوگیری می‌کند و فضایی آرام و مطبوع را برای ساکنان فراهم می‌آورد. به‌کارگیری سیستم‌های چنددری (سه‌دری و دودری) نیز بر انعطاف‌پذیری این سازه می‌افزاید و امکان تنظیم جریان هوا و نور را براساس تغییرات فصلی فراهم می‌سازد. این تقسیم‌بندی فضایی دقیق و حساب‌شده، شباهت شگفت‌آوری به استراتژی‌های تطبیقی در سیستم‌های زیستی دارد؛ جایی که لایه‌ها و غشاها برای بهینه‌سازی تعامل با محیط طراحی شده‌اند. این تطابق ناخودآگاه با اصول طراحی بیونیک، گواهی بر نبوغ معماران ایرانی در بهره‌گیری از دانش بومی و تلفیق آن با الهام از طبیعت است.

گنبدها و طاق‌های استوار که در سراسر معماری سنتی ایران

دلالت دارد. این سازگاری ژرف، نشان از درک عمیق معماران ایرانی از اصول طراحی پایدار و بهره‌گیری از طبیعت دارد. یافته‌های این پژوهش فرصتی طلایی است تا با الهام از طبیعت، گام‌های مؤثری در جهت بازآفرینی بافت شهری بم برداشته شود، بی‌آنکه به هویت تاریخی آن خدشه‌ای وارد آید. حیاط مرکزی خانهٔ عامری‌ها، به‌عنوان نمونه‌ای بارز، نه‌تنها نقش یک تنظیم‌کنندهٔ اقلیمی کارآمد را ایفا می‌کند بلکه الگویی از سازمان‌دهی فضایی لایه‌به‌لایه را ارائه می‌دهد که شباهت بسیاری به ساختار اکوسیستم‌های طبیعی دارد. این امر، پتانسیل بالای معماری بیومیمتیک در تقویت پایداری شهری را به‌روشنی نشان می‌دهد؛ همان‌گونه که در نمونه‌های جهانی همچون مرکز ایست‌گیت زیمبابوه (Solano et al., 2023) به عیان دیده می‌شود.

علم مواد و نوآوری‌های الهام‌گرفته از طبیعت؛ کلید بازآفرینی پایدار بم: دانش مواد و نوآوری‌های بیومیمتیک، دریچه‌ای نو به‌سوی رفع چالش‌های ساخت‌وساز سنتی در شهر تاریخی بم می‌گشاید. پژوهش‌های پیشین (Goldust & Ahmadnejad Karimi, 2022) نشان داده‌اند که الگوهای باربری پیچیده در تنهٔ درختان و بال‌های حشرات، الهام‌بخش طراحی کامپوزیت‌های پیشرفتهٔ خشتی هستند. به‌عنوان مثال، مواد خودترمیم‌شونده که از مکانیسم‌های ترمیم در موجودات زنده الهام گرفته‌اند، می‌توانند عمر مفید سازه‌های خشتی را به‌طور چشمگیری افزایش دهند. همچنین، پوشش‌های بازتابندهٔ نور که از ساختار پوستهٔ سوسک‌ها الگوبرداری شده‌اند، می‌توانند میزان جذب گرمای ساختمان‌ها را کاهش دهند و به بهبود شرایط آسایش ساکنان کمک کنند. این نوآوری‌ها نه‌تنها عملکرد بناها را ارتقا می‌دهند بلکه با هویت فرهنگی و زیبایی‌شناختی شهر بم نیز همخوانی دارند.

بم؛ الگویی برای ساخت شهری پایدار بر پایه طبیعت: همزیستی تاریخی سیستم‌های آبیاری قنات، نخلستان‌های سرسبز و باغ‌های سایه‌دار در شهر بم، چارچوبی مستحکم برای تبیین اصول بیومیمتیک در معماری شهری فراهم می‌آورد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که با الهام از این میراث غنی، می‌توان زیرساخت‌های شهری نوینی را طراحی کرد که همسو با طبیعت باشند. برای نمونه، می‌توان از سیستم‌های سایه‌اندازی الهام گرفت که عملکردی مشابه درختان بائوباب دارند یا کریدورهای سبز شهری را طراحی کرد که شباهت بسیاری به شبکهٔ ریشهٔ گیاهان بیابانی دارند. چنین رویکردی نه‌تنها به کاهش اثرات جزایر گرمایی شهری کمک شایانی می‌کند بلکه به افزایش تنوع زیستی و بازگرداندن تعادل زیست‌محیطی این منطقه نیز منجر خواهد شد. این یافته‌ها کاملاً همسو خودنمایی می‌کنند، بی‌شک در خانهٔ عامری‌ها نیز حضوری پررنگ دارند؛ چنانچه از نقشهٔ آن بر می‌آید. این سازه‌ها با توزیع بارهای وارده و کاهش مصرف مصالح، گواهی بر نبوغ معماران ایرانی است. این رویکرد سازه‌ای، الهام‌گرفته از طبیعت است؛ جایی که پوسته‌ها و سایبان‌های درختان، با هندسه‌ای دقیق و کارآمد، از موجود زنده محافظت می‌کنند. تکرار ریتمیک اتاق‌ها (اتاق‌های خدماتی) و هماهنگی تناسبی عناصر مختلف در نقشه، تداعی‌گر الگوهای خودتکراری و هندسهٔ فرکتال در موجودات زنده است. این شباهت تصادفی نیست؛ بلکه نشان از درک ژرف معماران ایرانی از اصل بهینه‌سازی عملکرد با کمترین هزینه دارد؛ اصلی که یکی از مفاهیم بنیادین معماری بیونیک است.

در مطالعهٔ دوم پژوهش، مصاحبه‌هایی با ۱۳ تن از سالمندان بومی شهر بم که به‌طور سنتی به دانش معماری محلی آشنایی داشتند، انجام شد. هدف از این مصاحبه‌ها، جمع‌آوری دیدگاه‌های عمیق و تجربی این افراد دربارهٔ تأثیر عناصر طبیعی نظیر گیاهان و جانوران بومی بر شیوه‌های ساخت‌وساز سنتی در شهر بم بود. به‌ویژه، تلاش شد تا درک عمیقی از نگرش آن‌ها نسبت به بهره‌گیری از ویژگی‌های الهام‌گرفته از طبیعت، مانند درخت نخل، حیوانات بیابانی و استراتژی‌های بقا در آن‌ها، در معماری سنتی به دست آید. این مصاحبه‌ها، درکی عمیق از دانش بومی و محلی در خصوص شکل‌گیری شیوه‌های معماری پایدار در شهر بم، از طریق انتقال تجربیات نسل به نسل، فراهم آورد. ساکنان اغلب به توصیف ساختمان‌هایی پرداختند که با الهام از مکانیزم‌های طبیعی خنک‌سازی و پناه‌گیری موجود در گیاهان و جانوران طراحی شده بودند؛ ازجمله می‌توان به دیوارهای ضخیم، حیاط‌های سایه‌دار و فضاهای زیرزمینی اشاره کرد. این دیدگاه مبتنی‌بر جامعه، به یافته‌های پژوهش عمق می‌بخشد و نشان می‌دهد که طبیعت به شیوه‌ای عملی و عمیقاً فرهنگی بر معماری سنتی شهر بم تأثیرگذار بوده است. نتایج حاصل از مصاحبه با ساکنان محلی در جدول ۲ و تصویر ۸ ارائه شده است.

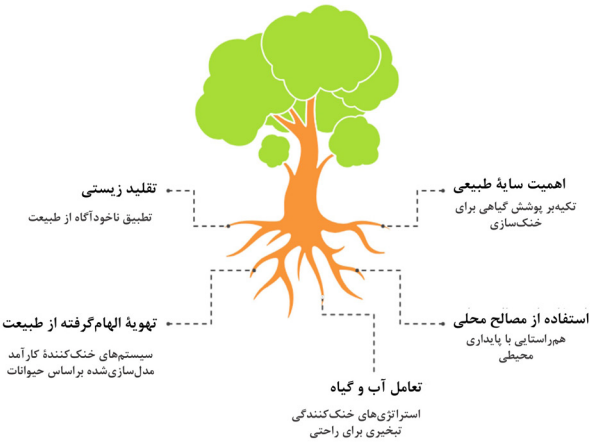
## نتایج کلیدی حاصل از مصاحبه‌ها

تقلید ناخودآگاه از سازگاری‌های زیستی: بسیاری از مصاحبه‌شوندگان به شباهت‌های striking بین معماری سنتی بم و سازگاری‌های حیوانات بیابانی مانند مارها، روباه‌های صحرایی و مارمولک‌ها اشاره کردند. ویژگی‌هایی همچون دیوارهای ضخیم گلی، حیاط‌های عمیق و اتاق‌های زیرزمینی، به‌عنوان راهکارهایی برای ایجاد محیط‌های خنک و پناهگاهی، مشابه لانه‌ها و پناهگاه‌های طبیعی این جانوران عمل می‌کردند.

جدول ۲. نتایج مصاحبه‌ها براساس موضوعات دسته‌بندی‌شده. مأخذ: نگارندگان.

| شرکت‌کننده در مصاحبه | شغل | دیدگاه در خصوص استفاده از ویژگی‌های گیاهان و حیوانات در معماری سنتی | مثال‌ها و توضیحات خاص |
|---|---|---|---|
| مرد، ۷۰ ساله | آزاد | اعتقاد داد که معماران از غریزهٔ بقا حیوانات بیابانی تقلید می‌کردند. | آن‌ها دیوارها را ضخیم می‌ساختند، مانند پوشش شتر که گرما را بیرون نگه می‌داشت و همان‌طور که مارها به زیر زمین می‌روند، خانه‌های ما سردابه‌های خنک داشتند. |
| زن ۶۸ ساله | کارمند بازنشسته (معلم) | بر ویژگی‌های خنک‌کنندگی گیاهان تمرکز دارد. | ما همیشه در حیاط نخل‌ها و باغچه‌های کوچک داشتیم. درخت‌ها سایه ایجاد می‌کردند و هوا را خنک می‌کردند. |
| مرد ۷۴ ساله | کارمند بازنشسته (راه آهن) | فکر می‌کند طراحی به‌طور غیرعمدی بازتاب طبیعت بوده است. | طریقی که خانه‌ها را ساختیم، فقط عقل سلیم بود. مثل اینکه حیوانات به‌دنبال سایه می‌گردند، ما هم کوچه‌های باریک و حیاط‌های عمیق ساختیم تا از آفتاب فرار کنیم. |
| زن ۶۵ ساله | خانه‌دار | به استفاده از درختان نخل برای سایه و حفظ آب اشاره می‌کند. | نخل‌ها نه‌تنها سایه می‌دادند بلکه به خنک نگه‌داشتن آب در کوزه‌های گلی که نزدیکشان قرار می‌دادیم، کمک می‌کردند. |
| مرد ۷۲ ساله | آزاد | شکل‌های گنبدی را با پناهگاه‌های طبیعی حیوانات مرتبط می‌داند. | سقف‌های گنبدی مانند تپه‌ها و تپه‌های شنی بودند که حیوانات زیر آن‌ها استراحت می‌کردند. آن‌ها ما را از آفتاب محافظت می‌کردند و هوای داخلی را خنک نگه می‌داشتند. |
| زن ۷۱ ساله | خانه‌دار | به تقلید رفتارهای حیوانات برای بقا اشاره می‌کند. | ما از مارمولک‌ها و موش‌ها یاد گرفتیم که چگونه از گرما پنهان می‌شوند. خانه‌های ما دیوارهای ضخیم داشتند، مثل اینکه این موجودات جاهای خنک پیدا می‌کنند. |
| زن ۶۱ ساله | خانه دار | به تهویهٔ طبیعی که از سازگاری حیوانات الهام گرفته است اشاره می‌کند | بادگیرها مثل گوش‌های بزرگ حیوانات صحرایی عمل می‌کردند. آن‌ها هوای خنک بیرون را به داخل خانه می‌آوردند. |
| مرد ۶۹ ساله | کارمند بازنشسته ( مخابرات) | اعتقاد قوی به تأثیر طبیعت بر شیوه‌های ساخت‌وساز سنتی دارد. | ما خانه‌ها را همان‌طور که صحرا به ما می‌گفت ساختیم. درست مانند حیوانات و گیاهانی که با صحرا زندگی می‌کنند، ما هم از آنچه می‌دیدیم. سایه، آب و دیوارهای ضخیم برای جلوگیری از گرما استفاده کردیم. |
| زن ۶۶ ساله | خانه‌دار | درختان، به‌ویژه نخل‌ها، را به‌عنوان عناصر خنک‌کننده ضروری می‌داند. | بدون درختان نخل، گرما غیرقابل‌تحمل می‌شد. ما آن‌ها را در اطراف خانه داشتیم تا فضا را خنک نگه دارند، درست مانند اینکه حیوانات در سایه آن‌ها پنهان می‌شوند. |
| مرد ۷۶ ساله | آزاد | بر عملی‌بودن مصالح براساس گیاهان و حیوانات محلی تأکید دارد. | ما از بتن یا مواد دیگر استفاده نمی‌کردیم. همه چیز از گل، کاه و خشت ساخته می‌شد، درست مثل اینکه حیوانات و گیاهان با آنچه در اطرافشان بود، به‌سادگی زندگی می‌کردند. |
| زن ۷۲ ساله | کارمند بازنشسته (پرستار) | به تکنیک‌های خنک‌کنندگی الهام‌گرفته از رفتارهای گیاهان اشاره می‌کند | بادهایی که از میان درخت‌ها عبور می‌کردند و هوا را خنک می‌کردند الهام‌بخش چگونگی ساخت پنجره‌ها و دریچه‌ها بود تا هوا بتواند از خانه عبور کند. |
| زن ۶۹ ساله | خانه‌دار | به ترکیب آب و گیاهان برای ایجاد فضاهای خنک‌تر اشاره می‌کند. | ما از فواره‌های کوچک و درختانی در اطراف آن‌ها استفاده می‌کردیم، درست مانند اینکه گیاهان در بیابان در نزدیکی آب رشد می‌کنند. این کار حیاط را خیلی خنک‌تر می‌کرد. |
| مرد ۶۳ ساله | آزاد | تکنیک‌های ساختمانی را با مکانیزم‌های طبیعی خنک‌سازی مرتبط می‌داند. | مانند اینکه حیوانات در شن خنک پنهان می‌شوند، ما خانه‌های خود را با آجرهای گلی ساختیم تا در طول روز خنک بمانند و شب گرم شوند، درست مانند حیوانات در بیابان. |

اهمیت نخل و سایه طبیعی: مصاحبه‌شوندگان بر نقش حیاتی نخل‌ها و سایر پوشش گیاهی در ایجاد سایه و خنک‌سازی فضاهای مسکونی تأکید فراوانی داشتند. این رویکرد، شباهت قابل توجهی به استراتژی‌های بقا در گیاهان و جانوران بیابانی دارد که از سایه برای مقابله با گرمای شدید استفاده می‌کنند.




تصویر ۸. تأثیرات زیستی و الهامات طبیعی در طراحی معماری سنتی بم. مأخذ: نگارندگان.

سیستم‌های تهویهٔ الهام‌گرفته از طبیعت: بادگیرها به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین عناصر معماری سنتی بم، اغلب با گوش‌های بزرگ حیوانات بیابانی مانند روباه مقایسه می‌شد. این شباهت نشان می‌دهد که معماران سنتی با الهام از طبیعت، سیستم‌های تهویهٔ طبیعی کارآمدی را طراحی کرده‌اند.

استفاده از مصالح بومی و ساده: مصاحبه‌شوندگان به استفاده گسترده از مصالح طبیعی مانند گل، خشت و کاه در ساخت بناهای سنتی اشاره کردند. این رویکرد، با فلسفهٔ ساده‌زیستی و سازگاری با محیط‌زیست که در بسیاری از موجودات بیابانی مشاهده می‌شود، همخوانی دارد.

تعامل آب و گیاه در ایجاد خنک‌سازی تبخیری: استفاده از فواره‌های کوچک و کاشت درختان در مجاورت آن‌ها، روشی رایج برای ایجاد خنک‌سازی تبخیری در حیاط‌های سنتی بوده است. این روش، مشابه استراتژی‌های بقا در گیاهان بیابانی است که برای حفظ رطوبت و ایجاد محیطی خنک‌تر، در اطراف منابع آبی محدود رشد می‌کنند.

## بحث

معماری بومی بم؛ الگویی بی‌بدیل برای تقلید از طبیعت: تحقیقات پیشین همچون پژوهش‌های مختاری و همکاران (Mokhtari et al., 2019) و عینی‌فر و عشرتی (Einifar & Eshrati, 2018) آشکار ساخته است که معماری تاریخی بم با اتکا بر سازوکارهای طبیعی همچون جرم حرارتی، سلسله‌مراتب فضایی و کنترل دقیق ریزاقلیم، نمونه‌ای بارز از تاب‌آوری منفعل محسوب می‌شود. یافته‌های این پژوهش نیز بر تطابق عناصر معماری این شهر، همچون حیاط مرکزی (حوضخانه)، ایوان‌های سایه‌دار و بادگیرها با سیستم‌های زیستی نظیر تپه‌های موریانه و کاکتوس‌ها با شاخص‌های تاب‌آوری زیست‌محیطی مطرح‌شده توسط گاندرسون (Gunderson, 2000) و اسپیرز و همکاران (Spears et al., 2015) است.

بیونیک؛ پلی میان گذشته و آینده: پاسداری از هویت فرهنگی بم: به‌کارگیری اصول بیونیک در معماری بومی شهر بم، نه‌تنها به بازآفرینی کالبدی این شهر کهن کمک شایانی می‌کند بلکه فرصتی استثنایی برای تقویت ریشه‌های فرهنگی و هویتی آن فراهم می‌آورد. پژوهش‌های میدانی نشان می‌دهند که ساکنان این شهر پیوندی عمیق با معماری سنتی خود دارند و به خوبی از سازگاری‌های آن با شرایط اقلیمی، مانند تقلید از ویژگی‌های حرارتی لانهٔ حیوانات بیابانی، آگاهند. با ادغام این دانش بومی با فناوری‌های نوین و الهام از طبیعت، معماران می‌توانند طرح‌هایی ارائه دهند که هم با روح گذشتهٔ این شهر همخوانی داشته باشد و هم پاسخگوی نیازهای امروز باشد. این رویکرد کاملاً همسو با دیدگاه الکساندر (Alexander, 2004) است که بر اهمیت تداوم فرهنگی در معماری پایدار تأکید دارد.

چالش‌های پیوند دانش نوین با سنت؛ موانع و فرصت‌ها در ادغام اصول بیونیک در معماری بومی شهر بم: پیاده‌سازی اصول بیونیک در بافت تاریخی بم، با وجود مزایای فراوان، با چالش‌های جدی نیز همراه است. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، سازگاری مصالح و سازه‌های نوین با معماری سنتی این شهر است. پژوهش‌های پیشین (see Jiang et al., 2024) نشان داده‌اند که تلفیق مواد پیشرفته همچون کامپوزیت‌ها و پوشش‌های نانو با مصالح بومی مانند خشت، مستلزم دقت و ظرافت فراوان است. این مواد، اگرچه دوام و عملکرد سازه را بهبود می‌بخشند اما ممکن است ویژگی‌های حسی و بصری بنا را دستخوش تغییر کنند و اصالت فرهنگی آن را به خطر اندازند. چالش دیگر، محدودیت‌های اقتصادی و فنی موجود در منطقه است. فناوری‌های نوین همچون مواد تغییر فازدهنده یا سیستم‌های سازه‌ای الهام‌گرفته از طبیعت، نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجه و دانش فنی پیشرفته‌ای هستند که لزوماً در دسترس همهٔ جوامع نیست. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که برای موفقیت در این مسیر، باید به‌دنبال راهکارهایی بود که هم از نظر فنی کارآمد باشند و هم با شرایط اقتصادی و اجتماعی منطقه سازگاری داشته باشند. این رویکرد با گفتمان جهانی در خصوص طراحی‌های پایدار و در دسترس (Rietmann, 2021) نیز همسو است.

چالش‌های اقلیمی و لرزه‌ای در اجرای اصول بیومیمتیک در شهر بم: شهر بم، با دارابودن اقلیمی سخت و سابقهٔ زلزله‌خیزی، عرصه‌ای است که در آن، نوآوری‌های معماری بیومیمتیک باید توانایی خود را به اثبات رسانند. اگرچه سیستم‌های تهویهٔ الهام‌گرفته از تپه‌های موریانه و

سازوکارهای سایه‌اندازی شبیه به کاکتوس‌ها، راهکارهای نویدبخشی برای مقابله با چالش‌های اقلیمی به نظر می‌رسند اما پایداری بلندمدت آن‌ها در مواجهه با بادهای شدید، طوفان‌های شن و زلزله‌های مکرر، پرسشی است که نیازمند پاسخ دقیق است. تطبیق این راهکارهای جهانی با شرایط خاص زمین‌شناسی و اقلیمی بم، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

پایبندی به هویت؛ چالش‌های اجتماعی و فرهنگی: در کنار چالش‌های فنی، ادغام اصول بیونیک در معماری بم با موانع اجتماعی و فرهنگی نیز مواجه است. جامعهٔ محلی بم، به‌دلیل پیوند عمیق با معماری سنتی و دانش بومی، ممکن است نسبت به نوآوری‌های خارجی و تغییرات اساسی در بافت تاریخی شهر، مقاومت نشان دهد. ازاین‌رو، مشارکت فعال ساکنان، معماران محلی و سیاست‌گذاران در تمامی مراحل طراحی و اجرا، امری حیاتی است. این امر نه‌تنها به افزایش پذیرش طرح‌ها کمک می‌کند بلکه تضمین‌کنندهٔ همخوانی آن‌ها با ارزش‌ها و هویت فرهنگی شهر نیز خواهد بود.

برای نیل به تاب‌آوری زیست‌محیطی و فرهنگی در شهر بم، رویکردی تلفیقی پیشنهاد می‌شود که در آن، دانش بومی با فناوری‌های نوین آمیخته شود.

همزیستی سنت و نوآوری در مصالح ساختمانی: یکی از راهکارهای مؤثر، تلفیق مصالح سنتی همچون خشت با کامپوزیت‌های پیشرفته‌ای است که از طبیعت الهام گرفته‌اند. برای مثال، می‌توان پوشش‌هایی بر پایهٔ مواد طبیعی طراحی کرد که ضمن جذب رطوبت اضافی، همانند گیاهان بیابانی عمل و از سازه در برابر رطوبت و آسیب‌های ناشی از آن محافظت کنند. همچنین، استفاده از سیستم‌های ساختمانی مدولار و انعطاف‌پذیر که الهام‌بخش آن‌ها طبیعت است، امکان بازسازی و ارتقای تدریجی بناها را فراهم و به حفظ هویت معماری شهر کمک شایانی می‌کند.

خلق ریزاقلیمی مطلوب با الهام از طبیعت: برای بهبود شرایط آسایش در ساختمان‌ها، می‌توان از راهکارهای طبیعی بهره برد. برای مثال، با الهام از تپه‌های موریانه، می‌توان سیستم‌های سرمایشی غیرفعال طراحی کرد که بدون نیاز به انرژی خارجی، دمای داخل ساختمان را کاهش دهند. همچنین، استفاده از سطوح بازتابندهٔ نور خورشید، مشابه پوشش گیاهی بیابانی، می‌تواند از گرم‌شدن بیش از حد ساختمان‌ها جلوگیری کند. علاوه‌بر این، بهره‌گیری از دیوارهای سبز و سیستم‌های سایه‌اندازی هوشمند، در مقیاس شهری، به بهبود کیفیت هوا، کاهش مصرف انرژی و ایجاد ریزاقلیمی مطلوب کمک خواهد کرد.

هم‌آمیزی دانش و عمل؛ کارگاه‌های آموزشی و برنامه‌های مشارکتی: برگزاری کارگاه‌های آموزشی و برنامه‌های مشارکتی، بستری را فراهم می‌کند تا دانش بومی و تجربیات ارزشمند ساکنان محلی با نوآوری‌های مدرن و دانش فنی متخصصان تلفیق شود. این رویکرد، ضمن تقویت حس مالکیت و تعلق خاطر ساکنان، تضمین می‌کند که راهکارهای ارائه‌شده، نه‌تنها از نظر فنی کارآمد باشند بلکه با فرهنگ و ارزش‌های جامعهٔ محلی نیز همخوانی داشته باشند.

از نمونه تا کل؛ اجرای مقیاس‌پذیر در بازآفرینی شهری: اجرای آزمایشی اصول بیونیک در بناهای شاخصی همچون خانهٔ عامری‌ها، می‌تواند به‌عنوان یک الگوی موفق، مسیر را برای بازآفرینی گسترده‌تر شهر هموار کند. این رویکرد مرحله‌ای، ضمن کاهش ریسک‌های مالی، فرصتی را برای اصلاح و بهبود تدریجی طرح‌ها فراهم می‌آورد. به‌این‌ترتیب، می‌توان با اطمینان بیشتری به سمت اجرای پروژه‌های بزرگ‌تر و پیچیده‌تر گام برداشت و در نهایت به یک بازآفرینی شهری پایدار دست یافت.

## نتیجه‌گیری

یافته‌های و نتایج کلی حاصل از این مطالعه حکایت از این دارد که معماری سنتی بم با ادغام عناصر معماری، مصالح طبیعی و اصول طراحی زیست‌محیطی، نمونه‌ای بارز از معماری پایدار است. تحلیل این معماری نشان می‌دهد که اصول بنیادین معماری بیونیک مانند بهره‌وری انرژی و سازگاری با محیط‌زیست، به‌طور ذاتی در ساختار و عملکرد بناهای بومی این منطقه گنجانده شده است. این پژوهش با ارائهٔ شواهدی روشن، پتانسیل بالای معماری بومی بم را برای الگوبرداری در طراحی معماری معاصر نشان می‌دهد.

یکی از بارزترین ویژگی‌های معماری سنتی بم، بهره‌گیری از فرم‌های فضایی هوشمندانه برای مقابله با شرایط اقلیمی سخت است. حیاط‌های مرکزی، به‌عنوان پناهگاه‌های طبیعی، با ایجاد سایه، جریان هوا و خنک‌سازی تبخیری، پاسخی کارآمد به گرمای شدید و خشکسالی منطقه داده‌اند. علاوه‌بر این، لایه‌بندی فضایی و ایجاد فضاهای واسط مانند ایوان‌ها و دالان‌ها، انتقال تدریجی از فضای بیرونی به داخلی را تسهیل و به کنترل دما و رطوبت داخلی کمک شایانی می‌کند. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که معماران سنتی بم، با شناختی عمیق از اقلیم و نیازهای انسان، به طراحی فضاهایی پرداخته‌اند که همواره آسایش و راحتی ساکنان را تأمین می‌کند. فرم‌های گنبدی و طاقی، با توزیع یکنواخت تنش‌ها در سرتاسر سطح خود، مشابه اسکلت خارجی بندپایان عمل و حداکثر مقاومت را با حداقل مصالح فراهم می‌کنند. این سازه‌های پوسته‌ای، به‌دلیل عایق‌کاری حرارتی بالا، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان را نیز ممکن

می‌سازند. ازسوی‌دیگر، بادگیرها با طراحی آیرودینامیک خود، جریان هوا را به داخل ساختمان هدایت و با الهام از سازوکارهای زیستی، تهویهٔ طبیعی و خنک‌سازی محیط را تسهیل می‌کنند. این امر، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم‌وخشک، منجر به ایجاد فضایی با دمای مطبوع و آسایش بیشتر برای ساکنان می‌شود.

علاوه‌بر این، مصالح محلی مانند خشت، گل و کاه با اینرسی حرارتی بالا و ساختار متخلخل، محیطی با دمای پایدار و رطوبت مناسب ایجاد و آسایش حرارتی ساکنان را تأمین می‌کنند. این مصالح علاوه‌بر تطابق با محیط و کاهش مصرف انرژی، قابلیت ارتقا با فناوری‌های مدرن را نیز دارا هستند. به‌عنوان مثال، استفاده از پوشش‌های بازتابنده الهام‌گرفته از پوستهٔ جانوران بیابانی، با بازتابش اشعهٔ خورشید، از گرم‌شدن بیش از حد ساختمان جلوگیری و در نتیجه به کاهش بار سرمایشی کمک می‌کند.

ارتباط میان عناصر معماری و سیستم‌های زیستی در بم، ریشه در زمینهٔ فرهنگی و محیطی عمیق این شهر دارد. کاشت نخل در حیاط‌های مرکزی، علاوه‌بر ایجاد سایه و تقویت تبخیر، نمادی از زندگی و حیات در دل کویر و بازتابی از باورهای فرهنگی مردم بوده است. این سایه‌اندازی طبیعی، به خنک‌سازی محیط و کاهش استرس حرارتی کمک و مشابه مکانیسم تعرق در گیاهان عمل می‌کند. طراحی بادگیرها با درک عمیق از دینامیک جریان هوا، مشابه سازوکارهای دمایی در جانورانی مانند روباه‌های صحرایی است. این سازه‌ها بادهای غالب را به داخل فضاهای داخلی هدایت می‌کنند و از اختلاف فشار برای تسهیل تهویهٔ طبیعی بهره می‌برند. همچنین، کوچه‌های باریک و دیوارهای بلند، مشابه با لانه‌های زیرزمینی جانوران بیابانی، فضایی خنک و تاریک ایجاد می‌کنند که از نفوذ بیش از حد گرما جلوگیری می‌کند و محیطی مناسب برای زندگی فراهم می‌آورد. استفاده از مصالح بومی مانند خشت و گل نیز، با ایجاد محیطی با دمای پایدار، به پایداری ساختمان‌ها کمک کرده است. این تطابق کامل معماری با شرایط اقلیمی و زیست‌محیطی، نشان‌دهندهٔ درک عمیق معماران سنتی از نیروهای طبیعی و اهمیت هماهنگی با طبیعت است.

در یک جمع‌بندی کلی، یافته‌های این گفتمان نشان داد که معماری بومی بم، به‌طور ذاتی اصول معماری بیونیک را در خود دارد. بهره‌گیری از فرم‌های آئرودینامیک در طراحی بادگیرها، مشابه با بال پرندگان، به ایجاد جریان هوا و تهویهٔ طبیعی کمک می‌کند. استفاده از مصالح محلی مانند خشت و گل، با خواص حرارتی مناسب، به حفظ دمای پایدار در فضاهای داخلی کمک می‌کند و از مصرف انرژی برای سرمایش و گرمایش می‌کاهد. عملکرد حرارتی و ساختاری فضاهای طاقی و گنبدی، نشان می‌دهد که ادغام فرم‌های طبیعی در طراحی معماری، مشابه با پوسته‌های تخم‌مرغ، می‌تواند مقاومت سازه‌ای را افزایش دهد و در عین حال، عایق حرارتی مناسبی ایجاد کند. همچنین، استراتژی‌های استفاده از سطوح متخلخل و بازتابنده، رویکردهای بیونیک برای کاهش مصرف انرژی و افزایش پایداری را تقویت می‌کنند (تصویر ۹).

ادغام اصول بیونیک در رویکردهای مدرن معماری، به‌ویژه در شهری مانند بم با هویت فرهنگی غنی، نیازمند ایجاد توازنی ظریف میان حفظ میراث و پیشرفت تکنولوژیکی است. توسعهٔ مصالح زیست‌الهام جدید مانند خشت‌های خودترمیم با الهام از مکانیسم ترمیم در موجودات زنده و استفاده از نماهای تطبیقی با عملکردی مشابه پوست جانوران، می‌تواند به احیا و پایداری بافت تاریخی بم کمک شایانی کند. مقیاس‌بندی این نوآوری‌ها در سطح شهری، با توجه به پیچیدگی بافت تاریخی و نیازهای متنوع ساکنان، یکی از چالش‌های اصلی است که نیازمند همکاری بین‌رشته‌ای، سرمایه‌گذاری مناسب و توسعهٔ زیرساخت‌های لازم است. با توجه به پتانسیل بالای معماری بومی بم و پیشرفت‌های اخیر در حوزهٔ بیونیک، می‌توان آینده‌ای پایدار و پویا برای این شهر تاریخی متصور شد.

## اعلام عدم تعارض منافع

نگارندگان اعلام می‌کنند که این پژوهش عاری از هرگونه تعارض منافع است. کلیهٔ یافته‌ها و نتایج حاصل از این پژوهش، به‌صورت کاملاً مستقل و بی‌طرفانه به دست آمده‌اند و هیچ‌گونه عامل بیرونی یا شخصی بر روند پژوهش و نتایج آن تأثیرگذار نبوده است.

## پی‌نوشت‌ها

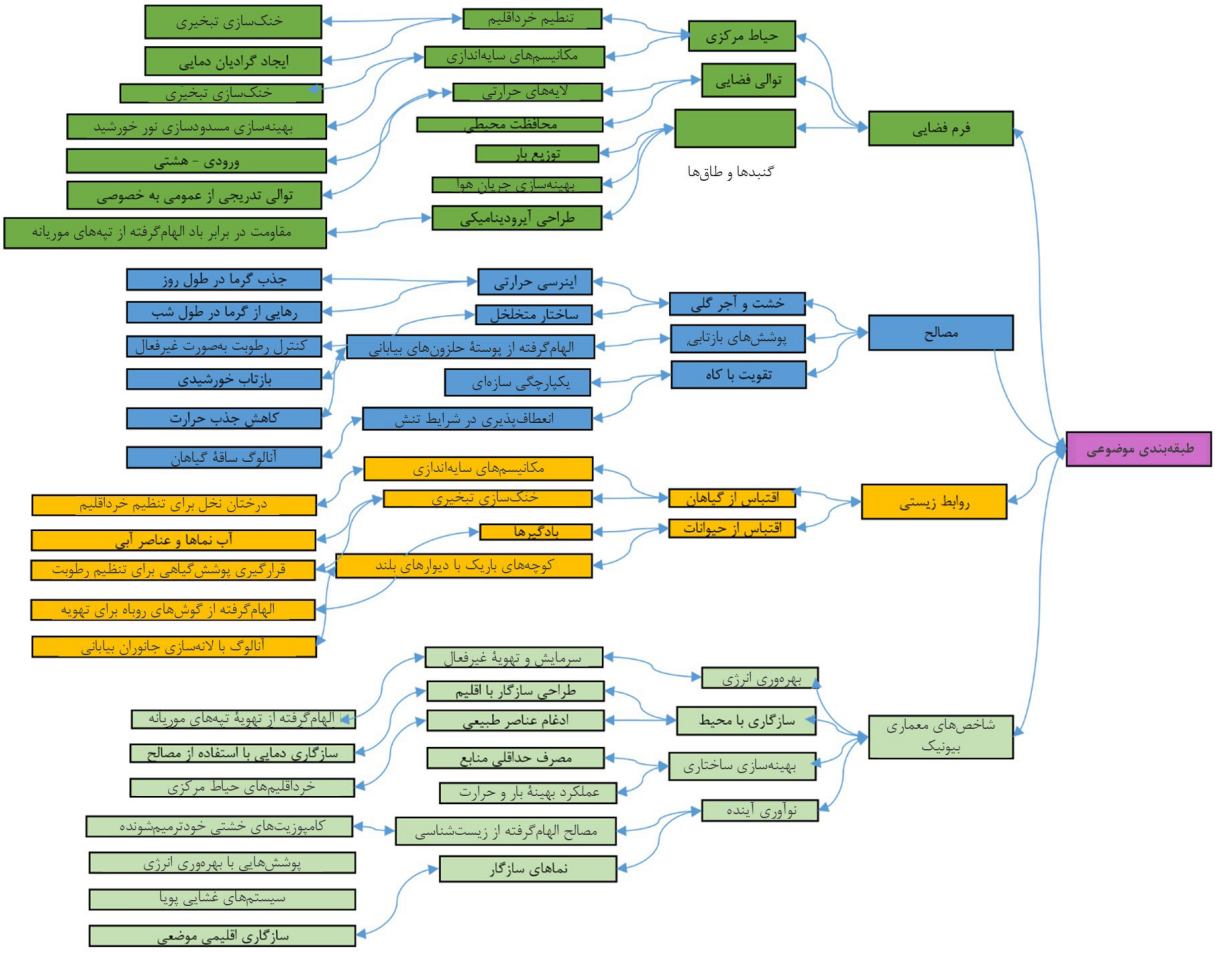
۱. Hough Transform

## فهرست منابع

• داعی الله، مانیا و انجم‌شعاع، امینه. (۱۳۸۸). *بررسی اصول توسعهٔ پایدار در نظام معماری و شهرسازی گذشته اقلیم گرم‌وخشک ایران*. همایش ملی انسان، محیط‌زیست و توسعه پایدار، همدان. https://www.sid.ir/paper/816041/fa#downloadbottom

• گلپایگانی، عبدالرضا. (۱۳۸۶). *گونه‌شناسی و راهنمای طراحی مسکن بم*. وزارت مسکن و شهرسازی.

• Abd Ullah, A., Said, I. B., & Ossen, D. R. (2018). Cooling strategies in the biological systems and termite mound: The potential of emulating them to sustainable architecture and bionic engineering. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 13*(19), 8127-8141. https://www.semanticscholar.org/




تصویر ۹. مدل ترسیمی تلفیق معماری سنتی بم با شاخص‌های معماری بیونیک: طبقه‌بندی موضوعی فضا، مصالح و اقتباس‌های زیستی. مأخذ: نگارندگان.

paper/COOLING-STRATEGIES-IN-THE-BIOLOGICAL-SYSTEMS-AND-OF-Ullah-Said/4ab680f95d707826cefb5b55d79d51dda9e81f29

• Akrami, G., & Damyar, S. (2017). New approach to vernacular architecture considering its structural relationship with sustainable architecture. *Journal of Fine Arts: Architecture & Urban Planning, 22*(1), 29-40. https://doi.org/10.22059/jfaup.2017.62263

• Alberti, M., & Marzluff, J. M. (2004). Ecological resilience in urban ecosystems: Linking urban patterns to human and ecological functions. *Urban Ecosystems, 7*, 241-265. https://doi.org/10.1023/B:UECO.0000044038.90173.c6

• Alemi, B. (2022). Comparative study of termite nests and Nooshabad underground complex. *Journal of Iranian Architecture Studies, 10*(20), 177-194. https://doi.org/10.22052/JIAS.2022.111879

• Alexander, C. (2004). *The nature of order*. Taylor & Francis. https://books.google.com/books?id=UOxlt8CJX2oC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

• Alexander, C. (2007). Empirical findings from the nature of order. *Environmental and Architectural Phenomenology, 18*, 11-19. https://patterns.architexturez.net/doc/az-cf-172923

• Aslani, F., Asadian Zargar, N., & Montazeriun, M. (2019). The role of trees as a natural index in post-disaster reconstruction (Case Study: Palm groves of Bam, Following the 2003 Bam earthquake). *Disaster Prevention and Management Knowledge, 9*(2), 207-218. http://dpmk.ir/article-1-265-fa.html

• Bantserova, O. L., & Kasimova, A. R. (2023). Bionic approach to the organization of architectural objects in the sustainable development paradigm. *Civil Engineering and Architecture, 11*(2), 939-947. https://www.academia.edu/102861400/Bionic_Approach_to_the_Organization_of_Architectural_Objects_in_the_Sustainable_Development_Paradigm

• Barthlott, W., Rafiqpoor, M. D., & Erdelen, W. R. (2016). Bionics and biodiversity – Bio-inspired technical innovation for a sustainable future. In Knippers, J., Nickel, K., & Speck, T. (Eds.), *Biomimetic research for architecture and building construction: Biologically-Inspired Systems* (Vol. 8). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46374-2_3

• Bayulken, B., Huisingh, D., & Fisher, P. M. (2021). How

are nature-based solutions helping in the greening of cities in the context of crises such as climate change and pandemics? A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production, 288*, 125569. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125569

• Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature.* Harper Perennial.

• Braungart, M., McDonough, W., & Bollinger, A. (2007). Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions–a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production, 15*(13-14), 1337-1348. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.003

• Bruckmeier, K., & Pires, I. (2018). Innovation as transformation: Integrating the socio-ecological perspectives of resilience and sustainability. In H. Pinto, T. Noronha, & E. Vaz (Eds.), *Resilience and Regional Dynamics: An International Approach to a New Research Agenda* (pp. 209-231). Springer.

• Dakos, V., & Kéfi, S. (2022). Ecological resilience: what to measure and how. *Environmental Research Letters, 17*(4), 043003. http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac5767

• Davtalab, J., & Heidari, A. (2020). A numerical and analytic study of the humidity impact of Kharkhona on vernacular Sistan housing. *Journal of Housing and Rural Environment, 39*(169), 89-100. http://dx.doi.org/10.22034/39.169.89

• Davtalab, J., Heidari, A., & Narooei, V. (2022). Identification and analysis of the architectural spaces and features of the historic Seb Castle in Saravan County, Iran. *Journal of Sistan and Baluchistan Studies, 2*(2), 1-11. https://doi.org/10.22034/jsbs.2022.338703.1023

• Day, R. H., Allen, S. T., Brenner, J., Goodin, K., Faber-Langendoen, D., & Ames, K. W. (2018). Ecological resilience indicators for mangrove ecosystems. In K. Goodin, D. Faber-Langendoen, J. Brenner, & S. Allen (Eds.), *Ecological resilience indicators for five northern Gulf of Mexico ecosystems* (pp. 91-150). NatureServe. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.natureserve.org/sites/default/files/chapter_3_-_mangrove_indicators.pdf&ved=2ahUKEwjnrejzkb6LAxVOhf0HHQ_LJ4UQFnoECBMQAQ&usg=AOvVaw0H-EDEa6Ynn4wtgH8jksnf

• Deglon, M., Africa, C., Soepnel, L. M., Kapwata, T., de-Graft Aikins, A., Bedu-Addo, K., Howard, G., Lambert, E. V., Rae, D. E., Sibanda, M., Gordon, C., New, M., & Dugas, L. (2024). *Heat adaptation benefits for vulnerable groups in Africa (HABVIA): A study protocol for a controlled clinical heat adaptation trial. Research Square.* https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4788466/v1

• Dilshodovich, D. D. (2024). Bionics in architecture and construction. *Intent Research Scientific Journal, 3*(1), 1–3. https://intentresearch.org/index.php/irsj/article/view/286

• Einifar, A., & Eshrati, P. (2018). A holistic approach to "the relationship between culture and nature" in "cultural landscape", Case study of Bam, Iran. *Journal of Fine Arts: Architecture & Urban Planning, 22*(4), 81-92. https://doi.org/10.22059/jfaup.2018.207385.671397

• Fallmann, J., & Emeis, S. (2020). How to bring urban and global climate studies together with urban planning and architecture? *Developments in the Built Environment*, *4*, 100023. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100023

• Farina, D., Vujaklija, I., Brånemark, R., Bull, A. M. J., Dietl, H., Graimann, B., Hargrove, L. J., Hoffmann, K. P., Huang, H., Ingvarsson, T., Janusson, H. B., Kristjánsson, K., Kuiken, T., Micera, S., Stieglitz, T., Sturma, A., Tyler, D., Weir, R. F. F., & Aszmann, O. C. (2023). Toward higher-performance bionic limbs for wider clinical use. *Nature Biomedical Engineering, 7*(4), 473-485. https://doi.org/10.1038/s41551-021-00732-x

• Farokhizad, F., & Sabernejad, J. (2016). Tehran Water Museum with the Performance-Oriented Approach to Bionic Architecture. *Journal of History, Culture & Art Research/Tarih Kültür ve Sanat Arastirmalari Dergisi, 5*(4), 474. http://dx.doi.org/10.7596/taksad.v5i4.619

• Gharooni, F., Omrani Pour, A., & Yazdi, M. (2014). Bionic architectural design, Case study the design of architectural shells with the inspiration of abalon pearl. *Armanshahr Architecture & Urban Development, 6*(11), 127-140. https://www.armanshahrjournal.com/article_33470.html?lang=en

• Goldust, Y., & Ahmadnejad Karimi, M. (2022). Classification of load bearing patterns in architectural structures based on a bionic approach (Case study: bending structures). *Journal of Fine Arts: Architecture & Urban Planning, 27*(2), 33-45. https://doi.org/10.22059/jfaup.2022.345545.672782

• Gunderson, L. H. (2000). Ecological resilience—in theory and application. *Annual Review of Ecology and Systematics, 31*(1), 425-439. https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.31.1.425

• Gutterman, Y. (2002). *Survival strategies of annual desert plants: Adaptations of desert organisms. Springer.* https://books.google.com/books?id=DTv8CAAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

• Hashemi Zarj Abad, H., & Masudi, Z. (2013). Ventilation; Masterpiece of the classic architecture engineering of Iran in desert margin with the analysis of the architecture typology of ventilation in south khorasan. *Journal of Socio-Cultural Studies of Khorasan, 6*(4), 166-198. https://www.farhangekhorasan.ir/article_156216.html?lang=en

• Heidari, A., & Davtalab, J. (2020). The role of Kharkhona in temperature adjustment in rural houses of Sistan: An effective means for improving architecture sustainability. *Journal of Sustainable Architecture and Urban Design, 7*(2), 55-67. https://

doi.org/10.22061/jsaud.2020.5724.1553

• Heidari, A., & Davtalab, J. (2022). A study of the wind's role in shaping the man-made landscape of Sistan and the methods of utilizing and dealing with it based on historical sources. *Bagh-e Nazar, 19*(106), 33-44. https://doi.org/10.22034/bagh.2021.283839.4870

• Heidari, A., & Davtalab, J. (2024). Effect of Kharkhona on thermal comfort in the indoor space: A case study of Sistan region in Iran. *Energy and Buildings, 318,* 114431. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114431

• Heydari, A., & Davtalab, J. (2020). A study of the impact of Kharkhona on wind speed in the vernacular housing of Sistan region. *Geography and Territorial Spatial Arrangement, 10*(35), 49-64. https://doi.org/10.22111/gaij.2020.5451

• Javanmard, Z., Davtalab, J., Nikpour, M., & Sivandipour, A. (2024). Integrating machine learning and parametric design for energy-efficient building cladding systems in arid climates: Sport hall in Kerman. *Journal of Building Engineering, 97*, 110693. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110693

• Jiang, M., Deng, W., & Lin, H. (2024). Sustainability through biomimicry: A comprehensive review of bionic design applications. *Biomimetics, 9*(9), 507. https://doi.org/10.3390/biomimetics9090507

• McGrath, B., & Lei, D. (2021). The embodied multisystemic resilience of architecture and built form. In M. Ungar (Ed.), *Multisystemic resilience: Adaptation and transformation in contexts of change* (pp. 603-624). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oso/9780190095888.003.0032

• Mokhtari, F., Joodaki Azizi, A., & Mousavi Haji, S. R. (2019). The landscape of the city of Bam in the early centuries of the Islamic era. *Research Journal of Iran Local Histories, 7*(14), 77-100. https://doi.org/10.30473/lhst.2019.35711.1966

• Nejad Ebrahimi, A., & Tokhmchian, A. (2021). An Analysis of the Relationship Between the Historic Bazaar of Tabriz and the Rhizome as an Organ of Vegetative Reproduction. *Humans and Environment, 19*(2), 181–199. https://sanad.iau.ir/fa/Article/846982?FullText=FullText

• Orr, D. (2007). Architecture, ecological design, and human ecology. In K. Tanzer & R. Longoria (Eds.), *The Green Braid* (pp. 33-51). Routledge.

• Oveisi Keikha, Z., Kavosh, H., Heidari, A., & Davtalab, J. (2020). A typology of Sistan's vernacular housing in terms of open and closed space formation. *Journal of Housing and Rural Environment, 39*(171), 61-72. http://dx.doi.org/10.22034/39.171.61

• Rietmann, H. (2021). *Ecological modernization in the United Arab Emirates? The case of Masdar Eco-City* (Vol. 119). Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

• Sardá, M. R. C., Duşoiu, E. C., & Lascu, T. N. (Eds.). (2023). *Architecture inspired by nature: Experimenting bionics. Springer.* https://books.google.com/books?id=UhXTEAAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

• Saremi Naeeni, D., & Joodaki Azizi, A. (2014). Rahimibid Kushk (Palace) and its historical garden (Charbagh) in Bam; A good memorial monument from the early Islamic era. *Bagh-e Nazar, 11*(30), 67-88. https://www.bagh-sj.com/article_6499.html

• Scheffer, M., Carpenter, S. R., Dakos, V., & van Nes, E. H. (2015). Generic indicators of ecological resilience: inferring the chance of a critical transition. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 46*(1), 145-167. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054242

• Solano, T., Bernal, A., Mora, D., & Chen Austin, M. (2023). How bio-inspired solutions have influenced the built environment design in hot and humid climates. *Frontiers in Built Environment, 9*, 1267757. https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1267757

• Spears, B. M., Ives, S. C., Angeler, D. G., Allen, C. R., Birk, S., Carvalho, L., Cavers, S., Daunt, F., Morton, R. D., Pocock, M. J. O., Rhodes, G., & Thackeray, S. J. (2015). Effective management of ecological resilience–are we there yet? *Journal of Applied Ecology, 52*(5), 1311-1315. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12497

• Tian, T., Moying, W., Yinyu, W., & Jingrui, Z. (2018). A discourse on landscape architecture: at the intersection of design, ecology, resilience, and research. *Landscape Architecture Frontiers, 6*(4), 54-61. https://doi.org/10.15302/J-LAF-20180406

• Vorobyeva, O. I. (2018). Bionic architecture: back to the origins and a step forward. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 451, No. 1, p. 012145). IOP Publishing. http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012145

• Wahl, D. C. (2006). Bionics vs. biomimicry: from control of nature to sustainable participation in nature. *Design and Nature III: Comparing Design in Nature with Science and Engineering, 87*, 289-298. https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/87/16157

• Wang, Z., FU, X., & Lin, J. (2021). *Bionic adaptive facade design. Evaluation of adaptive facade design for bionic envelope system inspired by ladybug wings and its implementaion [Master's thesis*, University in Milan]. Politecnico, Milona 1863. https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/174198

• Ward, D. (2009). *The biology of deserts. Oxford University Press.* https://books.google.com/books?id=J-3mDAAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

• Whitford, W. G. (2002). Ecology of desert systems. Academic

Press. https://books.google.com/books?id=OZ4hZbXS8IcC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

• Williams, D. E. (2007). *Sustainable design: Ecology, architecture, and planning.* Wiley. https://books.google.com/books?id=1l3fO6Wqh_gC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false

• Yannas, S. (2011). Adaptive strategies for an ecological architecture. *Architectural Design, 81*(6), 62-69. https://doi.org/10.1002/ad.1321

• Young, K. R. (2021). *Ecology and human habitation of Andean forests.* Upper Amazon, 23. https://core.tdar.org/document/444199/ecology-and-human-habitation-of-andean-forests

• Young, K. R., & Duchicela, S. (2020). Abandoning Holocene dreams: Proactive biodiversity conservation in a changing world. *Annals of the American Association of Geographers, 111*(3), 880-888. https://doi.org/10.1080/24694452.2020.1785833

• Yuan, Y., Yu, X., Yang, X., Xiao, Y., Xiang, B., & Wang, Y. (2017). Bionic building energy efficiency and bionic green architecture: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74*, 771-787. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.004

**COPYRIGHTS**
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Bagh-e Nazar Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

**نحوهٔ ارجاع به این مقاله:**

پورحق‌وردی، نوشین؛ داوطلب، جمشید؛ قاسمی، محسن و نوروزی، ملیحه. (۱۴۰۴). شناسایی چالش‌ها و تحلیل فرصت‌های ادغام معماری بیونیک با شیوه‌های معماری بومی سنتی (مطالعه موردی: شهر بم). *باغ نظر*، ۲۲(۱۴۲)، ۵-۲۶.

**DOI: 10.22034/BAGH.2025.486616.5698**
**URL: https://www.bagh-sj.com/article_214852.html**