

ترجمه 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 شماره مجله به چاپ رسیده است.

مقاله 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^۴

۱. دانشجوی دکتری معماری، گروه معماری، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران.

۲. دانشیار گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه زابل، ایران.

۳. استادیار گروه معماری، واحد بم، دانشگاه آزاد اسلامی، بم، ایران.

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۸

چکیده

بیان مسئله: تحولات شتابان معماری شهر بم پس از 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، به تدریج 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 درباره 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 نرم‌افزار OpenCV، 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 از جمله سامانه‌های سرمایشی غیرفعال و بهره‌وری بهینه از مواد را آشکار ساخت. با این حال، چالش‌هایی همچون سازگاری مصالح نوین، محدودیت‌های اقتصادی و آسیب‌پذیری در برابر زلزله، به عنوان 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 مبتنی بر 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.

و مشاوره دکتر «محسن قاسمی» و دکتر «ملیحه نوروزی» در سال ۱۴۰۳ در گروه معماری، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران در حال انجام است.
** نویسنده مسئول: ۰۹۱۵۵۴۲۰۶۵۷، jdavtalab@uoz.ac.ir

* این مقاله برگرفته از رساله 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»

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 حوزه 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). ازسوی دیگر، 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 توسعه 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. ازسوی دیگر، 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 عرصه 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 حوزه 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 توسعه 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 ارائه 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؟

پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متمرکز بر معماری بیونیک و اکولوژیک در شهر تاریخی بم به‌ندرت انجام شده است. با توجه به محدودیت منابع تخصصی در این حوزه، پیشینه 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 حوزه معماری بیونیک و اکولوژیک استفاده شود.

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

است، از جمله آرایش‌های سلسله‌مراتبی و طراحی‌های مبتکرانه برای بهینه‌سازی مصرف انرژی.

پژوهش‌های خارجی در حوزه معماری بیونیک، پتانسیل‌های قابل توجهی را در زمینه بهینه‌سازی طراحی‌های معماری و ارتقای پایداری ساختمان‌ها آشکار ساخته‌اند. دلشادویچ و هم‌مورفیس (Dilshodovich, 2024) با بهره‌گیری از مفاهیم ایزومورفیسیم و همومورفیسیم، 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 صابرزاد (Farokhizad & Sabernejad, 2016) نیز با تحلیل موزه 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. با این حال، جیانگ و همکاران به چالش‌هایی همچون پذیرش گسترده 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 پروژه 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 پایه دو مفهوم بنیادین و درهم‌تنیده 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

تأمین نیاز آبی کشاورزی، به شکوفایی تولیدات اقتصادی از جمله 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، علاوه بر کارکردهای عملی، نمادی از تداوم حیات و هویت فرهنگی این شهر بوده‌اند که احیای آن‌ها برای توسعه پایدار و حفظ روح اصیل شهر، امری ضروری است (Aslani et al., 2019).

پژوهش‌های عمیق و گسترده در حوزه 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. با این حال، مطالعات مرتبطی که اصول بیونیک را در طراحی معماری واکاوی کرده‌اند، به‌عنوان پیشینه داخلی برای این پژوهش بررسی شده‌اند. مطالعات اخیر در حوزه 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 تهویه طبیعی لانه‌های موربانه 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 مقایسه 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 هندسه 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 پیچیده پرندگان پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مکانیزم‌های تطبیقی هوشمندانه‌ای در این ساختارهای طبیعی نهفته

(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 بهینه منابع، توانایی‌های شگفت‌انگیزی را به نمایش گذاشته است. با این حال، زلزله 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 درهم‌تنیده یک درخت، به پایداری و استحکام یک سیستم می‌افزاید. در بافت پیچیده شهری، تنوع در تیپولوژی‌های معماری، سیستم‌های انرژی و شیوه‌های بهره‌برداری از منابع، به منزله تضمینی است بر پایداری و بقای آن. این تنوع، شبیه به یک شبکه 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 جامعه 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 تکه‌تکه شدن بافت شهری جلوگیری و به ایجاد یک کل یکپارچه و هماهنگ کمک می‌کنند.

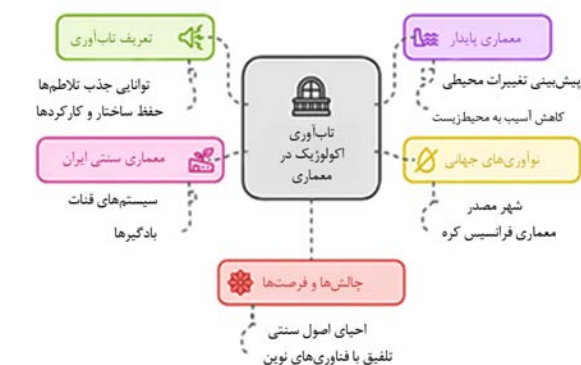
مقیاس‌پذیری زمانی و مکانی: تاب‌آوری، پدیده‌ای است که در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی، خود را نشان می‌دهد. در شهر بم، رویکردهای ساخت‌وساز باید به گونه‌ای باشد که هم به مخاطرات آنی مانند زلزله پاسخ دهند و هم در برابر تغییرات اقلیمی بلندمدت تاب‌آور باشند.

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

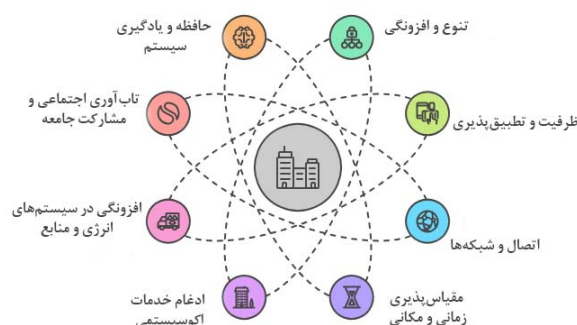
بنیادین خود یا حتی تحول به‌سوی حالت‌هایی سازگارتر با شرایط نوین، تعریف می‌شود. در حوزه معماری، این مفهوم به خلق محیط‌های مصنوعی اشاره دارد که قادرند تغییرات محیطی همچون کمبود منابع و نوسانات اقلیمی را پیش‌بینی و آثار مخرب آن‌ها را تعدیل کنند (Tian et al., 2018, 57). کن یانگ (Young & Duchicela, 2020, 882)، از پیشگامان اندیشه 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 عرصه معماری مناطق خشک و نیمه‌خشک انجامیده است؛ مناطقی که فشارهای زیست‌محیطی در آن‌ها به شدت 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). ازسوی دیگر، معمارانی همچون فرانسیس کره در دل صحرای آفریقا، با تلفیق راهبردهای سرمایه‌های غیرفعال و فرایندهای طراحی مبتنی بر 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 گستره پهناور ایران، معماری سنتی همواره نمودی بارز از پایداری زیست‌محیطی بوده است (Davtalab et al., 2022; Heydari & Davtalab, 2020; Davtalab & Heidari, 2020). سیستم‌های پیچیده قنات و سازه‌های هوشمند بادگیر (Heidari & Davtalab, 2022) در مناطق مرکزی ایران، گواهی بر نوآوری پیشینیان در مدیریت بهینه منابع آبی و سازگاری با شرایط اقلیمی سخت و طاقت‌فرسا هستند.



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



تصویر ۲. شاخص‌های کلیدی در تاب آوری اکولوژیک. مأخذ: نگارندگان.

تنوع بخشی در منابع انرژی و مواد: اتکا به منابع انرژی تجدیدپذیر، توزیع شده و سیستم‌های مدیریت پسماند چرخه‌ای، مقاومت سیستم شهری را در برابر نوسانات و بحران‌ها افزایش می‌دهد. این تنوع بخشی، وابستگی به منابع متمرکز و آسیب پذیر را کاهش می‌دهد و امنیت انرژی را تضمین می‌کند.

هم گرایی اجتماعی و زیست محیطی: مشارکت فعالانه شهروندان و ذی‌نفعان محلی در تصمیم‌گیری‌ها، تضمین کننده اجرای موفق استراتژی‌های تاب آوری است. این مشارکت، منجر به شکل‌گیری حس مالکیت و مسئولیت پذیری مشترک می‌شود و ظرفیت جامعه برای پاسخگویی به تغییرات و چالش‌های آینده را افزایش می‌دهد. یادگیری از گذشته و آمادگی برای آینده: سیستم‌های تاب آور، 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 مقاوم تر 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 تاب آوری اکولوژیک

معماری بیونیک، ریشه در تقلید از طبیعت دارد و با الهام از سیستم‌های پیچیده و کارآمد زیستی، به دنبال راهکارهایی نوآورانه برای چالش‌های معاصر است (Bantserova & Kasimova, 2023, 940). جین بن یوس (Benyus, 1997)، بیومیمتیک را فرایندی می‌داند که در آن، استراتژی‌های اثبات شده طبیعت به مثابه الگویی ارزشمند برای حل مسائل پیچیده انسانی به کار گرفته می‌شود. پژوهش‌های پیشگامانی چون بارتلوت و همکاران (Barthlott et al., 2016, 19) نشان داده‌اند که اصول بنیادین حیات همچون خودترمیمی، تطبیق پذیری و بهینه سازی

انرژی، می‌توانند الهام بخش 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 زیست محیطی، میراث گرانسنگ فرهنگی این منطقه را نیز پاس می‌دارد. طراحی نماهای پویای خشتی که قادر به تنظیم دما براساس تغییرات محیطی باشند، سیستم‌های جمع آوری آب الهام گرفته 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 عرصه معماری بیونیک منجر به توسعه 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، از جمله توسعه مواد تغییر فازدهنده و بایوکامپوزیت‌ها، پتانسیل ایجاد تحولی شگرف در ادغام مفهوم پایداری در فرم‌های معماری را فراهم آورده است.

در پهنه تاریخی بم، اصول بیونیک راهگشای ارائه راهکارهای نوآورانه‌ای برای مقابله با چالش‌های زیست محیطی است؛ راهکارهایی که ضمن حفظ هویت فرهنگی این شهر، به ارتقای پایداری آن نیز کمک شایانی می‌کند (تصویر ۳). به عنوان مثال، سازه‌های خشتی با بهره‌گیری از الهامات طبیعت، همچون پوشش‌های جاذب رطوبت الگوبرداری شده از گیاهان بیابانی یا پایه‌های توزیع کننده بار الهام گرفته از ساختارهای زیستی، می‌توانند به پایداری و استحکام بیشتری دست یابند. همچنین، پیاده سازی سیستم‌های سرمایشی غیرفعال الهام گرفته از هوشمندی تپه‌های مورانه‌ای، تحولی شگرف در تنظیم دمای داخلی ساختمان‌های بم ایجاد خواهد کرد. تلفیق این نوآوری‌ها با عناصر بومی نظیر حیاط‌های خنک و کوچه‌های سایه دار، 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 به دنبال ایجاد محیط‌های ساخته شده‌ای 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 محیط زیست، به دنبال ایجاد بناها و

می‌شوند، خواص خودتمیزشوندگی و دفع آب را دارا هستند (Abd Ullah et al., 2018). این رویکرد، با اولویت قراردادن نوآوری‌های مبتنی بر اصول زیستی، پیشرفت‌های علمی در حوزه‌های مواد، رباتیک و مهندسی سیستم‌ها را یکپارچه می‌سازد و به خلق معماری‌ای می‌انجامد که نه تنها با محیط خود سازگار بلکه توانایی پیش‌بینی و تطبیق با شرایط متغیر محیطی را نیز دارا است (Sardá et al., 2023).

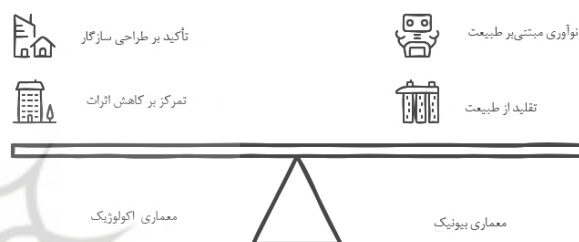
• تداوم فرهنگی: پاسداری از هویت جمعی از طریق معماری

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، نه تنها 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 پیشگامانه نادر خلیلی در ایران، پتانسیل تلفیق هوشمندانه تکنیک‌های سنتی با نوآوری‌های معاصر را برای حفظ یکپارچگی فرهنگی این شهر به نمایش می‌گذارد. مفاهیم بدیع همچون «سوپرآدوب» 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، نه تنها 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، علاوه بر عملکرد زیست‌محیطی، باید به ارزش‌های فرهنگی ساختمان نیز توجه داشته باشد (تصویر ۵).



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



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

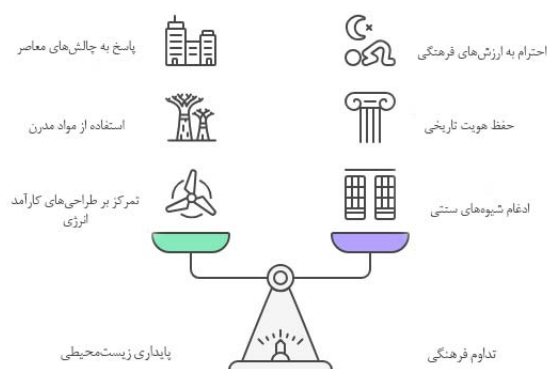
سازه‌هایی است که به‌طور پایدار با اکوسیستم‌های طبیعی همزیستی کنند (Williams, 2007). این رویکرد بر بهره‌وری از منابع، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و طراحی بناها متناسب با شرایط اقلیمی تأکید دارد. به عبارت دیگر، معماری اکولوژیک، بنا را به‌عنوان عضوی از یک سیستم اکولوژیکی بزرگ‌تر می‌بیند و به دنبال ایجاد 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 کمی برای ارزیابی پایداری ساختمان‌ها متکی است (Orr, 2007).

در مقابل، معماری بیونیک با فراتر نهادن از محدوده 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 موربانه طراحی می‌شوند، قادر به تنظیم خودکار دمای داخلی هستند و موادی که با الگوبرداری از برگ‌های نیلوفر آبی تولید

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 حداقل رساندن مصرف انرژی کمک کنند.

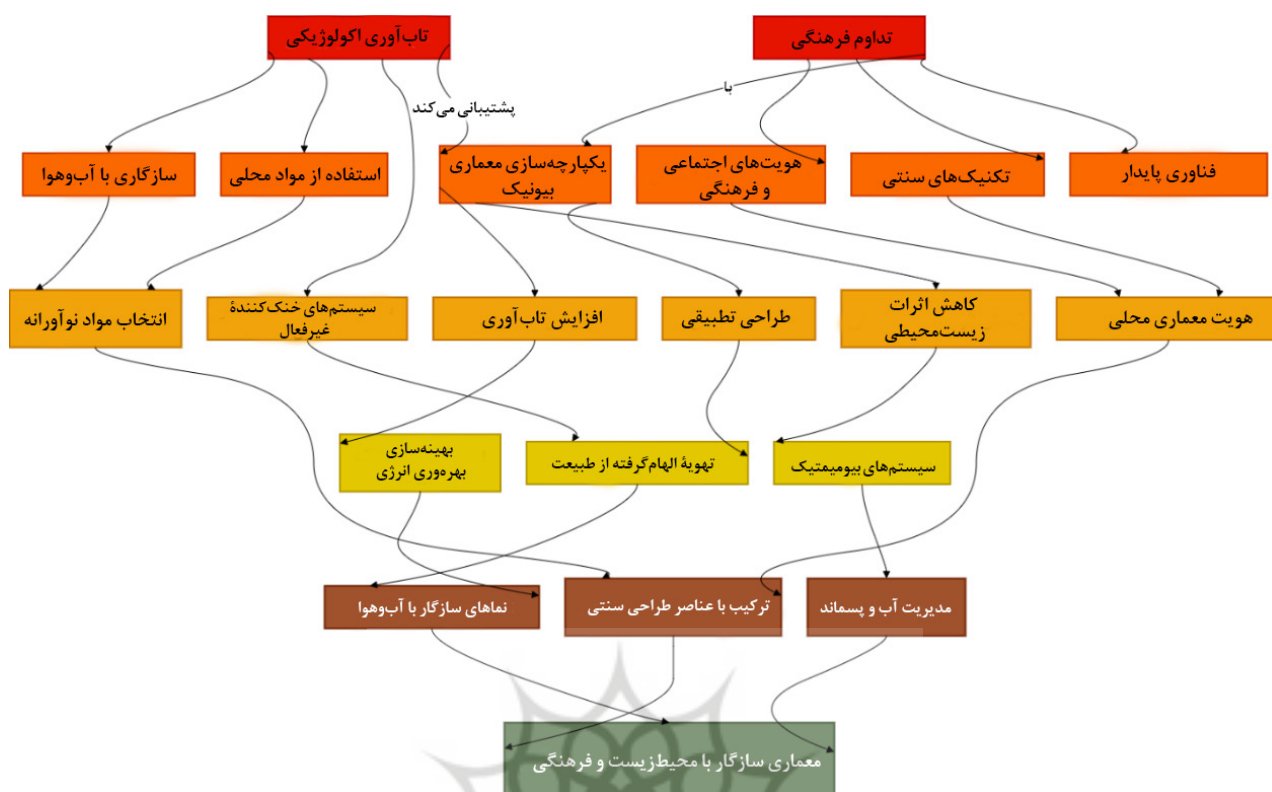
روش پژوهش

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 زلزله 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، پس از گذراندن فرایند پیچیده 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 کمی‌سازی تغییرات بافتی منحصربه‌فرد در معماری بومی، به انجام رسید. الگوهای هندسی اصلی نیز با بهره‌گیری از تبدیل هوف^۱ 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 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. ازسوی دیگر، 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



تصویر ۶. مدل نظری پژوهش. مأخذ: نگارندگان.

دو گروه مصاحبه‌ها، با بهره‌گیری از نرم‌افزار ATLAS T.I تحلیل شد که امکان کدگذاری موضوعی و استخراج اصول کلیدی طراحی را فراهم آورد.

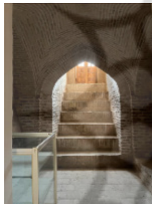
یافته‌های پژوهش

در زیرمطالعه 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 نحوه ادغام معماری بیونیک و اصول آن با معماری بومی شهر بم پرداخته شد. نتایج حاصل از این بخش در **جدول ۱** ارائه شده است.

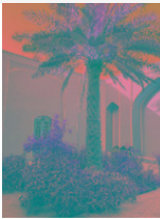
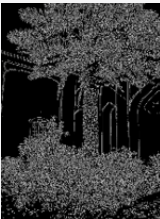
آمیزش هنر معماری بیونیک با بافت سنتی بم، افقی نوین را پیش روی می‌گشاید؛ افقی که در آن، محیطی پایدار و همساز با فرهنگ بومی در دل کویر پدید می‌آید. معماری بومی شهر بم، با دیوارهای خشتی، کوچه‌های تنگ، سقف‌های طاقی و گنبدی، گنجینه‌ای از راهکارهای خنک‌سازی طبیعی و بهره‌گیری از جرم حرارتی است. این عناصر، همسو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

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 درباره 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 نقشه معماری خانه عامری‌ها، از دانش و تجربه سه تن از متخصصان برجسته کرمانی بهره جسته شد. مشورت با این کارشناسان، دریچه‌ای نو به سوی درک نحوه 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 به صورت آگاهانه و چه به صورت 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

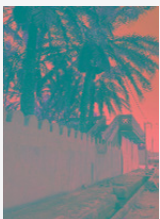
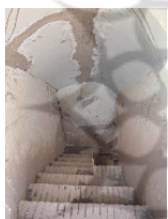
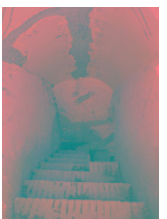
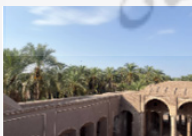
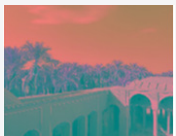
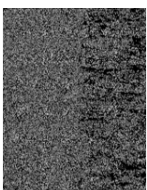
جدول ۱. الهامات زیستی و راهکارهای پیشنهادی بیونیک برای معماری بومی در شهر بم. مأخذ: نگارندگان.

ردیف	مصادقی از معماری بومی شهر بم	الگوی زیستی (بیونیک)	ادغام معماری بیونیک با معماری بومی شهر بم	تصاویر پردازش شده	تشخیص لبه
۱	- در برابر باد مقاوم و توزیع بارهای سازه‌ای به صورت یکنواخت است. - خنک‌سازی غیرفعال و گردش طبیعی هوا در فضای داخلی به سهولت انجام می‌شود. - گردش کنترل‌شده هوا برای خنک‌سازی داخلی بدون ورود گرمای اضافی امکانپذیر است. - در برابر نفوذ شن در اقلیم‌های بیابانی محافظت شده است.	- پوسته لاک‌پشت: نسبت بهینه استحکام به وزن - شکل کاکتوس: سازگاری با اقلیم‌های سخت برای دفع گرما. - تپه‌های موربانه‌ای: برج‌های تهویه برای حفظ تعادل حرارتی داخلی. - لانه پرندگان: موقعیت استراتژیک بازشوها برای تنظیم جریان هوا.	- استفاده از مواد بازتاب‌دهنده گرما الهام گرفته از پوست کاکتوس برای بهبود خنک‌سازی. طراحی گنبد‌های آیرودینامیک برای مقاومت در برابر باد در مناطق خشک. - طراحی بازشوهای تهویه بهینه براساس مدل تپه‌های موربانه برای تنظیم جریان هوا. - توسعه مکانیسم‌های تهویه قابل تنظیم الهام گرفته از لانه 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. - این فضاها با کاهش تجمع حرارت، دماهای خنک‌تری را حفظ می‌کنند.	- تپه‌های موربانه‌ای استفاده از کانال‌های داخلی برای تنظیم جریان هوا و کاهش تجمع حرارت. - ریشه‌های نخل: ایجاد پایداری در خاک‌های سست از طریق ساختارهای متصل در زیرزمین.	- ایجاد مسیرهای تهویه در فضاهای طاق‌دار، الهام گرفته از سیستم‌های جریان هوای تپه‌های موربانه برای کاهش تجمع حرارت به صورت طبیعی. - استفاده از الگوهای آجری متصل الهام گرفته 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 خرد اقلیم‌هایی هستند که گرما را کاهش می‌دهند. - 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. - گیاهان بیابانی: سازگاری برای ذخیره آب و مقاومت در برابر گرما، مانند برگ‌های مومی و ریشه‌های عمیق.	- استفاده از سیستم‌های سایه‌اندازی الهام گرفته از نخل برای گسترش اثر سایه‌اندازی در نمای ساختمان و سقف‌ها. - به کارگیری 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. - مصالح آجری جرم حرارتی بالایی دارند که دماهای داخلی را پایدار می‌سازد.	- تپه‌های موربانه‌ای: استفاده از شبکه‌های تهویه برای خنک‌سازی غیرفعال. - اسکلت بیرونی سوسک: لایه‌بندی‌های سبک اما مستحکم برای افزایش پایداری سازه.	- طراحی مسیرهای جریان هوا در سقف‌های طاق‌دار الهام گرفته از تهویه تپه‌های موربانه برای بهبود جریان هوا و خنک‌سازی. - تقویت سازه‌های طاقی با الگوهای آجری لایه‌ای شبیه اسکلت بیرونی سوسک برای افزایش مقاومت در برابر زلزله.	 	

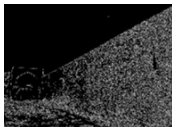
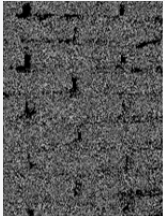
ادامه جدول ۱.

ردیف	مصادقی از معماری بومی شهر بم	الگوی زیستی (بیونیک)	ادغام معماری بیونیک با معماری بومی شهر بم	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. - 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. - درختان مرکبات: با تعریق تبخیری، هوا را خنک و در باغ‌های سنتی ایرانی میوه فراهم می‌کنند.	- توسعه پرگولاهای سبک با طراحی‌های الهام‌گرفته از برگ‌های نخل برای گسترش سایه در حیاط‌ها. - 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 هندسه فشرده و عایق‌بندی‌شده، جذب حرارت خورشیدی را به حداقل می‌رسانند. - دیوارهای ضخیم خشتی با جرم حرارتی بالا، در روزهای گرم خنک و در شب‌های سرد گرم باقی می‌مانند.	- پوسته حلزون: بیابانی: جذب حرارت را با سطوح بازتابنده و شکل مارپیچی کاهش می‌دهد. - خارهای کاکتوس: حرارت را دفع و سایه‌اندازی ایجاد می‌کند.	- اعمال پوشش‌های بازتابنده بر سطح گنبد، الهام‌گرفته از حلزون‌های بیابانی برای کاهش جذب خورشیدی. - 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. - سنگ‌فرش دوام بالایی در شرایط خشک دارد و گردوغبار و بازتاب حرارت را کاهش می‌دهد.	- تونل‌های مورچه‌های صحرایی: این تونل‌ها جریان هوا و کنترل دما را در طراحی فشرده حفظ می‌کنند. - پوست شتر: به‌عنوان عایق عمل می‌کند و جذب گرما و از دست دادن رطوبت را کاهش می‌دهد.	- افزودن مسیرهای تهویه در دیوارهای خشتی الهام‌گرفته از تونل‌های مورچه‌های صحرایی برای بهبود جریان هوا و خنک‌سازی مسیرها. - تقویت سنگ‌فرش با بافت‌های الهام‌گرفته از پوست مار برای کاهش خطر لغزش و بهبود دفع حرارت.			
۸	- دیوار خشتی نشان‌دهنده عایق کاری حرارتی سنتی است که به‌طور مؤثر شرایط گرمای شدید را تعدیل می‌کند. - سایه‌های درخت نخل با خنک‌سازی غیرفعال، دیوار را از تابش مستقیم خورشید محافظت می‌کنند.	- پوست مار: ساختار هم‌پوشان آن جذب حرارت را به حداقل رسانده و دوام و انعطاف را فراهم می‌کند. - پشم روباه بیابانی (Whitford, 2002): پشم متراکم و رنگ روشن نور خورشید را بازتاب می‌دهد و گرمای داخلی بدن را تنظیم می‌کند.	- استفاده از پوشش‌های زیستی الهام‌گرفته از پوست شتر برای بهبود عایق کاری دیوارها، کاهش ترک‌خوردگی و کاهش نیاز به نگهداری. - معرفی طراحی‌های زیستی برای گسترش دیوار (مانند دنده‌های سایه‌زن) براساس خارهای کاکتوس) برای بهبود جریان هوا و خنک‌سازی.			
	- نزدیکی به پوشش گیاهی (نخلستان‌ها) خرداقلیم ایجاد می‌کند و دماهای محیطی را کاهش می‌دهد.	- ریشه‌های درخت بانوباب: رطوبت را ذخیره می‌کنند و در دوره‌های خشک طولانی دوام می‌آورند.	- افزودن مخازن ذخیره رطوبت در پایه دیوارها الهام‌گرفته از ریشه‌های بانوباب برای تنظیم رطوبت محیط و بهبود خرداقلیم.			

ادامهٔ جدول ۱.

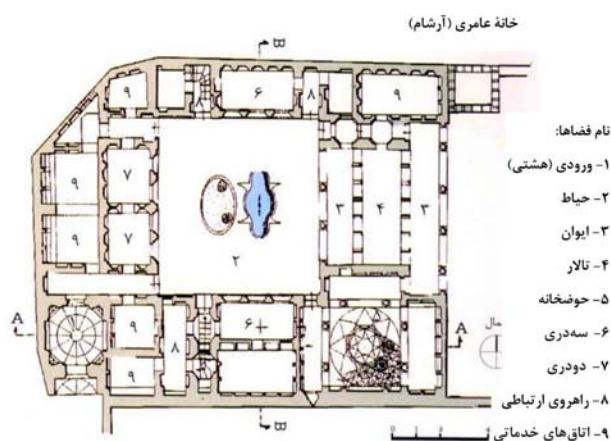
ردیف	مصداق از معماری بومی شهر بم	الگوی زیستی (بیونیک)	ادغام معماری بیونیک با معماری بومی شهر بم	تصویر اصلی	فضای رنگ آزمایشگاهی	تشخیص لبه
۹	- دیوارهای خشتی با جرم حرارتی بالا برای عایق‌بندی گرما بسیار مناسب هستند و در اقلیم‌های گرم و خشک مانند بم اهمیت بالایی دارند. - سایه‌های ایجاد شده توسط درختان نخل اثر خنک‌کنندگی ایجاد می‌کنند و دمای سطح را کاهش می‌دهند. - ادغام پوشش گیاهی کیفیت هوا را بهبود بخشیده و به ایجاد خرد اقلیم محلی کمک می‌کند.	- تار عنکبوت: ماده‌ای قوی اما سبک برای ایجاد سازه‌های کششی سایه‌دار. - ساختار کاکتوس (Ward, 2009): بهینه‌سازی ذخیرهٔ آب و سایه‌اندازی.	- کاشت پوشش‌های گیاهی مقاوم به خشکی، الگوبرداری شده از سیستم‌های کاکتوسی، در نزدیکی دیوارها برای ایجاد یک سد خنک‌کنندهٔ مداوم. - معرفی سازه‌های سایه‌دار کششی الهام‌گرفته از تار عنکبوت برای افزایش مناطق سایه و کاهش هزینه‌های مواد.			
۱۰	- سقف‌های طاقی در پایداری سازه‌های بسیار مؤثرند و بار را به‌صورت یکنواخت توزیع می‌کنند و نوسانات دمایی را کاهش می‌دهند. - 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 شش ضلعی، بار را به‌طور کارآمد توزیع و تهویه را حفظ می‌کنند. - تپه‌های موربانه‌ای: جریان هوای طبیعی و دفع حرارت را در طراحی‌های فشرده امکان‌پذیر می‌کنند.	- تقویت طاق‌ها با الگوهای ساختاری شش ضلعی براساس کندوهای زنبور برای افزایش استحکام و کاهش وزن سازه. - ایجاد کانال‌های کوچک جریان هوا الهام‌گرفته از تپه‌های موربانه برای تهویه مناسب و کاهش گرمای داخلی.			
۱۱	- نخلستان‌های متراکم به‌عنوان بادشکن طبیعی عمل می‌کنند و طوفان‌های شنی را کاهش می‌دهند و سایه‌ای خنک فراهم می‌کنند. - معماری طاق‌دار پایداری سازه‌ای را تضمین می‌کند و نفوذ مستقیم نور خورشید به ساختمان را به حداقل می‌رساند. - 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. - غشای بال خفایش: لایه‌های نازک اما بادوام که جریان هوا را با حداقل مواد به حداکثر می‌رسانند. - 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. - معرفی مواد ترکیبی لایه‌ای الهام‌گرفته از پوستهٔ لاک‌پشت برای تقویت سقف و بهبود عایق‌کاری. - استفاده از الیاف نخل در ساخت و ساز برای کاربردهای سازگار با محیط‌زیست و اقلیم.			
۱۲	- بافت دیوار نمایانگر آجرهای خشتی محلی است که تکنیک‌های سنتی سازگار با اقلیم گرم و خشک بم را برجسته می‌کند. - فواصل و بی‌نظمی‌های طبیعی سطح، عایق‌کاری و تهویه را بهبود می‌بخشد.	- تپهٔ مورچه‌ها: تونل‌های پیچیده برای تنظیم حرارتی. - ساختار منقار دارکوب: لایه‌بندی مقاوم در برابر ضربه.	- معرفی دیوارهای دولایه الهام‌گرفته از طراحی تپه‌های مورچه برای بهبود خنک‌سازی غیرفعال و عملکرد حرارتی. - افزودن خواص جذب شوک به خشت با استفاده از ترکیبات زیستی مانند کاه و خاک رس، الهام‌گرفته از ساختار لایه‌ای منقار دارکوب.			

ادامه جدول ۱.

ردیف	مصادقی از معماری بومی شهر بم	الگوی زیستی (بیونیک)	ادغام معماری بیونیک با معماری بومی شهر بم	تصویر اصلی	فضای رنگ آزمایشگاهی	تشخیص لبه
۱۳	- طراحی طاقی و چارچوب مبتنی بر ستون‌ها پایداری سازه‌ای و توزیع مؤثر بار را نشان می‌دهد. - این طراحی، فضاهای سایه‌دار ایجاد می‌کند و تابش گرمای خورشید را در اقلیم‌های گرم و خشک مانند بم کاهش می‌دهد.	- هندسه کندویی: نسبت مقاومت به وزن بالا و استفاده کارآمد از مواد. - کوهان شتر: ذخیره انرژی و حفظ دما.	- اعمال هندسه کندویی برای بهبود یکپارچگی سازه‌ای در عین کاهش مصرف مواد و ساخت ستون‌های سبک‌تر و مقاوم‌تر. - ادغام سیستم‌های ذخیره حرارت الهام گرفته 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 موربانه‌ای: سیستم‌های تنظیم حرارتی و تهویه کارآمد. - خارهای کاکتوس: کاهش جذب حرارت و تأمین استحکام ساختاری.	- تهویه غیرفعال پیشرفته الهام گرفته از تپه‌های موربانه، شامل شبکه‌ای از گذرگاه‌های هوایی به هم پیوسته. - افزودن الگوهای سطح خارجی الهام گرفته از خارهای کاکتوس برای کاهش جذب گرمای خورشیدی.	- تپه‌های موربانه‌ای: سیستم‌های تنظیم حرارتی و تهویه کارآمد. - خارهای کاکتوس: کاهش جذب حرارت و تأمین استحکام ساختاری.			
۱۵	- الگوی چیده شده آجر روش‌های ساخت سنتی را بازتاب می‌دهد که استحکام سازه‌ای و جرم حرارتی را فراهم می‌کند. - فاصله بین آجرها پتانسیل تهویه هوا یا حرکت مواد را افزایش می‌دهد و عایق‌بندی را بهبود می‌بخشد.	- کندوی عسل: آرایش کارآمد مواد برای استحکام و تهویه. - پوست مار: الگوهای هم‌پوشان برای انعطاف‌پذیری و حفاظت حرارتی.	- استفاده از چیدمان الهام گرفته از کندو برای ایجاد مواد سبک اما بادوام و بهبود عایق‌بندی. - توسعه سیستم مدولار آجری 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. - جریان هوا و نور طبیعی را ترویج می‌دهند که برای اقلیم‌های گرم مناسب است.	- تار عنکبوت: کارایی سازه‌ای با حداقل مواد. - رگ‌برگ‌های برگ: توزیع بار از طریق الگوهای حداقلی اما قوی.	- استفاده از شکل‌های تطبیقی طاق الهام گرفته از رگ‌برگ‌های برگ برای ایجاد سیستم‌های باربر قوی‌تر و سبک‌تر. - اجرای دستگاه‌های سایه‌اندازی خورشیدی در طاق‌ها برای تنظیم شدت نور خورشید.			

عملکرد اقلیمی بناها ارائه می‌دهد. این هم‌افزایی، نه تنها به پاسداری از میراث معماری این شهر کهن می‌انجامد بلکه تاب‌آوری آن را در برابر چالش‌های اقلیمی افزایش می‌دهد. با این وجود، 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

ساختار لایه‌های خارجی سوسک‌ها در طراحی سقف‌های طاقی و گنبدی، نه تنها 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 پوسته حلزونها برای کاهش جذب حرارت، ضمن حفظ زیبایی‌شناسی سنتی، راهکارهای نوینی را برای بهبود



تصویر ۷. نمای از پلان معماری خانه عامری ها در شهر بم. مأخذ: گلپایگانی، ۱۳۸۶.

معماری خانه عامری ها یکی از نمونه های فاخر معماری بومی در شهر بم، میزان تطابق طراحی آن با اصول معماری بیونیک و اکولوژیک را، چه به صورت آگاهانه و چه به صورت ناخودآگاه، کنکاش می کنند.

طراحی خانه عامری ها، با محوریت حیاط مرکزی (حوضخانه) به عنوان عنصری کلیدی، گواهی بر درک ژرف معماران ایرانی از اصول پایدار معماری است. این حیاط که به مثابه قلب تپنده بناست، با حوض آبی و باغچه، میکروکلیمایی را در دل ساختمان پدید آورده است. فرایند تبخیر آب از سطح حوض، در کنار سایه های گسترده ایجادشده توسط بناهای پیرامونی، موجب خنک شدن قابل توجه هوای حیاط و فضاهای مجاور می شود. این شیوه خنک سازی که بر پایه اصول طبیعی استوار است، نه تنها وابستگی به سیستم های سرمایشی مصنوعی را به حداقل می رساند بلکه الگویی روشن از الهام گیری از طبیعت و تقلید از سازوکارهای طبیعی در معماری است.

پلان خانه عامری ها، روایتی از یک توالی فضایی تدریجی است که از ورودی (هشتی) آغاز و به تدریج به فضاهای نیمه خصوصی و خصوصی منتهی می شود. این ترتیب فضایی هوشمندانه، همچون پوستی محافظ، از نفوذ مستقیم شرایط سخت اقلیمی به عمق بنا جلوگیری می کند و فضایی آرام و مطبوع را برای ساکنان فراهم می آورد. به کارگیری سیستم های چنددری (سه دری و دودی) نیز بر انعطاف پذیری این سازه می افزاید و امکان تنظیم جریان هوا و نور را براساس تغییرات فصلی فراهم می سازد. این تقسیم بندی فضایی دقیق و حساب شده، شباهت شگفت آوری به استراتژی های تطبیقی در سیستم های زیستی دارد؛ جایی که لایه ها و غشاها برای بهینه سازی تعامل با محیط طراحی شده اند. این تطابق ناخودآگاه با اصول طراحی بیونیک، گواهی بر نبوغ معماران ایرانی در بهره گیری از دانش بومی و تلفیق آن با الهام از طبیعت است.

گنبدها و طاق های استوار که در سراسر معماری سنتی ایران

نانو، نگرانی هایی را مبنی بر حفظ یکپارچگی زیبایی شناختی و اصالت ساختاری بناها بر می انگیزد. علاوه بر این، بهره مندی از سازگاری های بیونیک نظیر سیستم های جریان هوای الهام گرفته از طبیعت یا مواد خودترمیمی، مستلزم پژوهش ها و آزمایش های گسترده ای است تا از کارایی بلندمدت آن ها در شرایط سخت اقلیمی همچون دمای بالا، بادهای شدید و زلزله های محتمل در منطقه بم اطمینان حاصل شود. چالش دیگر، برقراری تعادل میان مزایای زیست محیطی طراحی های بیونیک و مقرون به صرفه بودن اقتصادی اجرای این فناوری های نوین در منطقه ای تاریخی اما کم برخوردار است. مواجهه با این چالش ها، ضرورت رویکردی چندجانبه را می طلبد که حفاظت از میراث معماری را با پیشرفت های 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 زیست محیطی و فرهنگی، تلفیق اصول طراحی زیستی در معماری بم، فرصتی را برای بازاندیشی درباره پایداری شهری و پاسداری از میراث این شهر تاریخی فراهم می آورد. طراحی زیست محیطی الهام گرفته از نظام های طبیعی چون نخلستان ها و تپه های موریانه، می تواند بهینه سازی سایه اندازی، تهویه و مدیریت آب را در پی داشته و به طور مستقیم بر بهبود ریزاقلیم اثرگذار باشد. به عنوان مثال، طراحی حیاط هایی با پوشش گیاهی سازگار با خشکی و سامانه های سایه اندازی برگرفته از طبیعت، آسایش حرارتی را فزونی می بخشد و مصرف آب را کاهش می دهد. همچنین، تلفیق عناصری همچون دیوارهای سبز الهام گرفته از ریشه های درختان باثواب و پوشش های بازتابنده زیستی روی سطوح خشتی، می تواند به طور چشمگیری استرس گرمایی را کاهش و بهره وری انرژی و آسایش درونی را افزایش دهد. با بهره گیری از راهکارهای طبیعت محور که با ارزش های فضایی و زیبایی شناختی سنتی معماری بم هم خوانی دارد.

زلزله سال ۱۳۸۲، ضربه ای بر پیکره معماری سنتی شهر بم وارد کرد و شکافی عمیق بر هویت فرهنگی و زیست محیطی این نگین کویر نشان داد. بازسازی های پس از زلزله، عمدتاً با اتکا بر رویکردهای نوین معماری انجام شد، رویکردهایی که اغلب اصول بنیادین معماری بومی را که طی قرون متمادی در هم آمیزی با اقلیم گرم و خشک بم و بافت فرهنگی غنی آن شکل گرفته بود، نادیده انگاشتند. در این میان، نمونه های برجای مانده از معماری کهن، همچون خانه تاریخی عامری ها (تصویر ۷)، دریچه ای است به سوی درک استراتژی های زیست محیطی و الهام گیری از طبیعت در طراحی های تاریخی. در این بخش از مقاله با رویکردی تحلیلی بر نقشه

خودنمایی می‌کنند، بی‌شک در خانه‌های عامری‌ها نیز حضوری پررنگ دارند؛ چنانچه از نقشه 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 هندسه 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 مطالعه 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 درباره 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؛ از جمله می‌توان به دیوارهای ضخیم، حیاط‌های سایه‌دار و فضاهای زیرزمینی اشاره کرد. این دیدگاه مبتنی بر 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.

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 خانه‌های عامری‌ها، به‌عنوان نمونه‌ای بارز، نه تنها نقش یک تنظیم‌کننده 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 به سوی رفع چالش‌های ساخت‌وساز سنتی در شهر تاریخی بم می‌گشاید. پژوهش‌های پیشین (Goldust & Ahmadnejad Karimi, 2022) نشان داده‌اند که الگوهای باربری پیچیده در تنه درختان و بال‌های حشرات، الهام‌بخش طراحی کامپوزیت‌های پیشرفته 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 بازتابنده نور که از ساختار پوسته سوسک‌ها الگوبرداری شده‌اند، می‌توانند میزان جذب گرمای ساختمان‌ها را کاهش دهند و به بهبود شرایط آسایش ساکنان کمک کنند. این نوآوری‌ها نه تنها 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 شبکه ریشه گیاهان بیابانی دارند. چنین رویکردی نه تنها 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

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

شرکت کننده 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 غریزه 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 نه تنها 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 تهویه 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 غیرقابل تحمل 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.

رویکرد، شباهت قابل توجهی به استراتژی‌های بقا در گیاهان و جانوران بیابانی دارد که از سایه برای مقابله با گرمای شدید استفاده می‌کنند.

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

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 لانه حیوانات بیابانی، آگاهند. با ادغام این دانش بومی با فناوری‌های نوین و الهام از طبیعت، معماران می‌توانند طرح‌هایی ارائه دهند که هم با روح گذشته 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 همه جوامع نیست. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که برای موفقیت در این مسیر، باید به دنبال 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 دارا بودن اقلیمی سخت و سابقه زلزله‌خیزی، عرصه‌ای است که در آن، نوآوری‌های معماری بیومیمتیک باید توانایی خود را به اثبات رسانند. اگرچه سیستم‌های تهویه الهام‌گرفته از تپه‌های موریانه و



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

سیستم‌های تهویه 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 تهویه 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 فلسفه 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

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، نه تنها از نظر فنی کارآمد باشند بلکه با فرهنگ و ارزش‌های جامعه محلی نیز همخوانی داشته باشند.

از نمونه تا کل؛ اجرای مقیاس‌پذیر در بازآفرینی شهری: اجرای آزمایشی اصول بیونیک در بناهای شاخصی همچون خانه 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. به این ترتیب، 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 ارائه 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. علاوه بر 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، به دلیل عایق کاری حرارتی بالا، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان را نیز ممکن

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. جامعه محلی بم، به دلیل پیوند عمیق با معماری سنتی و دانش بومی، ممکن است نسبت به نوآوری‌های خارجی و تغییرات اساسی در بافت تاریخی شهر، مقاومت نشان دهد. از این رو، مشارکت فعال ساکنان، معماران محلی و سیاست‌گذاران در تمامی مراحل طراحی و اجرا، امری حیاتی است. این امر نه تنها به افزایش پذیرش طرح‌ها کمک می‌کند بلکه تضمین‌کننده 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 پایه 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 موربانه، می‌توان سیستم‌های سرمایشی غیرفعال طراحی کرد که بدون نیاز به انرژی خارجی، دمای داخل ساختمان را کاهش دهند. همچنین، استفاده از سطوح بازتابنده نور خورشید، مشابه پوشش گیاهی بیابانی، می‌تواند از گرم شدن بیش از حد ساختمان‌ها جلوگیری کند. علاوه بر 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

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 توازن ظریف میان حفظ میراث و پیشرفت تکنولوژیکی است. توسعه 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 توسعه زیرساخت‌های لازم است. با توجه به پتانسیل بالای معماری بومی بم و پیشرفت‌های اخیر در حوزه 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. کلیه 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

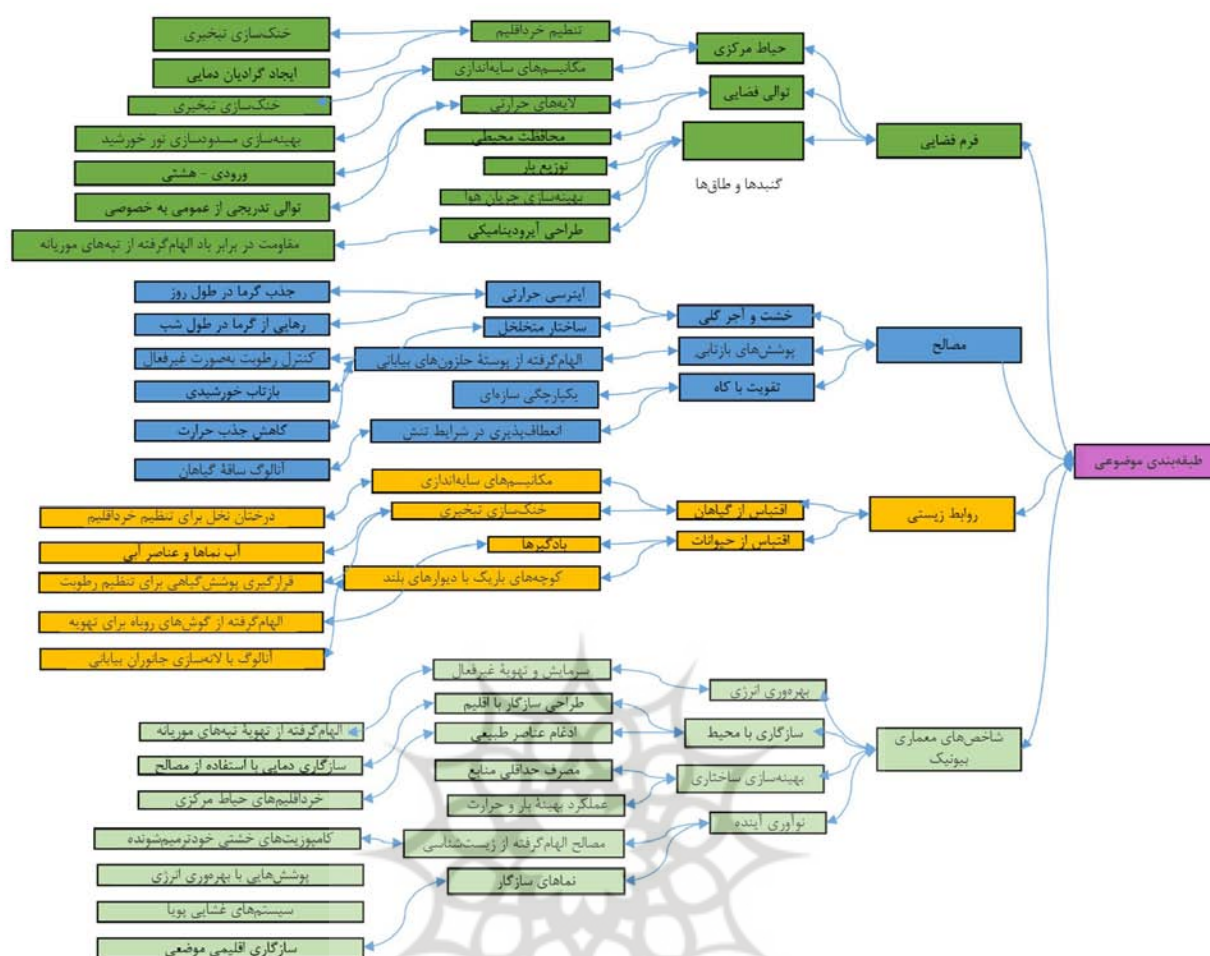
- داعی الله، مانیا و انجم‌شعاع، امینه. (۱۳۸۸). بررسی اصول توسعه پایدار در نظام معماری و شهرسازی گذشته اقلیم گرم‌وخشک ایران. همایش ملی انسان، محیط‌زیست و توسعه پایدار، همدان. <https://www.sid.ir/paper/816041/fa#downloadbottom>
- گلپایگانی، عبدالرضا. (۱۳۸۶). گونه‌شناسی و راهنمای طراحی مسکن بم. وزارت مسکن 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. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(19), 8127-8141. <https://www.semanticscholar.org/>

می‌سازند. ازسوی دیگر، بادگیرها با طراحی آیرودینامیک خود، جریان هوا را به داخل ساختمان هدایت و با الهام از سازوکارهای زیستی، تهویه 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.

علاوه بر 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 علاوه بر تطابق با محیط و کاهش مصرف انرژی، قابلیت ارتقا با فناوری‌های مدرن را نیز دارا هستند. به‌عنوان مثال، استفاده از پوشش‌های بازتابنده الهام‌گرفته از پوسته جانوران بیابانی، با بازتابش اشعه 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 زمینه فرهنگی و محیطی عمیق این شهر دارد. کاشت نخل در حیاط‌های مرکزی، علاوه بر 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 تهویه 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، نشان‌دهنده 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 آیرودینامیک در طراحی بادگیرها، مشابه با بال پرندگان، به ایجاد جریان هوا و تهویه 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



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.architecture.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., Huisinigh, 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=2ahUKEwjnrejk6LAXVOhf0HHQ_LJ4UQFnoECBMQAQ&usq=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 Araştırmaları 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=DTv8CAAQAQ&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.jobbe.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=UhXTEAAQBAJ&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-3mDAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Whitford, W. G. (2002). *Ecology of desert systems*. Academic

Press. <https://books.google.com/books?id=OZ4hZbXS8Ic&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/>).



نحوه 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

