نشریهٔ علمی باغ نظر، ۲۳(۱۵۶)، ۲۱-۳۲ / خرداد ۱۴۰۵
DOI:/10.22034/bagh.2026.567762.5962

ترجمهٔ انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
From Static Restoration to Adaptive Resilience: Bio-Lime as a Material-Oriented Biomimetic Approach to Historic Heritage Conservation (Case Study: Rab'-e Rashidi Tabriz)
در همین شمارهٔ مجله به‌چاپ رسیده است.

مقالهٔ پژوهشی

# معماری به‌مثابهٔ تاب‌آوری: از الهام‌گیری بیومیمتیک تا بازسازی تطبیقی میراث تاریخی در مواجهه با بحران‌های طبیعی و انسانی (نمونه موردی ربع رشیدی تبریز)*،**

زهرا کی‌نژاد[۱]***، فرهاد آخوندی[۱]

۱. گروه فناوری معماری، دانشکدهٔ معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۱

## چکیده

**بیان مسئله:** در سال‌های اخیر، افزایش فراوان بحران‌های طبیعی و انسانی نظیر زلزله، جنگ و تغییرات اقلیمی، چالش‌های جدی در حفاظت و بازسازی میراث معماری تاریخی ایجاد کرده است. رویکردهای رایج مرمت و بازسازی عمدتاً ماهیتی بازتولیدی و کالبدمحور دارند و کمتر به سازوکارهای انطباقی، زمان‌مند و تاب‌آور در سطح ماده توجه کرده‌اند. در این میان، بیومیمتیک به‌عنوان رویکردی مبتنی‌بر الهام از منطق رفتاری و فرایندی طبیعت، می‌تواند بستری نظری برای بازاندیشی در بازسازی تطبیقی میراث تاریخی فراهم آورد؛ به‌ویژه هنگامی که از تقلید صرفِ فرمی فراتر رفته و به رفتار مصالح معطوف شود.

**هدف پژوهش:** پژوهش حاضر با تمرکز بر بیوآهک (emiL-oiB) به‌عنوان مصداقی از بیومیمتیک ماده‌محور، به تبیین ظرفیت‌های مصالح آهکی خودترمیم‌شونده در مرمت و بازسازی تطبیقی میراث معماری می‌پردازد.

**روش پژوهش:** روش تحقیق مبتنی‌بر تحلیل تطبیقی و مرور نظام‌مند مطالعات انجام‌شده در حوزهٔ مصالح خودترمیم‌شونده، ملات‌های آهکی و افزودنی‌های زیست‌پایه در سال‌های اخیر است. مطالعات منتخب براساس شاخص‌هایی چون نوع ماده، سازوکار خودترمیمی، میزان سازگاری با مرمت تاریخی و پیامدهای عملکردی تحلیل شده‌اند.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان می‌دهد که برخلاف سیستم‌های متداول خودترمیم‌شوندهٔ مبتنی‌بر بتن، مصالح آهکی و به‌ویژه بیوآهک به‌واسطهٔ فرایندهای طبیعی کربناته‌شدن، هیدراسیون مجدد و اصلاح ریزساختار، از ظرفیت ذاتی برای خودترمیمی تدریجی، کم‌انرژی و سازگار با بستر تاریخی برخوردارند. یافته‌ها حاکی از آن است که افزودنی‌های زیست‌پایه می‌توانند این ظرفیت را به‌صورت هدفمند تقویت کرده و بدون ایجاد ناسازگاری شیمیایی، به افزایش دوام و تاب‌آوری کالبدی بناهای تاریخی کمک کنند. بر این اساس، پژوهش حاضر چارچوبی مفهومی برای بازسازی تطبیقی مبتنی‌بر بیومیمتیک ماده‌محور پیشنهاد می‌کند که می‌تواند زمینه‌ساز گذار از مرمت ایستا به بازسازی تطبیقی و آینده‌نگر در سایت‌های تاریخی ایران، به‌ویژه ربع رشیدی تبریز، باشد.

**واژگان کلیدی:** *بیومیمتیک، تاب‌آوری معماری، میراث تاریخی، بازسازی تطبیقی، بیوآهک.*

## مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش چشم‌گیر بحران‌های طبیعی و انسانی همچون زلزله، سیل، جنگ، و تغییرات اقلیمی، چالش‌های اساسی در زمینهٔ حفاظت و بازسازی میراث معماری تاریخی به‌وجود آورده است. بسیاری از شهرهای تاریخی در خاورمیانه و مدیترانه در معرض خطر مستقیم یا غیرمستقیم این بحرآنها قرار دارند، و در عین حال، سیاست‌های حفاظتی موجود اغلب بر بازسازی کالبدی متمرکز بوده‌اند و به ابعاد فرهنگی و تطبیقی تاب‌آوری کمتر توجه داشته‌اند (Esposito et al., 2021; Jeleński, 2018).

* این مقاله در همایش بین‌المللی «میراث معماری در خطر» که در تاریخ ۲۹ مهر ۱۴۰۴ به میزبانی مجتمع علمی، فرهنگی و تاریخی ربع رشیدی تبریز و مرکز تحقیقات تاریخ، هنر و فرهنگ سازمان فرهنگی اسلامی (ارسیکا) برگزار شد، ارائه شده است.

** نویسندهٔ مسئول: 09147779208، Z.Keynezhad@tabriziau.ac.ir

در چنین شرایطی، مفهوم «معماری تاب‌آور» به‌عنوان پارادایمی نوین در پیوند میان طراحی، فناوری و میراث فرهنگی مطرح شده است.

معماری تاب‌آور، برخلاف رویکردهای سنتی حفاظت، تنها به حفظ ظاهر بنا بسنده نمی‌کند، بلکه به توانایی سیستم‌های معماری برای انطباق پویا با شرایط متغیر محیطی، اجتماعی و فناورانه تأکید دارد (Fatigusoa et al., 2018). این رویکرد به‌ویژه در بازسازی پس از بحران‌های مخرب، به‌عنوان ابزاری برای حفظ تداوم فرهنگی و عملکردی بناهای تاریخی اهمیت یافته است. با این حال، یکی از چالش‌های بنیادین در تحقق تاب‌آوری، یافتن الگوهایی است که در عین احترام به اصالت میراث، بتوانند ظرفیت‌های سازگاری و باززایی را در آن تقویت کنند.

در این میان، طبیعت به‌عنوان بزرگ‌ترین منبع الهام در طراحی تاب‌آور مطرح شده است. طراحی بیومیمتیک (Biomimetic Design) با الگوبرداری از سازوکارهای زیستی مانند خودترمیمی، تعادل پویا و هم‌زیستی ساختاری، می‌تواند پاسخی نوآورانه برای بازسازی تطبیقی میراث تاریخی ارائه دهد (Bader et al., 2021; Zaki, 2023). همان‌طور که در پژوهش بادر و همکاران (Bader et al., 2021) دربارهٔ بازسازی بندر بیروت مشاهده شد، تقلید از ساختارهای طبیعی مانند درختان و صدف‌ها، موجب افزایش مقاومت سازه‌ای و پایداری در برابر نیروهای محیطی شد.

به‌موازات این تحولات، پژوهش‌های جدید به‌سمت ترکیب اصول بیومیمتیک با فناوری‌های نوین مانند مدل‌سازی دیجیتال، نانوزیست‌فناوری و واقعیت مجازی حرکت کرده‌اند. برای مثال، موچرینو (Mocerino, 2024) با بررسی کاربرد نانومواد الهام‌گرفته از فرایندهای طبیعی در مرمت سازه‌های تاریخی، نشان می‌دهد که استفاده از فناوری‌های هوشمند می‌تواند دوام و پایداری کالبدی بناهای میراثی را افزایش دهد. همچنین لوکانتو و همکاران (Lucanto et al., 2024) به نقش مدل‌سازی دیجیتال و طراحی باززایشی در پیش‌بینی خطرات اقلیمی و برنامه‌ریزی بازسازی تطبیقی اشاره دارد.

در کنار نوآوری‌های فناورانه، پژوهش‌های متعددی بر ارزش دانش بومی و تجربیات سنتی تأکید کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، مکین (Mackin, 2020) با مطالعهٔ پناهگاه‌های سنتی شمالگان، نشان می‌دهد که استفاده از مصالح محلی و فرم‌های طبیعی نه‌تنها پاسخ‌گوی شرایط اقلیمی سخت است، بلکه نوعی تاب‌آوری فرهنگی و اجتماعی را نیز حفظ می‌کند. این مطالعات تأکید دارند که ادغام بینش‌های بومی با نوآوری‌های بیومیمتیک می‌تواند چارچوبی متوازن میان اصالت تاریخی و کارایی معاصر فراهم آورد (Vegas et al., 2022).

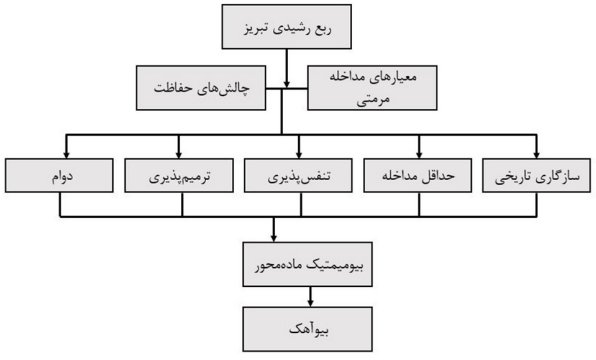
مرور پیشینهٔ موجود بیانگر آن است که علی‌رغم تنوع مطالعات در زمینهٔ بیومیمتیک و تاب‌آوری معماری، اغلب پژوهش‌ها فاقد داده‌های تجربی و ارزیابی کمی از کارایی این رویکردها هستند. بسیاری از مطالعات، صرفاً در سطح نظری یا مفهومی باقی مانده‌اند و شواهد تجربی محدودی دربارهٔ عملکرد واقعی الگوهای بیومیمتیک در شرایط بحران ارائه شده است (Mocerino, 2024; Fatigusoa et al., 2018).

همچنین، بخش عمده‌ای از پژوهش‌ها به مناطق اروپایی اختصاص دارد و نمونه‌های بومی خاورمیانه، از جمله ایران، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

ازاین‌رو، نیاز به توسعهٔ چارچوبی تلفیقی که در آن اصول بیومیمتیک در کنار مفاهیم پایداری تطبیقی و دانش بومی قرار گیرد، بیش از پیش احساس می‌شود. چنین چارچوبی می‌تواند راهگشای بازسازی میراث معماری در برابر بحران‌های طبیعی و انسانی باشد و زمینه‌ساز شکل‌گیری الگوی «تاب‌آوری فرهنگی-زیست‌محیطی» در بازآفرینی بافت‌های تاریخی شود. در این راستا، پژوهش حاضر ربع رشیدی نه صرفاً به‌عنوان نمونه کاربردی، بلکه به‌عنوان بستر مسئله و مبنای استخراج معیارهای مداخله مرمتی در نظر گرفته شده است. بر این اساس، بیوآهک به‌واسطهٔ سازگاری با مصالح آهکی، قابلیت تنفس‌پذیری، ظرفیت خودترمیمی تدریجی و هم‌خوانی با اصل حداقل مداخله، به‌عنوان گزینه‌ای ماده‌محور برای تقویت تاب‌آوری کالبدی و فرهنگی سایت پیشنهاد می‌شود. در تصویر ۱، خلاصه‌ای از چارچوب مفهومی بیوآهک در بازسازی تطبیقی ربع رشیدی تبریز، نشان داده شده است.

## پیشینهٔ پژوهش

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در حوزهٔ حفاظت و مرمت میراث معماری، رویکردهای متداول در بازسازی پس از بحران هنوز عمدتاً ماهیت بازتولیدی و ایستا دارند و کمتر بر پویایی، یادگیری و سازگاری سیستم‌های معماری تمرکز کرده‌اند (Esposito et al., 2021; Jeleński, 2018). این در




تصویر ۱. چارچوب مفهومی انتخاب بیوآهک در بازسازی تطبیقی ربع رشیدی تبریز. مأخذ: نگارندگان.

حالی است که بحران‌های نوین از زلزله‌ها و سیل‌ها گرفته تا تغییرات اقلیمی و منازعات انسانی به‌صورت فزاینده‌ای پیچیده، چندوجهی و پیش‌بینی‌ناپذیر شده‌اند. در چنین شرایطی، حفظ صرف کالبد بنا نمی‌تواند تضمین‌کنندهٔ تداوم فرهنگی و هویتی آن باشد. بلکه لازم است تاب‌آوری میراث معماری از سطح فیزیکی فراتر رفته و شامل ابعاد عملکردی، فرهنگی و فناورانه نیز بشود. همچنین پژوهش‌های جدید نشان می‌دهند که اصول بیومیمتیک، به‌ویژه در تلفیق با فناوری‌های نوینی همچون مدل‌سازی دیجیتال، نانوزیست‌فناوری و واقعیت مجازی، می‌توانند ظرفیت‌های بازسازی تطبیقی را در بناهای تاریخی تقویت کنند (Bader et al., 2021; Mocerino, 2024; Lucanto et al., 2024). با این حال، بخش عمده‌ای از این مطالعات در مقیاس نظری یا طراحی مفهومی باقی مانده‌اند و ارزیابی‌های تجربی محدودی از کارایی واقعی این الگوها در زمینه‌های بومی یا در تعامل با نظام‌های حفاظتی فرهنگی صورت گرفته است. نبود مدل‌های عملی و چارچوب‌های بومی‌سازی‌شده، مانع از کاربرد مؤثر یافته‌های جهانی در بافت‌های تاریخی خاورمیانه و ایران شده است، جایی که بحران‌های طبیعی و انسانی هم‌زمان بر میراث اثرگذارند.

از سوی دیگر، بخش زیادی از رویکردهای بیومیمتیک به جنبه‌های سازه‌ای و فرمال محدود شده‌اند و پیوند میان منطق زیستی طبیعت و اصول پایداری فرهنگی هنوز به‌درستی تبیین نشده است (Fatigusoa et al., 2018; Zaki, 2023). در حالی که مطالعاتی مانند مکین (Mackin, 2020) و وگاس و همکاران (Vegas et al., 2022) نشان داده‌اند که سازوکارهای بومی و سنتی، خود جلوه‌هایی از منطق طبیعت در مواجهه با بحران هستند، تاکنون الگویی نظام‌مند برای تلفیق دانش بومی، الهام بیولوژیک و فناوری نوین در فرایند بازسازی تطبیقی ارائه نشده است. این فقدان، سبب می‌شود سیاست‌ها و اقدامات حفاظتی بیشتر واکنشی و کوتاه‌مدت باشند تا پویا و آینده‌نگر.

در دهه‌های اخیر، مفهوم «معماری تاب‌آور» به‌عنوان یکی از محورهای بنیادین در رویکردهای نوین حفاظت از میراث تاریخی مطرح شده است. این رویکرد با تمرکز بر سازوکارهای انطباقی و بازآیشی، می‌کوشد پیوند میان پایداری محیطی، کارایی ساختاری و تداوم فرهنگی را در فرایند بازسازی پس از بحران برقرار سازد. براساس مرور نظام‌مند انجام‌شده بر پژوهش‌های سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴، می‌توان روندی فزاینده در استفاده از اصول بیومیمتیک (Biomimetic Design) در طراحی و مرمت بناهای تاریخی مشاهده کرد؛ روندی که طبیعت را نه صرفاً به‌عنوان منبع الهام فرمی، بلکه به‌عنوان الگوی رفتاری و عملکردی برای تاب‌آوری در برابر تهدیدهای محیطی می‌نگرد (Bader et al., 2021; Mocerino, 2024).

مکین (Mackin, 2020) با بررسی پناهگاه‌های بومی در مناطق شمالگان، نشان می‌دهد که استفاده از مصالح محلی و فرم‌های طبیعی می‌تواند به ایجاد سازه‌هایی منجر شود که هم از منظر اقلیمی پایدارند و هم از لحاظ فرهنگی، حس تعلق و تداوم هویت را حفظ می‌کنند. در همین راستا، بادر و همکاران (Bader et al., 2021) در بازسازی بندر بیروت، از ساختارهای زیستی مانند درختان، بامبو و صدف برای ارتقای مقاومت سازه‌ای و کاهش اثرات تخریب پس از انفجار بهره گرفته‌اند. این دو پژوهش نشان می‌دهند که اصول بیومیمتیک می‌تواند در شرایط بحرانی، به‌عنوان ابزار باززایی کالبدی و اجتماعی عمل کند.

در حوزهٔ فناوری‌های نوین، مطالعات متعددی به نقش ابزارهای دیجیتال در ارتقای تاب‌آوری میراث معماری پرداخته‌اند. لوکانتو و همکاران (Lucanto et al., 2024) کاربرد مدل‌سازی دیجیتال و طراحی باززایشی را در تحلیل ریسک اقلیمی بافت‌های تاریخی مطرح می‌کنند و نشان می‌دهند که فناوری‌های نوین مانند Digital Prototyping و Regenerative Design می‌توانند با شبیه‌سازی چندسناریویی، به تصمیم‌گیری آگاهانه در مرمت کمک کنند. موچرینو (Mocerino, 2024) نیز در پژوهش خود بر استفاده از نانوبیوتکنولوژی، سطوح خودپاک‌شونده و مصالح هوشمند تأکید می‌کند که با الهام از سازوکارهای طبیعی، به افزایش دوام و عملکرد حرارتی بناهای تاریخی منجر می‌شوند. این مطالعات بیانگر تغییر پارادایم از حفاظت منفعل به‌سمت بازسازی هوشمند و داده‌محور هستند.

از سوی دیگر، پژوهش‌هایی همچون اسپوسیتو و همکاران (Esposito et al., 2021) و فتیگوسا و همکاران (Fatigusoa, 2018) بر ضرورت ایجاد چارچوب‌های چندریسکی در حفاظت میراث تأکید دارند. آنها با ترکیب مدل‌سازی خطر، ارزیابی عملکرد سازه و تحلیل رفتار اجتماعی، چارچوبی برای تصمیم‌گیری تطبیقی در بافت‌های تاریخی ارائه می‌دهند. با این حال، همان‌گونه که در تحلیل نظام‌مند این مطالعات نیز آمده، رویکردهای موجود عمدتاً نظری و کیفی هستند و کمتر به داده‌های تجربی و ارزیابی‌های کمی از میزان تأثیرپذیری روش‌های بیومیمتیک پرداخته‌اند.

در حوزهٔ دانش بومی و میراث فرهنگی، مکین (Mackin, 2020) و وگاس و همکاران (Vegas et al., 2022) نشان می‌دهند که سازوکارهای سنتی و محلی در معماری بومی، خود حامل اصول بیومیمتیک‌اند؛ برای نمونه، در سازه‌های خشتی یا گنبدی مناطق خشک، همان الگوهای خودتنظیم و سازگار

با محیط مشاهده می‌شود که طبیعت در سیستم‌های زیستی خود به کار می‌برد. وگاس و همکاران (Vegas et al., 2022) در مطالعه‌ای بین‌المللی بر معماری بومی اسپانیا، مراکش و چین، تأکید می‌کنند که بهره‌گیری از منابع محلی، شکل‌گیری الگوهای سازگار با اقلیم و بازتولید مصالح طبیعی، ریشه در فهم زیستی انسان از محیط دارد. این مطالعات با تأکید بر هم‌افزایی بین سنت و فناوری، به اهمیت ادغام دانش بومی و نوآوری بیومیمتیک در حفاظت میراث اشاره می‌کنند.

در عین حال، مرور جامع پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که با وجود گستردگی موضوع، هنوز مدل مفهومی واحدی برای ادغام اصول بیومیمتیک، فناوری دیجیتال و تاب‌آوری فرهنگی در فرایند بازسازی تطبیقی تدوین نشده است (Mocerino, 2024; Lucanto et al., 2024). بیشتر مطالعات در مقیاس موردی (case-based) یا آزمایشگاهی انجام شده‌اند و کمتر به تلفیق نظریه‌های پایداری تطبیقی با منطق زیستی طبیعت پرداخته‌اند. ازاین‌رو، خلأ قابل‌توجهی در ادبیات علمی در زمینهٔ تلفیق بیومیمتیک با چارچوب‌های بومی احیای میراث معماری در مناطق بحران‌زده وجود دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که پیشینهٔ موجود با وجود تأکید بر اهمیت تاب‌آوری و الهام از طبیعت، هنوز فاقد چارچوبی جامع برای پیوند بین زیست‌الهامی، فناوری‌های هوشمند و هویت فرهنگی است. پژوهش حاضر بر آن است تا با بهره‌گیری از رویکردی تطبیقی، مدلی مفهومی برای بازسازی میراث معماری تاریخی در برابر بحران‌های طبیعی و انسانی ارائه دهد؛ مدلی که در آن سازوکارهای بیومیمتیک در کنار فناوری‌های دیجیتال و اصول پایداری فرهنگی، بنیان تاب‌آوری تطبیقی را شکل دهند. مروری بر پژوهش‌های مرتبط با کاربرد بیوآهک در مرمت و حفاظت بناهای تاریخی در جدول ۱ ارائه شده است.

## مبانی نظری

چارچوب نظری پژوهش حاضر بر این فرض بنیادین استوار است که بازسازی میراث معماری تاریخی در مواجهه با

جدول ۱. پیشینهٔ پژوهش. مأخذ: نگارندگان.

| نویسنده / سال | محور اصلی پژوهش | نوع میراث مورد مطالعه | نوع بحران | رویکرد بیومیمتیک | یافته‌های کلیدی | محدودیت پژوهش |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Mackin (2020) | بازسازی پناهگاه‌های بومی شمالگان | معماری سنتی بومی | اقلیم سرد، تغییرات آب‌وهوایی | استفاده از مصالح طبیعی، فرم‌های الهام‌گرفته از طبیعت | پیوند میان پایداری اقلیمی و تاب‌آوری فرهنگی | فقدان تحلیل فناورانه و مدل‌سازی کمی |
| Bader et al. (2021) | بازسازی بندر بیروت پس از بحران | بافت شهری تاریخی | زلزله، انفجار، سونامی | تقلید از ساختار درخت، بامبو و صدف برای استحکام سازه | بیومیمتیک به‌عنوان ابزار باززایی اجتماعی و سازه‌ای | محدود به مطالعهٔ موردی و فاقد تعمیم‌پذیری |
| Lucanto et al. (2024) | طراحی و مدل‌سازی دیجیتال | ساختمان تاریخی در ایتالیا | تغییر اقلیم، سیلاب | نمونه‌سازی دیجیتال و طراحی بازتولیدی | مدل‌سازی داده‌محور در تحلیل خطر اقلیمی | تمرکز نظری؛ بدون داده تجربی |
| Mocerino (2024) | نانوفناوری و دیجیتالیزه‌کردن میراث | بناهای تاریخی و مناظر فرهنگی | فرسایش، زلزله، تغییر اقلیم | نانوبیوتکنولوژی، سطوح خودپاک‌شونده | ارتقای دوام و عملکرد سازه‌ای | کمبود ارزیابی بلندمدت میدانی |
| Esposito et al. (2021) | تحلیل میراث شهری | بافت‌های تاریخی شهری | بلایای طبیعی و اقلیمی | مدل‌سازی عملکرد و رفتار اجتماعی | چارچوب تصمیم‌گیری تطبیقی در حفاظت | محدود به مدل نظری |
| Fatigusoa et al. (2018) | چارچوب نظری تاب‌آوری در میراث تاریخی | بافت‌های سنگی سنتی (Matera, Italy) | بحران‌های محیطی و فرسایش | سیستم‌های انطباقی الهام‌گرفته از طبیعت | تأکید بر هماهنگی میان حفاظت و تغییر | فاقد ارزیابی کمی از نتایج |
| Vegas et al. (2022) | تاب‌آوری معماری بومی در مناطق مختلف | معماری بومی بین‌المللی (اسپانیا، مراکش، چین) | زلزله، سیل، فشار شهری | بیومیمتیک ضمنی از طریق بیوکلیماتیک | ادغام منابع محلی و فناوری | نیاز به مدل مفهومی تلفیقی |
| Zaki (2023) | بیومیمتیک در طراحی مقاوم مدرن | ساختمان‌های مدرن (آسیا و آمریکا) | بلایای طبیعی، تغییر اقلیم | تقلید از ساختار DNA و پر پرندگان | بهبود کارایی انرژی و استحکام | تمرکز بر مدرن، نه میراث تاریخی |
| Jeleński (2018) | بازسازی میراث پس از بحران در لهستان | مجتمع‌های تاریخی شهری | تخریب ناشی از جنگ و بحران | حفاظت تطبیقی و باززایی عملکردی | پیوند بازسازی کالبدی و هویتی | کمبود نگاه فناورانه و بیومیمتیک |

بحران‌های طبیعی و انسانی، مستلزم گذار از رویکردهای ایستا و بازتولیدی به سوی الگوهای پویا، سازگار و تاب‌آور است. در این میان، مفهوم «معماری تاب‌آور» به‌عنوان پارادایمی نوین، بر توانایی سیستم‌های معماری برای انطباق تدریجی، تداوم عملکرد و حفظ هویت فرهنگی در شرایط عدم قطعیت تأکید دارد (Fatigusoa et al., 2018; Jeleński, 2018). از سوی دیگر، طراحی بیومیمتیک با الهام از منطق رفتاری و سازوکارهای زیستی طبیعت نظیر خودترمیمی، تعادل پویا و هم‌زیستی ساختاری چارچوبی مفهومی برای ارتقای تاب‌آوری در معماری فراهم می‌آورد که فراتر از تقلید فرمی، بر فرایندها و رفتار سیستم‌ها تمرکز دارد (Bader et al., 2021; Zaki, 2023). بر این اساس، پژوهش حاضر با تأکید بر بیومیمتیک ماده‌محور و نقش مصالح خودترمیم‌شونده آهکی، به‌ویژه زیست‌آهک، می‌کوشد چارچوبی نظری برای بازسازی تطبیقی میراث تاریخی ارائه دهد که در آن، ماده به‌عنوان عنصری فعال در فرایند تاب‌آوری کالبدی و فرهنگی ایفای نقش می‌کند.

**• ربع رشیدی تبریز؛ بستر تاریخی، کالبدی و اقلیمی پژوهش**

ربع رشیدی تبریز یکی از مجموعه‌های تاریخی و وقفی دورهٔ ایلخانی است که به دستور خواجه رشیدالدین فضل‌الله همدانی در اوایل سدهٔ هشتم هجری شکل گرفت و در منابع تاریخی با نام‌هایی چون «رشیدیه»، «رشیدآباد» و «ابواب‌البر رشیدی» نیز شناخته شده است. این مجموعه که امروزه بقایای آن با وسعتی حدود ۱۳ هکتار در شمال‌شرقی تبریز، بر روی کنان‌کوه و در دامنهٔ کوه سرخاب قرار دارد، در سال ۱۳۵۴ با شمارهٔ ۹۴۳ در فهرست آثار ملی ایران ثبت شده است. براساس وقف‌نامه ربع رشیدی، این شهرچه نه‌تنها فضایی معماری، بلکه مجموعه‌ای علمی، خدماتی، مذهبی و زیستی بوده که با هدف اسکان گروه‌هایی از شهرها و سرزمین‌های مختلف و تأمین خدمات عمومی، آموزشی و درمانی سازمان‌دهی شده بود. شواهد تاریخی و باستان‌شناختی نشان می‌دهد که ربع رشیدی در مرحلهٔ نخست، بخشی از روضهٔ رشیدی و مجموعه وقفی خواجه رشیدالدین در دورهٔ ایلخانی بوده و پس از آن، در دوره‌های بعدی دچار تغییر کاربری، تخریب، بازسازی و لایه‌های متعدد سکونتی و نظامی شده است (Ajorloo & Mehdizadeh, 2024).

اهمیت ربع رشیدی تنها به جایگاه علمی و وقفی آن محدود نمی‌شود، بلکه چندلایگی تاریخی و معماری آن، این سایت را به نمونه‌ای پیچیده برای مطالعهٔ مرمت و بازسازی تطبیقی تبدیل کرده است. پس از افول ایلخانان و رخدادهای تخریبی، این مجموعه در دورهٔ صفوی و عثمانی کارکردی نظامی یافت؛ به‌ویژه در سال‌های «فترت رومیه تبریز»، عثمانیان با توجه به موقعیت راهبردی کنان‌کوه، اشراف آن بر مهران‌رود و دشت تبریز، در این محدوده قلعه‌ای بزرگ ساختند و برج بزرگ جنوبی را به‌عنوان بخشی از ساختار دفاعی آن ایجاد کردند (آجورلو و همکاران، ۱۳۹۹). از سوی دیگر، مطالعات مربوط به سازهٔ پلکانی تپه شرقی نیز نشان می‌دهد که ربع رشیدی دارای زیرساخت‌های آبرسانی مهمی، از جمله آب‌انبار، قنات‌ها و شبکه لوله‌های سفالین بوده است؛ عناصری که نقش این مجموعه را در تأمین آب، پایداری سکونت، تاب‌آوری در برابر محاصره و سازمان‌دهی خدمات شهری نشان می‌دهد. بنابراین، ربع رشیدی را می‌توان بستری تاریخی، کالبدی و زیرساختی دانست که در آن مسئله حفاظت صرفاً به حفظ بقایای معماری محدود نیست، بلکه با خوانش لایه‌های ایلخانی، پساایلخانی، صفوی و عثمانی، شناخت مصالح، عملکردها، نظام آبرسانی و منطق دفاعی سایت پیوند می‌خورد (Roshan et al., 2024). موقعیت و بقایای کالبدی ربع رشیدی در تصویر ۲ نشان داده شده است.

تصویر ۲. ربع رشیدی تبریز. مأخذ: نگارندگان.

**• بیومیمتیک به‌عنوان منطق بنیادین تاب‌آوری در میراث معماری**

در این پژوهش، بیومیمتیک به‌عنوان ستون فقرات نظری مطرح می‌شود؛ اما نه در معنای تقلید فرمی از طبیعت، بلکه به‌مثابهٔ الهام از منطق رفتاری، سازگاری و خودتنظیمی سیستم‌های زیستی. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که طبیعت از طریق سازوکارهایی چون خودترمیمی، تعادل پویا، افزونگی و هم‌زیستی ساختاری، توانایی بقا در شرایط بحرانی را تضمین می‌کند (Bader et al., 2021; Zaki, 2023). انتقال این منطق به معماری میراثی، مستلزم تمرکز بر فرایندها و رفتارهاست، نه صرفاً فرم یا تکنولوژی.

**• گذار از بیومیمتیک فرمال به بیومیمتیک ماده‌محور در بازسازی تاریخی**

یکی از نکات کلیدی استخراج‌شده از تحلیل پیشینه آن است که بخش عمده‌ای از رویکردهای بیومیمتیک در معماری، به سطح سازه‌ای یا فرمال محدود مانده‌اند، در حالی که لایهٔ «رفتار ماده» کمتر مورد توجه قرار گرفته است. چارچوب نظری پژوهش حاضر، این خلأ را با تمرکز بر بیومیمتیک ماده‌محور پر می‌کند؛ جایی که خود مصالح ساختمانی، واجد ظرفیت‌های زیست‌الهام برای انطباق و ترمیم هستند. در این نگاه، ماده نه یک عنصر منفعل، بلکه بخشی از سیستم تاب‌آور معماری تلقی می‌شود که در طول زمان با محیط تعامل می‌کند (Zuabi et al., 2021).

**• مصالح آهکی خودترمیم‌شونده و سازگاری با مداخلات مرمتی**

مصالح آهکی، به‌ویژه ملات‌های مبتنی‌بر آهک هوایی و آهک هیدرولیکی طبیعی، به‌دلیل ماهیت معدنی، تنفس‌پذیری، نفوذپذیری کنترل‌شده و سازگاری شیمیایی با بسیاری از مصالح تاریخی، جایگاهی مهم در مداخلات مرمتی دارند. برخلاف مصالح سیمانی مدرن که اغلب به‌سبب سختی بالا، نفوذپذیری پایین و ناسازگاری رفتاری با بسترهای تاریخی می‌توانند موجب تمرکز تنش، حبس رطوبت و تشدید فرسایش شوند، ملات‌های آهکی رفتاری تدریجی‌تر و سازگارتر با مصالح سنتی از خود نشان می‌دهند. این ویژگی‌ها سبب می‌شود آهک نه صرفاً به‌عنوان یک ماده اتصال‌دهنده، بلکه به‌مثابهٔ بخشی از منطق حفاظتی مرمت تلقی شود؛ منطقی که بر حداقل مداخله، برگشت‌پذیری نسبی، هم‌خوانی با بستر تاریخی و حفظ تداوم رفتاری مصالح تأکید دارد. از این منظر، مصالح آهکی می‌توانند در بازسازی و تثبیت بخش‌های آسیب‌دیده میراث معماری، بدون تحمیل رفتار مکانیکی نامتجانس، امکان مداخله‌ای ملایم، تدریجی و قابل‌انطباق با شرایط کالبدی بنا را فراهم آورند (Bader et al., 2021; Zaki, 2023).

یکی از مهم‌ترین ظرفیت‌های مصالح آهکی در پیوند با رویکردهای نوین مرمت، قابلیت خودترمیمی درون‌زاد آنهاست. این قابلیت عمدتاً از طریق فرایندهایی چون کربناته‌شدن مجدد، هیدراسیون ثانویه، انحلال و رسوب دوباره ترکیبات کلسیمی و پرشدن تدریجی ریزترک‌ها و منافذ فعال می‌شود (Pietruszka, 2019). در چنین فرایندی، ماده در مواجهه با رطوبت، دی‌اکسیدکربن و تغییرات محیطی، به‌صورت تدریجی بخشی از آسیب‌های ریزمقیاس خود را ترمیم کرده و به پایداری بیشتر ریزساختار دست می‌یابد. اهمیت این ویژگی در مرمت بناهای تاریخی آن است که ترمیم نه از طریق مداخله‌ای خشن و خارجی، بلکه در امتداد رفتار طبیعی ماده و در طول زمان رخ می‌دهد؛ بنابراین با اصول حفاظت میراث، به‌ویژه اصل سازگاری، مداخلهٔ حداقلی و پرهیز از افزودن سامانه‌های ناسازگار، هم‌راستا است (Beatty et al., 2022). بر همین اساس، در جدول ۲، گونه‌های مختلف مصالح خودترمیم‌شونده، سازوکارهای ترمیم، مزایا، محدودیت‌ها و میزان ارتباط آنها با مداخلات مرمتی مقایسه و ارائه شده‌اند.

**• بیوآهک به‌عنوان راهبرد ماده‌محور برای ارتقای تاب‌آوری میراث تاریخی**

در لایه‌ای پیشرفته‌تر، بیوآهک به‌عنوان راهبردی برای تقویت این ظرفیت طبیعی مطرح می‌شود. افزودنی‌های زیست‌پایهٔ تخمیری، با اصلاح ریزساختار ملات‌های آهکی، تسریع تشکیل فازهای پایدار کربناتی و افزایش همگنی ماده، زمینه‌ساز نوعی خودترمیمی تدریجی، کم‌انرژی و سازگار با بستر تاریخی می‌شوند. در چارچوب نظری پژوهش، بیوآهک نه یک فناوری صرف، بلکه تجلی هم‌زمان منطق زیستی طبیعت و دانش بومی مصالح سنتی تلقی می‌شود؛ امری که آن را به گزینه‌ای مناسب برای بازسازی تطبیقی میراث تاریخی تبدیل می‌کند (Vegas et al., 2022; Mackin, 2020).

بیوآهک به‌عنوان یک رویکرد نوین در معماری و ساخت‌وساز پایدار، مجموعه‌ای از سیستم‌های آهکی تقویت‌شدهٔ زیستی را دربر می‌گیرد که هدف اصلی آنها کاهش اثرات زیست‌محیطی، افزایش دوام و ارتقای عملکرد تطبیقی مصالح است. مطابق این گزارش، فناوری‌های بیوآهکی شامل چهار رویکرد متمایز اما مکمل هستند: کامپوزیت‌های همپ آهک، سیستم‌های زیست‌سیمانی مبتنی‌بر رسوب کربنات کلسیم القاشده میکروبی (MICP)، ملات‌های آهکی با افزودنی‌های آلی تخمیری و لایه‌های محافظ آهکی با تقویت زیستی وجه اشتراک این رویکردها، اتکا به سازوکارهای زیستی برای فعال‌سازی فرایندهای طبیعی آهک نظیر کربناته‌شدن، ترمیم ریزترک‌ها و تنظیم رطوبتی و نه جایگزینی کامل منطق مصالح سنتی است. یافته‌های گزارش نشان می‌دهد که بیوآهک بیش از آنکه یک ماده واحد باشد، یک چارچوب ماده‌محور است که

جدول ۲. مصالح خودترمیم شونده. مأخذ: نگارندگان.

| نوع مصالح خودترمیم‌شونده | سازوکار خودترمیمی | مقیاس ترمیم ترک | مزایا | محدودیت‌ها | منابع |
|---|---|---|---|---|---|
| بتن خودترمیم درون‌زاد (Autogenous Concrete) | هیدراسیون مجدد، کربناته‌شدن، افزودنی‌های بلوری و SAP | ریز (≈ 150–100 µm) | ساده، بدون سیستم خارجی، هزینه کمتر | ظرفیت ترمیم محدود، وابستگی شدید به رطوبت | دبلی و همکاران (۲۰۱۸) |
| بتن خودترمیم برون‌زاد (کپسولی) | رهایش عامل ترمیم از میکروکپسول‌ها هنگام ترک‌خوردگی | متوسط (≈ 300 µm) | ترمیم فعال، عملکرد سریع | ناسازگاری شیمیایی، دشواری ساخت صنعتی | مینبو و همکاران (۲۰۱۷) |
| بتن با سیستم عروقی (Vascular Concrete) | شبکه‌های لوله‌ای الهام‌گرفته از سیستم‌های زیستی | متوسط تا بزرگ (≥ 1 mm) | ترمیم چندباره، بازیابی بالای مقاومت | پیچیدگی بالا، عدم تناسب با مرمت تاریخی | مینبو و همکاران (۲۰۱۷) |
| ملات آهکی خودترمیم درون‌زاد | کربناته‌شدن، هیدراسیون مجدد، پرشدن منافذ | ریز (micro-cracks) | سازگاری تاریخی، رفتار تدریجی، برگشت‌پذیر | سرعت ترمیم پایین، وابسته به شرایط محیطی | گاریجو و همکاران (۲۰۲۳) |
| ملات آهکی با افزودنی‌های بلوری | تسریع فرایندهای ترمیم طبیعی | ریز تا متوسط | افزایش دوام بدون اختلال جدی در اصالت | داده‌های کمی محدود | ناردی و همکاران (۲۰۲۰) |
| ملات آهکی با میکروکپسول‌ها | آزادسازی بایندر آهکی پس از ترک | ریز | خودترمیم فعال در بستر تاریخی | کاهش مقاومت فشاری آنی | ناردی و همکاران (۲۰۲۰) |
| زیست‌آهک (Bio-Lime Mortar) | افزودنی‌های زیستی، بهبود کربناته‌شدن و ریزساختار | ریز (تدریجی) | کم‌هزینه، غیرسمی، هم‌راستا با بیومیمتیک | تمرکز بیشتر بر دوام تا ترک‌درمانی مستقیم | منوهاران و همکاران (۲۰۲۲) |
| مصالح زیست‌الهامی پیشرفته (نانو/هوشمند) | سطوح خودپاک‌شونده، واکنش‌های نانوزیستی | متغیر | بهبود دوام و عملکرد محیطی | هزینهٔ بالا، فقدان داده میدانی بلندمدت | موچرینو (۲۰۲۴) زاکی (۲۰۲۳) |

هر زیرسیستم آن در پاسخ به نیازهای متفاوت معماری، از کاربردهای غیرسازه‌ای و پوششی تا حفاظت و مرمت میراث تاریخی، عمل می‌کند (Lawrence et al., 2012). از منظر نظری، اهمیت بیوآهک در پیوند هم‌زمان میان پایداری زیست‌محیطی، خودترمیمی تدریجی و سازگاری با بسترهای تاریخی قابل تبیین است. گزارش نشان می‌دهد که در بسیاری از کاربردها به‌ویژه در مرمت بناهای تاریخی ویژگی‌هایی همچون تنفس‌پذیری، تنظیم رطوبت و توانایی ترمیم طبیعی ریزآسیب‌ها، نسبت به مقاومت مکانیکی بالا اولویت دارند. در این زمینه، ملات‌های آهکی با افزودنی‌های زیستی تخمیری و پوشش‌های آهکی تقویت‌شده زیستی، به‌دلیل هم‌خوانی شیمیایی با مصالح سنتی و رفتار تدریجی در زمان، بیشترین انطباق را با اصول حفاظت میراث نشان می‌دهند. گزارش همچنین تأکید می‌کند که علی‌رغم محدودیت‌های مکانیکی و چالش‌های مقیاس‌پذیری برخی فناوری‌های بیوآهکی، بیشترین موفقیت اجرایی آنها در حوزه‌هایی حاصل شده است که نیازمند مداخله حداقلی، برگشت‌پذیری و دوام بلندمدت هستند؛ امری که جایگاه نظری بیوآهک را به‌عنوان راهکاری ماده‌محور و زیست‌الهام در بازسازی تطبیقی میراث معماری تقویت می‌کند (Booth & Ljiljanam, 2022).

**• زمینهٔ تاریخی-اقلیمی ربع رشیدی به‌عنوان بستر خوانش تطبیقی**

ربع رشیدی تبریز در این پژوهش نه به‌عنوان نمونه‌ای برای مداخلهٔ اجرایی قطعی، بلکه به‌مثابهٔ بستری تاریخی، اقلیمی و هویتی برای خوانش تطبیقی چارچوب نظری مطرح می‌شود. این سایت به‌دلیل قرارگیری در اقلیم سرد تبریز، آسیب‌پذیری بقایای تاریخی، حساسیت‌های حفاظتی و پیوند با حافظه فرهنگی شهر، نیازمند رویکردی است که در آن مداخله مرمتی با اصول سازگاری، حداقل مداخله، دوام تدریجی و احترام به منطق مصالح سنتی همراه باشد. از این منظر، مصالح آهکی و به‌ویژه بیوآهک می‌توانند به‌عنوان راهبردی ماده‌محور برای تقویت تاب‌آوری کالبدی و فرهنگی ربع رشیدی مورد خوانش قرار گیرند.

چارچوب نظری پژوهش، تاب‌آوری را صرفاً در سطح ماده یا سازه محدود نمی‌کند، بلکه آن را در پیوند با تاب‌آوری فرهنگی و دانش بومی می‌بیند. مطالعات معماری بومی نشان

می‌دهد که بسیاری از الگوهای سنتی ساخت، خود واجد منطق بیومیمتیک‌اند و از طریق مصالح محلی، فرم‌های سازگار با اقلیم و فرایندهای تدریجی ساخت، پاسخ‌های تاب‌آور به بحران‌ها ارائه داده‌اند (Mackin, 2020; Vegas et al., 2022). از این منظر، استفاده از مصالح آهکی و بیوآهک، نه‌تنها انتخابی فنی، بلکه انتخابی فرهنگی و هویتی است.

## روش پژوهش / مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نظر ماهیت، تحلیلی-تطبیقی و از نظر هدف، کاربردی-توسعه‌ای است. در این پژوهش تلاش شده تا از طریق تحلیل نظام‌مند منابع و مطالعات پیشین، چارچوبی مفهومی برای بازسازی تطبیقی میراث معماری تاریخی برمبنای الهام بیومیمتیک و فناوری‌های نوین ارائه شود. روش تحقیق بر پایهٔ تحلیل محتوای کیفی و استنتاج تطبیقی (Comparative Inference) استوار است تا روابط میان سه محور اصلی پژوهش بیومیمتیک، پایداری تطبیقی و تاب‌آوری فرهنگی به‌صورت نظری و ساختاری تبیین شود. در مرحلهٔ نخست، داده‌های پژوهش از طریق مرور نظام‌مند متون علمی منتشرشده بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ گردآوری شد. برای این منظور، پایگاه‌های دادهٔ Semantic Scholar، OpenAlex و Elicit مورد استفاده قرار گرفت و در مجموع ۵۰ مقالهٔ مرتبط با کلیدواژه‌های Resilient Architecture، Biomimetic Design، Adaptive Reconstruction و Cultural Heritage استخراج شد. پس از غربالگری با معیارهایی چون تمرکز بر میراث تاریخی، کاربرد اصول بیومیمتیک، و حضور در زمینه‌های بحران طبیعی یا انسانی، ده مطالعهٔ معتبر برای تحلیل نهایی انتخاب شد (از جمله آثار Mackin, 2020; Bader et al., 2021; Lucanto et al., 2024; Mocerino, 2024). داده‌های کیفی از این مقالات در قالب شاخص‌هایی چون نوع میراث، نوع بحران، اصول بیومیمتیک به‌کاررفته، فناوری‌های مورد استفاده، و نتایج تجربی کدگذاری و طبقه‌بندی شدند. در مرحلهٔ دوم، یافته‌های استخراج‌شده در قالب تحلیل تطبیقی مورد ارزیابی قرار گرفت تا اشتراکات و تفاوت‌های میان رویکردهای بیومیمتیک در زمینه‌های مختلف شناسایی شود. سپس، با استفاده از روش استنتاج مفهومی (Conceptual Derivation) و مقایسه‌ی میان مفاهیم نظری موجود، مدل مفهومی بازسازی تطبیقی مبتنی‌بر بیومیمتیک و فناوری‌های دیجیتال تدوین شد. این مدل در چهار مؤلفه‌ی اصلی شامل بیومیمتیک، پایداری تطبیقی، فناوری دیجیتال و تاب‌آوری فرهنگی سازمان‌دهی شد. در پایان، اعتبار نظری مدل از طریق مقایسه با چارچوب‌های مطرح در پژوهش‌های موچرینو (Mocerino, 2024) و فتیگوسا و همکاران (Fatigusoa, 2018) مورد ارزیابی قرار گرفت تا انسجام و قابلیت تعمیم آن در بستر میراث معماری ایران سنجیده شود. جمع‌بندی یافته‌های حاصل از مرور پژوهش‌های پیشین و جهت‌گیری نظری مقاله در جدول ۳ ارائه شده است.

## یافته‌ها و بحث

یافته‌های حاصل از مرور نظام‌مند و تحلیل تطبیقی مطالعات نشان می‌دهد که مفهوم تاب‌آوری معماری در ادبیات معاصر، غالباً در پیوند مستقیم با اصول بیومیمتیک تعریف شده است؛ به‌گونه‌ای که طبیعت نه صرفاً به‌عنوان منبع الهام فرمی، بلکه به‌عنوان الگویی رفتاری و عملکردی برای مواجهه با بحران‌های طبیعی و انسانی تلقی می‌شود (Mackin, 2020; Bader et al., 2021; Zaki, 2023). با این حال، بررسی دقیق‌تر این مطالعات نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از رویکردهای بیومیمتیک در معماری، همچنان به سطح سازه‌ای، فرمال یا فناوری‌های دیجیتال محدود مانده و کمتر به لایهٔ «رفتار ماده» و نقش مصالح در تحقق تاب‌آوری پرداخته‌اند. این شکاف، به‌ویژه در حوزهٔ حفاظت و احیای میراث تاریخی، اهمیت مضاعفی می‌یابد؛ جایی که ماده، نه‌تنها حامل عملکرد سازه‌ای، بلکه حافظ هویت و تداوم تاریخی است.

تحلیل مطالعات مرتبط با مصالح خودترمیم‌شونده نشان

جدول ۳. جمع‌بندی یافته‌ها و جهت‌گیری نظری. مأخذ: نگارندگان.

| نویسنده | محور اصلی | نوع بحران | رویکرد بیومیمتیک | ارتباط با مدل پیشنهادی |
|---|---|---|---|---|
| Mackin (2020) | معماری بومی | اقلیمی | مصالح محلی و فرم‌های طبیعی | سازگاری فرهنگی |
| Bader et al. (2021) | بازسازی بندر بیروت | انفجار، زلزله | الهام از درخت و صدف | سازگاری ساختاری |
| Lucanto et al. (2024) | طراحی باززایشی | تغییر اقلیم | مدل‌سازی دیجیتال | پشتیبانی داده‌محور |
| Mocerino (2024) | نانوفناوری در میراث | زلزله و فرسایش | سطوح هوشمند و خودپاک‌شونده | ارتقای عملکرد سازه‌ای |
| Vegas et al. (2022) | معماری بومی بین‌المللی | چندریسکی | بیوکلیماتیک سنتی | پیوند با دانش بومی |

می‌دهد که اگرچه خودترمیم‌شوندگی به‌عنوان یکی از جلوه‌های طراحی تاب‌آور مطرح شده است، اما در عمل عمدتاً به فناوری‌های بتن سازه‌ای محدود مانده و کمتر در چارچوب مرمت و احیای میراث تاریخی توسعه یافته است. یافته‌های پژوهش، همان‌گونه که در جدول ۴ نشان داده شده است، بیانگر ارتباط میان بیومیمتیک، پایداری تطبیقی، فناوری دیجیتال و تاب‌آوری فرهنگی در فرایند بازسازی تطبیقی هستند. رویکردهای رایج، به‌ویژه سیستم‌های خودکار مبتنی‌بر کپسول‌ها و شبکه‌های عروقی، علی‌رغم عملکرد فنی قابل توجه، به‌دلیل ناسازگاری شیمیایی، پیچیدگی اجرایی و ماهیت غیرقابل بازگشت، هم‌خوانی محدودی با اصول حفاظت میراث و منشورهای بین‌المللی دارند. این امر بیانگر شکاف معنادار میان پیشرفت فناورانه در حوزهٔ مصالح هوشمند و قابلیت کاربرد آنها در بافت‌های تاریخی حساس است (Saridhe & Selvaraj, 2021).

در مقابل، یافته‌ها نشان می‌دهد که مصالح آهکی، به‌واسطهٔ منطق طبیعی تشکیل و تحول خود، دارای ظرفیت ذاتی برای خودترمیمی هستند. این ظرفیت از طریق فرایندهایی همچون هیدراسیون مجدد، کربناته‌شدن و پرشدن تدریجی منافذ فعال می‌شود و به‌ویژه در شرایط بارگذاری چرخه‌ای، به افزایش معنادار مقاومت فشاری باقیمانده و کاهش تخلخل ریز منجر می‌شود (Choi et al., 2017). چنین رفتاری نشان‌دهندهٔ فعال‌شدن سازوکارهای درون‌زاد ترمیم در ماده است و مصالح آهکی را به گزینه‌ای سازگار، تدریجی و قابل انطباق برای مداخلات حفاظتی در سایت‌های تاریخی تخریب‌شده تبدیل می‌کند؛ گزینه‌ای که با فلسفهٔ حداقل مداخله و برگشت‌پذیری در مرمت هم‌راستاست.

یافته‌های مرتبط با زیست‌آهک (Bio-Lime) و افزودنی‌های زیست‌پایه نشان می‌دهد که ادغام مواد آلی تخمیری با ملات‌های آهکی می‌تواند این ظرفیت ذاتی را به‌طور هدفمند تقویت کند. ترکیبات زیستی، از طریق اصلاح ساختار منافذ، تسریع تشکیل فازهای پایدار کربناتی و افزایش همگنی ریزساختار، زمینه را برای نوعی خودترمیمی تدریجی، کم‌انرژی و پایدار فراهم می‌کنند. نکتهٔ قابل‌توجه آن است که این فرایندها بدون اتکا به فناوری‌های پیچیده و در امتداد منطق زیستی طبیعت عمل می‌کنند؛ امری که زیست‌آهک را به نمونه‌ای شاخص از تقلید عملکردی از طبیعت در مقیاس ماده تبدیل می‌سازد و آن را در قلب رویکرد بیومیمتیک و پایداری تطبیقی قرار می‌دهد.

از منظر نظری، تحلیل تطبیقی نشان می‌دهد که مصالح خودترمیم‌شونده آهکی و زیست‌پایه را می‌توان به‌عنوان تجلی ماده‌محور بیومیمتیک در معماری تاب‌آور تفسیر کرد. برخلاف بسیاری از رویکردهای بیومیمتیک که به تقلید فرمی یا سازه‌ای محدود می‌شوند، در این‌جا خود ماده، همانند یک سیستم زیستی، قادر به واکنش، یادگیری و انطباق تدریجی در طول زمان است (Bader et al., 2021; Zaki, 2023). این ویژگی، پیوند مستقیمی میان بیومیمتیک، رفتار ماده و تاب‌آوری کالبدی برقرار می‌سازد و نشان می‌دهد که تاب‌آوری می‌تواند از سطح فرم و سیستم، به سطح ریزساختار مصالح ارتقا یابد.

درنهایت، نتایج نشان می‌دهد که با وجود ظرفیت‌های قابل‌توجه زیست‌آهک و مصالح خودترمیم‌شونده آهکی، فقدان چارچوب‌های ارزیابی کمی و مدل‌های تصمیم‌گیری داده‌محور، مانع از انتقال این قابلیت‌ها به سطح راهبردهای اجرایی در احیای میراث تاریخی شده است. بیشتر پژوهش‌های موجود به توصیف کیفی بهبود دوام و عملکرد مصالح بسنده

جدول ۴. ارتباط میان مؤلفه‌های اصلی مدل مفهومی بازسازی تطبیقی برپایهٔ بیومیمتیک. مأخذ: نگارندگان.

| مؤلفه | تعریف کلیدی | نمونه‌ها | خروجی یا کارکرد در بازسازی تطبیقی |
|---|---|---|---|
| بیومیمتیک (Biomimicry) | الهام از ساختار و رفتار طبیعت | ساختار درخت، صدف، بامبو، پوست | افزایش مقاومت سازه‌ای و کارایی انرژی |
| پایداری تطبیقی (Adaptive Sustainability) | سازگاری پویا و یادگیری در زمان | سیستم‌های قابل تغییر و بازآموزی‌شونده | تداوم عملکرد و انطباق با شرایط محیطی |
| فناوری دیجیتال (Digital Technology) | ابزارهای مستندسازی و مدل‌سازی داده‌محور | Digital Twin، HBIM، VR | تحلیل ریسک، شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری دقیق |
| تاب‌آوری فرهنگی (Cultural Resilience) | تداوم هویت و حافظهٔ جمعی | مشارکت جامعهٔ محلی، بازآفرینی فرهنگی | بازسازی معنادار و حفظ پیوستگی فرهنگی |

کرده‌اند و سنجش تطبیقی سناریوهای مداخله، وزن‌دهی شاخص‌های پایداری و پیش‌بینی رفتار بلندمدت مصالح کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این یافته، ضرورت تلفیق مصالح خودترمیم‌شونده زیست‌پایه با ابزارهایی چون دوقلوی دیجیتال، مدل‌سازی داده‌محور و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را برجسته می‌سازد تا بازسازی تطبیقی میراث معماری از سطح مفهوم، به سطح راهبردی و قابل اجرا ارتقا یابد (Esposito et al., 2021; Lucanto et al., 2024).

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بازسازی میراث معماری در مواجهه با بحران‌های طبیعی و انسانی، نیازمند گذار از رویکردهای بازتولیدی و کالبدمحور به‌سوی چارچوب‌هایی پویا، تطبیقی و ماده‌محور است؛ چارچوب‌هایی که در آن «تاب‌آوری» نه صرفاً به معنای مقاومت فیزیکی، بلکه به‌عنوان ظرفیت انطباق، ترمیم تدریجی، تداوم عملکرد و حفظ معنا درطول زمان تعریف می‌شود. یافته‌ها نشان می‌دهد که بیومیمتیک، هنگامی که از سطح تقلید فرمی فراتر رفته و به منطق رفتاری و فرایندی طبیعت اتکا کند، می‌تواند مبنایی نظری برای بازسازی تطبیقی میراث تاریخی فراهم آورد. در این میان، «رفتار ماده» جایگاهی تعیین‌کننده دارد؛ زیرا در بناهای تاریخی، مصالح نه‌تنها نقش سازه‌ای و حفاظتی دارند، بلکه بخشی از اصالت، تداوم تاریخی و منطق ساخت بنا محسوب می‌شوند. از این منظر، انتخاب مصالح مرمتی باید افزون بر دوام و کارایی، با معیارهایی چون سازگاری شیمیایی و مکانیکی، تنفس‌پذیری، مداخلهٔ حداقلی، امکان ترمیم تدریجی و هم‌خوانی با بستر تاریخی سنجیده شود.

برپایهٔ تحلیل تطبیقی مصالح خودترمیم‌شونده، می‌توان نتیجه گرفت که مصالح آهکی در مقایسه با بسیاری از سامانه‌های نوین خودترمیم‌شونده، به‌ویژه نمونه‌های مبتنی‌بر بتن، از سازگاری بیشتری با حوزهٔ مرمت میراث تاریخی برخوردارند. سیستم‌های خودترمیم‌شونده بتن‌محور، مانند نمونه‌های کپسولی، عروقی یا مبتنی‌بر افزودنی‌های صنعتی، اگرچه در مقیاس سازه‌های جدید ظرفیت فنی قابل توجهی دارند، اما به‌دلیل سختی بالا، پیچیدگی اجرایی، امکان ناسازگاری شیمیایی، کاهش برگشت‌پذیری و فاصله رفتاری با مصالح سنتی، برای مداخلات حساس مرمتی همواره گزینه‌ای مناسب محسوب نمی‌شوند. در مقابل، ملات‌ها و مصالح آهکی به‌واسطهٔ ویژگی‌هایی چون سازگاری با مصالح تاریخی، نفوذپذیری و تنفس‌پذیری مناسب، رفتار مکانیکی ملایم‌تر، قابلیت کربناته‌شدن مجدد، هیدراسیون ثانویه و پرشدن تدریجی ریزترک‌ها، ظرفیت ذاتی برای خودترمیمی درون‌زاد دارند. بنابراین، آهک نه‌تنها یک ماده سنتی و شناخته‌شده در مرمت است، بلکه می‌تواند در چارچوب بیومیمتیک ماده‌محور، به‌عنوان مصالحی فعال، زمان‌مند و ترمیم‌پذیر بازتعریف شود.

در این چارچوب، بیوآهک به‌عنوان گونه‌ای تقویت‌شده از مصالح آهکی، امکان ارتقای این ظرفیت طبیعی را فراهم می‌کند. افزودنی‌های زیست‌پایه می‌توانند با اصلاح ریزساختار، بهبود فرایند کربناته‌شدن، افزایش همگنی ماده و کمک به ترمیم تدریجی ریزآسیب‌ها، عملکرد ملات آهکی را بدون تحمیل مداخله‌ای خشن یا نامتجانس تقویت کنند. اهمیت این ویژگی در مرمت آن است که فرایند ترمیم، برخلاف بسیاری از فناوری‌های برون‌زاد، از منطق طبیعی خود ماده و در تعامل با شرایط محیطی فعال می‌شود. ازاین‌رو، مصالح آهکی و بیوآهک در قیاس با مصالح سخت، صنعتی و ناسازگار، پاسخ مناسب‌تری به الزامات مرمت تاریخی ارائه می‌دهند؛ زیرا میان دوام، سازگاری، حداقل مداخله و تاب‌آوری بلندمدت تعادل برقرار می‌کنند.

ارتباط این چارچوب با ربع رشیدی تبریز نیز از همین منظر قابل تبیین است. ربع رشیدی، به‌عنوان سایتی چندلایه با پیشینهٔ ایلخانی، پساایلخانی، عثمانی و صفوی، واجد بقایای کالبدی و زیرساختی متنوعی است که در آن مصالحی چون سنگ، آجر و ملات‌های پایهٔ آهکی نقش مهمی در شکل‌گیری و تداوم ساختارهای معماری داشته‌اند. شواهد مربوط نشان می‌دهد که این مجموعه نه‌تنها از منظر تاریخی و هویتی اهمیت دارد، بلکه از نظر مصالح، رطوبت، فرسایش، آسیب‌پذیری اقلیمی و نیاز به مداخلهٔ سازگار نیز بستری مناسب برای طرح مسئله مصالح آهکی خودترمیم‌شونده است. بنابراین، نام بردن از ربع رشیدی در این پژوهش صرفاً اشاره‌ای موردی یا تزئینی نیست، بلکه این سایت به‌عنوان بستری تاریخی-کالبدی مطرح می‌شود که در آن مسئله اصلی مقاله، یعنی ضرورت انتخاب مصالح سازگار، ترمیم‌پذیر و کم‌مداخله، به‌صورت عینی قابل فهم است.

بر این اساس، به‌کارگیری رویکردهای مبتنی‌بر آهک و بیوآهک در خوانش مرمتی ربع رشیدی می‌تواند به‌عنوان راهبردی سازگار برای بازسازی تطبیقی مطرح شود؛ راهبردی که با منطق مصالح سنتی، اصل حداقل مداخله، تنفس‌پذیری، سازگاری شیمیایی و نیاز به تاب‌آوری بلندمدت هم‌راستا است. این پژوهش نشان می‌دهد که در مقایسه با مصالح خودترمیم‌شونده نوینِ نامتجانس با بستر تاریخی، مصالح آهکی ظرفیت بیشتریَ برای پیوند میان

دانش بومی، رفتار طبیعی ماده و اهداف حفاظت میراث دارند. درنهایت، پژوهش حاضر بر ضرورت توسعهٔ مطالعات آزمایشگاهی، ارزیابی‌های میدانی و سنجش عملکردی ملات‌های آهکی و بیوآهک در شرایط اقلیمی و کالبدی ربع رشیدی تأکید می‌کند تا امکان تبدیل این چارچوب نظری به راهبردی اجرایی برای مرمت و بازسازی تطبیقی میراث تاریخی ایران فراهم شود.

## پی‌نوشت‌ها

** این مقاله برگرفته از رسالهٔ دکتری «زهرا کی‌نژاد» باعنوان « بیومیمتیک ماده‌محور در بازسازی تاب‌آور میراث تاریخی: نقش بیوآهک به‌عنوان مصالح خودترمیم‌شونده در مرمت تطبیقی (مطالعهٔ موردی: ربع رشیدی تبریز)» است که به راهنمایی دکتر «فرهاد آخوندی» در دانشکدهٔ هنر اسلامی دانشگاه تبریز در حال انجام است.

## اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند در انجام این پژوهش هیچ گونه تعارض منافعی برای ایشان وجود نداشته است.

## فهرست منابع


• آجورلو، بهرام. (۱۳۹۹). کاوش‌های باستان‌شناختی پروژهٔ بین‌المللی ربع‌رشیدی: میراث فرهنگی خواجه رشیدالدین فضل‌ا... همدانی. احمد مرتاضی (ویراستار)، *مجموعهٔ مقالات منتخب اولین همایش بین‌المللی بزرگداشت خواجه رشیدالدین فضل ا... همدانی با محوریت وقف و علم‌الادیان* (۱۶۱-۱۸۲) دانشگاه تبریز.

• Ajorloo, B., & Mehdizadeh, B. (2024). Investigating the Roman and Byzantine Patterns of the Great Southern Outwork of the Rabʿ-e Rashidi; Based on Anatolian Samples. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar, 21*(136), 49-58. https://doi.org/10.22034/bagh.2024.435340.5537

• Bader, F., Halabi, M. I., Mohsen, H., & Youssef, M. A. (2021). Use of biomimicry design approach in constructing sustainable resilient structures (Case study: Port of Beirut). *BAU Journal - Creative Sustainable Development, 3*(1), 1–15.

• Beatty, D. N., Williams, S. L., & Srubar, W. V., III. (2022). Biomineralized materials for sustainable and durable construction. *Annual Review of Materials Research, 52*, 73–97. https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-081921-021901

• Booth, P., & Ljiljanam, J. (2022). Novel Biodesign Enhancements to at-Risk Traditional Building Materials. *Frontiers in Built Environment, 8*. https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.851963.

• Choi, S. G., Chu, J., Brown, R. C., Wang, K., & Wen, Z. (2017). Sustainable biocement production via microbially induced calcium carbonate precipitation: Use of limestone and acetic acid derived from pyrolysis of lignocellulosic biomass. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 5*(6), 5183–5190. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00381

• Esposito, D., Cantatore, E., & Sonnessa, A. (2021). A multi-risk analysis for the planning, management and retrofit of cultural heritage in historic urban districts. *Journal of Cultural Heritage Management, 45*(2), 87–99.

• Fatigusoa, F., & De Finoa, M., Cantatorea, E., & Caponioa, V. (2018). Resilience of historic built environments: Inherent qualities and potential strategies. In *International High-Performance Built Environment Conference* (SBE16, iHBE 2016) (pp. 423–430). Elsevier.

• Jeleński, T. (2018). Practices of built heritage post-disaster reconstruction for resilient cities. *Heritage Science Review, 12*(3), 56–68.

• Lawrence, M., Fodde, E., Paine, K., & Walker, P. (2012). Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building. *Construction and Building Materials, 36*, 270–275. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.070

• Lucanto, D., Nava, C., & Mangano, G. (2024). Digital prototyping and regenerative design toward carbon-neutrality and a climate resilient built environment: A multi-scale assessment of environmental multi-risks. *Buildings, 14*(12), 3140. https://doi.org/10.3390/buildings14123140

• Mackin, N. (2020). Reconstruction of indigenous Arctic shelters. *Rekonstrukcja Rdzennego Dziedzictwa Architektonicznego, 8*(2), 44–57.

• Manoharan, A., & Umarani, C. (2022). Properties of Air Lime Mortar with Bio-Additives. *Sustainability, 14*(9), 5147. https://doi.org/10.3390/su14095147.

• Mocerino, C. (2024). Innovation and resilience in the redevelopment, restoration and digitalisation strategies of architectural heritage. *Mediterranean Architectural Heritage, 6*(1), 1–20.

• Pietruszka, B., Michał, G., & Piotr, L. (2019).Characterization of Hemp-Lime Bio-Composite. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 290*, 012104. https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012104.

• Roshan, M., Ajorloo, B., & Pirbabaei, M. T. (2024). The Analytical Revising of Function and Relative Dating of the Stepped Structure at Rabʿ-e Rashidi. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar, 21*(139), 49-58. https://doi.org/10.22034/bagh.2024.472735.5645

• Saridhe, S. P., & Selvaraj, T. (2021). Reporting the Ancient Green Construction Technology of Limecrete Slabs Adopted in Udaipur, Rajasthan. *Journal of Building Engineering, 44*, 102623. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102623.

• Vegas, F., Mileto, C., Escobar, A. H., & de Miguel, M. L. (2022).

Sustainability, risks and resilience of vernacular architecture. *International Journal of Architectural Heritage, 16*(7), 1125–1142. https://doi.org/10.1080/15583058.2022.2021431

• Zaki, S. H. (2023). Biomimicry as an approach to create architectural resilient projects. *Engineering Research Journal, 47*(2), 92–104.

• Zuabi, W., & Memari, A. (2021). Review of hempcrete as a sustainable building material. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction, 10*(2), 121–133. https://doi.org/10.7492/IJAEC.2021.015

**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:**

کی‌نژاد، زهرا و آخوندی، فرهاد. (۱۴۰۵). معماری به‌مثابهٔ تاب‌آوری: از الهام‌گیری بیومیمتیک تا بازسازی تطبیقی میراث تاریخی در مواجهه با بحران‌های طبیعی و انسانی (نمونه موردی ربع رشیدی تبریز). *باغ نظر*، ۲۳(۱۵۶)، ۲۱-۳۲.

**DOI:** 10.22034/bagh.2026.567762.5962
**URL:**https://www.bagh-sj.com/article_243906.html