



Stability Assessment and Geomechanical Analysis of Bibi-Kand Hand-Dug Caves (Shahin Dezh, NW Iran) with Emphasis on Structural Geology

Mehrdad Sarhangi¹ | Artin Arian^{*2}

1- Department of Earth Sciences, SR. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of Architecture, CT. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Keywords

Qom Formation,
Rock Mechanics,
Structural Stability,
Tafoni,
Troglodytic
Architecture

Extended Abstract

Introduction

The intersection of geology and archaeology provides a unique perspective on how ancient civilisations perceived and exploited their physical surroundings. The Bibi-Kand cave complex, situated within the structural zones of north-western Iran, exemplifies this synergy. Unlike many troglodytic settlements carved into soft volcanic tuffs such as those at Kandovan or Cappadocia Bibi-Kand is uniquely set within the lithified, high-strength reefal limestones of the Qom Formation. The primary objective of this study is to address a fundamental engineering question: how have these man-made structures maintained their integrity over centuries without the use of internal supports? This investigation focuses on three key factors: the role of homoclinal structural control, the geomechanical properties of the host rock, and the utilisation of natural dissolution features, namely tafoni, in the creation of this architectural marvel.

The study area lies within the Central Iran zone, and is specifically characterised by outcrops of the Qom Formation. Stratigraphically, this formation comprises a sequence of marine limestones, marls, and evaporites deposited during the Oligo-Miocene epoch. At the Bibi-Kand site, the dominant facies is a massive, porous reefal limestone. Geomorphologically, the site is defined by a steep ridge, while its structural framework corresponds to a classic homocline, in which the sedimentary layers dip consistently at a low angle approximately 10° to the north whereas the topographic surface cuts across these layers at a considerably steeper angle of 40° to the south. This geometric relationship is of critical importance, as it gives rise to natural stair-stepped platforms and vertical faces that are ideally suited to horizontal excavation.

Receive: 2026-05-05

Accepted: 2026-07-28

Published: 2026-08-23

*Corresponding Author: Artin Arian; E-mail: artin.arian@iau.ir

How to cite this article: Sarhangi, M., & Arian, A. (2026). Stability Assessment and Geomechanical Analysis of Bibi-Kand Hand-Dug Caves (Shahin Dezh, NW Iran) with Emphasis on Structural Geology. *Structural Geology and Applied Tectonics*, 1(1): 82-97. DOI: [10.30473/SGAT.2026.77936.1006](https://doi.org/10.30473/SGAT.2026.77936.1006)



Copyright © 2026, by the author(s). Published by Payame Noor University, Tehran, Iran. This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

To ensure a comprehensive assessment, this study employed a multi-tiered methodological framework. First, digital photogrammetry was carried out using a DJI Phantom 4 Pro UAV to capture high-resolution images from the otherwise inaccessible cliff faces. The acquired data were then processed to generate a 3D point cloud and a Digital Surface Model (DSM), enabling detailed analysis of both the fracture network and the cave geometry. Complementing this remote approach, field-based geotechnical investigations were conducted through systematic scanline mapping of discontinuities, with key parameters including joint spacing, orientation, persistence, and surface roughness being recorded in situ. To quantitatively characterise the rock mass, the Rock Mass Rating (RMR) system was applied. Finally, analytical stability assessments of the cave ceilings were performed using beam theory in conjunction with the Lauffer-Pacher stand-up time relationship.

Results and Discussion

The field investigations yielded several findings of critical importance. The reefal limestone proved to be of exceptional quality, with the estimated Uniaxial Compressive Strength (UCS) ranging between 50 and 75 MPa. Notably, the cave interiors displayed a near-complete absence of systematic tectonic joints, a feature reflected in a Rock Quality Designation (RQD) value of 95–100%. The individual Rock Mass Rating (RMR) parameters were assigned scores of 7 for strength, 20 for RQD, 20 for discontinuity spacing, 25 for discontinuity condition, and 15 for groundwater, culminating in a total RMR of 87. This places the host rock in Class I (Very Good), which fundamentally explains the caves' remarkable ability to span wide openings up to 7 metres without structural failure.

Equally significant is the role of geological structure. The homoclinal dip of 10° appears to be an engineering masterstroke: because the bedding planes slope gently towards the cave entrance, any meteoric water that infiltrates through micro-fractures is naturally channelled outward along these planes. This self-draining geometry effectively prevents water pooling and chemical weathering (karstification) at the rear of the chambers, and has been a key factor in preserving the interior environment over centuries.

At the cliff face, extensive tafoni weathering ellipsoidal cavities formed by salt crystallisation and differential erosion is prevalent. Our mapping revealed a high spatial correlation between ancient excavation sites and large tafoni clusters, leading us to hypothesise that prehistoric masons intentionally exploited these natural voids as starter points. By enlarging and interconnecting these pre-existing cavities, they would have substantially reduced the labour required to penetrate the hard reefal limestone.

The Bibi-Kand complex thus exemplifies a profound empirical understanding of rock mechanics. The ancient builders selected the reefal facies not merely for its topographic prominence, but for its massive, poorly jointed structure. In rock-mechanics terms, the size effect dictates that unfractured massive rocks behave much closer to their laboratory-tested strength than do fractured rock masses. By restricting cave spans to a 5–7 m range, the builders ensured that the induced tensile stresses at the ceiling centre remained well below the limestone's tensile capacity.

An additional, and somewhat serendipitous, preservation mechanism was also identified. The thick soot layer coating the ceilings a by-product of centuries of domestic fires has inadvertently acted as a chemical sealant. This carbonaceous deposit has reduced the rock's permeability to atmospheric moisture, thereby slowing secondary calcification and preserving the sharpness of the original tool marks with unusual fidelity.

From a geotourism perspective, Bibi-Kand is unquestionably a world-class site, offering a rare opportunity to showcase geo-archaeology in practice. Unlike conventional archaeological localities, here the narrative is as much about the 20-million-year-old Qom Formation as it is about the human communities that carved into it. Nevertheless, the site faces ongoing threats from unregulated tourism and natural cliff-face erosion. Although our RMR analysis confirms that the internal cave structures remain stable, the external eyebrows the thin rock ledges above the entrances are susceptible to block falls driven by thermal expansion and contraction, and thus warrant particular conservation attention.

Conclusions

This study confirms that the longevity of the Bibi-Kand cave complex is a direct consequence of the superior geomechanical properties of the Qom Formation reefal limestones. With an RMR score of 87 and the inherent stability conferred by the homoclinal dip structure, the site provided favourable natural conditions that enabled ancient settlers to establish a permanent, secure, and self-draining habitation environment. The integration of

UAV photogrammetry with conventional geotechnical classification has, for the first time, furnished quantitative evidence of the engineering rationale that underpins the site's selection and endurance. On this basis, we recommend that Bibi-Kand be formally designated as a National Geopark. Future research should prioritise two-dimensional numerical modelling employing tools such as RS2 or FLAC to simulate stress distribution around the openings under seismic loading, thereby further consolidating our understanding of this outstanding geo-cultural heritage.



ارزیابی پایداری و تحلیل ژئومکانیکی غارهای دست‌کند بی‌بی‌کند (شاهین‌دژ) با تأکید بر زمین‌شناسی ساختمانی

مهرداد سرهنگی^۱، آرتین آراین^{۲*}

۱- گروه علوم زمین، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه معماری، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

کلیدواژه‌ها

سازند قم،
مکانیک سنگ،
پایداری ساختاری،
فرسایش لانه‌زنبوری،
معماری دست‌کند

چکیده

مجموعه غارهای دست‌کند بی‌بی‌کند در شاهین‌دژ، نمونه‌ای برجسته از تعامل هوشمندانه انسان با بسترهای زمین‌شناسی صلب و مقاوم است. این پژوهش با رویکردی میان‌رشته‌ای، شامل زمین‌شناسی ساختاری، زمین‌ریخت‌شناسی و مهندسی سنگ، به تحلیل پایداری و الگوهای تکاملی این سایت پرداخته است. یافته‌ها نشان می‌دهد که این مجموعه در سنگ‌آهک‌های ریفی سازند قم به سن میوسن، با ساختار چین‌خورده ملایم حفر شده است. ارزیابی ژئومکانیکی توده سنگ بر اساس شاخص کیفی توده سنگ، امتیاز ۸۷ معادل رده ۱ که بیانگر توده سنگ بسیار خوب است را تعیین کرد که توضیح‌دهنده پایداری خودنگهدار دهانه‌های عریض و سقف‌های تخت بدون نیاز به تکیه‌گاه مصنوعی است؛ امری که به دلیل فقدان درزه‌های سیستماتیک در مقیاس غار میسر شده است. تحلیل ریخت‌شناسی، آشکار ساخت که معماران باستان از فرسایش لانه‌زنبوری به عنوان نقاط آغازین و تسهیل‌گر حفاری استفاده کرده و با رویکردی معماری و حذفی، فضاهای داخلی را در ترازهای عمودی گسترش داده‌اند. تفاوت زاویه میان شیب لایه‌بندی و توپوگرافی دامنه، علاوه بر ایجاد دیواره‌های قائم دسترسی، منجر به شکل‌گیری سامانه زه‌کشی طبیعی در کف اتاق‌ها شده است. از منظر اقلیمی، ویژگی تأخیر فازی صخره و گردش هوای ناشی از مقطع طبقاتی، آسایش حرارتی غیرفعال را در فصول مختلف تضمین می‌کند. در نهایت، آسیب‌شناسی سایت نشان داد که چرخه انجماد و ذوب در دیواره‌های ساختمانه، جدی‌ترین تهدید پایداری است. این مطالعه، بی‌بی‌کند را به عنوان یک ژئوسایت واجد ارزش معرفی کرده و راهبردهای حفاظتی مبتنی بر نیلینگ مخفی و مدیریت روان‌آب‌های بالادست را برای تضمین ماندگاری این اثر مهندسی باستان، پیشنهاد می‌دهد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۱

*نویسنده مسئول: آرتین آراین

رایانامه:

artin.arian@iau.ir

شناسه دیجیتال مقاله: 10.30473/SGAT.2026.77936.1006

ارجاع به این مقاله: سرهنگی، م؛ آراین، آ. (۱۴۰۵). ارزیابی پایداری و تحلیل ژئومکانیکی غارهای دست‌کند بی‌بی‌کند (شاهین‌دژ) با تأکید بر زمین‌شناسی ساختمانی. *زمین‌شناسی ساختاری و زمین‌ساخت کاربردی*، ۱(۱): ۹۷-۸۲.



مقدمه

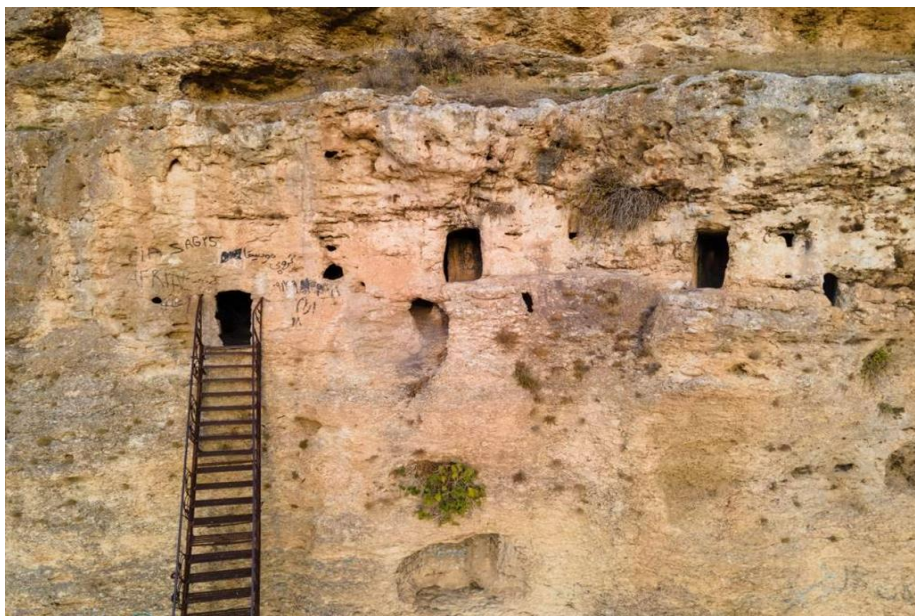
فضاهای زیرزمینی و سکونتگاه‌های دست‌کند انسانی، به عنوان یکی از برجسته‌ترین شواهد تعامل متقابل جوامع بشری با محیط زمین‌شناختی، نقش مهمی در تبیین سازگاری انسان با شرایط زمین‌ریخت‌شناختی ایفا می‌کنند. این مجموعه‌ها نه تنها از منظر باستان‌شناسی، بلکه به عنوان بخشی از میراث زمین‌شناختی، ابزاری کلیدی در توسعه ژئوتوریسم و شناخت سیمای چشم‌اندازهای فرهنگی-طبیعی هستند (Newsome & Dowling, 2010). در این راستا، شناسایی و ثبت این سایت‌ها در فهرست‌های میراث جهانی، اهمیت حفاظت از سازه‌های دست‌کند را در سطح بین‌المللی برجسته کرده است (Gannon et al, 2019). مطالعه معماری صخره‌ای در جهان، از خانه‌های دست‌کند تونس (Bachouch, 2025) تا نمونه‌های مشابه در مناطق مختلف، نشان می‌دهد که انتخاب مکان برای سکونت در سنگ، همواره تابعی از ویژگی‌های زمین‌شناختی و نیازهای اقلیمی بوده است. در ایران، معماری سنتی صخره‌ای به دلیل ویژگی‌های عایق حرارتی و پاسخگویی به شرایط اقلیمی، مورد توجه قرار گرفته است (Ghobadiyan, 2006; Gorjimahlabani & Sanaee, 2010). بررسی‌های انجام شده بر روی نمونه‌های موفق مانند روستای کندوان، نشان می‌دهد که عملکرد حرارتی بهینه و سازگاری با طبیعت، از عوامل اصلی پایداری این زیست‌بوم‌هاست (Ayin et al, 2005; Ebrahimi Asl & Sattarzadeh, 2013; Nahi & Singery, 2015). میان سکونتگاه‌های صخره‌ای در نقاط مختلف جهان، از جمله مقایسه‌های صورت گرفته میان روستای میمند در کرمان و سایت مزا ورده در کلرادو، گویای یک رویکرد جهانی در بهره‌برداری از فضاهای صخره‌ای است (Ataei et al, 2014). در بسیاری از موارد، نرمی نسبی سنگ‌ها یا وجود سطوح ضعف ساختاری، حفاری را تسهیل کرده است (Asghari Kaljahi et al, 2014). برای مثال، در مناطق کوهستانی، متدهایی نظیر روش‌های ساختاری-تشکیلی برای تعیین قدمت و تکامل ویژگی‌های ژئومورفولوژیک به کار می‌روند تا روند شکل‌گیری این فضاها تبیین شود (Najmoddini, 2025). با این حال، در حالی که بیشتر پژوهش‌ها بر روی سنگ‌های نرم متمرکز بوده‌اند، ایجاد فضاهای گسترده در رخنمون‌های سخت‌تر و یکپارچه همچنان یک چالش تحلیلی است.

در این راستا، مجموعه غارهای دست‌کند بی‌بی‌کند (شکل ۱). درفاصله ۱۴ کیلومتری از آق تپه (کیلومتر ۲ جاده شاهین دژ به بوکان) در باختر شاهین دژ در جنوب آذربایجان باختری، نمونه‌ای منحصربه‌فرد از این تعامل است. این سایت که در محدوده زمین‌شناختی نقشه‌های ۱:۱۰۰,۰۰۰ اسکو قرار دارد (Khodabandeh, 2004). در پهنه‌ای از سنگ‌آهک‌های ریفی سازند قم (سن میوسن) واقع شده است (Aghanabati, 2006). این منطقه که تحت تأثیر فرسایش‌های پس‌رونده و ایجاد دیواره‌های قائم قرار گرفته (شکل ۲)، ویژگی‌های متمایزی همچون حفرات انحلالی و فرسایش لانه‌زنبوری را در سطح سنگ نشان می‌دهد (Sarhangi, 2025). به نظر می‌رسد بافت توده‌ای و مقاوم آهک ریفی، در کنار این فرسایش‌های سطحی، زمینه را برای تبدیل پناهگاه‌های طبیعی به فضاهای سکونتی فراهم کرده است (Ranjbaran & Sotuhiyan, 2018). با توجه به اهمیت حفظ بافت‌های تاریخی و باززنده‌سازی فضاهای شهری و روستایی (Masoud & Beygzade, 2012) و لزوم بازشناسایی جاذبه‌های گردشگری روستاهای تاریخی (Karami & Sharifi, 2014; Asadi & Abbasi, 2008) پژوهش حاضر با رویکردی میان‌رشته‌ای میان زمین‌شناسی ساختاری، زمین‌ریخت‌شناسی و معماری صخره‌ای انجام شده است. این بررسی با تمرکز بر تحلیل رابطه میان ساختار توده‌سنگ، فرسایش‌های لانه‌زنبوری و پایداری مکانیکی، می‌کوشد روند تبدیل حفرات طبیعی به فضاهای دست‌کند انسانی را در بی‌بی‌کند تبیین نماید.



شکل (۱): نمای راه دسترسی به غارهای دست‌کند بی‌بی‌کند شاهین دژ، دید به سمت جنوب خاوری

Fig (1): View of the access path to the Bibi-Kand troglodytic caves, Shahin Dej, looking toward the southeast.



شکل (۲): نمای نزدیک از غارهای دست‌کند بی‌بی‌کند شاهین دژ، دید به سمت خاور. سوراخ‌های کوچک و نامنظمی که در صخره دیده می‌شوند (به‌ویژه در سمت راست و پایین)، ناشی از فرسایش لانه‌زنبوری هستند. برخی از حفره‌های کوچک‌تر بعداً توسط انسان گسترش یافته‌اند. حضور گیاهان کوچک در شکاف‌ها نشان‌دهنده وجود نم و نفوذ ریشه بین لایه‌هاست که خود عامل تخریب تدریجی سنگ (هوازگی زیستی) محسوب می‌شود.

Fig (2): Close-up view of the Bibi-Kand troglodytic caves, Shahin Dej, looking toward the east. The small, irregular cavities visible on the rock surface particularly on the lower right side are the result of tafoni weathering. Some of these smaller hollows were later enlarged by human activity. The presence of small plants growing within the fissures indicates moisture retention and root penetration between the bedding layers, which in turn acts as a gradual agent of rock degradation through biological weathering.

روش پژوهش

پژوهش پیش‌رو با تلفیقی از سه حوزه ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی ساختاری و معماری، تلاش کرده است تا مدلی برای چگونگی شکل‌گیری و تکامل غارهای بی‌بی‌کند ارائه دهد. برای این کار، اجرای پژوهش در چند گام عملیاتی دنبال شده است. ابتدا، برای اینکه تصویر روشنی از هندسه منطقه به دست آوریم، پارامترهای ساختاری لایه‌ها مانند امتداد، شیب و دامنه را در جبهه‌های گوناگون اندازه‌گیری کردیم. از آنجا که دامنه‌ها شیبی حدود ۴۰ درجه دارند و دیواره‌های عمودی تقریباً غیرقابل دسترس هستند، ناچار به استفاده از یک پرندۀ بدون سرنشین برای تصویربرداری باکیفیت بالا شدیم. در ادامه، برای سنجش پایداری سقف‌ها و دهانه‌های پهن غارها، پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ از جمله مقاومت فشاری تک‌محوری و شاخص RQD را به‌شیوه‌ای کیفی و با تکیه بر مشاهدات میدانی برآورد کردیم.

نتایج

تحلیل داده‌های حاصل از برداشت‌های میدانی، نتایج کلیدی زیر را در رابطه با ساختار غارهای بی‌بی‌کند آشکار کرد:

ویژگی‌های ساختاری ساختار

بر اساس داده‌ها، مشخص گردید که ساختگاه، یال جنوب باختری یک تاقدیس ملایم با شیب میانگین ۱۰ درجه است. در حالی که شیب توپوگرافی دامنه به طور متوسط ۴۰ درجه اندازه‌گیری شد، شیب لایه‌های سنگی تنها ۱۰ درجه است. این تفاوت زاویه‌ای ۳۰ درجه‌ای، منجر به ایجاد وضعیتی شده است که در آن فرسایش پس‌رونده، لایه‌های سنگی را به صورت پلکانی قطع کرده و دیواره‌های قائمی به ارتفاع بیش از ۲۰ متر ایجاد نموده است که دسترسی عمودی به لایه‌های صلب را ممکن می‌سازد.

تحلیل درزه‌داری و یکپارچگی توده سنگ

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، عدم شناسایی ناپیوستگی‌های سیستماتیک در سنگ میزبان است. این ویژگی باعث شده است که توده سنگ در مقیاس غار، رفتاری مشابه یک توده سنگ یکپارچه از خود نشان دهد. به همین دلیل، در سقف غارها هیچ اثری از ریزش‌های بلوکی یا گسیختگی‌های ناشی از تقاطع درزه‌ها مشاهده نشد، که این امر پایداری دهانه‌های عریض تا ۷ متر را بدون تکیه‌گاه مصنوعی توجیه می‌کند.

توزیع فرسایش لانه زنبوری و ریخت‌شناسی حفرات

مشاهدات میدانی نشان داد که سطح دیواره صخره با حفرات انحلالی در ابعاد گوناگون از چند سانتی‌متر تا بیش از یک متر پوشیده شده است. این حفرات که در دسته فرسایش لانه‌زنبوری قرار می‌گیرند، توزیعی ناهمگن و غیریکنواخت در سطح منطقه دارند (شکل ۳).

تحلیل‌های ریخت‌شناختی این حفرات، دو ویژگی شاخص را آشکار ساخت. نخست اینکه حفرات اولیه از لبه‌های گرد و دیواره‌هایی صیقلی برخوردارند که نشان از انحلال شیمیایی دارد. دوم اینکه ورودی بیشتر غارهای اصلی دقیقاً بر روی خوشه‌هایی از حفرات لانه‌زنبوری بزرگ‌تر جای گرفته است؛ الگویی که به‌روشنی نشان‌دهنده راهبرد هوشمندانه انسان در بهره‌گیری از نقاط ضعف طبیعی سنگ برای آغاز عملیات حفاری است.



شکل (۳): نمای نزدیک از فرسایش لانه زنبوری در کوه بی‌بی‌کند شاهین دژ، دید به سمت خاور. توده‌ای بودن سنگ و بافت متخلخل آن کاملاً مشهود است. سقف حفرات، حالتی نامنظم و خشن دارد که نشان‌دهنده فرسایش انحلالی طبیعی است، اما کف و بخشی از دیواره‌های داخلی، برای ایجاد فضای نشستن یا پناه گرفتن، صاف‌تر شده‌اند. این همان نقطه انتقال از «پدیده طبیعی» به «سازه انسانی» است. سوراخ‌های کوچک متعددی که در بدنه صخره (سمت چپ بالا) دیده می‌شوند، فرسایش لانه زنبوری کلاسیک هستند. این حفرات در سنگ آهک‌های ریفی به دلیل ناهمگن بودن بافت سنگ (تفاوت مقاومت بین سیمان و فسیل‌ها) به سرعت شکل می‌گیرند.

Fig (3): Close-up view of tafoni weathering on the Bibi-Kand mountain, Shahin Dej, looking toward the east. The massive nature of the rock and its porous texture are clearly evident. The ceilings of the cavities display an irregular and rough morphology, indicative of natural dissolution weathering, whereas the floors and portions of the interior walls have been smoothed to create sitting spaces or shelter. This marks the transitional point from a natural phenomenon to a human-made structure. Numerous small holes visible on the rock face (upper left side) represent classic tafoni weathering. These hollows develop rapidly in reefal limestones due to the heterogeneous nature of the rock texture, specifically the differential resistance between the cement matrix and the fossil components.

معماری صخره‌ای و تغییرات انسانی

بررسی‌های داخلی غارها نشان داد که کف غارها دقیقاً بر روی سطوح لایه‌بندی قرار گرفته است (شکل ۴ و ۵). این امر نه تنها تراز بودن کف اتاق‌ها را تضمین کرده، بلکه به دلیل شیب ۱۰ درجه‌ای لایه به سمت بیرون، به عنوان یک سامانه زهکشی طبیعی عمل می‌کند. همچنین، پوشش کربنی ناشی از دوده ممکن است به عنوان یک لایه نیمه‌تراوا، نفوذ رطوبت به توده سنگ را کاهش داده و فرآیند هوازدگی فیزیکی را کند کرده باشد. وجود طاقچه‌ها و حفره‌های نورگیر که با ابعاد هندسی خاص تراشیده شده‌اند، مرحله نهایی تبدیل یک حفره انحلالی به یک فضای زیستی پایداری را تأیید می‌کند.



شکل (۴): نمای داخلی یک اتاق که عمق فضا و تسلط سازندگان باستان بر این توده سگی را به وضوح نشان می‌دهد. در سمت راست تصویر، بخشی از سنگ به صورت یک ستون ضخیم باقی گذاشته شده است. در معماری صخره‌ای، وقتی درزه وجود ندارد، سازندگان به طور آگاهانه یا تجربی می‌دانستند که کجا باید توده سنگ را دست‌نخورده باقی بگذارند تا بار سقف را تحمل کند.

Fig (4): Interior view of a chamber, clearly illustrating the depth of the space and the mastery of ancient builders over this rock mass. On the right side of the image, a portion of the rock has been left intact as a thick pillar. In rock-cut architecture, when joints are absent, builders whether consciously or empirically understood where to leave the rock mass untouched in order to support the ceiling load.



شکل (۵): شکل نامنظم و تقریباً بیضوی حفره‌های نورگیر (به‌ویژه حفره‌های کوچک‌تر در سمت راست) خاستگاه انحلالی دارند. معماران باستان از این حفره‌ها به عنوان «نقطه شروع» استفاده کرده‌اند، آن‌ها احتمالاً فقط دیواره‌های بین دو یا چند حفره طبیعی را تراشیده‌اند تا فضای بزرگتری ایجاد کنند. همچنین دهانه بزرگی در سمت چپ، به اتاق مجاور راه دارد.

Fig (5): The irregular, sub-elliptical morphology of the light-well cavities particularly the smaller ones on the right side indicates a dissolutional origin. Ancient builders exploited these hollows as starting points; they likely only carved away the walls between two or more natural cavities to create larger spaces. Additionally, the large opening on the left side provides access to an adjacent chamber.

معماری دست‌کند بی‌بی‌کند، فراتر از یک سرپناه ساده، سندی زنده از نبوغ مهندسی صخره‌ای در ادوار مختلف تاریخی، احتمالاً از هزاره اول پیش از میلاد است. برخلاف سکونتگاه‌های سطحی، این مجموعه به عنوان یک ساختار زیستی یکپارچه با اهداف چندگانه اعم از پناهگاه، سکونتگاه دائم و فضاهای آیینی، شکل گرفته است. نامگذاری این محل در فرهنگ عامه و

گره خوردن آن با روایات محلی، لایه‌ای از هویت اجتماعی را به کالبد سنگی آن افزوده است. ساختگاه از نظر فیزیکی، مجموعه‌ای از اتاق‌ها، تالارها و دالان‌های متصل به هم است که در چندین تراز عمودی (طبقه) در دل صخره تراشیده شده‌اند. پیوستگی بصری میان جبهه‌ی بیرونی کوه و فضاهای داخلی، دیالوگی مستمر میان منظر طبیعی و فضای مصنوع ایجاد کرده است. در این پارادایم فکری، معماری نه به عنوان عنصری تحمیلی بر طبیعت، بلکه به عنوان کشفِ فضا در دل جرم صلب زمین تعریف می‌شود.

تحلیل کالبدی و ریخت‌شناسی فضاهای دست‌کند

ریخت‌شناسی بی‌بی‌کند بر پایه‌ی معماری حذفی یا کاهشی استوار است؛ فرآیندی که در آن فضا نه با افزودن مصالح، بلکه با تخلیه‌ی جرم سنگی پدید می‌آید. سازماندهی فضایی در این مجموعه از یک الگوی سیال و ارگانیک پیروی می‌کند. اتاق‌ها عمدتاً دارای پلان‌های چهارگوش نامنظم با گوشه‌های مدور هستند که نشان‌دهنده تبعیتِ معمار از لایه‌بندی سنگ و مقاومتِ جرم زمین در حین تراش است (شکل ۴). اتصال میان فضاها نه از طریق راهروهای صلب، بلکه از طریق دالان‌های گذار و روزنه‌های میانی شکل گرفته که سلسله‌مراتب محرمیت را از فضاهای عمومی‌تر بیرونی به اتاق‌های خصوصی‌تر درونی تعریف می‌کند. بارزترین ویژگی کالبدی بی‌بی‌کند در مقایسه با سایر نمونه‌های معماری صخره‌ای ایران، ساختار طبقاتی و عمودی آن است. این سایت در چندین تراز روی هم قرار گرفته که توسط پلکان‌های سنگی و شیب‌راه‌های داخلی به یکدیگر متصل می‌شوند. این مقطع‌گرایی در طراحی نشان‌دهنده‌ی درک عمیق از ایستایی صخره است؛ به طوری که هر طبقه با حفظ ضخامتِ سقف سنگی، بار طبقه فوقانی را به دیواره‌های جانبی منتقل می‌کند. این لایه‌بندی عمودی علاوه بر تفکیک کارکردی نوعی سامانه دفاعی غیرفعال را نیز ایجاد کرده است که دسترسی به ترازهای بالاتر را برای بیگانگان دشوار می‌ساخت.

در ریخت‌شناسی این بنا، نمای بیرونی صخره به عنوان یک پوسته‌ی متخلخل عمل می‌کند. بازشوها و ورودی‌ها که در دل سنگ تراشیده شده‌اند، فراتر از یک عنصر کالبدی، نقش تنظیم‌کننده‌ی رابطه میان تاریکی مطلق درونی و روشنایی تندِ بیرونی را برعهده دارند. توزیع این حفره‌ها در نمای صخره، ریتمی نامنظم اما هم‌آهنگ با توپوگرافی کوه دارد. این بازشوها علاوه بر تأمین نور و تهویه، به عنوان قاب‌های دید عمل کرده و پیوند بصری ناظرِ داخلِ صخره را با بستر طبیعی و دشت مقابل به صورت مستمر حفظ می‌کنند (شکل ۵). در واقع، معماری در اینجا مرز میان صلبیتِ کوه و سیالیتِ فضا را به چالش می‌کشد.

تحلیل معماری و اقلیم

بستر صخره‌ای بی‌بی‌کند در اقلیم سرد و نیمه‌خشک شاهین‌دژ، به عنوان یک باتری حرارتی عمل می‌کند. ضخامت بسیار بالای دیواره‌های سنگی پیرامونی، ضریب انتقال حرارت را به حداقل رسانده و پدیده‌ی تأخیر فازی را پدید می‌آورد. این ویژگی باعث می‌شود که نوسانات شدید دمای بیرون به فضای داخلی منتقل نشود. در واقع، فضای درونی این خانه‌های دست‌کند در زمستان گرم‌تر و در تابستان خنک‌تر از محیط پیرامون باقی می‌ماند که این امر عالی‌ترین نمونه از آسایش حرارتی غیرفعال بدون نیاز به مصرف انرژی است.

در ریخت‌شناسی بی‌بی‌کند، جایگیری فضاهای اصلی و ورودی‌ها به گونه‌ای است که حداکثر بهره‌برداری از جبهه‌ی جنوب باختری صورت گیرد. با توجه به زاویه تابش خورشید در عرض‌های جغرافیایی منطقه، عمق ورودی‌ها و تراش‌های نمای بیرونی به شکلی طراحی شده که در زمستان، پرتوهای مایل خورشید به عمق اتاق‌ها نفوذ کرده و به گرمایش فضاهای داخلی کمک کند، در حالی که در تابستان، ضخامت پیشانی صخره، مانع از ورود مستقیم تابش تند خورشید به داخل می‌شود. این سایه‌اندازی خودخواسته کالبد صخره، هوشمندی اقلیمی در طراحی نمای این مجموعه طبقاتی را نشان می‌دهد.

یکی از ویژگی‌های متمایز بی‌بی‌کند نسبت به خانه‌های تک‌واحدی صخره‌ای، ساختار طبقاتی و پیوستگی عمودی آن است. این ساختار باعث ایجاد نوعی جریان هوای طبیعی میان ترازهای مختلف می‌شود. حفره‌های موجود در سقف‌ها و دالان‌های میانی، نقش کانال‌های تهویه را ایفا می‌کنند. هوای گرم به دلیل سبکی به سمت ترازهای بالاتر حرکت کرده و از طریق روزنه‌های فوقانی خارج می‌شود و جای خود را به هوای خنک‌تر می‌دهد. این گردش دائمی هوا، علاوه بر تأمین اکسیژن در عمق صخره، از تجمع رطوبت در فضاهای تحتانی جلوگیری کرده و ماندگاری کالبد سنگی را در برابر عوامل جوی تضمین می‌کند.

آسیب‌شناسی کالبدی و تحلیل پایداری بستر

یکی از جدی‌ترین چالش‌های کالبدی بی‌بی‌کند، تضعیف پوسته خارجی صخره در اثر فرسایش تفریقی است. نفوذ رطوبت به ناپیوستگی‌های سنگ و وقوع متوالی چرخه انجماد و ذوب، منجر به جدایش لایه‌ای و ریزش پیشانی‌ها شده است. این فرآیند نه تنها تناسب معماری را برهم زده، بلکه با تغییر در لیتولوژی سطحی، نفوذپذیری توده سنگی را افزایش داده و زمینه‌ساز تخریب‌های عمیق‌تر در ساختار داخلی اتاق‌ها گشته است. تحلیل کالبدی نشان می‌دهد که بخشی از تخریب‌های فضای داخلی، از جمله فروریزش سقف‌ها و پلکان‌ها، پیرو الگوهای لایه‌بندی سنگ‌ها است.

علاوه بر فرسایش طبیعی، مداخلات انسانی منجر به بروز ناهنجاری‌های شیمیایی در سطح سنگ شده است. ایجاد حریق‌های عمدی در داخل فضاها، علاوه بر شوک حرارتی به لایه‌های سطحی، باعث رسوب کربن و مواد اسیدی بر بدنه صخره شده که در درازمدت فرآیند هوازدگی شیمیایی سنگ را تسریع می‌کند. این لایه‌های مزاحم، مانع از تنفس طبیعی سنگ شده و با حبس رطوبت در پشت پوسته دودی، منجر به پوسته-پوسته شدن و ریزش‌های موضعی در تزیینات و جداره‌های ظریف معماری شده است.

با توجه به شناسایی ضعف‌های ساختاری در بخش آسیب‌شناسی، اولین اولویت در حفاظت از بی‌بی‌کند، تثبیت بلوک‌های سنگی ناپایدار است. بر این پایه با استفاده از روش نیلینگ و مهاربندی مکانیکی با مفتول‌های ضدزنگ در عمق توده سنگی، می‌توان از لغزش لایه‌های بالادستی جلوگیری نمود. این مداخلات باید به صورت مخفی و درون حفره‌های طبیعی سنگ اجرا شوند تا کمترین مخدوش‌سازی بصری را در سیمای تاریخی اثر ایجاد کنند. همچنین در تالارهای وسیعی که با خطر ریزش سقف مواجه هستند، نصب میان‌قاب‌های سبک فولادی برای انتقال بار به کف‌های صلب، ضروری به نظر می‌رسد.

برای توقف فرآیند انجماد و ذوب که عامل اصلی متلاشی شدن صخره است، یک سامانه ایزولاسیون غیرمستقیم در لایه‌های فوقانی کوه لازم است. ایجاد کانال‌های انحراف آب باران در ترازهای بالای سایت، مانع از شستشوی مستقیم جبهه‌ی بیرونی و نفوذ آب به شکاف عمودی می‌شود (شکل ۶). این رویکرد پیشگیرانه، رطوبت اشباع‌شده در بافت متخلخل سنگ را کاهش داده و نرخ هوازدگی فیزیکی را به شکل چشم‌گیری تقلیل می‌دهد.

تحلیل پتانسیل‌های زمین گردشگری و احیای پایدار

مجموعه بی‌بی‌کند فراتر از یک اثر باستانی، نمونه‌ای بارز از زمین ریخت‌شناسی انسان‌زاد است، جایی که فعل و انفعالات زمین‌شناختی با اراده‌ی انسان درآمیخته است (Dowling, 2010). این سایت به دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصربه‌فرد لیتولوژیکی و شکل‌های خاص فرسایشی در کنار نبوغ مهندسی صخره‌ای، پتانسیل بالایی برای ثبت به عنوان یک ژئوسایت در اطلس میراث زمین‌شناختی منطقه دارد (Sarhangi, 2025). معرفی این اثر در قالب زمین گردشگری، به جای گردشگری سنتی، باعث جذب مخاطبان تخصصی و ارتقای سطح حفاظتی سایت می‌گردد.

احیای بی‌بی‌کند بر پایه معیارهای زمین‌گردشگری، راهکاری استراتژیک برای توسعه اقتصادی منطقه شاهین‌دژ است. این رویکرد با درگیر کردن جامعه محلی در حفاظت از میراث سنگی و ایجاد زنجیره ارزش از جمله اقامتگاه‌های بوم‌گردی و تورهای زمین‌شناسی، از یک‌سو مانع از تخریب‌های انسانی ناشی از فقر فرهنگی می‌شود و از سوی دیگر، منابع مالی لازم برای پایش‌های مداوم ژئوتکنیکی بنا را تأمین می‌نماید.



شکل (۶): نمای درزه عرضی پرشیب در انتهای جنوبی ساختگاه غارها و واریزه‌های انباشته شده در دهانه بزرگترین غار
Fig (6): View of a steeply dipping transverse joint at the southern end of the cave site, along with debris accumulations at the entrance of the largest cave.

بی‌بی‌کند می‌تواند به عنوان یک آزمایشگاه باز برای دانشجویان زمین‌شناسی، مرمت و معماری عمل کند. تماشای زنده تقابل فرآیندهای هوازدگی با سازه‌های دست‌کند، بهترین منبع آموزشی برای درک مکانیک سنگ و رفتار درازمدت مصالح طبیعی در برابر عوامل جوی است. تعریف پروژه‌های پژوهشی مشترک بین‌المللی بر روی این سایت، نه تنها جایگاه علمی ایران را در حوزه میراث صخره‌ای ارتقا می‌دهد، بلکه منجر به تدوین استانداردهای بومی برای حفاظت از آثار مشابه در حوضه آبریز رودخانه زرین‌رود خواهد شد.

ارزیابی ژئومکانیکی توده سنگ و تحلیل پارامترهای هندسی و معماری

برای تحلیل پایداری فضاهای دست‌کند، از ارزیابی تجربی-برآوردی کیفی توده سنگ (RMR) استفاده شد (Lacombe *et al.*, 2022). ارزیابی (RMR) یکی از معتبرترین روش‌های ارزیابی کیفی توده سنگ در مهندسی تونل و معدن است که بر پایه شش پارامتر اصلی بنا شده و مجموع امتیازات آن‌ها بین ۰ تا ۱۰۰ متغیر است (Bieniawski, 1989). با توجه به ویژگی‌های سازند قم در محدوده ساختگاه بی‌بی‌کند، پارامترها به شرح زیر برآورد گردید:

۱. مقاومت فشاری تک‌محوری: بر اساس نتایج چکش اشمیت، مقاومت تخمینی سنگ‌آهک ریفی حدود ۵۰-۷۵ MPa برآورد شد (امتیاز: ۷).
 ۲. شاخص RQD: با توجه به فاصله بسیار زیاد درزه‌ها و عدم شناسایی درزه‌های سیستماتیک در مقیاس غار (برپایه مشاهدات میدانی)، RQD معادل ۹۵-۱۰۰٪ در نظر گرفته شد (امتیاز: ۲۰).
 ۳. فاصله ناپیوستگی‌ها: به دلیل توده‌ای بودن رخساره، فواصل بیش از ۲ متر ثبت شد (امتیاز: ۲۰).
 ۴. وضعیت ناپیوستگی‌ها: سطوح لایه‌بندی کاملاً بسته، خشک و بدون پرشدگی ضعیف هستند (امتیاز: ۲۵).
 ۵. شرایط آب زیرزمینی: صخره در وضعیت کاملاً خشک قرار دارد (امتیاز: ۱۵).
 ۶. تصحیح جهت‌داری: با توجه به اینکه لایه‌ها با شیب کم (۱۰ درجه) و عمود بر جبهه ورودی هستند، وضعیت بسیار مساعد در نظر گرفته شد (امتیاز: ۰).
- عدد تجمیعی ۸۷، مجموع امتیازهای یاد شده در بالا، نشان‌دهنده قرارگیری توده سنگ در رده ۱ تحت عنوان توده سنگ بسیار خوب است. این امتیاز بالا توضیح‌دهنده پایداری خودنگهدار غارها طی قرن‌ها بدون نیاز به سامانه نگهداری مصنوعی است.
- همچنین از آنجا که معماری صخره‌ای بی‌بی‌کند تابعی از هندسه لایه‌بندی و شیب دامنه است. پارامترهای زیر در این تحلیل استخراج شدند:
- ضریب شکل: نسبت عرض به ارتفاع در اکثر اتاق‌ها بین ۱/۵ تا ۲/۲ متغیر است. این نسبت، توزیع تنش را در سقف‌های تخت بهینه کرده و تمرکز تنش در گوشه‌ها را کاهش می‌دهد.
 - تحلیل تیر سقف: با فرض در نظرگیری سقف غار به عنوان یک تیر دوسر گیردار، ضخامت لایه‌های ریفی (به طور میانگین ۱/۲ متر) و عرض دهانه آزاد (به طور میانگین ۶ متر) مورد ارزیابی قرار گرفت. نسبت ضخامت به عرض یادشده نشان می‌دهد که سقف غار در برابر خمش بسیار مقاوم است و تنش کششی ایجاد شده در مرکز سقف، بسیار کمتر از مقاومت کششی سنگ‌آهک ریفی است.

بحث

نتایج حاصل از این پژوهش، فرضیات جدیدی را در مورد انتخاب مکان و پایداری سازه‌های صخره‌ای در سنگ‌های صلب مطرح می‌کند. در ادامه به تحلیل ابعاد مختلف این یافته‌ها پرداخته شده است:

تحلیل تطبیقی با سایر غارهای دست‌کند شاخص ایران

برخلاف غارهای دست‌کند معروف ایران مانند کندوان که در بسترهای نرم توف‌های آتشفشانی (Amini Beiram et al, 2026). حفر شده‌اند، غارهای بی‌بی‌کند در آهک‌های ریفی سازند قم قرار دارند که از نظر مکانیکی بسیار مقاوم‌تر هستند. در حالی که در سنگ‌های نرم، سهولت حفاری عامل اصلی بوده، در بی‌بی‌کند پایداری سازه‌ای ناشی از بافت یکپارچه ریفی اولویت داشته است. مقایسه با غار کرفتو نیز نشان می‌دهد که در کرفتو، درزه‌ها در شکل‌گیری فضاها بوده‌اند (Najmoddini, 2025)، اما در بی‌بی‌کند، نبود درزه اجازه ایجاد دهانه‌های عریض‌تر را داده است (جدول ۱).

نقش ساختار در توسعه فضای دست‌کند

تفاوت زاویه ۱۰ درجه‌ای لایه‌بندی با ۴۰ درجه‌ای توپوگرافی، یک استراتژی هوشمندانه برای زهکشی طبیعی فراهم کرده است. شیب لایه‌ها به سمت دهانه غار باعث می‌شود که هرگونه نفوذ احتمالی آب از سقف، به جای تجمع در انتهای غار، به

سمت بیرون هدایت شود. این ویژگی در کنار استفاده از سطوح لایه‌بندی به عنوان کف صاف، نشان‌دهنده شناخت تجربی معماران باستان از هندسه لایه‌ها است. مشاهدات نشان می‌دهند که یک درزه عرضی پرشیب در انتهای جنوبی ساختگاه غارها وجود دارد (شکل ۶). باز شدگی این درزه در اثر عبور نزولات جوی افزایش یافته و در کنار آن، واریزه‌های گسترده‌ای در دهانه بزرگترین غار قابل مشاهده است. این واریزه‌ها، عموماً حاصل از فرسایش قهقرایی و تخریب دیواره‌های غار یاده شده و تعریض و تعمیق آن در اثر کارکرد آبشار حاصل از یک آبراهه فصلی است. همچنین فرسایش لانه زنبوری صرفاً عناصر تزئینی نبوده‌اند. ما معتقدیم که این حفرات انحلالی به عنوان نقاط ضعف اولیه عمل کرده‌اند. معماران باستان با شناسایی خوشه‌های فرسایش لانه زنبوری که نفوذ در سنگ را ساده‌تر می‌کردند، کار حفاری را آغاز کرده و سپس با تراش سنگ، فضای داخلی را توسعه داده‌اند. این همزیستی بین فرآیند زمین ریخت شناختی و تکنولوژی باستان، مدلی جدید از توسعه فضاهای زیرزمینی را ارائه می‌دهد.

جدول (۱): مقایسه ویژگی‌های ساختگاه غار بی بی کند با سایر نمونه‌های شاخص ایران

Table (1): Comparison of the site characteristics of the Bibi-Kand cave with other prominent examples in Iran.

نام اثر	کاربری اصلی	سنگ ساختگاه	نوع سنگ	تبعیت از درزه های اصلی	درجه سختی حفاری	سن تقریبی
بی بی کند (شاهین دژ)	مجتمع مسکونی-دفاعی	سنگ آهک ریفی میوسن	سخت و متراکم	عدم تبعیت	بالا	هزاره اول پیش از میلاد
کندوان (اسکو)	مسکونی با حریم خصوصی خانوادها	ایگمبریت پلیو- پلیستوسن	نیمه سخت	تبعیت بالا	متوسط	سده ۱۴ میلادی
کرفتو (دیواندره)	سکونت، دژ دفاعی و نیایش	سنگ آهک میوسن	سخت و متراکم	تبعیت بالا	بالا	سده ۳ تا ۴ پیش از میلاد

نتیجه‌گیری

تحلیل‌های ژئومکانیکی و مشاهدات میدانی در مجموعه غارهای بی‌بی‌کند شاهین‌دژ به یافته‌های چندوجهی انجامید. ارزیابی توده‌سنگ بر پایه سیستم امتیازدهی RMR، امتیاز ۸۷ را برای این سایت به همراه داشت که آن را در رده یک با عنوان سنگ‌های بسیار خوب قرار می‌دهد. این کیفیت استثنایی که ریشه در یکپارچگی آهک‌های ریفی سازند قم و فقدان درزه‌های سیستماتیک دارد، امکان ایجاد فضاهای عریض با دهانه‌های تا ۷ متر و سقف‌های تخت را بدون نیاز به هرگونه سیستم نگهداری مصنوعی فراهم کرده است. تحلیل استاتیکی تیر سقف نیز تأیید کرد که ضخامت لایه‌بندی ریفی به خوبی تنش‌های کششی را مهار کرده و پایداری خودنگهدار این بنا را در طول سده‌ها تضمین نموده است. از سوی دیگر، یافته‌های تحقیق نشان داد که معماری بی‌بی‌کند در واقع نوعی معماری حذفی هوشمندانه به شمار می‌رود. ریخت‌شناسی دهانه‌ها با فرضیه بهره‌گیری از حفرات لانه‌زنبوری به عنوان نقاط بهینه برای آغاز عملیات حفاری همخوانی کامل دارد و این رویکرد فرصت‌طلبانه، همراه با استفاده از اختلاف زاویه بین شیب لایه‌بندی و توپوگرافی دامنه برای ایجاد زهکشی طبیعی در کف غارها، نشان از درک تجربی عمیق معماران باستان از هندسه لایه‌ها و رفتار هیدرولیکی سنگ دارد. تحلیل کالبدی نیز فاش ساخت که بدنه صخره‌ای به مثابه یک باتری حرارتی با تأخیر فازی بالا عمل کرده و نوسانات خشن دمایی منطقه آذربایجان را برای ساکنان تعدیل می‌کند. ساختار طبقاتی و عمودی مجموعه، افزون بر کارکرد دفاعی، جریان هوای طبیعی و اکسیژن‌رسانی به عمق صخره را میسر ساخته و از تجمع رطوبت مخرب در فضاهای داخلی جلوگیری کرده است. همچنین همسویی شیب لایه‌بندی با شیب دامنه، منجر به ایجاد زه‌کشی طبیعی و جلوگیری از لغزش لایه‌ای به درون فضاهای دست‌کند شده است. با وجود پایداری درونی بسیار بالا، پوسته خارجی صخره به دلیل فرسایش تفریقی و چرخه انجماد و ذوب در معرض تهدید جدی قرار دارد. از این رو، با توجه به ارزش‌های منحصربه‌فرد باستان‌شناسی مهندسی این مجموعه، آغاز اقدامات لازم برای ثبت آن به عنوان یک ژئوسایت

ملی و اجرای راهکارهای حفاظتی همچون هدایت روان‌آب‌های بالادست و تثبیت پیشانی بازشوها، برای جلوگیری از ریزش‌های قهقراپی ضروری به نظر می‌رسد. بی‌بی‌کند نه تنها یک سکونتگاه تاریخی، بلکه سندی زنده از مهندسی همساز با زمین است که می‌تواند به عنوان الگویی در مطالعات معماری پایدار مورد ارزیابی مجدد قرار گیرد.

References

- Aghanabati, A. (2006). *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran, 586 pp. Retrieved January 2004. (In Persian).
- Amini Beiram, F., Asghari, E., & HajiAlavi Bonab, M. (2026). Evaluation of weathering and erosion of cone-shaped pyroclastic rocks of Kandovan village. *Engineering Geology*, 9(1), 2593-2614. (In Persian).
- Asadi, R., & Abbasi, D. H. (2008). An Investigation into the Historical Village of Maymand in Attractive Tourism Aspects. *Geographic Space*, 8(21), 1-. (In Persian). <https://origin-ir.magiran.com/paper/640094>
- Asghari Kaljahi, E., Birami, F. A., & Hajialilue, M. (2014). Influence of geological structures and weathering in formation and destruction of cone-shaped rocky houses of the Kandovan Village, Iran. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 8: Preservation of Cultural Heritage* (pp. 231-234): Springer.
- Ataei Hamedani, M., Niknafs, A., & Mofidi Shemirani, S. M. (2014). Following of human residences positioning and form from ecological and climatic concepts despite of cultural connections (comparative examination of Meymand Village of Kerman and Mesa Verde Village of Colorado). *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 6(11), 111-126.
- Ayin, S., Kord Jamshidi, Maria., Pour Falah, Hamed. (2005). Evaluation of thermal performance of rock architecture of Kandovan village. *Journal of Arts Studies Quarterly*, 3(2). (In Persian). <https://www.noormags.ir/view/fa/magazine/number/82267>
- Bachouch, N. (2025). Troglodytic Architecture in Southern Tunisia in the Context of Culture, Space, and Society; Vertical Troglodytes in Matmata as a Case Study. In *Cities' Identity Through the Art of Urban Spaces* (pp. 3-20): Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-94821-3_1
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*: John Wiley & Sons.
- Dowling, R. K. (2010). *Geotourism: the tourism of geology and landscape*.
- Ebrahimi Asl, H., & Sattarzadeh, D. (2013). An analysis of the historical texture of Kandovan from the viewpoint of green architecture. *Advanced Materials Research*, 689, 75-80. (In Persian).
- Gannon, M. J., Cordina, R., Lochrie, S., Taheri, B., & Okumus, F. (2019). Kandovan Troglodyte village: A functioning cultural heritage experience. <https://doi.org/10.1108/S2042-144320190000010008>
- Ghobadiyan, v. (2006). *Climatic analysis of the traditional Iranian buildings* University of Tehran. (In Persian). <https://ketab.ir/book/ed9e0384-b9e2-46fc-96ec-62f810e7013a>
- Gorjimahlabani, Y., & Sanaee, e. (2010). Compatible architecture survey with Kandovan village climate. (In Persian).
- Karami, F., & Sharifi, R. (2014). Assessment of Rural Tourism through SWOT (Case Study: Rurals of Maragheh Central District). *Journal of Geography and Planning*, 17(46), 199-221. (In Persian).
- Khodabandeh, A. (2004). *Geological Map of Iran, 1:100,000 series, Osku Sheet*. Geological Survey of Iran. (In Persian).
- Lacombe, O., Tavani, S., Lamarche, J., Balsamo, F., & Agosta, F. (2022). Introduction: Faults and fractures in rocks: mechanics, occurrence, dating, stress history and fluid flow. 159, 1847-1854): Cambridge University Press Cambridge, UK.
- Masoud, M., & Beygzade, S. H. (2012). Conservation and Reneration of Decorative motifs of urban spaces. (In Persian). <https://www.sid.ir/paper/220169/en>
- Nahi, N., & Singery, M. (2015). Describing native architectural features of Kandovan, a sustainable village with rock architecture. Paper presented at the Renewable Energy in the Service of Mankind Vol I: Selected Topics from the World Renewable Energy Congress WREC 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-17777-9_62

- Najmoddini, I. (2025). Geochronology of Geomorphological Features Existence in Mountainous Regions with Formational-Structural Method (Case Study: Karaftou Cave, Kurdistan Province). *Journal of Environmental Research in Mountainous Regions*, 1(2), 25-34. (In Persian).
- Newsome, D., & Dowling, R. K. (2010). Geotourism: the tourism of geology and landscape: Goodfellow Publishers Ltd.
- Ranjbaran, M., & Sotuhiyan, F. (2018). The role of lithology in the formation of hive-like houses in the village of Kandovan, East Azarbaijan. *Quantitative Geomorphological Research*, 7(1), 48-60. (In Persian).
Dor:<https://20.1001.1.22519424.1397.7.1.4.8>
- Sarhangi, M. (2025). Atlas of Geological Heritage of West Azarbijan Province. Geological Survey & Mineral Explorations of Iran (GSI) Publications. (In Persian).