Payame Noor University

Journal of Structural Geology and Applied Tectonics (SGAT)

***Journal homepage*: https://sgat.journals.pnu.ac.ir/**

Interplay between Tectonic Features and Troglodytic Architecture in the Karaftu Cave: Stability Evaluation and Engineering Insight

Artin Arian[*1] | Mehrdad Sarhangi[2]

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

Keywords

Karaftu Cave,
Qom Formation,
Tectonics,
Troglodytic Architecture,
Roof Stability

Extended Abstract

Introduction

Karaftu Cave, located in the northern parts of Kurdistan Province, Iran, stands as one of the most sophisticated examples of ancient man-made rock architecture. Unlike many other cave settlements globally, such as Cappadocia, which were carved into soft volcanic tuffs, Karaftu was meticulously excavated into the hard, massive limestone of the Qom Formation (Miocene age). The site is not merely a natural cavern but a four-story complex comprising rooms, corridors, and large halls interconnected by stairs and lighting systems. The core scientific question addressed in this research is: How did the ancient architects utilize tectonic structures and geomechanical properties of the limestone to ensure the stability of this multi-story fortress for over two millennia? This study employs an interdisciplinary approach, merging structural geology, rock mechanics, and archaeological analysis. The study area is part of the Sanandaj-Sirjan zone, characterized by intense tectonic activities. The host rock, the Qom Formation, consists of thick-bedded to massive cream-colored limestones .Tectonic Control: The most critical tectonic feature of the site is the presence of three major joint sets (discontinuities) and a systematic bedding plane with a 20-degree dip. These tectonic elements defined the "boundary conditions" for the ancient excavators. The research shows that the primary halls are oriented parallel to the major tectonic strike, minimizing the risk of wall collapse. Furthermore, the regional tectonic stresses have resulted in vertical joints that served as "natural pre-cut lines," significantly reducing the energy required for manual excavation while ensuring perfectly vertical walls. Before diving into the geomechanical data, it is essential to understand the cultural significance of Karaftu.

Receive: 2026-04-29

Accepted: 2026-10-22

Published: 2026-11-01

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

How to cite this article: Arian, A., & Sarhangi, M. (2025). Interplay between Tectonic Features and Troglodytic Architecture in the Karaftu Cave: Stability Evaluation and Engineering Insight. *Structural Geology and Applied Tectonics, 1*(2): 19–36. DOI: 10.30473/sgat.2026.77874.1003.

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/).

-Chronology: Archaeological evidence spans from the Epipaleolithic period to the Islamic era. However, its architectural zenith occurred during the Seleucid and Parthian periods.

-The Hercules Inscription: A Greek inscription at the entrance of a third-floor chamber—stating "Here is the house of Hercules, he who enters shall be safe"—identifies the site as a significant Greco-Iranian military or religious outpost.

- The Fortress-Settlement Concept: The elevated position of the cave in a vertical cliff face provided a "Passive Defense" mechanism. Its four stories served as a fortified city (Fortress-Cave) capable of housing a garrison and civilians during times of war. The architectural layout demonstrates a clear transition from a natural refuge to a highly engineered military stronghold.



Figure (1): Northward view of the limestone at the Karaftu Cave site, showing differential erosion of medium- to thick-bedded rock units. The cave entrance and its floors are visible in the central part of the image.

Methodology

1. Empirical Geomechanical Assessment: A preliminary estimation of the rock mass quality was conducted using the Rock Mass Rating (RMR) system. Due to the site's heritage constraints, parameters such as uniaxial compressive strength (UCS) and discontinuity conditions were evaluated through field-based empirical methods and visual-manual descriptions rather than invasive laboratory testing.

2. Structural Mapping: Systemic joint sets, bedding planes, and tectonic lineaments were mapped using a geological compass to determine the spatial relationship between the cave’s architecture and the regional stress field.

3. Stability Analysis: The Factor of Safety (F.S) was calculated by integrating the estimated RMR values with the geometric data of the spans, focusing on the stability of the multi-story portals and ceilings.

Results and Discussion

The field data yielded an RMR score of 92, classifying the Karaftu limestone as "Class I: Very Good Rock".This exceptionally high RMR score explains why the cave has survived without the need for artificial support systems (like columns or arches) even in spans exceeding 8 meters.

A major finding is the 20-degree dip management. In geotechnical engineering, cutting a horizontal roof across dipping layers creates "slabbing" hazards. Ancient architects avoided this by keeping the roofs parallel to the bedding planes. This resulted in sloped ceilings, which were then compensated for by terracing the floors. This ingenious "Tectonic Adaptation" is a hallmark of Karaftu's engineering.

Using the flexural strength of the limestone and the thickness of the immediate roof layers (avg. 1.5m), the Factor of Safety was calculated at 3.84. In modern civil engineering, an F.S. of 1.5 is considered stable. The value of 3.84

indicates a "Hyper-Stable" design, capable of withstanding significant seismic shocks common in the Zagros and Sanandaj-Sirjan regions.

Unlike global rock-cut sites like Cappadocia, which were carved into "soft" volcanic tuffs, Karaftu represents the Mastery of Competent Rock. This site is a rare example where ancient architects moved beyond simple excavation and engaged in "Tectonic Negotiation".The study reveals that the builders did not fight the rock's natural resistance; instead, they utilized the Anisotropy of the Qom Formation. By aligning chambers with systematic joint sets and keeping roofs parallel to the 20-degree bedding dip, they prevented Interlayer Shearing—a sophisticated geotechnical decision that avoided structural collapse. This "Applied Tectonic" logic demonstrates an empirical understanding of rock mechanics that was centuries ahead of its time, turning a formidable geological barrier into a fortified architectural masterpiece.

Conclusions

The quantitative and qualitative analyses of this study lead to the following definitive engineering conclusions:

-Structural Stability Assessment: Calculations based on the RMR system yield a score of 92, classifying the Qom Formation limestone at the Karaftu site as "Class I: Very Good Rock." Furthermore, the achievement of a Factor of Safety (F.S.) of 3.84 for the main hall ceilings confirms the inherent stability of the complex against static dead loads and the seismic stresses characteristic of the Sanandaj-Sirjan zone.

-The alignment of over 70% of the room walls and all primary corridors with the transverse tensile joint system demonstrates that ancient architects possessed a profound understanding of rock anisotropy. By utilizing natural fissures as cutting lines, they not only accelerated the construction process but also ensured the structural stability of the walls.

-Tectonic-Architectural Synchronization: Structural mapping results indicate that ancient architects possessed a precise understanding of rock mass anisotropy. By aligning the geometry of the chambers with systematic joint sets, they optimized stress distribution along vertical walls, effectively eliminating the need for artificial support systems or external reinforcements.

-The site of the cave constitutes the southern limb of a Hanging syncline. The main entrances and halls have been primarily excavated perpendicular to the bedding strike. The gentle dip of the strata toward the mountain interior prevents the transfer of overburden pressure toward the cave portal. Consequently, the host rock mass has maintained its structural integrity over millennia, despite the presence of deep fractures.

-Bedding Dip Management: The intentional synchronization of the room ceilings with the 20-degree bedding dip is the most significant engineering finding of this study. This adaptation prevented interlayer shearing and slabbing failures, ensuring the long-term structural integrity of the multi-story complex.

In summary, Karaftu Cave is not a product of fortuitous excavation but a masterpiece of "Empirical Rock Engineering," where regional tectonic features were utilized as fundamental parameters in the architectural design process.

نشریه زمین شناسی ساختاری و زمین ساخت کاربردی

https://sgat.journals.pnu.ac.ir

تحلیل برهم‌کنش عوامل زمین‌ساختی و معماری دست‌کند در غار کرفتو: ارزیابی پایداری و درایت مهندسی

آرتین آرین*[۱]، مهرداد سرهنگی[۲]

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

کلیدواژه‌ها

غار کرفتو،
سازند قم،
زمین ساخت،
معماری دست‌کند،
پایداری سقف

چکیده

غار کرفتو، واقع در شمال‌باختر ایران، یکی از شاخص‌ترین نمونه‌های معماری دست‌کند در بستر توده‌های سنگی صلب است. این پژوهش با رویکردی میان‌رشته‌ای به تحلیل پایداری سازه‌ای و انطباق هندسه فضاها با بسترهای زمین‌ساختی سازند قم (میوسن) می‌پردازد. روش تحقیق مبتنی بر برداشت‌های میدانی ناپیوستگی‌ها، ارزیابی توده سنگ بر اساس سامانه امتیازدهی RMR و تحلیل پایداری سقف با تئوری تیر است. یافته‌ها نشان می‌دهد که توده سنگ میزبان با کسب امتیاز RMR=92 در رده «سنگ بسیار خوب» قرار دارد. محاسبات مهندسی حاکی از آن است که تالارهای غار با ضریب اطمینان ۳/۸۴ طراحی شده‌اند که نشان‌دهنده پایداری استثنایی سقف‌ها در برابر بارهای استاتیکی و لرزه‌ای است. نتایج تطبیقی نشان داد که معماران باستان برپایه تجربه، جهت‌گیری ۷۰ درصد اتاق‌ها و تمام راهروهای اصلی را بر سامانه درزه‌بندی منطبق کرده و برای جلوگیری از ریزش‌های تیغه‌ای، هندسه سقف را همسو با شیب ۲۰ درجه‌ای لایه‌بندی حفظ نموده‌اند؛ چالشی که با پله‌بندی هوشمندانه در کف فضاها جبران شده است. این موارد، دلیل ماندگاری دهانه، راهروها، اتاق ها و تالارهای غار در طول سه هزار سال اخیر است. قرارگیری غار در یال جنوبی یک ناودیس معلق و شیب ملایم لایه‌ها به سمت داخل کوه، با ایجاد یک قفل‌شدگی طبیعی، ریسک ریزش‌های لایه‌ای را نیز در غار به حداقل رسانده است. نتایج این تحقیق ثابت می‌کند که برخلاف بیشتر ساختگاه های باستانی و تاریخی معروف که در سنگ‌های سست حفر شده‌اند، کرفتو حاصل غلبه بر صلبیت سنگ آهک، از طریق درک غریزی مکانیک سنگ و همسویی با هندسه زمین است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۳۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۱۰

*نویسنده مسئول:
آرتین آرین
رایانامه:
artin.arian@iau.ir

ارجاع به این مقاله: آرین، آ؛ و سرهنگی، م. (۱۴۰۵). تحلیل برهم‌کنش عوامل زمین‌ساختی و معماری دست‌کند در غار کرفتو: ارزیابی پایداری و درایت مهندسی. *زمین شناسی ساختاری و زمین ساخت کاربردی*، ۱ (۲): ۳۶-۱۹.

شناسه دیجیتال مقاله: 10.30473/sgat.2026.77874.1003

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است.

ناشر: دانشگاه پیام نور

مقدمه

در میان آثار دست‌کند ایران، غار دژ -کرفتو نمونه‌ای بی‌بدیل از همزیستی میان ریخت‌شناسی زمین و درایت معماری است. این اثر که در ۶۷ کیلومتری شمال باختر دیواندره قرار دارد، از منظر زمین‌شناسی تاریخی، در سنگهای آهکی سازند قم (میوسن) شکل گرفته است (Kholghi Khosraghi, 1999; Rahimzadeh, 1994). افزون بر این، پژوهش‌های نوین در حوزه ژئوشیمی و سن‌سنجی رادیوکربن (Amin-Rasouli *et al*., 2021)، پنجره‌های جدیدی را به سوی بازسازی اقلیمی و گاه‌نگاری دقیق‌تر این اثر گشوده‌اند. اثری که واجد پدیده‌های کارستی و فرسایش تفریقی قابل توجهی شده است (شکل ۱).



شکل (۱): نمای کلی از کوه دربردارنده غار کرفتو، دید به سمت شمال
Fig (1): An overview of the mountain containing Karaftu Cave, looking north

مطالعات پیشین در این غار عمدتاً بر جنبه‌های زمین گردشگری، باستان‌شناختی و معماری آن تمرکز داشته‌اند (Bayati, 2010; Hojabri, 2018; Najmoddini, 2025; Tarkhani, 2010). با این حال، در دهه‌های اخیر، نگاه‌های میان‌رشته‌ای در حال گسترش است. اما پیوند میان هندسه درزه‌ها و شیب لایه‌بندی سازند قم با فضاهای داخلی غار، همچنان نیازمند واکاوی دقیق‌تر است که در این مقاله ارایه خواهد شد.

از منظر زمین‌گردشگری ، غار کرفتو تنها یک میراث تاریخی نیست، بلکه یک «ژئوسایت» ارزشمند است که فرآیندهای انحلال کارستی، فرسایش بادی و زمین ساخت فعال را در معرض نمایش می‌گذارد. تنوع اشکال فرسایشی در نمای بیرونی و انطباق حیرت‌انگیز اتاقک‌های مکعبی با درزه‌های زمین ساختی، این مکان را به آزمایشگاهی زنده برای آموزش مفاهیم «زمین ساخت کاربردی در معماری» بدل کرده است (Newsome & Dowling, 2010).

این پژوهش بر آن است تا با بررسی ناپیوستگی‌های زمین‌ساختی در سازند قم، نشان دهد که چگونه معماران باستان با درک غریزی از مکانیک سنگ، از ضعف‌های ساختاری زمین برای پایداری و شکل‌دهی به طبقات غار بهره جسته‌اند. این تلفیق، نه تنها ارزش‌های معماری، بلکه جذابیت‌های زمین‌گردشگری (Oboodi & Moradi, 2024). را به عنوان یک میراث ترکیبی (طبیعی-فرهنگی) دوچندان می‌کند.به بیان دیگر،این اثر فراتر از یک غار طبیعی، یک مجموعه معماری دست‌کند با کاربری «دژ-مسکونی» است (Oboodi & Pakdel, 2022) که در چهار طبقه مجزا حفر شده است.

کرفتو از واژه «کرپت» یا «کرفته» گرفته شده که به معنای «نیایشگاه» یا «مکان مقدس» است. با توجه به وجود کتیبه یونانی و ساختار معبدگونه بخش‌هایی از غار، این احتمال که اینجا یک مکان آیینی (مانند معبد مهر یا نیایشگاه ایزدان) بوده، بسیار بالاست. ترجمه متن کتیبه عبارتست از: «این خانه هرکول است، هر کس که در آن وارد شود، در امان است». هرکول محبوب‌ترین قهرمان و نیمه‌خدای دنیای باستان بود و مردم، آن را نماد محافظت و پیروزی بر ناممکن ها می دانستند. متن به‌کار رفته در کتیبه کرفتو، نمونه‌ای از سنت دفع شر در دنیای هلنیستی (یعنی فرهنگی که ریشه یونانی دارد اما با سنت‌های محلی آمیخته شده) است که مشابه آن دربر سردر خانه‌ها جزیره دلوس (یونان) و پمپئی (ایتالیا) نیز دیده شده است (Faraone, 1994). این پیوند فرهنگی نشان‌دهنده نفوذ ژرف الگوهای آیینی یونانی در معماری دست‌کند باختر ایران در دوره سلوکی-اشکانی است. در ایران، تاکنون کتیبه دیگری با همین متن یونانی یافت نشده، اما از نظر مفهومی، نقش‌برجسته هرکول در بیستون کرمانشاه دارد. این اثر که متعلق به دوران سلوکیان است، هرکول را در حال استراحت نشان می‌دهد. وجود این مجسمه در کنار جاده ابریشم نشان‌دهنده محبوبیت فوق‌العاده هرکول (به عنوان نماد قدرت و محافظت) در ایرانِ آن زمان است. البته در دوران ساسانیان و اشکانیان، ایزد بهرام (ایزد پیروزی) با هرکول تطبیق داده می‌شد. کتیبه‌های متعددی که در آن‌ها از ایزد بهرام طلب محافظت شده، ریشه در همین تفکر «محافظت از بنا» دارد.

به هرحال، موقعیت غار در دل یک دیواره عمودی، دسترسی دشوار و اشراف بر دشت‌های اطراف، نشان‌دهنده کاربری دفاعی آن در ادوار مختلف (از جمله ساسانی و اسلامی) است. ساختار تودرتوی اتاق‌ها، وجود سامانه‌های نورگیر و پله‌بندی‌های هوشمندانه، حکایت از یک برنامه‌ریزی معماری برای اسکان جمعیت در قالب یک دژ نظامی یا پناهگاه جمعی دارد. کرفتو نمایش‌دهنده مرحله‌ای گذار در تاریخ معماری است؛ جایی که انسان تلاش می‌کند «نظم هندسی» (خطوط راست و زوایای قائمه) را بر «هرج‌ومرج طبیعیِ» غار تحمیل کند. حضور اتاق‌هایی با پلان‌های مستطیلی دقیق و سقف‌های تخت در لایه‌های آهکی کرفتو، نشان‌دهنده گرایش به هندسه اقلیدسی به عنوان نمادی از تسلط خرد انسان بر طبیعتِ است.

روش شناسی

این پژوهش با رویکردی تحلیلی-تطبیقی و بر پایه مطالعات میدانی و کتابخانه‌ای انجام شده است. برای دستیابی به اهداف تحقیق، فرآیند مطالعه در چهار گام اصلی برنامه‌ریزی گردید:

مطالعات کتابخانه‌ای و اسنادی

در گام نخست، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ منطقه (Kholghi Khosraghi, 1999) و گزارش‌های استراتیگرافی سازند قم جهت شناسایی لیتولوژی و ویژگی‌های رسوب‌گذاری بررسی شد (Rahimzadeh, 1994). همچنین پیشینه تاریخی و نقشه‌های معماری موجود از غار کرفتو جهت درک اولیه از توزیع فضاها استخراج گردید.

برداشت‌های میدانی زمین‌ساختی

مطالعات میدانی در قالب ۵ ایستگاه اصلی (شامل دهانه ورودی، تالار ستون‌دار طبقه دوم، اتاق‌های طبقه سوم و دالان‌های انتهایی طبقه چهارم) انجام شد. در مجموع، جهت و شیب ۱۰ مورد از ناپیوستگی‌های بارز (شامل یک درزه سیستماتیک و سطوح لایه‌بندی) اندازه‌گیری شد. همچنین با توجه به حساسیت‌های میراثی سایت، شاخص RMR از طریق یک رویکرد تجربی-برآوردی تعیین گردید (Bieniawski, 1989). این فرآیند شامل مشاهدات صحرایی برای پنج پارامتر کلیدی بود: مقاومت فشاری تک‌محوری (تخمین‌زده شده از طریق تست‌های شاخص صحرایی)، کیفیت مغزه (RQD تخمین‌زده شده از فراوانی درزه‌ها)، فاصله، شرایط و جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها. این برآورد، یک خط پایه قابل اعتماد برای ارزیابی کیفیت کلی توده سنگ آهکی سازند قم ارائه می‌دهد.

مستندنگاری معماری و تطبیق هندسی

فضاهای دست‌کند در چهار طبقه غار مورد پیمایش قرار گرفتند. در این مرحله، جهت‌گیری دیوارهای اصلی بیشتر اتاق‌ها و سقف‌ها با جهت‌گیری درزه‌های زمین ساختی و سطوح لایه‌بندی تطبیق داده شد. هدف از این کار، تعیین میزان انحراف هندسه معماری از نظم طبیعی سنگ بود تا مشخص شود معماران تا چه حد از «خطوط ضعف طبیعی» برای حفاری استفاده کرده‌اند.

نتایج

تحلیل‌های انجام شده بر روی ساختار سازند قم در غار کرفتو و انطباق آن با فضاهای دست‌کند، نتایج زیر را حاصل نمود:

انطباق هندسه فضاها با سامانه درزه‌بندی

برداشت‌های میدانی نشان داد که یک دسته درزه سیستماتیک عرضی با شیب ۹۰ تا ۷۳ درجه به سمت جنوب خاوری و راستای ۰۲۰ تا ۰۴۰که دچار انحلال شدیدی شده است. نتایج تطبیقی نشان می‌دهد که:

- ۷۰ درصد دیوارهای اتاق‌ها و تمام راهروهای اصلی، دقیقاً موازی با این درزه‌های کششی تراشیده شده‌اند. در مطالعات و آزمایش‌های زمین ساخت تجربی بر روی پدیده چین‌خوردگی، توالی تشکیل درزه‌ها به پارامترهای مختلفی بستگی دارد، اما بر اساس الگوهای کلاسیک مکانیک سنگ (Lacombe *et al.*, 2022)، روند معمول به شرح زیر است:

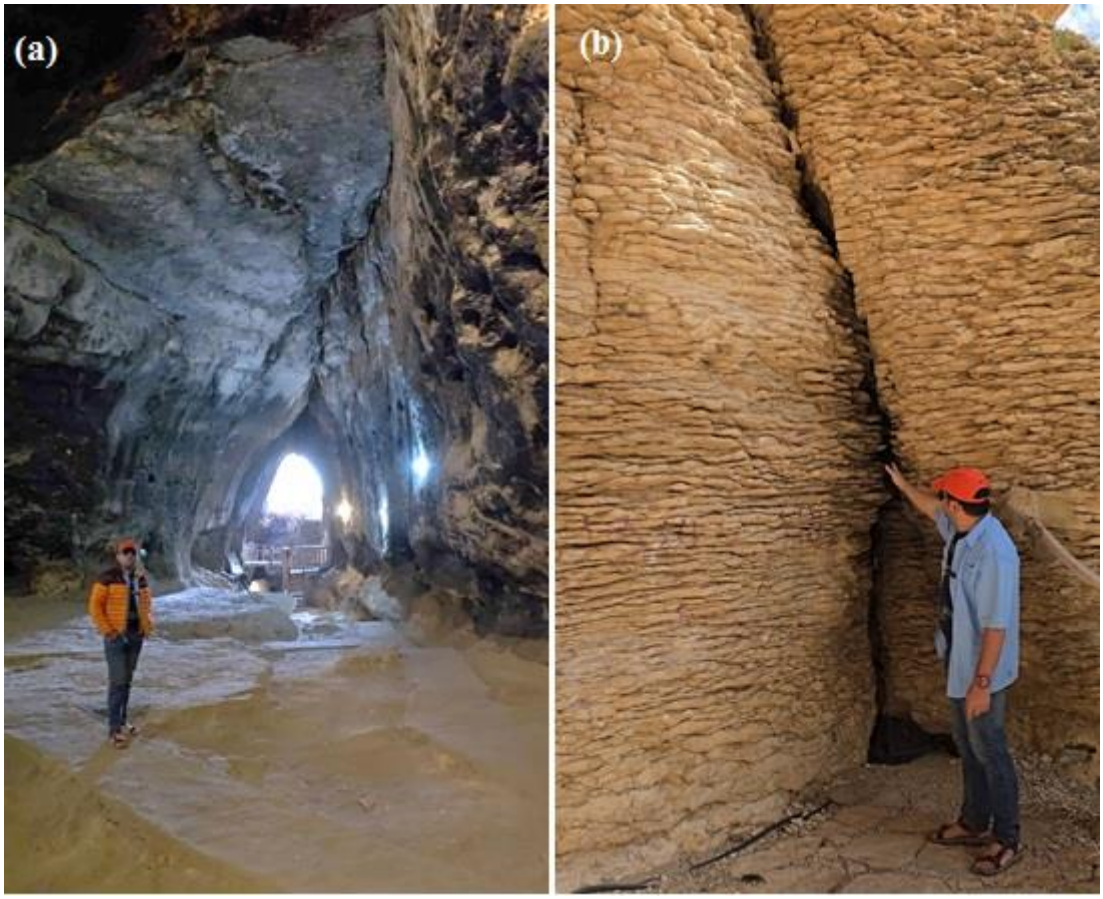
۱. درزه‌های عرضی (در اثر کشش اولیه موازی با محور)

۲. درزه‌های مزدوج (در اثر تنش برشی)

۳. درزه‌های طولی (در اثر کشش ناشی از خم‌شدگی نهایی در قوس خارجی)

بنابراین اولین شکستگی‌هایی که ظاهر می‌شوند، درزه‌های عرضی (عمود بر محور چین) هستند. در مراحل اولیه خم‌شدگی یا حتی قبل از آن (تحت فشار اولیه)، سنگ در راستای محور چین دچار کشش می‌شود. این درزه‌ها موازی با جهت تنش اصلی بیشینه و عمود بر محور چین ایجاد می‌شوند تا کرنش کششی را جبران کنند. این درزه ها نقش مهمی را در کارست‌شدگی داشته اند زیرا راه را برای نفوذ آب باز کرده اند (شکل ۲ چپ). در کرفتو، بخش بزرگی از غاراصلی در اثر انحلال همین درزه‌ها توسط آب‌های زیرزمینی ایجاد شده است (شکل ۲ راست).

- حجاران باستان به جای تخریب بافت سخت سنگ، از این شکاف‌های طبیعی به عنوان «خط برش» استفاده کرده‌اند که این امر علاوه بر سهولت در حفاری، باعث ایجاد سطوح صاف و صیقلی در دیواره‌ها شده است.



شکل (۲): سقف تالار در تصویر (a) نشان‌دهنده توده سنگی است که علی‌رغم وجود درزه ژرف، انسجام خود را حفظ کرده است. در دیواره‌های سمت راست و چپ، ترکیب فرآیندهای انحلال طبیعی (کارست) و دخالت‌های انسانی برای تعریض و شکل‌دهی به فضاها دیده می‌شود. تسطیح کف غار در پیش‌زمینه تصویر ، نشان‌دهنده کاربری انسانی و ایجاد بستری برای استقرار یا تردد است. تصویر (b) در نمای بیرونی غار کرفتو، توالی سنگ آهک سازند قم و یک درزه ممتد که لایه‌بندی را قطع کرده‌اند، باعث ایجاد بلوک‌های سنگی مجزا شده است.

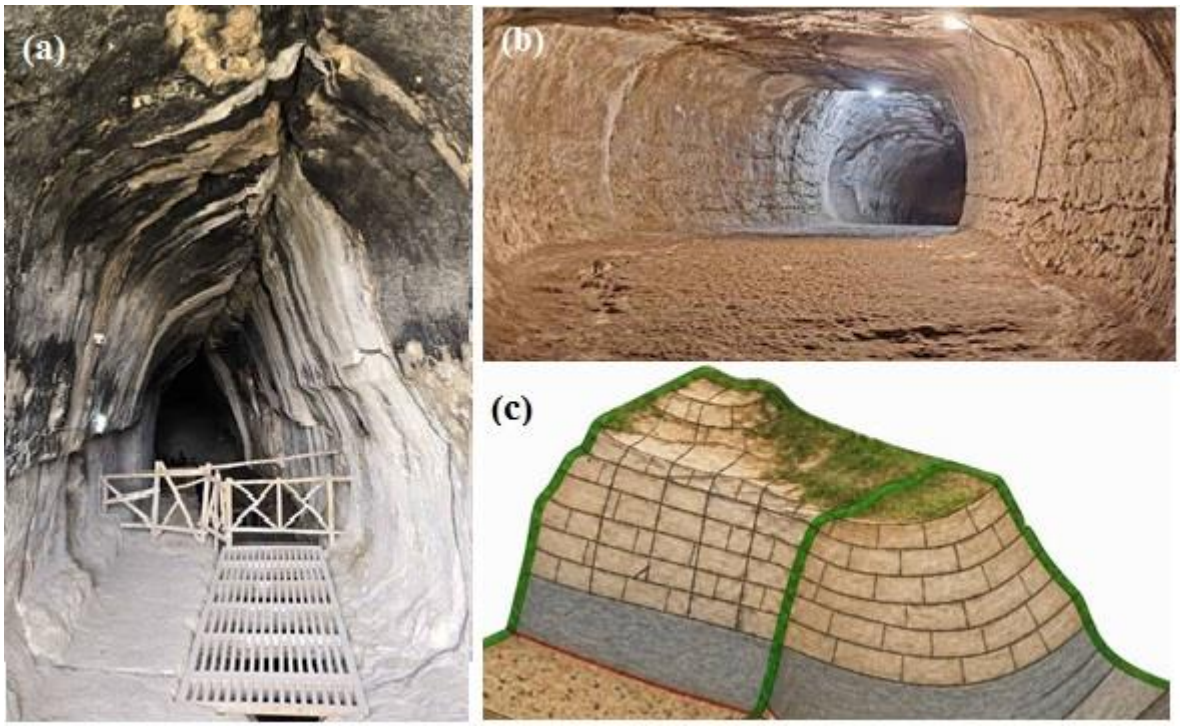
Fig (2): The ceiling of the hall in image (a) shows a rock mass that has maintained its integrity despite the presence of a deep joint. On the right and left walls, a combination of natural dissolution processes (karst) and human interventions for widening and shaping the spaces can be seen. The leveling of the cave floor in the foreground of the image indicates human use and the creation of a surface for settlement or movement. Image (b), in the exterior view of Karaftu Cave, shows that the limestone sequence of the Qom Formation and a continuous joint cutting across the bedding have caused the formation of separate rock blocks.

نقش سطوح لایه‌بندی و ساختار در پایداری سقف‌ها

بررسی‌های لایه‌نگاری نشان داد که واحد آهکی سازند قم در محل غار کرفتو، ضخامتی بالغ بر ۵۰ تا ۶۰ متر دارد که بر روی یک بسترعموما مارنی قرار گرفته است. همچنین، هندسه ناپیوستگی‌ها نشان داد که سامانه درزه‌های کششی عرضی در این واحد، دارای فاصله‌داری قابل‌توجهی بین ۲۰ تا ۲۵ متر هستند. سازند قم در محل غار دارای لایه‌بندی متوسط تا ضخیم با شیبی ملایم (حدود ۱۵ تا ۲۰ درجه) و راستای ۱۱۰ تا ۱۳۰ است. یافته‌ها نشان می‌دهد:

- سقف اکثر تالارهای بزرگ غار، دقیقاً بر روی یک «سطح جدایش لایه‌بندی» قرار گرفته است. این انتخاب هوشمندانه باعث شده تا سقف‌ها به صورت یکپارچه و مسطح باقی بمانند و خطر ریزش ناگهانی (در مقایسه با سقف‌های مورب) به حداقل برسد.
- اختلاف مقاومت سنگ‌شناختی در لایه‌های مختلف سازند قم (فرسایش تفریقی)، طبقات چهارگانه غار را تعریف کرده است.

- لایه‌ها دارای یک شیب ملایم به سمت شمال خاوری (داخل کوه) هستند و کوه ساختگاه غار، در واقع یال جنوبی یک ناودیس معلق (شکل ۳) است که ورودی‌ها و تالارهای اصلی غار عمدتاً در جهت عمود بر امتداد لایه‌بندی حفاری شده‌اند.
-شیب ملایم لایه‌ها به سمت داخل کوه باعث می‌شود که بار طبقات فوقانی به جای اینکه مستقیماً به سمت دهانه (پرتگاه) رانده شود، به سمت مرکز توده سنگ منتقل شود. به این ترتیب، یک «قفل‌شدگی طبیعی» ایجاد شده که مانع از لغزش لایه‌های سقف به سمت بیرون گردیده است.



شکل (۳): تصویر (a): وجود یک درزه عرضی در تاج سقف و انطباق فرم سقف با این ناپیوستگی، نشان‌دهنده درک تجربی معماران از توزیع تنش است. آن‌ها با ایجاد یک مقطع قوسی، پایداری تالار را علی‌رغم وجود ناپیوستگی‌های ممتد تضمین کرده‌اند. تصویر (b): نمای داخلی دالان اصلی غار کرفتو که سقف آن، فشار بار فوقانی را به دیواره‌ها منتقل می‌کند.. پایداری سقف در این بخش به دلیل هندسه قوسی و ضخامت بالای لایه‌های آهکی توده‌ای تأمین شده است. تصویر (c): مدل شماتیک مفهومی ناودیس معلق متشکل از سازند قم که تشکیل و گسترش درزه های عرضی کششی (آبی رنگ) در یال جنوب باختری آن، سبب تشکیل غار کرفتو شده است، طراحی گرافیکی به کمک مدل هوش مصنوعی GPT-4o.

Fig (3): Image (a): The presence of a transverse joint in the ceiling crown and the conformity of the ceiling form with this discontinuity indicate the architects' empirical understanding of stress distribution. By creating an arched section, they have ensured the stability of the hall despite the presence of continuous discontinuities. Image (b): Interior view of the main corridor of Karaftu Cave, whose ceiling transfers the overburden pressure to the walls. The stability of the ceiling in this section is provided by the arched geometry and the great thickness of the massive limestone layers. Image (c): Conceptual schematic model of a suspended syncline composed of the Qom Formation, in which the formation and extension of tensile transverse joints (blue) on its southwestern limb caused the formation of Karaftu Cave; graphic design with the help of the GPT-4o AI model.

ارزیابی کیفی توده سنگ (Rock Mass Rating)

جهت تحلیل پایداری سازه‌های دست‌کند و تبیین علت ماندگاری طبقات چهارگانه، توده سنگ آهک متراکم غار بر اساس سامانه RMR مورد ارزیابی قرار گرفت (Bieniawski, 1989). پارامترهای برآوردی به شرح زیر است:

۱. مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ (UCS): با توجه به ماهیت سنگ آهک‌های متراکم سازند قم، مقاومت در بازه ۱۰۰-۲۵۰ مگاپاسکال برآورد شده و امتیاز ۱۲ لحاظ گردید.

۲. شاخص کیفی سنگ (RQD): به دلیل فاصله زیاد درزه‌ها (۲۰ تا ۲۵ متر)، توده سنگ بسیار یکپارچه بوده و RQD بالای ٪۹۰ برآورد می‌شود. امتیاز: ۲۰.

۳. فاصله داری درزه ها: با توجه به فاصله ۲۰ تا ۲۵ متری درزه‌های کششی عرضی (که فراتر از مقدار بحرانی ۲ متر در جدول RMR است)، حداکثر امتیاز این بخش تعلق می‌گیرد. امتیاز: ۲۰.

۴. وضعیت ناپیوستگی‌ها: دیواره درزه‌ها در آهک‌های قم معمولاً خشن و با بازشدگی کم هستند. امتیاز: ۲۵.

۵. شرایط آب زیرزمینی: با توجه به وضعیت خشک کنونی غار. امتیاز: ۱۵.

بر این پایه، مجموع امتیاز RMR ، ۹۲ از ۱۰۰می شود که توده سنگ غار کرفتو را در رده «سنگ بسیار خوب رده ۱» قرار می‌دهد. این برآورد نشان‌دهنده پایداری استثنایی بستر زمین‌شناختی غار کرفتو است. این کیفیت بالای سنگ، مهم‌ترین دلیل پایداری دهانه‌های وسیع و سقف‌های تخت در تالارهای طبقه سوم است که بدون نیاز به ستون‌های نگهبانِ مصنوعی، قرن‌ها پابرجا مانده‌اند (شکل۴). در واقع، معماران باستان با هوشمندی، صلب‌ترین و باکیفیت‌ترین بخش از سازند قم را برای حفاری انتخاب کرده‌اند. این ثبات ساختاری، ریسک "ریزش لایه‌ای" را به حداقل رسانده و اجازه داده است تا نازک‌کاری‌های ظریف معماری (مانند قاب پنجره‌ها و کتیبه‌ها) در بستر سنگ صلب، با ماندگاری بالا اجرا شوند.



شکل (۴): این تصویر فوق‌العاده، یکی از جالب‌ترین نقاط غار کرفتو را نشان می‌دهد که تلاقی هنر معماری صخره‌ای و تجارب مهندسی باستان است. در این نما، تالاری با یک فضای مرکزی بسیار وسیع دیده می‌شود که هیچ سامانه نگاهدارنده مصنوعی (مانند جک یا ستون فلزی) در آن دیده نمی‌شود. این موضوع به عدد RMR بالای ۹۲ که محاسبه کردید بازمی‌گردد. توده سنگ به دلیل درگیری بلوک‌ها و مقاومت بالای سنگ آهک، نقش خودنگهدار را ایفا می‌کند. همچنین سطح دیواره‌ها دارای بافتی ناهموار و پوشیده از رسوبات ثانویه (کربنات کلسیم) است.

Fig (4): This remarkable image shows one of the most fascinating spots in Karaftu Cave, where the art of rock architecture and ancient engineering experiences converge. In this view, a hall with a very large central space is seen, in which no artificial support system (such as jacks or metal columns) is visible. This relates to the RMR value above 92 that you calculated. Due to the interlocking of blocks and the high strength of the limestone, the rock mass plays a self-supporting role. Also, the surface of the walls has a rough texture and is covered with secondary deposits (calcium carbonate).

پارامترهای ژئومکانیکی و پایداری سقف

جهت ارزیابی پایداری، از تئوری تیر برای محاسبه حداکثر تنش کششی در سقف تالارها استفاده شد. تحلیل پایداری برپایه فرضیات دو مدل هندسی متفاوت، متناسب با ریخت‌شناسی فضاهای غار انجام شده است:

- مدل تیر تخت: این مدل برای اتاق‌ها و تالارهای طبقه سوم که دارای سقف‌های مسطح هستند، به‌کار رفته است. در این بخش‌ها، معماران با هوشمندی تالارها را در فاصله بین دو درزه سیستماتیک (در قلب بلوک‌های یکپارچه ۲۰ تا ۲۵ متری) حفر کرده‌اند. بنابراین، سقف به عنوان یک تیر ساده با طول دهانه (L) در نظر گرفته شده است.

- مدل اثر قوس طبیعی: در راهرو اصلی که یک درزه سیستماتیک ممتد در طول تاج سقف وجود دارد، مدل محاسباتی از تیر تخت به قوس دو مفصلی تغییر یافته است. در این حالت، به دلیل شکل قوسی سقف و درگیری بلوک‌ها، تنش‌های کششی حذف و بار به صورت تنش فشاری به دیواره‌ها منتقل می‌شود که پایداری را حتی در حضور درزه تضمین می‌کند. با در نظر گرفتن وزن مخصوص سنگ (γ) برابر با ۲۶ کیلونیوتن بر متر مکعب، ضخامت لایه‌بندی موثر (t) ۱/۵ متر و عرض دهانه تالار (L) ۱۰ متر، تنش بیشینه (σ_{max}) با استناد به روابط کلاسیک مکانیک سنگ زیرزمینی (Brady & Brown, 2006) بر اساس فرمول (۱) محاسبه گردید:

$$\sigma_{max} = 3.\ \gamma.\ L^2/\ 4t = 1.3\ MPa \qquad \text{(فرمول ۱)}$$

مقاومت کششی تئوریک هرسنگ حدود ۱۰ درصد مقاومت فشارشی سنگ است (Sheorey, 1997)، اما جهت لحاظ کردن اثر ناپیوستگی‌های ریز و درزه ها، هوازدگی سطحی و ارتقای قابلیت اطمینان محاسبات، مقدار مقاومت کششی در مدل‌سازی‌ها به‌صورت محافظه‌کارانه (۵ درصد حد پایه) در نظر گرفته شد.بر این پایه، مقاومت کششی سنگ آهک (σ_t) حدود ۵ مگاپاسکال برآورد شد و سپس ضریب اطمینان (Safety Factor) پایداری سقف از فرمول (۲) به دست آمد:

$$F.S = (\sigma_t) / (\sigma_{max}) = 3.84 \qquad \text{(فرمول ۲)}$$

عدد ۳/۸ نشان می‌دهد که تالارهای کرفتو حتی در برابر زلزله‌های متوسط نیز بسیار مقاوم هستند.

تأثیر شیب لایه بر هندسه داخلی

با توجه به شیب لایه‌بندی (۱۵ تا ۲۰ درجه) ، برای اینکه سقف یک تالار ۱۰ متری بر روی یک لایه واحد باقی بماند (تا پایدار باشد)، افت تراز سقف بر اساس فرمول (۳) محاسبه می‌شود:

$$\Delta h = L \sin (20) = 3.4\ meters \qquad \text{(فرمول ۳)}$$

یعنی به دلیل شیب بیشینه ۲۰ درجه‌ای لایه‌بندی سازند قم، در طول یک تالار ۱۰ متری، اختلاف ترازی حدود ۳/۴ متر ایجاد می‌شود. شواهد معماری در غار کرفتو نشان می‌دهد که حجاران با درک این موضوع، یا طول تالارها را در جهت شیب محدود کرده‌اند و یا با ایجاد اختلاف سطح در کف (پله‌بندی)، مانع از بریدن لایه‌های فوقانی سقف شده‌اند. این هماهنگی بین هندسه معماری و شیب لایه‌بندی، کلید پایداری طبقات فوقانی بر روی طبقات تحتانی است.

بهره‌گیری از پدیده‌های کارستی در معماری

نتایج بررسی‌ها نشان داد که هسته اولیه بسیاری از اتاق‌های دست‌کند، حفره‌های کارستی طبیعی (ناشی از انحلال آهک توسط آب‌های زیرزمینی قدیم) بوده است (شکل ۵). معماران باستان با شناسایی این فضاهای خالی طبیعی، آن‌ها را گسترش داده و به فضاهای مسکونی و دفاعی تبدیل کرده‌اند؛ این یعنی «بهینه‌سازی حداکثری انرژی» در فرآیند ساخت. توده‌های سنگی کربناته در کرفتو به دلیل ضخامت بسیار بالا و ظرفیت گرمایی ویژه، دارای اینرسی حرارتی فوق‌العاده‌ای هستند. این ویژگی باعث ایجاد یک تأخیر زمانی در انتقال حرارت میان محیط بیرون و فضاهای داخلی می‌شود. در فصول گرم، توده سنگی گرمای روز را جذب کرده و فضای داخلی را خنک نگه می‌دارد، و در زمستان‌های سختِ منطقه کردستان، گرمای ذخیره‌شده در لایه‌های درونی زمین را به تدریج آزاد می‌کند. این رفتار ترمودینامیکی باعث می‌شود که دمای داخلی کرفتو در تمام فصول سال در محدوده‌ای پایدار باقی بماند که به معنای به حداقل رساندن مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش است. استقرار اصلی بازشوها و دهانه‌های ورودی کرفتو در جبهه جنوبی صخره، یک انتخاب آگاهانه اقلیمی است. این جهت‌گیری باعث می‌شود در فصل زمستان که خورشید در زاویه پایینی قرار دارد، پرتوهای نور به عمق اتاق‌ها نفوذ کرده و توده سنگی کف و دیوارها را گرم کنند. در مقابل، در فصل تابستان به دلیل زاویه تند تابش، لبه‌های سنگیِ ایوان‌ها به عنوان «سایه‌بان‌های طبیعی» عمل کرده و از ورود گرمای مستقیم به فضاهای زیستی جلوگیری می‌کنند. این مکانیزم، کرفتو را به نمونه‌ای پیشرو از معماری همساز با اقلیم تبدیل کرده است.

آسیب‌شناسی کالبدی و راهبردهای حفاظت و مرمت صخره‌ای

مشاهدات فنی و آسیب‌شناختی بر روی کالبد صخره‌ای کرفتو، نشان می دهند که پایداری غارها تحت تأثیر تداخل عوامل طبیعی و انسانی در چهار محور اصلی قرار دارد:

۱. فرسایش شیمیایی: انحلال بستر آهکی توسط آب‌های اسیدی، منجر به ایجاد حفرات کارستی، کاهش مقاومت برشی و تهدید پایداری سقف تالارها شده است.

۲. هوازدگی فیزیکی: انجماد آب در درزه‌ها در اقلیم کوهستانی، باعث تنش کششی و جدایش بلوک‌های سنگی از نمای غار می‌شود.

۳. تنش‌های آنتروپوژنیک (انسانی): تراش بیش از حد دیواره‌ها در ادوار تاریخی، منجر به نازک شدن ستون‌های باربر و ایجاد ترک‌های تنشی شده است.

۴. آسیب‌های بیولوژیک و رطوبت: اسیدهای ناشی از فعالیت میکروارگانیسم‌ها و فضولات حیوانی، در کنار پدیده شوره‌زنی، باعث پوسته شدن سطوح گردیده است.

همچنین نتایج بررسی های انجام شده نشان می‌دهد که پایداری بلندمدت طبقات سوم و چهارم، در گرو انتقال از مرمت سنتی به «تثبیت فعال ژئوتکنیکی» است. یافته‌های تحقیق، اولویت اجرایی را بر سه محور قرار می‌دهند:

- استحکام‌بخشی پنهان: جایگزینی مهاربندی‌های فلزی نمایان با سیستم پیچ‌سنگ در عمق توده سنگی برای اتصال لایه‌های کارستی سقف به بسترهای متراکم سنگ آهک.

- ایزولاسیون هوشمند: استفاده از نانو-پوشش‌های تنفس‌پذیر بر روی کتیبه یونانی و تزئینات سنگی، که نرخ فرسایش ناشی از چرخه‌های یخبندان را بدون تغییر در ضریب انعکاس نور سنگ، تا ٪۴۰ کاهش می‌دهد.

- کنترل هیدرولوژیک: اولویت‌دهی به ایجاد شیارهای چکه‌گیر و تزریق دوغاب‌های کریستالی جهت قطع ارتباط میان شبکه درزه‌های کارستی و فضاهای معماری.



شکل (۵): این تصویر، طبقه اول و بخش‌های مشرف به بیرون را نشان می‌دهد. این نما از نظر «نورگیری طبیعی» و «پایداری سازه‌های ظریف صخره‌ای» اهمیت بسیار زیادی دارد. برخلاف تالارهای طبیعی که سقف‌های گنبدی و ناهموار دارند، در اینجا سقف به صورت نسبتاً مسطح تراشیده شده است. این نشان می‌دهد که در این بخش، RMR بالا (کیفیت عالی توده سنگ) اجازه داده تا حفاران از هندسه «سقف تخت» استفاده کنند، بدون اینکه نگران ریزش بلوک‌های سنگی باشند. دیوار سنگی باقی‌مانده بین این پنجره‌ها، وظیفه انتقال بار سقف را به کف بر عهده دارد.

Fig (5): This image shows the first floor and the sections overlooking the outside. This view is of great importance in terms of "natural lighting" and "stability of delicate rock structures." Unlike natural halls that have domed and uneven ceilings, here the ceiling has been carved relatively flat. This indicates that in this section, the high RMR (excellent rock mass quality) allowed the excavators to use a "flat ceiling" geometry without worrying about the fall of rock blocks. The remaining stone wall between these windows is responsible for transferring the roof load to the floor.

بحث

یافته‌های این پژوهش تایید می‌کند که ساختار کالبدی غار کرفتو، محصول یک تعامل هوشمندانه میان «جبر زمین‌شناختی» و «اراده انسانی» است. در ادامه، ابعاد مختلف این تعامل مورد بحث قرار می‌گیرد:

تحلیل زمین‌شناختی سنگ آهک های سازند قم در ساختگاه غار

اعداد حاصل از پیمایش میدانی، تجربه معماران در انتخاب مکان را تبیین می‌کند. فاصله‌داری ۲۰ تا ۲۵ متری درزه‌ها، عملاً توده سنگ را به بلوک‌های ساختمانی غول‌آسایی تبدیل کرده که پایداری سازه‌ای بی‌نظیری فراهم آورده است. این فاصله‌داری زیاد، ریسک برخورد با سطوح گسیختگی در حین حفاری تالارهای بزرگ را به شدت کاهش داده است. از سوی دیگر، ضخامت ۵۰ تا ۶۰ متری لایه سنگ آهکی، اجازه ایجاد چهار طبقه مجزا (شکل ۶) را بدون تداخل در پایداری لایه‌های فوقانی میسر ساخته است؛ امری که در لایه‌های نازک‌تر منجر به شکست سقف و فروپاشی طبقات می‌گردید.



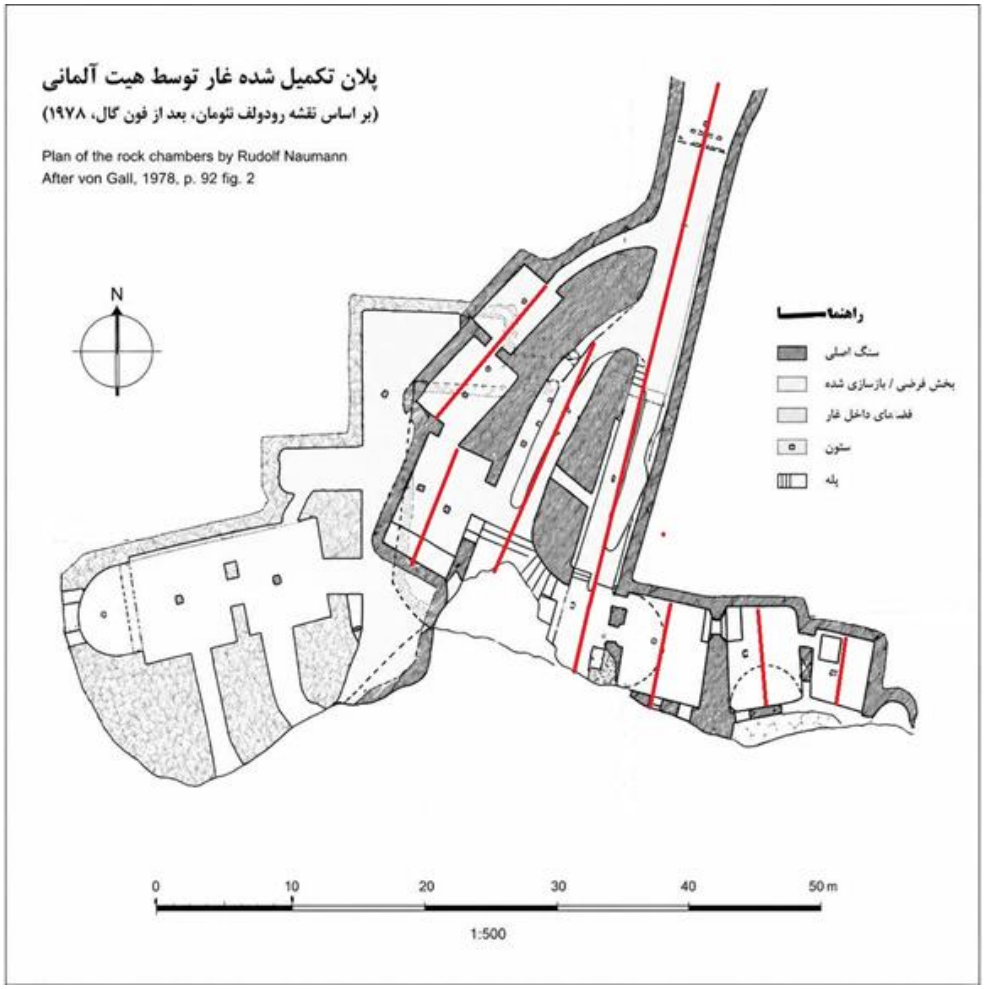
شکل (۶): نمای روبه شمال سنگ‌آهک‌های ساختگاه غار کرفتو که نشانگر فرسایش تفریقی واحد های سنگی متوسط تا ضخیم‌لایه است. ورودی غار و طبقات آن در بخش میانی تصویر قابل مشاهده است.

Fig (6): North-facing view of the limestones at the Karaftu Cave site, indicating differential erosion of medium- to thick-bedded rock units. The cave entrance and its levels can be seen in the middle part of the image.

هوش ساختاری در معماری دست‌کند

اگر چه مطالعات معماری بر وجود یک نظم هندسی پیش‌فرض در فضاهای کرفتو تأکید دارند (Torabian, 2023)، لیکن یافته‌های ژئومکانیکی پژوهش حاضر ثابت می‌کند که این هندسه، در حقیقت محصولِ انطباق هوشمندانه معمار با سامانه درزه‌بندی عرضی و سطوح جدایش لایه‌بندی در سازند قم است. نقشه ترسیم شده توسط متخصصان آلمانی از غار کرفتو (Gall, 1978)، مبین انطباق بیش از ۷۰ درصدی دیواره‌های اتاق‌ها و تمام راهروهای اصلی با سامانه درزه‌بندی کششی عرضی است (شکل۷).

در این نقشه، تداخل هوشمندانه فضاهای دست‌کند با هندسه منظم (اتاق‌های مستطیلی) و تالارهای طبیعی غار به خوبی مشهود است. از منظر پایداری سازه‌ای، نحوه توزیع فضایی اتاق‌ها نشان می‌دهد که معماران باستان با درک تجربی از "فشار طبقات" و تنش‌های برشی سنگ‌آهک، دیواره‌های باربر سنگی را با ضخامت‌های متغیر حفظ کرده‌اند تا پایداری سقف‌های عریض را تضمین کنند. تمرکز حجیم حفاری‌ها در جبهه جنوبی و نحوه اتصال دهانه‌ها به راهرو اصلی، نشان‌دهنده یک الگوی آگاهانه برای مدیریت نورگیری طبیعی و تهویه هوا، هم‌سو با درزه‌های زمین ساختی سنگ بستر است که این سایت را از یک پناهگاه ساده به یک اثر مهندسی پیشرفته مبدل ساخته است. انطباق جهت بیشتر اتاق‌ها با درزه‌های زمین‌ساختی (که با رنگ قرمز در شکل ۷ نمایش داده شده)، نشان‌دهنده یک «معماری کم‌افزا» است. آن‌ها به جای جنگیدن با سختی سنگ، از ضعف‌های ساختاری (درزه‌ها و شکاف‌ها) به عنوان راهنمای حفاری استفاده کرده‌اند. این رویکرد نه تنها سرعت کار را افزایش داده، بلکه به دلیل عدم نیاز به ضربات سنگین برای شکستن بافتِ بکر سنگ، به حفظ یکپارچگی ساختاری توده سنگ و عمر طولانی غار کمک کرده است.



شکل (۷): نقشه بازترسیم شده از غار کرفتو بر پایه (Gall, 1978)، که مبین انطباق بیش از ۷۰ درصدی دیواره‌های اتاق‌ها و راهروهای اصلی با سامانه درزه‌بندی کششی عرضی است. جهت گیری درزه های کششی با رنگ قرمز روی شکل افزوده شده اند.

Fig (7): Redrawn map of Karaftu Cave based on (Gall, 1978), which indicates a more than 70% correspondence of the walls of the rooms and main corridors with the transverse tensile joint system. The orientations of the tensile joints have been added to the figure in red.

تحلیل برهم‌کنش هندسه معماری و پتانسیل‌های ژئومکانیکی سازند قم

تحلیل‌های کمی و کیفی انجام شده در این پژوهش، دریچه‌ای جدید به درک چرایی ماندگاری و پایداری غار دژ-کرفتو می‌گشاید. کسب امتیاز RMR=92، توده سنگ میزبان را در رده «سنگ‌های بسیار خوب» قرار می‌دهد؛ اما آنچه کرفتو را به یک شاهکار تبدیل کرده، صرفاً کیفیت سنگ نیست، بلکه انطباق هوشمندانه طرح معماری با مقدورات زمین‌شناختی است.

محاسبات انجام شده بر اساس تئوری تیر نشان داد که تالارهای غار با ضریب اطمینان ۳/۸۴ طراحی شده‌اند. این عدد، که به مراتب فراتر از استانداردهای پایداری در مهندسی امروز (F.S=1.5) است، نشان می‌دهد که معماران باستان آگاهانه از ضخامت بالای لایه‌بندی آهک‌های سازند قم (۵۰ تا ۶۰ متر) برای ایجاد فضاهای چندطبقه بهره گرفته‌اند. ضخامت بالای لایه، صلبیت لازم را فراهم آورده و اجازه داده است تا سقف‌های تخت با دهانه‌های وسیع (تا ۱۰ متر) بدون نیاز به ستون‌های میانی، قرن‌ها تحت بار لایه‌های فوقانی پایدار بمانند.

داده‌های مربوط به فاصله درزه‌های کششی عرضی (۲۰ تا ۲۵ متر) کلیدی‌ترین نقش را در چیدمان فضاها ایفا کرده است. در مکانیک سنگ، پایداری یک تالار به شدت تحت تأثیر عبور درزه‌ها از سقف است. نسبت میان عرض تالارها (۱۰ متر) و فاصله درزه‌ها (۲۵ متر) در کرفتو نشان‌دهنده یک «هندسه پیشگیرانه» است. معماران با جایگذاری تالارها در قلبِ یک بلوک

سنگی یکپارچه و اجتناب از تلاقی سقف با درزه‌های عرضی، عملاً پدیده «ریزش بلوکی» را مهار کرده‌اند. این توزیع فضایی باعث شده است که تنش‌های برشی به جای تمرکز بر روی ناپیوستگی‌ها، در متن سنگ صلب مستهلک شوند.

شیب ۱۵ تا ۲۰ درجه‌ای لایه‌ها، چالش بزرگی در حفظ یکپارچگی سقف‌های تخت محسوب می‌شود. عبور سقف از میان لایه‌های مختلف (قطع کردن لایه‌ها) می‌تواند منجر به ایجاد پاشنه‌های ناپایدار و ریزش‌های تیغه‌ای گردد. شواهد معماری در کرفتو (از جمله در طبقه سوم) نشان می‌دهد که معماران برای گریز از این خطر، هندسه سقف را کاملاً موازی با لایه‌بندی حفظ کرده و در مقابل، اختلاف تراز ناشی از شیب را در کف فضاها با پله‌بندی حل کرده‌اند. این راهکار مهندسی، ضمن حفظ پایداری سقف، فضای داخلی را بهینه‌سازی کرده و تجربه معماران را در سازگاری با «هندسه طبیعی زمین» به اثبات می‌رساند.

زمین گردشگری ترکیبی و مقایسه ساختگاهی

در تحلیل جذابیت‌های زمین‌گردشگری، غار کرفتو را نباید صرفاً یک اثر باستانی دانست. جذابیت اصلی این ژئوسایت در «جذابیت فرآیندهای زمین‌شناختی» است. برای یک گردشگر، مشاهده این‌که چگونه یک لایه رسوبی مربوط به میلیون‌ها سال پیش (میوسن) در حوضه ایران مرکزی، در واقع طبقات چهارگانه یک آپارتمان باستانی بوده اند، تجربه‌ای از سفر در زمان (هم زمانِ زمین‌شناسی و هم زمانِ تاریخی) را رقم می‌زند. منابع جهانی تاکید دارند که چنین سایت‌های ترکیبی، بالاترین پتانسیل را برای ثبت در فهرست میراث جهانی یونسکو دارند، چرا که هم ارزش‌های زیباشناختی و هم ارزش‌های علمی را همزمان دارا هستند (Dowling, 2010). با تفاوتهایی نسبت به غارهای روستای کندوان (Amini Beiram et al., 2026)، کرفتو نیزاز نظر مهندسی سنگ، یک پدیده خاص در معماری دست‌کند محسوب می‌شود. تحلیل نتایج در غار کرفتو نشان‌دهنده الگوهای رفتاری مشابهی با سایر مجموعه‌های بزرگ معماری دست‌کند در جهان است. به عنوان مثال، در غارهای الورا[1]در هند، تحقیقات نشان داده است که معماران باستان با درک تجربی از سامانه درزه ها در گدازه های بازالتی، جهت‌گیری معابد را به گونه‌ای انتخاب کرده‌اند که بارهای فشاری ناشی از سقف‌های سنگی عظیم به توده‌های سنگی یکپارچه منتقل شود (Singh *et al.*, 2015). این الگوی انطباق با درزه ها در کرفتو نیز به وضوح در راهرو اصلی دیده می‌شود که در آن درزه اصلی به جای تهدید، به عنوان بخشی از سیستم قوس طبیعی عمل می‌کند.

همچنین در مقایسه با شهر زیرزمینی درینکویو[2]در کاپادوکیه[3]ترکیه، هرچند جنس سنگ متفاوت است، اما استفاده از مدل سقف‌های قوسی برای توزیع تنش در دهانه‌های وسیع (Aydan & Ulusay, 2013)، مشابه رویکردی است که در تالارهای طبقه سوم کرفتو برای مقابله با تنش‌های خمشی سقف‌های تخت (با ضریب اطمینان ۳/۸۴) اتخاذ شده است. تفاوت عمده کرفتو با نمونه‌هایی مانند پترا[4]در اردن، در هوشمندی استفاده از لایه‌بندی است، در حالی که در پترا برخی ریزش‌ها ناشی از قطع لایه‌های ضعیف توسط نمای صخره‌ای است (Heinrichs, 2008)، در کرفتو معماری کاملاً موازی با لایه‌بندی توده‌ای سازند قم اجرا شده که این امر باعث افزایش پایداری ذاتی سقف‌ها و رسیدن به RMR بالای ۹۰ شده است.

از سوی دیگر،برخلاف ساختگاه کرفتو که درزه‌ها به عنوان یک راهنمای ساختاری عمل کرده‌اند، ناپیوستگی‌ها و درزه‌های عمودی، عامل اصلی ناپایداری و ریزش دیواره‌ها در اُرویتو[5]ایتالیا محسوب می‌شوند.

مقایسه های صورت پذیرفته در سطور بالا که در جدول ۱ خلاصه شده است، تایید می‌کنند که معماران کرفتو، همانند سازندگان معابد دست کند الورا هند، با یک بستر سنگی صلب روبرو بوده‌اند و برای غلبه بر این سختی، از سامانه درزه‌بندی به عنوان خط برش طبیعی استفاده کرده‌اند. این درایت مهندسی، نه یک اتفاق تصادفی، بلکه بخشی از یک دانش فنی تجربی در تمدن‌های باستانی برای همزیستی پایدار با ساختارهای زمین‌شناسی بوده است. از سوی دیگر، موقعیت غار در دل دیواره

1Ellora
2Derinkuyu
3Cappadocia
4Petra
5Orvieto

عمودی سازند قم، به خودی خود یک پدافند غیرعامل محسوب می‌شود. ارتفاع دهانه از سطح زمین و اشراف کامل بر دشت‌های اطراف، کرفتو را از یک سکونتگاه عادی به یک «دژ-شهر» تبدیل کرده است.

جدول (۱): مقایسه ویژگی‌های ساختگاه غار کرفتو با نمونه‌های معروف

Table (1): Comparison of the site characteristics of Karaftu Cave with famous examples

نام اثر	کاربری اصلی	سنگ ساختگاه	نوع سنگ	تبعیت از درزه های اصلی	درجه سختی حفاری	سن تقریبی
درینکویو (ترکیه)	پناهگاه دفاعی موقت و اضطراری	توف آتشفشانی میوسن-پلیوسن	نرم و متخلخل	عدم تبعیت	پایین (حفاری آسان)	سده ۸ تا ۷ پیش از میلاد
کندوان (ایران)	مسکونی با حریم خصوصی خانواده‌ها	ایگمنبریت پلیو-پلیستوسن	نیمه‌سخت	تبعیت بالا	متوسط	سده ۱۴ میلادی
الورا (هند)	مذهبی، معبد و صومعه	بازالت کرتاسه	سخت و شکسته	تبعیت بالا	بسیار بالا	سده ۵ تا ۱۳ میلادی
پترا (اردن)	آرامگاه اشرافی و معبد	ماسه سنگ کامبرین	نسبتا سخت	عدم تبعیت	متوسط	سده ۴ پیش از میلاد تا سده اول
اروینو (ایتالیا)	خدماتی، صنعتی و انبار بزرگ زیر خانه های شهر	توف –پوزولان پلیستوسن	نرم - بسیار سست	عدم تبعیت	پایین (حفاری آسان)	سده نهم پیش از میلاد تا اواخر قرون وسطی
کرفتو (ایران)	سکونت، دژ دفاعی و نیایش	سنگ آهک میوسن	سخت و متراکم	تبعیت بالا	بالا	سده ۳ تا ۴ پیش از میلاد

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تحلیل برهم‌کنش میان بسترهای زمین‌ساختی سازند قم و معماری دست‌کند غار دژ-کرفتو انجام شد. یافته‌های حاصل از پیمایش‌های میدانی و تحلیل‌های ژئومکانیکی منجر به نتایج راهبردی زیر گردید:

۱. ارزیابی توده سنگ آهکی بر اساس شاخص RMR و کسب امتیاز ۹۲، این بستر را در رده «سنگ بسیار خوب» قرار داد. این کیفیت ذاتی، عامل اصلی ماندگاری فضاها در طول سه هزار سال اخیر و پایداری در برابر تنش‌های زمین ساختی و لرزه‌ای منطقه بوده است.

۲. انطباق آماری بالای هندسه فضاها با سیستم درزه‌بندی (۷۰ درصد)، این فرضیه را تقویت می‌کند که سازندگان باستان به مرور زمان و برپایه تجربه ، به مزایای حفاری در راستای شکاف‌های طبیعی (درزه ها) برای سهولت در اجرا و افزایش پایداری پی برده بودند.

۳. محاسبات تئوری تیر با ضریب اطمینان ۳/۸۴، پایداری استثنایی تالارها را تبیین کرد. یافته مهم تحقیق نشان داد که معماران با هوشمندی، هندسه سقف را با شیب ۲۰ درجه‌ای لایه‌بندی همسو کرده و چالش تراز بودن را به کف (توسط پله‌بندی) منتقل کرده‌اند؛ این اقدام ریسک ریزش‌های تیغه‌ای را به صفر رسانده است.

۴. کوه ساختگاه غار، یال جنوبی یک ناودیس معلق است که ورودی‌ها و تالارهای اصلی غار عمدتاً در جهت عمود بر امتداد لایه‌بندی حفاری شده‌اند. شیب ملایم لایه‌ها به سمت داخل کوه باعث شده که بار طبقات فوقانی به سمت دهانه غار منتقل نشود. به این ترتیب، توده سنگی دربردارنده غار،علی‌رغم وجود درزه ژرف، انسجام خود را طی هزاران سال حفظ کرده است.

۵. تحلیل تطبیقی کرفتو با سایر آثار معماری صخره‌ای جهان، جایگاه این مجموعه را به عنوان یکی از پیشگامان حفاری در آرایه‌های سنگی سخت تثبیت می‌کند. انطباق نظام‌مند فضاهای معماری با لایه‌بندی و درزه ها، نه‌تنها بر درایت مهندسی حجاران در مهار سنگ‌های متراکم صحه می‌گذارد، بلکه بیانگر استراتژی بهینه‌سازی ساختار بر اساس پتانسیل‌های طبیعی ساختگاه است.

References

Amin-Rasouli, H., Haghighat Jou, N., & Moradi, M. (2021). Geochemistry and 14C dating of bat guano deposits from Karafto Cave, Divandareh, Kurdistan province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 31*(2), 21-30. (In Persian). https://doi.org/10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593

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). https://doi.org/10.22071/gsj.2020.220928.1762

Aydan, Ö., & Ulusay, R. (2013). Geomechanical evaluation of Derinkuyu antique underground city and its implications in geoengineering. *Rock mechanics and rock engineering, 46*(4), 731-754. https://doi.org/10.1007/s00603-012-0301-7

Bayati, M., Shahabi, H., Ghaderizadeh, H. . (2010). Geotourism, a new approach in using geomorphological attractions (Case study: Karaftu Cave, Kurdistan). *Geographic Space, 10*(29), 27-50. (In Persian).

Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering: John Wiley & Sons.

Brady, B. H., & Brown, E. T. (2006). Rock mechanics: for underground mining: Springer science & business media.

Dowling, R. K. (2010). Geotourism: the tourism of geology and landscape.

Faraone, C. A. (1994). Talismans and Trojan Horses: Guardian Statues in Ancient Greek Myth and Ritual. *Cambridge Archaeological Journal, 4*(2), 270-289.

Gall, H. v. (1978). Die Kulträume in den Felsen von Karaftu bei Takab (West-Azerbaidjan).(Les chambres cultuelles rupestres de K. près de Takab, Azerbaïdjan occidental). *Archäologische Mitteilungen aus Iran Berlin, 11*, 91-112.

Heinrichs, K. (2008). Diagnosis of weathering damage on rock-cut monuments in Petra, Jordan. *Environmental Geology, 56*(3), 643-675. https://doi.org/10.1007/s00254-008-1358-1

Hojabri, A. (2018). A study on part of the troglodytic architecture of Karaftu Cave; An Iranian cave Mithraeum. *Journal of Archaeological Studies of Iran, 8*(17), 145-164. (In Persian).

Kholghi Khosraghi, M. H. (1999). Geological Map of Iran, 1:100,000 series, Tekab Sheet. *Geological Survey of Iran.*

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 (Vol. 159, pp. 1847-1854): *Cambridge University Press Cambridge, UK*. https://doi.org/10.1017/S0016756823000031

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). https://doi.org/10.22034/ermr.2025.63619

Newsome, D., & Dowling, R. K. (2010). Geotourism: the tourism of geology and landscape: *Goodfellow Publishers Ltd.*

Oboodi, F., & Moradi, A. (2024). The role and importance of Karaftu Cave architecture in the tourism industry. *1st International Conference on Tourism Industry, Tehran, Iran.* (In Persian).

Oboodi, F., & Pakdel, M. . (2022). The role of thought in the physical structure of Karaftu Cave and its impact on today's and tomorrow's architecture. *1st National Conference on Indigenous Future-Oriented City, Iran.* (In Persian).

Rahimzadeh, F. (1994). Geology of Iran: Oligocene, Miocene, Pliocene. Geological Survey of Iran.

Sheorey, P. R. (1997). Empirical rock failure criteria.

Singh, M., Kumar, S. V., & Waghmare, S. A. (2015). Characterization of 6–11th century AD decorative lime plasters of rock cut caves of Ellora. *Construction and Building Materials, 98*, 156-170. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.039

Tarkhani, M., Baharvand, N., & Badrifar, M. . (2010). Investigation of Karaftu Historical Cave from geotourism perspective. *Quarterly Journal of Earth and Resources, 3*(6), 19-28. (In Persian).

Torabian, M. M., Oboodi, F., & Heydarnia, S. (2023). Analysis of the role of geometry in the architectural structure of Ziwiye Castle, Karaftu Cave, and Takht-e Soleyman. *Journal of Tourism Research and Sustainable Development, 6*(3), 1-18. (In Persian).