



Journal of Structural Geology and Applied Tectonics (SGAT)

Journal homepage: <https://sgat.journals.pnu.ac.ir/>



Defining the Geo-Integrated Architecture Model Based on the Geometric Analysis of Conjugate Joints in Volcanic Ignimbrites of Kandovan Village, NW Iran

Artin Arian¹ | Mehran Arian^{*2} | Mehrdad Sarhangi²

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

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

Keywords

Earth-integrated Architecture, Geomorphology, Geotourism, Kandovan, Tectonic Sahand Volcano

Extended Abstract

Introduction

The interaction between geological substrata and architectural forms in rock-cut settlements is a fundamental subject in interdisciplinary studies of architecture and Earth sciences. Among the global examples of troglodyte architecture, the village of Kandovan, situated on the slopes of the Sahand volcanic massif in Iran, represents a unique paradigm where architecture is not an imposed element but an emergent feature of the landscape. The primary problem addressed in this research is the lack of a quantitative and qualitative framework that explains how tectonic jointing and lithological properties of ignimbrites have dictated the architectural spatial organization. Most previous studies have focused on the historical or descriptive aspects of Kandovan, neglecting the causal relationship between geomorphological processes and human habitation patterns. This study aims to bridge this gap by introducing the Earth-integrated Architecture model, analyzing how indigenous intelligence adapted to the strategic weaknesses, specifically joints and fractures of the Earth, to create a sustainable, zero-carbon living environment. The theoretical core of this research is based on vernacular sustainability and geomorphological determinism. In rock-cut architecture, the site is not just a platform for construction but the material of construction itself. The concept of Earth-integrated Architecture, proposed in this study, refers to a design logic where the human carver follows the natural pre-existing fractures. Literature on ignimbrite formations suggests that their cooling history creates specific jointing patterns, known as conjugate joints, that define the potential for excavation. This research integrates these geological theories with the principles of sustainable development, focusing on how thermal mass and lithic properties contribute to passive climate control.

Receive: 2026-04-22

Accepted: 2026-07-11

Published: 2026-08-23

*Corresponding Author: Mehran Arian; E-mail: mehranarian@iau.ac.ir

How to cite this article: Arian, A., Arian, M., & Sarhangi, M. (2026). Defining the Geo-Integrated Architecture Model Based on the Analysis of Conjugate Joints in Volcanic Ignimbrites of Kandovan Village, NW Iran. *Structural Geology and Applied Tectonics*, 1(1): 22-38. DOI:[10.30473/SGAT.2026.77811.1001](https://doi.org/10.30473/SGAT.2026.77811.1001)



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/>).

Methodology

This research employs a descriptive-analytical method with a qualitative-exploratory approach. The data collection was conducted through geological mapping and lithological analysis, investigating the mineralogical composition and porosity of the Sahand ignimbrites; structural field surveys, involving systematic measurement of the orientations, dip, and spacing of conjugate joints within the Karan cone formations; architectural documentation, mapping the internal spatial hierarchy of selected cones and correlating them with the external geological fractures; and analytical modeling, comparing the true spacing of joints, which ranges between 18 and 25 meters, with the horizontal and vertical dimensions of the living units to identify the mathematical correlation between geology and architecture.

Results

The findings are categorized into three major domains. The first domain concerns structural geomorphology and spatial logic. The results indicate that the formation of the cones, which are locally called Karans and reach heights of up to 40 meters, is a direct consequence of differential erosion acting upon a specific jointing system. The conjugate joints, which were formed by the cooling of pyroclastic flows and tectonic pressures, provided the initial paths for human excavation. The analysis shows that the carvers specifically utilized the intersection of these joints to create stable, multi-story chambers. The verticality of the dwellings is not an aesthetic choice but rather a geometric necessity imposed by the 70 to 80-degree dip of the primary fractures.

The second domain relates to lithic properties and sustainability. The ignimbrite layers exhibit a unique dual hardness property: the interior remains relatively soft and easy to carve, while the exterior surface undergoes case-hardening upon exposure to the atmosphere, forming a protective crust against erosion. Furthermore, the high porosity and exceptional thermal mass of the stone create a passive solar system. Our measurements confirm a temperature differential of approximately 15 degrees Celsius between the interior and exterior during peak winter and summer, eliminating the need for fossil-fuel-based heating or cooling. This represents a perfect example of a zero-carbon architectural model.

The third domain addresses geo-cultural heritage and tourism. The study reveals that Kandovan's value as a geopark lies in its living nature. Unlike the Cappadocia region in Turkey, which is largely a museum site, Kandovan maintains an active social life within its geological shells. This synergy between geo-heritage, which refers to the cones themselves, and intangible heritage, which refers to the traditional carving techniques, forms a geo-cultural landscape that serves as the primary driver for sustainable tourism.

Discussion

The synthesis of geological data and architectural mapping leads to the formulation of the Earth-integrated Architecture model. This paradigm shifts the perspective from seeing the earth as a passive substrate to an active architectural agent. The discussion focuses on three critical dimensions.

First, the research demonstrates a high degree of correlation between the conjugate joint systems and the internal spatial layout of the Karans. The human carver in Kandovan did not work against the rock but utilized the pre-defined planes of weakness, specifically 325/70 and 145/75, as natural guidelines. This interaction represents a sophisticated form of structural intelligence, where the energy expended for excavation was minimized by following the tectonic fractures. This Earth-integrated approach suggests that the architecture is an extension of the rock's own geometry, where the domestic space is literally a hollowed-out expression of geological stress.

Second, the discussion further evaluates the zero-carbon performance of these dwellings. The high porosity of the Sahand ignimbrites acts as a natural insulator. However, the study reveals that it is the thermal mass, meaning the high heat capacity of the massive rock walls, that creates a phase-shift in heat transfer. During summer, the rock absorbs solar radiation, keeping the interior cool, while in winter, it slowly releases stored heat. This passive climate adaptation is a critical discussion point for modern sustainable urbanism, suggesting that high-mass construction in specific climates can reduce energy dependency by up to 80 percent compared to modern concrete structures.

Third, unlike other UNESCO sites that have become museumified, meaning they are depopulated and preserved only as physical objects, Kandovan represents a living landscape. The discussion argues that the preservation of the rock is inseparable from the preservation of the traditional carving knowledge. This synergy creates a geo-cultural identity, where the community's social structure is mirrored in the physical clustering of

the cones. The Earth-integrated logic thus extends from the physical carving to the social organization of the village.

Conclusions

The study concludes that the architectural morphology of Kandovan is a brilliant manifestation of geomorphological adaptation. The primary findings confirm that the lithological integrity of the ignimbrites, specifically the case-hardening effect, is the primary reason for the thousand-year stability of these structures. Additionally, the tectonic grid, represented by the joint systems, provided the architectural blueprint that defined the orientation, lighting, and ventilation of the Karans. Furthermore, the passive thermal performance of the site exceeds modern sustainability standards, offering a zero-emission housing prototype.

Regarding strategic implications for future management, to ensure the long-term sustainability of this site, the research proposes a transition from conventional tourism to integrative geotourism. This strategy includes geotechnical monitoring, which involves continuous tracking of fracture propagation in the primary conjugate joints to prevent structural failure due to freeze-thaw cycles; carrying capacity management, which focuses on limiting the number of visitors to prevent the micro-climatic alteration of the interior spaces that can lead to moisture buildup and rock decay; and the geo-park paradigm, which involves re-branding Kandovan as a living laboratory for sustainable architecture to attract educational and scientific tourism rather than purely recreational visits.

Ultimately, Kandovan is not merely a relic of a primitive past; it is a sophisticated geo-technical achievement. By adopting the Earth-integrated philosophy, contemporary architecture can move toward a more harmonious relationship with the Earth's crust, treating the site's geology not as an obstacle but as the primary source of design intelligence.



تبیین مدل معماری زمین‌پیرو بر پایه تحلیل هندسه درزه‌های مزدوج در ایگنمبریت‌های آتشفشانی روستای کندوان، شمال غربی ایران

آرتین آرین^۱، مهران آرین^{۲*}، 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.

چکیده

روستای صخره‌ای کندوان یکی از بارزترین نمونه‌های همزیستی انسان و طبیعت است که کالبد آن تحت تأثیر مستقیم فرآیندهای زمین‌شناختی شکل گرفته است. هدف این پژوهش، واکاوی رابطه متقابل میان ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی ساختمانی بستر و الگوهای معماری دست‌کند در راستای تدوین راهبردهای توسعه زمین‌گردشگری پایدار است. این تحقیق با روش توصیفی-تحلیلی و رویکردی کیفی انجام شده است. داده‌ها از طریق مطالعات کتابخانه‌ای، تحلیل نقشه‌های زمین‌شناسی و پیمایش‌های میدانی و بررسی سیستم درزه‌ها و ویژگی‌های لیتولوژیکی ایگنمبریت، گردآوری و با الگوهای معماری مخروط‌های سنگی تطبیق داده شدند. همچنین از تحلیل‌های هندسی برای تبیین رابطه میان ضخامت لایه‌های زمین‌شناسی و ابعاد کالبدی مخروط‌ها استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که معماری کندوان مصداق عینی یک معماری زمین‌پیرو است. سیستم درزه‌های مزدوج ناشی از فشار وزن لایه‌های رویی و سرد شدن سنگ‌های آذرآواری سهند، جهت‌گیری ورودی‌ها و سهولت حفاری را تعیین کرده و فرم مخروطی ناشی از فرسایش تفریقی سلسله‌مراتب عملکردی فضا از بخش دامداری تا سکونت را تعیین نموده است. همچنین، ویژگی‌های فیزیکی ایگنمبریت از قبیل تخلخل و اینرسی حرارتی، منجر به ایجاد آسایش اقلیمی غیرفعال با اختلاف قابل توجهی نسبت به محیط بیرون و تحقق الگوی معماری صفرکربن شده است. برخلاف بسیاری از نمونه‌های مشابه جهانی، زنده بودن زیست‌بوم کندوان، ارزش زمین‌گردشگری آن را از یک میراث کالبدی به یک میراث زمین‌فرهنگی، ارتقا داده است. پایداری این منطقه در گرو مدیریت ژئوتکنیکی برای کنترل فرسایش و حفاظت همزمان از فرآیندهای زمین‌شناختی و الگوهای معماری بومی به عنوان یک منظره فرهنگی واحد است.

کلیدواژه‌ها

زمین ریخت‌شناسی ساختمانی،
معماری دست‌کند،
زمین‌گردشگری،
کندوان،
آتشفشان سهند

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۱

ارجاع به این مقاله: آرین، آ؛ آرین، م؛ سرهنگی، م. (۱۴۰۵). تبیین مدل معماری زمین‌پیرو بر پایه تحلیل هندسه درزه‌های مزدوج در ایگنمبریت‌های آتشفشانی روستای کندوان، شمال غربی ایران. زمین‌شناسی ساختمانی و زمین‌ساخت کاربردی، ۱(۱): ۲۲-۳۸.

*نویسنده مسئول: مهران آرین
رایانامه:
mehranarian@iau.ac.ir

شناسه دیجیتال مقاله: 10.30473/SGAT.2026.77811.1001



مقدمه

تعامل میان بستر طبیعی و ساختار مصنوعی، همواره یکی از چالش‌برانگیزترین مباحث در نظریات معماری و شهرسازی بوده است. در اکثر سکونتگاه‌های بشری، معماری به‌عنوان عنصری تحمیلی بر ریخت زمین شناخته می‌شود که با تغییر در چهره زمین، فضا را تصرف می‌کند؛ رابطه‌ای که از منظر مکانیک سنگ نیز همواره مستلزم غلبه بر مقاومت ذاتی توده سنگی بوده است. اما در نقاطی محدود، این رابطه از حالت تقابل به نوعی همزیستی مطلق یا درهم‌تنیدگی کالبدی بدل می‌شود. روستای تاریخی کندوان در ۶۲ کیلومتری تبریز و در دامنه باختری آتشفشان سهند، تجلی‌گاهی از این هم‌سویی است که در آن، اراده زیستی انسان نه با تخریب، بلکه با بازشناسی و بهره‌برداری از نیروهای درونی زمین، فضای زیستی خود را شکل داده است (Asghari Kaljahi et al, 2014). مسئله اصلی در اینجا، درک مکانیسم تبدیل یک پدیده زمین‌شناختی به یک سازه‌ی معماری و شناسایی عوامل تعیین‌کننده در این تبدیل است.

خاستگاه زمین‌شناختی این پدیده به فعالیت‌های آتشفشانی کوه سهند و رسوب‌گذاری لایه‌های آذرآواری بازمی‌گردد، فرآیندی که طی هزاران سال و در اثر فرسایش تفریقی و هوازدگی توده‌های پیروکلاستیک، به شکل‌گیری مخروط‌های سنگی موسوم به «کران» انجامیده است. با توجه به تخریب تدریجی کالبد روستاهای دست‌کنده در اثر عوامل محیطی و فشار گردشگری، شناخت دقیق رابطه میان ساختار سخت زمین‌شناختی و معماری بومی، برای حفاظت از این میراث ضروری است (Masoud & Beygzade, 2012).

کندوان در زمره معدود نمونه‌های جهانی معماری دست‌کند قرار می‌گیرد که همتایان آن را می‌توان در کاپادوکیه ترکیه (Aydan & Ulusay, 2003) و منطقه ماتماتای تونس (Bachouch, 2025) نیز مشاهده کرد؛ سایت‌هایی که بسیاری از آن‌ها امروزه در فهرست میراث دست‌کند جهانی شناسایی و ثبت شده‌اند (UNESCO, 1995). در داخل ایران نیز، مطالعات تطبیقی، کندوان را در کنار روستای میمند کرمان و نمونه‌های مشابهی چون مسا وردی در کلرادو (Ataei Hamedani et al., 2014) و در چارچوب تحلیل پیکربندی فضایی معماری دست‌کند ایرانی با روش نحو فضا بررسی کرده‌اند. با این حال، برخلاف نمونه‌هایی چون کاپادوکیه که عمدتاً به موزه‌های فضای باز تبدیل شده‌اند (Aydan & Ulusay, 2003)، کندوان به دلیل دارا بودن «حیات اجتماعی جاری»، پتانسیل منحصربه‌فردی برای مطالعه هم‌زمان میراث ملموس زمین‌شناختی و میراث ناملموس فرهنگی دارد (Gorji Mahlabani, 2010; Karami, 2008). بنابراین، تدوین راهبردهای توسعه زمین‌گردشگری پایدار (Newsome & Dowling, 2010) نیازمند درکی عمیق از این پیوند است تا بتوان توازن میان بهره‌برداری گردشگری و حفظ اصالت کالبدی روستا را برقرار کرد (Dowling, 2010).

پیشینه پژوهشی موجود درباره کندوان را می‌توان در دو دسته کلی جای داد: نخست، مطالعاتی با محوریت توصیف تاریخی و مورفولوژیک بافت روستا (Mojtahedzadeh, 1974; Asadi, 2008)، و دوم، پژوهش‌هایی با رویکرد تحلیل معماری بومی و سازگاری اقلیمی کران‌ها، از جمله بررسی هماهنگی اقلیمی سازه‌ها (Ghobadiyan, 2006)، انطباق الگوهای معماری با منظر شهری طبیعی، و ارزیابی بافت تاریخی از منظر معماری سبز (Ebrahimi & Sattarzadeh, 2013). در کنار این دو رویکرد، مطالعاتی نیز به عوامل مداخله‌گر در شکل‌گیری معماری صخره‌ای در مقیاس روستایی (Pourmohammadi & Nasrollahzadeh, 2014) و ویژگی‌های کالبدی سکونتگاه‌های صخره‌ای (Karami & Sharifi, 2014) پرداخته‌اند.

پژوهش حاضر با هدف واکاوی رابطه علی میان ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناختی منطقه و الگوهای معماری بومی شکل گرفته است. این مقاله می‌کوشد تا پاسخ دهد که چگونه پارامترهای زمین‌شناختی و ساختاری، به‌عنوان مؤلفه‌های تعیین‌کننده در سازمان‌دهی فضا و شکل‌گیری الگوهای معماری دست‌کنده عمل کرده‌اند.

نوآوری این پژوهش در اتخاذ یک رویکرد بین‌رشته‌ای است که در آن، تحلیل‌های کمی زمین‌شناسی ساختاری را با تحلیل‌های کیفی معماری بومی پیوند می‌زند. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر توصیف مورفولوژیک یا تحلیل‌های معماری

متمرکز بوده‌اند (Sharif Khajehpasha, 2024)، این تحقیق تلاش می‌کند با استخراج داده‌های عددی از ساختار زمین، منطق شکل‌گیری فضا در دل زمین را تبیین نماید و پلی میان سنگ و سرا ایجاد کند.

زمین‌شناسی و ریخت‌شناسی منطقه

کوه سهند یکی از عظیم‌ترین و پیچیده‌ترین مجموعه‌های آتشفشانی ایران است که از نظر ساختاری در دسته آتشفشان‌های مرکب قرار می‌گیرد. این توده عظیم، حاصل فوران‌های متوالی و گسترده‌ای است که در طول میلیون‌ها سال، لایه‌های متفاوتی از مواد آتشفشانی را بر روی یکدیگر انباشته کرده و شکل فعلی خود را ساخته است.

از منظر زمان شناختی، ریشه‌های اصلی فعالیت‌های آتشفشانی سهند به دوره زمین‌شناسی ترشیری بازمی‌گردد، دورانی که شاهد شکل‌گیری توده‌های اصلی این کوهستان بود. با این حال، شواهد زمین‌شناختی نشان می‌دهد که این آتشفشان تا هولوسن نیز فعالیت‌های پراکنده و متأخری را تجربه کرده است (Chaharlang et al., 2015). در حال حاضر، سهند در وضعیت خاموش قرار دارد، اما اثرات باشکوه فعالیت‌های پیشین آن همچنان در چشم‌انداز منطقه قابل مشاهده است.

یکی از شگفت‌انگیزترین پیامدهای زمین‌شناختی فعالیت‌های سهند، پیدایش صخره‌های مخروطی در منطقه کندوان است. این پدیده در نتیجه یک فرآیند پیچیده از فوران‌های آتشفشانی، رسوب‌گذاری و فرسایش به ترتیب ذیل است:

۱. انباشت مواد: در جریان فوران‌ها، توده‌های عظیمی از توف و لاهار در دامنه سهند تجمع یافتند.
 ۲. فرسایش تفریقی: طی هزاران سال، عوامل محیطی نظیر باد و بارش‌های شدید، بر روی این مواد آتشفشانی اثر گذاشتند. به دلیل نرم‌تر بودن توف و لاهار در مقایسه با برخی لایه‌های سخت‌تر، فرسایش در نقاط مختلف با سرعت متفاوتی رخ داد.
 ۳. تکوین شکل کله‌قندی: این فرسایش تدریجی با تبعیت از شکستگی‌ها، منجر به تراشیده شدن توده‌ها و تبدیل آن‌ها به فرم‌های مخروطی یا کله‌قندی شد که امروزه به عنوان شناسنامه بصری و زمین‌شناختی منطقه کندوان شناخته می‌شوند.
- این ویژگی‌های طبیعی، نه تنها ارزش علمی-زمین‌شناختی بالایی دارند، بلکه بستری منحصر به فرد را برای ایجاد سکونتگاه‌های انسانی مانند خانه‌های صخره‌ای کندوان فراهم آورده‌اند.

سنگ‌های سازنده این منطقه از نوع ایگنمبریت هستند که به دلیل وجود مقدار زیاد پلاژیوکلاز، قطعات پامیس با مقاومت کم و تخلخل زیاد، مقاومت ضعیفی در برابر هوازگی دارند (Amini Beiram et al., 2015). این ویژگی‌ها منجر به ایجاد حفرات بزرگ حاصل از هوازگی لانه‌زنبوری شده است که در ابتدا پناهگاهی برای ساکنان پس از هجوم مغولان فراهم آورد و بعدها به دلیل قابلیت حفاری آسان، به بستری برای معماری دست‌کنده در قالب دو تا چهار طبقه تبدیل گردید (Hajirasouli, 2015; Yazhari Kermani & Amini Goharrizi, 2022).

روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر ماهیت در زمره تحقیقات توصیفی-تحلیلی قرار داشته و با اتخاذ رویکردی کیفی-اکتشافی، به واکاوی رابطه متقابل میان ساختار زمین‌شناختی و فرم‌های معماری بومی می‌پردازد. در این راستا، فرآیند تحقیق بر پایه یک مدل سه‌مرحله‌ای سازمان‌دهی شده است تا بتوان از طریق تحلیل متغیرهای زمین‌ریخت‌شناختی به عنوان متغیر مستقل، الگوهای کالبدی و معماری را به عنوان متغیر وابسته تبیین نمود و در نهایت به مدل مفهومی معماری زمین‌پیرو دست یافت.

برای دستیابی به داده‌های جامع، استراتژی جمع‌آوری اطلاعات در دو سطح اسنادی و میدانی اجرا گردید. بدین ترتیب، در گام نخست، با تحلیل نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ و نقشه‌های توپوگرافی، چارچوب کلی زمین‌ریخت‌شناسی منطقه ترسیم شد. سپس در پیمایش‌های میدانی، نحوه تعامل معمار بومی با شیب زمین، سامانه درزه‌ها و ویژگی‌های لیتولوژیکی سنگ‌ها ثبت گردید. شایان ذکر است که به دلیل فرسایش شدید در سطح توده‌های آتشفشانی و عدم امکان

اندازه‌گیری مستقیم فاصله‌داری درزه‌ها در میدان، برای استخراج پارامترهای ساختاری، از روش مدل‌سازی هندسی و روابط مثلثاتی استفاده شد تا دقت تحلیل‌های کمی در بازسازی ابعاد درزه‌ها و شناسایی هندسه واقعی توده‌ها تضمین گردد. در ادامه، به منظور تبیین دقیق رابطه میان زمین‌شناسی و معماری، ابزارهای تحلیلی متعددی به کار گرفته شد که در رأس آن‌ها، تحلیل لیتولوژیکی برای ارزیابی میزان قابلیت تراش‌خوری و پایداری سازه‌ای سنگ‌های ایگنمبریت قرار داشت. همزمان، از طریق تحلیل کالبدی-معماری و انطباق پلان‌های داخلی واحدها با فرم مخروطی صخره‌ها، چگونگی تبعیت فرم-فضا از فرم-زمین مورد بررسی قرار گرفت و در کنار آن، با بهره‌گیری از مدل‌های تحلیل بصری، ظرفیت‌های زمین‌گردشگری و جذابیت ریخت‌شناختی منطقه سنجیده شد.

در مرحله نهایی، با تطبیق ویژگی‌های زمین‌شناختی استخراج شده با الگوهای معماری، نقش درزه‌ها به عنوان خطوط راهنمای حفاری و لایه‌های آذرآواری در تعریف ترازهای سکونت‌مورد تحلیل قرار گرفت. در این رویکرد، برخلاف معماری متعارف که بر اساس افزودن مصالح شکل می‌گیرد، سازه‌های کندوان به عنوان نمونه‌ای از معماری کاهش‌مورد بررسی قرار گرفتند. جایی که ضخامت دیواره‌های سنگی، جرم حرارتی استثنایی ایجاد کرده و جهت‌گیری کران‌ها، جذب انرژی خورشیدی غیرفعال را تعیین می‌کند. در نهایت، سازمان‌دهی فضایی داخلی این واحدها، از بخش‌های مسکونی تا آخورها، به عنوان داده‌های پایه برای ارزیابی پایداری و منطق اجتماعی-فضایی روستا (شکل ۱) مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل (۱): نمای کلی روستای کندوان، دید به سمت شمال باختری.

Fig (1): A general view of Kandovan village, with a view toward the northwest

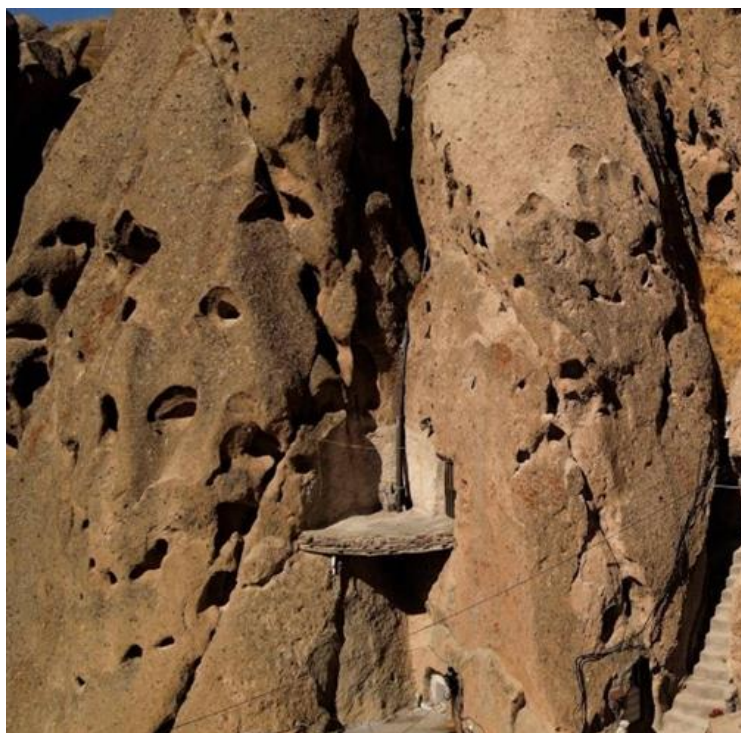
یافته‌های پژوهش

تحلیل‌های انجام شده بر روی بافت روستای کندوان نشان‌دهنده یک هندسه پنهان است که از ویژگی‌های زمین ریخت‌شناسی ساختمانی بستر تبعیت می‌کند. یافته‌ها در سه سطح زیر دسته‌بندی می‌شوند:

بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که شکل‌گیری اولیه مخروط‌ها (کران‌ها) تابع درزه‌های مزدوج (شکل ۲) حاصل از فشار وزن لایه‌های گدازه‌های جوانتر و واحدهای رسوبی و فرسایش پس از آن است. معمار بومی با ذکاوتی تجربی، این درزه‌ها را به عنوان نقاط ضعف استراتژیک شناسایی کرده است.

اکثر حفاری‌ها و ورودی‌های اصلی بناها در راستای همین درزه‌های طبیعی ایجاد شده‌اند. این کار نه تنها سرعت حفاری را افزایش داده، بلکه باعث شده است که تقسیم‌بندی فضاهای داخلی مثل اتاق‌ها و پستوها، به صورت ارگانیک با هندسه طبیعی سنگ هماهنگ شود (شکل ۳).

سنگ‌های منطقه کندوان از نوع ایگنمبریتی هستند. ایگنمبریت حاصل از نشست و سخت شدن جریان‌های غلیظ آذرآواری است. زمانی که آتشفشان کوه سهند فوران می‌کرده، ابری از خاکستر داغ، گازها و تکه‌های سنگ با سرعت بسیار زیاد به پایین سرازیر می‌شده و پس از اینکه مواد ته‌نشین و سرد شدند، ایگنمبریت شکل می‌گیرد. اما ایگنمبریت‌های منطقه کندوان از نوع جوش‌خورده هستند. یعنی به دلیل حرارت بسیار بالا در زمان رسوب‌گذاری، ذرات خاکستر و پوکه به هم جوش خورده‌اند (شکل ۴).



شکل (۲): نمایی از سطوح درزه‌های مزدوج با موقعیت ۳۲۵/۷۰ و ۱۴۵/۷۵ با استفاده از قانون دست راست.

Fig (2): A view of conjugate joint surfaces with orientations of 70/325 and 75/145 using the right-hand rule



شکل (۳): نمایی از تاقچه و فضای داخلی کران (مخروط‌های سنگی پیروکلاستیک روستای کندوان)

Fig (3): A view of the ledge and interior space of the Keran (the pyroclastic rock cones of Kandovan village)

این ویژگی باعث شده که سنگ، به قدری نرم باشد که با ابزارهای ساده دستی قابل تراشیدن باشد و همچنین آنقدر مستحکم باشد که پس از تراشیده شدن، بدون نیاز به ستون یا مصالح دیگر، قرن‌ها پایداری خود را حفظ کند.

در یک لایه‌ی ضخیم ایگنمبریت، معمولاً بخش میانی و زیرین به سه دلیل داغ‌تر بوده است:

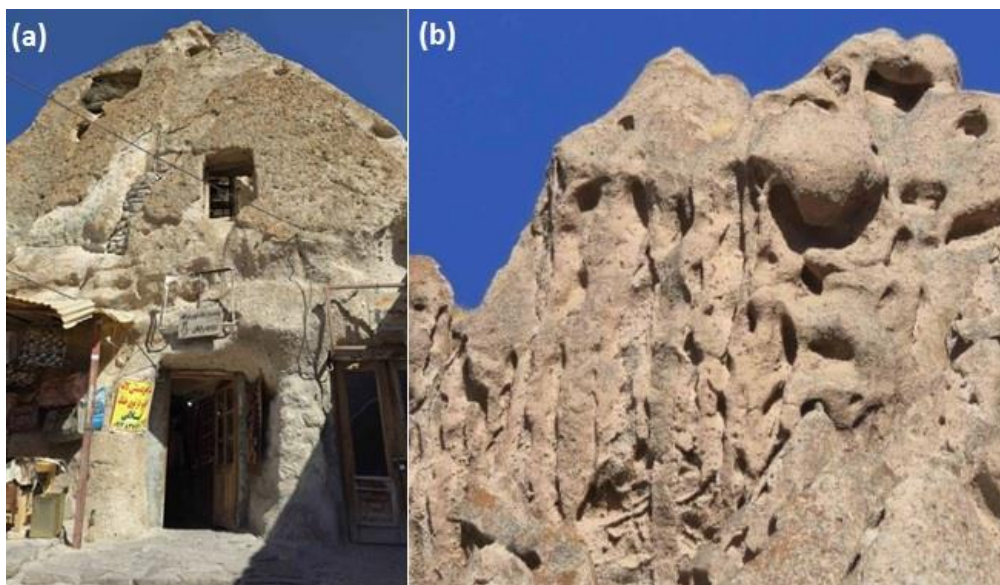
۱. اثر عایق: وقتی جریان آذرآواری شامل توده عظیم خاکستر و گاز داغ، رسوب می‌کند، بخش‌های بالایی در تماس با هوا و اتمسفر هستند و به سرعت حرارت خود را از دست می‌دهند. اما بخش‌های زیرین توسط لایه‌های بالایی پوشانده شده و حرارت در آن‌ها محبوس می‌ماند.
۲. فشار لایه‌های بالایی: در بخش‌های زیرین، وزن عظیم لایه‌های بالایی باعث می‌شود که ذرات خاکستر داغ تحت فشار به هم فشرده شوند. این ترکیب حرارت بالا و فشار زیاد باعث می‌شود ذرات کاملاً به هم جوش بخورند.
۳. سرمایش سریع در بالا: بخش بالایی ایگنمبریت به این علت که سریع سرد شده و فرصت جوش خوردن کامل را نداشته معمولاً دارای بافتی متخلخل و شکننده‌تر است، در حالی که بخش زیرین و میانی متراکم، سخت و برای معماری دست‌کند مناسب‌تر است. این قاعده، توسط بررسی‌های پتروگرافی ایگنمبریت‌ها تایید شده است (Amini Beiram et al., 2015).



شکل (۴): (a) نمای دور و (b) نمای نزدیک از ایگنمبریت‌های کندوان.
Fig (4): (a) Distant view and (b) close-up view of the ignimbrites of Kandovan village

بر همین پایه در کران‌های کندوان، این پدیده به وضوح دیده می‌شود که:

- بخش‌های پایین کران‌ها (طبقات همکف و اول) که در لایه‌های زیرین و داغ‌تر ایگنمبریت تراشیده شده‌اند، معمولاً تراکم و استحکام سازه‌ای بیشتری دارند (شکل ۵ a).
- هرچه به سمت نوک مخروط می‌رویم، سنگ‌ها تمایل بیشتری به فرسایش داشته باشند (شکل ۵ b).



شکل (۵): (a) نمای دور از تفاوت بخش‌های پایین و بالای یک کران و (b) نمای نزدیک از نحوه فرسایش بخش بالایی یک کران
 Fig (5): (a) Distant view of the difference between the lower and upper parts of a Keran (pyroclastic cone), and (b) close-up view of the erosion pattern on the upper part of a Keran

پس از فوران‌های آتشفشان سهند و ایجاد لاهار، ایگنمبریت ضمن سرد شدن، به تدریج زیر واحدهای جوانتر و گدازه دفن می‌شود (شکل ۶)، هنگامی که ضخامت رولایه آن به بیش از ۵۰ متر برسد (Ghalamghash *et al.*, 2019)، برای رها کردن انرژی خود می‌شکند. از آنجا که ایگنمبریت‌ها، متراکم و کم‌شیب هستند، وزن رولایه به طور یکنواخت پخش می‌شود و شکستگی‌ها به صورت درزه‌های مزدوج (شکل ۲) ظاهر می‌شوند. تلاقی این دو دسته درزه با هم، شبکه‌ای ضربدری ایجاد می‌کند که سنگ را به بلوک‌های هرمی شکل تقسیم می‌کند لیکن به دلایل ذیل، هندسه آن تغییراتی می‌کند:



شکل (۶): تصاویر گرافیکی و بازسازی مراحل تکامل زمین‌شناسی مخروط‌های ایگنمبریتی

Fig (6): Graphic illustrations and reconstruction of the geological evolution stages of the ignimbritic cones of Kandovan

- ۱- بافت سنگ: ایگنمبریت کندوان حاوی مقدار زیادی پومیس و خاکستر است که خاصیت الاستیک بیشتری نسبت به گدازه خالص دارد، لذا درزه‌های آن به راحتی گود شده و عریض می‌شوند.
- ۲- اقلیم: اقلیم ویژه و فرسایش شدید توسط باد و باران بر ساختار درزه‌ها غلبه کرده و لبه‌های تیز هندسی را گرد کرده است (Amini Beiram et al., 2015) (شکل ۷).



شکل (۷): فرسایش مخروطی در روستای کندوان

Fig (7): Cone-shaped differential erosion in Kandovan village

به بیان دقیق‌تر باید تاکید شود که تشکیل این درزه‌ها، حاصل از وزن لایه‌های رویی است. این درزه‌ها پس از سرد شدن توده شکل می‌گیرند یعنی ثانویه هستند و به همین دلیل، توده سنگ انسجام خود را حفظ کرده است. این درزه‌ها، باعث ایجاد سطوح لغزش خطرناک نمی‌شوند و در عوض، به سنگ اجازه می‌دهند که با سهولت بیشتری فرسایش یافته و سبب پایداری ساختاری شده است. برداشت‌های میدانی منجر به شناسایی دو نمونه درزه از دو دسته مزدوج (شکل ۲) شد لیکن فرسایش شدید امکان اندازه‌گیری فاصله‌داری آنها را نداد. برای یافتن این پارامتر مهم، میانگین ضخامت واحد ایگنمبریتی ۵۰ تا ۷۰ متر، میانگین ارتفاع مخروط‌ها بین ۳۰ تا ۴۰ متر و میانگین قطر قاعده ۱۵ تا ۲۰ متر تعیین شد. بدین ترتیب برای اینکه مخروطی یا به عبارت دقیق‌تر، یک گوه سنگی شکل بگیرد، می‌توان با استفاده از روابط مثلثاتی، فاصله‌داری درزه‌ها را محاسبه نمود. در اینجا فاصله‌داری را به دو صورت می‌توان تعریف کرد: فاصله افقی (ظاهری) روی زمین و فاصله عمود (حقیقی) بین دو درزه.

۱. محاسبه فاصله افقی (ظاهری روی زمین)

اگر دو درزه مزدوج با شیب ۷۰ درجه داشته باشیم که در راس مخروط (ارتفاع H) به هم می‌رسند، قاعده‌ی مخروط روی زمین (قطر بزرگ D) همان فاصله‌ی افقی بین دو درزه در تراز پایه است. این روش مثلثاتی برای محاسبه ضخامت واقعی لایه در مقابل ضخامت ظاهری استفاده می‌شود.

رابطه ارتفاع و قاعده در یک مثلث متساوی‌الساقین که درزه‌ها ساق‌های آن هستند (رابطه ۱):

$$\tan(dip) = H / \left(\frac{D}{2}\right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

بنابراین برای محاسبه قاعده‌ی مخروط روی زمین، می‌توان رابطه ۱ را به شکل رابطه ۲ نوشت:

$$D = 2H/\tan 70 \quad (\text{رابطه ۲})$$

با جایگذاری مقادیر:

$$D = \frac{60}{2.74} = 21.8 \text{ meters} \quad - \text{ برای ارتفاع ۳۰ متر:}$$

$$D = \frac{80}{2.74} = 29.2 \text{ meters} \quad - \text{ برای ارتفاع ۴۰ متر:}$$

۲. محاسبه فاصله داری عمودی (حقیقی)

فاصله‌داری حقیقی در زمین‌شناسی ساختمانی، کوتاه‌ترین فاصله عمود بین دو صفحه درزه است (S) (رابطه ۳).

$$S = D \sin 70 \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$S = 20(0.94) = 18.8 \text{ meters} \quad - \text{ برای قطر قاعده ۲۰ متر:}$$

بنابراین برای شکل‌گیری چنین مخروط‌هایی:

۱. فاصله افقی بین درزه‌های مزدوج در سطح زمین باید حدود ۲۲ تا ۲۹ متر باشد.

۲. فاصله داری حقیقی درزه‌ها باید در بازه ۱۸ تا ۲۵ متر باشد.

اگر فاصله درزه‌ها کمتر از این مقدار بود (مثلاً ۱۰ متر)، قبل از اینکه مخروط بتواند به ارتفاع ۳۰ متری برسد، درزه‌ها در ارتفاع کمتری، حدود ۱۳ متر به هم می‌رسیدند و مخروط‌های بسیار کوتاه‌تری تشکیل می‌شد.

بنابراین، ضخامت ۷۰ متری لایه ایگنمبریتی و فاصله درزه‌ها در کندوان به طور قابل توجهی بالاست (بیش از ۲۰ متر) که اجازه داده چنین ستون‌های عظیمی به صورت یکپارچه شکل بگیرند. اگر سنگ‌ها خردشدگی بیشتری داشتند و دارای درزه‌های نزدیک به هم بودند، به جای این مخروط‌های بلند، تپه‌های کوچک سنگی تشکیل می‌شدند.

همچنین واقعیت میدانی نشان می‌دهند که بسیاری از مخروط‌ها رو به رودخانه به سمت پایین دست در باختر، پهن‌تر هستند و در طرفین باریک‌تر می‌شوند. این نشان‌دهنده یک سطح مقطع بیضی‌گون است که قطر بزرگ آن در راستای تنش کششی بیشینه قرار دارد. این واقعیت، دال بر شکل‌گیری شکاف‌های عرضی همزمان با تشکیل سنگ است.

به بیان دقیق‌تر وقتی ایگنمبریت‌ها روی زمین نشستند، دمای بسیار بالایی داشتند. به محض اینکه شروع به سرد شدن کردند، سنگ منقبض شده و شکاف‌های عرضی متعدد با آرایش شعاعی نسبت به آتشفشان شکل می‌گیرند. مدت‌ها بعد، وقتی سنگ کاملاً سخت شد و وزن لایه‌های بالایی به حد کافی رسید، درزه‌های مزدوج روی بلوک‌های ایگنمبریتی که قبلاً توسط شکاف‌های عرضی ایجاد شده بودند، شکل می‌گیرند و هرم‌های با سطح مقطع چند ضلعی عریض شونده به سمت پایین باختر شکل می‌گیرند (Chaharlang et al., 2015) (شکل ۸). سپس فرسایش، به تدریج این گوشه‌های تیز را گرد نموده و هرم را به شکل مخروط با سطح مقطع بیضی‌گون در می‌آورد.

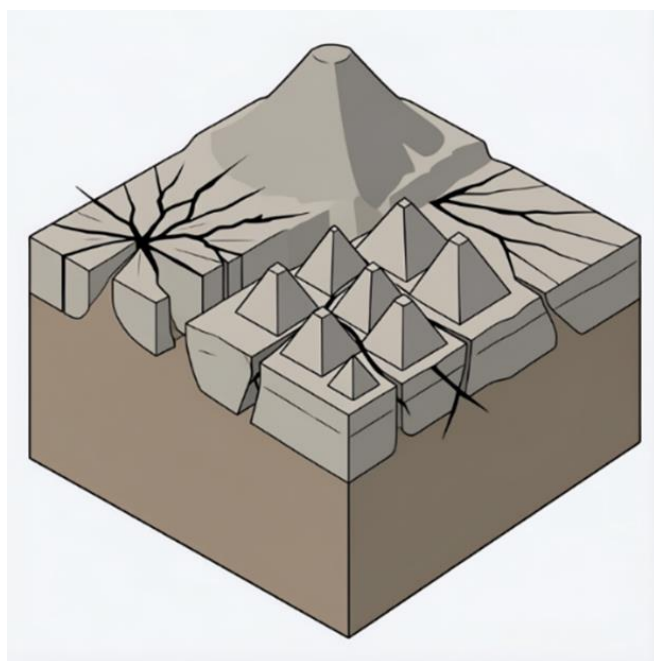
یافته‌های حاصل از بررسی میدانی معماری کران‌ها نشان می‌دهد که فرم مخروطی زمین، سلسله‌مراتب عمودی معماری را تعیین کرده است:

- بخش تحتانی پهن‌ترین قسمت: به دلیل عرض زیاد و نزدیکی به سطح زمین، به آخور و انبار علوفه اختصاص یافته است که نیاز به فضای وسیع‌تر و دمای متعادل‌تری برای دام دارد.

- بخش میانی بخش مسکونی: در این بخش، ضخامت دیواره سنگی به بهینه‌ترین حالت خود می‌رسد. پنجره‌ها و نورگیرها، دقیقاً در جایی تعبیه شده‌اند که قطر صخره اجازه عبور نور را می‌دهد.

- بخش فوقانی (نوک مخروط): به دلیل محدودیت فضا و نازک شدن دیواره‌ها، عمدتاً به عنوان انبار اشیاء سبک یا فضای تهویه استفاده می‌شود.

بر این پایه، آشکار شد که ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌های ایگنمبریتی سه‌پند در منطقه کندوان، بستر لازم برای ابداع یکی از اولین الگوهای سکونت عمودی را فراهم آورده است. شرایطی که در آن، صخره‌های مخروطی، نقش اسکلت سازه‌ای یک آپارتمان چندطبقه طبیعی را ایفا می‌کنند (شکل ۹).



شکل (۸): طرح شماتیک مفهومی نشانگر چگونگی تشکیل هرم‌های ایگنمبریتی ضمن فرسایش واحدهای رویی
Fig (8): Conceptual schematic diagram illustrating the formation of ignimbritic pyramids in Kandovan village through erosion of the overlying units

بحث

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که در روستای کندوان، زمین تنها بستر ساخت‌وساز نیست، بلکه خود ماده‌ی ساختمانی و طراح اصلی است. برخلاف معماری مدرن که فرم را به زمین تحمیل می‌کند، در اینجا با نوعی معماری کاهشی روبرو هستیم که در آن، معمار بومی با شناخت دقیق از زمین ریخت‌شناسی ساختمانی، تنها جرم‌های اضافی را حذف کرده تا فضا را از دل ماده آزاد کند.

نکته کلیدی در بحث زمین‌گردشگری، تقابل میان میراث طبیعی و میراث فرهنگی است. در بسیاری از نقاط جهان، این دو مقوله از هم جدا هستند، اما در کندوان، این مرز فرو ریخته است. کران‌ها به عنوان پدیده‌های زمین ریخت‌شناختی، بدون حضور معماری دست‌کند، تنها مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی بودند، و معماری بدون این بستر زمین‌شناختی، اساساً امکان شکل‌گیری نداشت. لذا، برندینگ زمین‌گردشگری در این منطقه باید بر مفهوم زمین فرهنگ استوار باشد.



شکل (۹): نمایی از چهار افق ساخت در کران

Fig (9): A view of four structural horizons in the Keran (the pyroclastic rock cones of Kandovan)

در ادامه، برای درک دقیق‌تر این هم‌سویی، مقایسه تطبیقی ذیل پارامترهای زمین‌شناختی و پاسخ‌های معماری مربوط به آن‌ها را خلاصه می‌کند (جدول ۱):

جدول ۱: همبستگی ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی و ساختاری سنگ‌بستر با الگوهای معماری دست‌کند در روستای کندوان

Table 1: Correlation of geomorphological and structural characteristics of the bedrock with the architectural patterns of rock-cut dwellings in Kandovan village

ویژگی زمین ریخت شناسی ساختمانی	پاسخ و راهبرد معماری (کالبدی)	اثر بر زمین‌گردشگری
سیستم درزه‌های انقباضی عمودی و تافونی‌های بزرگ ایگنمبریت	تعیین محل ورودی‌ها و جهت‌گیری حفاری‌های اولیه استفاده از خاصیت اینرسی حرارتی برای حذف سیستم‌های سرمایش/گرمایش	ایجاد ریتم منظم در نمای صخره‌ای روستا تجربه «آسایش اقلیمی طبیعی» برای گردشگر
فرسایش تفریقی (فرم مخروطی)	سازماندهی عمودی فضاها (دام در پایین، سکونت در میان، انبار در بالا)	تنوع بصری و ایجاد طبقات ارگانیک در دل سنگ
پدیده سخت‌شدگی سطحی	استفاده از لایه‌های فوقانی مقاوم به عنوان سقف طبیعی و باربر	اطمینان از پایداری سازه‌ای و ایمنی بناهای تاریخی
شیب دامنه	ایجاد پلکان‌های سنگی و مسیرهای دسترسی مارپیچ میان کران‌ها	خلق مسیرهای پیاده‌روی با دیدهای متغیر
ترکیبات کانی‌شناسی (رنگ خاکستری/کرم)	هماهنگی کامل رنگی بنا با طبیعت	تقویت حس «اصالت مکان» و یکپارچگی منظر

تحلیل داده‌های مندرج در جدول فوق نشان می‌دهد که در روستای کندوان، هوشمندی بومی چگونه بر محدودیت‌های زمین‌شناختی غلبه کرده و منجر به شکل‌گیری یکی از پایدارترین الگوهای سکونت بشری شده است. این انطباق بی‌بدیل را می‌توان در چارچوب الگوی توسعه پایدار روستایی در سه سطح بازخوانی کرد:

۱. پایداری انرژی (اینرسی حرارتی): بهره‌گیری از جرم حرارتی بالای سنگ‌های ایگنمبریت که در بخش یافته‌های لیتولوژیک به آن اشاره شد، نوعی سیستم غیرفعال خورشیدی ایجاد کرده است. این ویژگی باعث می‌شود که صخره‌ها در طول روز حرارت را ذخیره و در شب‌های سرد کوهستان به تدریج آزاد کنند؛ فرآیندی که منجر به ایجاد اختلاف دمای ۱۵ درجه‌ای با محیط بیرون شده و نیاز به انرژی فسیلی را به حداقل ممکن رسانده است.

۲. پایداری زیست‌محیطی (معماری صفرکربن): برخلاف معماری متعارف که با استخراج، تولید و حمل‌ونقل مصالح پرمصرف مانند سیمان و آهن باعث تخریب محیط‌زیست می‌شود، معماری تراششی کندوان با حذف کامل مصالح بیگانه، الگویی از معماری صفرکربن را ارائه می‌دهد. در اینجا، مسکن نه بر روی زمین، بلکه در بطن آن تعریف شده و هیچ‌گونه پسماند ساختمانی تولید نکرده است.

۳. پایداری اجتماعی-اقتصادی (میراث زنده): برخلاف بسیاری از سایت‌های زمین‌شناختی که به صورت موزه‌های مرده اداره می‌شوند، پایداری کندوان در گرو حیات اجتماعی جاری در دل این کِران‌هاست. این پیوند عمیق میان میراث ملموس زمین و میراث ناملموس فرهنگی، برندینگ زمین‌گردشگری منطقه را از یک تماشای ساده به یک تجربه زیسته ارتقا داده که کلید اصلی پایداری اقتصادی روستا در قرن حاضر است.

بنابراین، کندوان تنها یک پدیده زمین‌شناختی یا یک اثر تاریخی نیست، بلکه مخزنی از دانش فنی برای معماری همساز با اقلیم است که ضرورت حفاظت از آن را از منظر مطالعات انرژی و پایداری محیطی دوچندان می‌کند. بنابراین، مدیریت زمین‌گردشگری در کندوان باید همزمان یک مدیریت ژئوتکنیکی باشد تا از ریزش و فرسایش سریع در اثر بارگذاری‌های نا متعارف روی این آثار جلوگیری شود (شکل ۱۰).



شکل (۱۰): نمایی از بارگذاری‌های غیرمتعارف در روستای کندوان

Fig (10): A view of unconventional loadings in Kandovan village

بیانیه هوش مصنوعی

نویسندگان مسئولیت کامل صحت، دقت و اصالت محتوای مقاله را بر عهده دارند و اعلام می‌دارند که از ابزار مولد تصویر مبتنی بر هوش مصنوعی (ChatGPT) صرفاً برای نمایش بصری برخی پدیده‌های زمین‌شناختی در شکل‌های ۶ و ۸ استفاده شده است. تمامی خروجی‌های تولیدشده توسط نویسندگان بررسی، ویرایش و تأیید شده است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف واکاوی رابطه علی میان ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناختی و الگوهای معماری بومی در روستای کندوان انجام یافت. نتایج حاصل از انطباق تحلیل‌های زمین‌شناسی ساختمانی با برداشت‌های میدانی معماری، منجر به تبیین مدل مفهومی معماری زمین‌پیرو گردید. یافته‌های کلیدی این پژوهش در سه محور اصلی زیر خلاصه می‌شود:

۱. محاسبات هندسی انجام شده بر روی درزه‌های مزدوج نشان داد که تشکیل مخروط‌های عظیم (کِران‌ها) با ارتفاع ۳۰ تا ۴۰ متر، مستقیماً تابع فاصله‌داری حقیقی درزه‌ها در بازه ۱۸ تا ۲۵ متر است. این یافته ثابت می‌کند که سازماندهی فضایی و تراکم بافت روستا، پیش از مداخله انسان، توسط تنش‌ها و فرآیندهای سردشدگی ایگنمبریتی‌ها در دل زمین طراحی شده بود. معمار بومی با بازشناسی این نقاط ضعف استراتژیک (درزه‌ها)، آن‌ها را به فرصتی برای حفاری آسان و ایجاد فضاهای چندطبقه تبدیل کرده است.

۲. تحلیل لیتولوژیکی سنگ‌های ایگنمبریتی نشان داد که ویژگی‌های متضاد این سنگ، تراش‌خوری آسان در لایه‌های میانی و سخت‌شدگی سطحی در لایه‌های فوقانی، پایداری سازه‌ای و اقلیمی روستا را تضمین کرده است. این ویژگی‌ها، کندوان را به نمونه‌ای پیشرو از معماری پایدار و صفرکربن تبدیل کرده است که در آن جرم حرارتی سنگ، بدون نیاز به انرژی فسیلی، آسایش اقلیمی ساکنان را در یکی از سخت‌ترین اقلیم‌های کوهستانی فراهم می‌آورد.

۳. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که جذابیت اصلی کندوان برای توسعه گردشگری، در مفهوم زمین-فرهنگ نهفته است، جایی که مرز میان میراث طبیعی (میراث زمین) و میراث ناملموس فنون حفاری از بین رفته است. هرگونه برنامه حفاظت و توسعه در این منطقه باید بر پایه مدیریت همزمان ژئوتکنیکی برای کنترل فرسایش جاری صخره‌ها و حفظ حیات اجتماعی جاری در کران‌ها استوار باشد.

در نهایت، مدل معماری زمین‌پیرو ارائه شده در این تحقیق، چارچوب جدیدی برای مطالعه سایر سکونتگاه‌های دست‌کند جهان پیشنهاد می‌دهد. این مدل نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با درک عمیق از رفتار سنگ و ریخت زمین، به الگوهایی از سکونت دست یافت که نه در تقابل با طبیعت، بلکه در همزیستی مطلق با بستر زمین‌شناختی باشند.

References

- Amini Beiram, F., Asghari, E., & HajiAlavi Bonab, M. (2015). Evaluation of Weathering and Erosion of Cone-Shaped Pyroclastic Rocks of Kandovan Village. *Journal of Engineering Geology*, 9(1), 2593-2614.
- Asadi, A., & Meymand, H. (2008). Review historical village of tourist attractions. *Journal of Geographical Space*, 21(1).
- Asghari Kaljahi, E., Birami, F. A., & Hajjalilue, 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*, 8, 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. (In Persian).

- Aydan, Ö., & Ulusay, R. (2003). Geotechnical and geoenvironmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey. *Engineering Geology*, 69(3-4), 245-272.
- 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
- Chaharlang, R., Ghalamghash, J., Emami, M. H., & Omrani, J. (2015). Source of Kandovan Volcanic Rocks (NW of Iran): Using New Data of Geology, Petrography and Geochemistry. *Advanced Applied Geology*, 5(4), 34-43.
- 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).
- Ghalamghash, J., Schmitt, A., & Chaharlang, R. (2019). Age and compositional evolution of Sahand volcano in the context of post-collisional magmatism in northwestern Iran: Evidence for time-transgressive magmatism away from the collisional suture. *Lithos*, 344, 265-279.
- Ghobadiyan, v. (2006). Climatic analysis of the traditional Iranian buildings. *University of Tehran*. <https://ketab.ir/book/ed9e0384-b9e2-46fc-96ec-62f810e7013a>
- Gorji Mahlabani, Y., Sanaie, E. (2010). Climate-responsive architecture of Kandovan village. *Journal of Housing and Rural Environment*, 129, 2-19.
- Hajirasouli, A. (2015). An investigation of influential factors in the long-term survival of vernacular architecture in the form of cone-shaped dwelling: Case studies of Kandovan and Goreme (Cappadocia). *Journal of Engineering and Architecture*, 3(1), 89-98.
- Karami, F. (2008). Geotourism capabilities in the development of Kandovan village. *Geographical Space*, 20, 115-129.
- 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).
- Masoud, M., & Beygzade, S. H. (2012). Conservation and regeneration of decorative motifs of Urban spaces. *Research and Urban Planning*, 3(10), 43-66. (In Persian). <https://www.sid.ir/paper/220169/en>
- Mojtahedzadeh, G. H. (1974). Kandovan. *Journal of Art and Architecture*, 8(38), 149-154. (In Persian).
- Newsome, D., & Dowling, R. K. (2010). Geotourism: the tourism of geology and landscape: Goodfellow Publishers Ltd.
- Pourmohammadi, M., & Nasrollahzadeh, Z. (2014). The survey of intervening factors in the formation of rocky architecture in rural area, the case study: Kandovan Village in East Azerbaijan. *Journal of Geography and Planning*, 18(49), 81-100.
- Sharif Khajehpasha, S. (2024). Studying the architecture of Kandavan rock village in Iran. *International Journal of Social Relevance & Concern*, 12(3). <https://doi.org/10.26821/IJSRC.12.3.2024.120304>
- UNESCO. (1995). Troglodytic sites on the World Heritage List. *The UNESCO Courier*, 48(12), 35-41.
- Yazhari Kermani, A., & Amini Goharrizi, S. (2022). An analysis of the spatial configuration of Iranian hand-carved architecture through a glance at Kandovan and Meymand, using space syntax technique. *Soffeh*, 32(1), 71-84.