JOURNAL OF RESEARCH ON ARCHAEOMETRY

Received: 05 /05/2015 **Accepted: 16/8/2015**

Characterization and Pathology of Pyroclastic Stones in the Cut Rock Historical Architecture of Kandovan Village

F. AMINI BIRAMI[a], M. RAZANI[b*], E. ASGHARI KALJAHI[a], S. M. A. EMAMI[b] and A. BAGHBANAN[c]

[a] *Faculty of Natural Science, Department of Geology, University of Tabriz, IRAN*

[b] *Faculty of Conservation, Department Conservation-Restoration of Historic- Cultural Properties, Art University of Isfahan, IRAN*

[C] *Faculty of Mining Engineering, Department of Mining Engineering, Industrial University of Isfahan, IRAN*

Abstract

Kandovan historical village, in the vicinity of Osku town is one of the most important attractive sites in East Azerbaijan province which is outstanding and prominent due to the hewn-cut house of rock skirt of the Sahand volcano. This site has been registered in 1998 on the national cultural heritage list of Iran. Kandovan rocky architecture, from geological point of view, is on the surfaces of a thick ignimbrite layer that this layer, due to natural weathering and erosion along the main joints and discontinuities of Kandovan valley, has created conical forms and structures. According to the existing theory, Kandovan village was inhabited and settled in these conical buildings since the Ilkhanid era. Recent developments on rock decay in rock-cut architecture of the Kandovan historical village, have heightened the need for recognizing the role of different factors of weathering process on this site. Therefore, the main objective of this study was to assess the effect of inherent vice as a fundamental factor in deterioration patterns. For this purpose, field and laboratory investigations like sampling and observation, characterization with thin section petrography and X-ray diffraction analyzes, along with the measurement of physical properties and durability of rock in rocky houses, the role of inherent vice rock with intensity of rock mass Kandovan weathering has been done. Nowadays, intensity of decay and weathering in Kandovan village rocks causes of poor living conditions, ruination, and seasonal residence or nonresidential conditions. Based on the rock characterization, water absorption, dry density, total porosity content, saturation coefficient, slake durability and experiment for resistance to freezing-thawing demonstrated that Kandovan ignimbrite rock have poor durability and high sensitive to predisposing factors to deterioration such as wetting and drying and freezing-thawing cycles. The collection of these inherent properties causes of the internal structure to be non-resistance to the tensions arising from the impact of climate cycles. The local climate could be considered (or suggested) as the main reason of weathering and erosion of this rocky architecture.

Keywords: Decay, Weathering, Inherent Vice, Rock-Cut Architecture of Kandovan village, Ignimbrite

* - Corresponding author: m.razani@aui.ac.ir

پژوهه باستان‌سنجی

مقاله پژوهشی
سال اول، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۴، ۱-۱۶

تاریخ دریافت:۱۳۹۴/۰۲/۱۵
تاریخ پذیرش:۱۳۹۴/۰۵/۲۷

تحلیل ساختارشناسی سنگ‌های آذر آواری در معماری صخره‌کند روستای تاریخی کندوان

فریده امینی بیرامی[۱]؛ مهدی رازانی[۲*]؛ ابراهیم اصغری کلجاهی[۳]؛ سید محمدامین امامی[۴]؛ علی‌رضا باغبانان[۵]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی، دانشگاه تبریز، ایران.
۲. دانشجوی دکتری مرمت اشیا تاریخی و فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان، ایران. ۳. استادیار گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تبریز، ایران.
۴. استادیار دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان. ایران. ۵. دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان. ایران.

چکیده

روستای تاریخی کندوان از مهم‌ترین جاذبه‌های گردشگری استان آذربایجان شرقی است که به واسطه خانه‌های حفرشده در دل صخره‌های برافراشته در دامنه کوه آتشفشان سهند به سال ۱۳۷۶ در فهرست میراث فرهنگی کشور ثبت گردید و بر اساس نظریه‌های موجود از دوره ایلخانی تا به حال مردم در خانه‌های کله‌قندی آن ساکن بوده‌اند. معماری صخره‌ای کندوان از لحاظ زمین‌شناسی بر سطح یک توده آذر آواری قرار دارد که هوازدگی طبیعی و فرسایش در امتداد درزه‌های اصلیِ دره کندوان موجب شکل‌گیری سازه‌های کله‌قندی آن شده است. امروزه تشدید تخریب و هوازدگی سنگ‌ها در کندوان باعث نامناسب شدن شرایط زندگی، ویرانی، سکونت فصلی و یا غیرمسکونی شدن برخی خانه‌های صخره‌ای گردیده است. هدف از این پژوهش بررسی نقش عیوب ذاتی به‌مثابه عاملی بنیادی در فرسایش سنگ است در همین راستا مقاله حاضر بر اساس مطالعات میدانی و آزمایشگاهی شامل: بررسی‌های صحرایی و نمونه‌برداری، در کنار انجام آزمایش‌های سنگ‌شناسی، شامل پتروگرافی مقطع نازک، پراش پرتو ایکس (XRD) همراه با سنجش خواص فیزیکی و دوام‌داری سنگ خانه‌ها، نقشِ عیوب ذاتی سنگ در تشدید هوازدگی سنگ‌های آذر آواری کندوان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌های ساختارشناسی سنگ، جذب آب موئینه، درصد رطوبت طبیعی، ضریب اشباع سنگ، شاخص دوام وارفتگی، آزمایش مقاومت در برابر ذوب و انجماد متوالی، حاکی از نقش ویژه عیوب ذاتی سنگ در تسریع تخریب کندوان است، به نحوی که سنگ کندوان دوام پایین و حساسیت بالایی نسبت به عوامل مخرب از جمله یخ زدن – ذوب شدن و چرخه‌های تر و خشک شدن دارد. مجموعه این ویژگی‌های ذاتی باعث ایجاد ساختار درونی نامقاوم در برابر تنش‌های ناشی از تأثیر چرخه‌های فوق‌الذکر در اقلیم کوهستانی منطقه گردیده که آن را مستعد هوازدگی و فرسایش شدید قرار داده است.

واژگان کلیدی: تخریب سنگ، هوازدگی، عیوب ذاتی، معماری صخره‌ای روستای کندوان، ایگنمبریت

* نویسنده مسئول: اصفهان، خیابان حکیم نظامی، چهار راه خاقانی، دانشگاه هنر اصفهان، صندوق پستی ۱۷۴۴

پست الکترونیکی: m.razani@aui.ac.ir

حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقاله چاپ شده را با دیگران به اشتراک بگذارد منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

۱- مقدمه

پدیده‌های تخریب[۱] و هوازدگی[۲] از جمله عواملِ مخربِ چندبعدی و اجتناب‌ناپذیر در بناهای سنگی که در مجاورت با آب و هوا و شرایط محیطی قرار دارند، هستند. از مهم‌ترین مسائل مورد توجه در حفاظت از آثار سنگی محسوب می‌گردند. سرعت هوازدگی و گونه آن در همه‌جا یکسان نیست و این امر به عواملی چون: ۱) جنس و مشخصات سنگ مادر شامل: ویژگی‌های ذاتی همانند ترکیب کانی شناختی، بافت و ساخت آن که در واقع خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی سنگ محسوب می‌شوند. ۲) شرایط محیطی: شامل ویژگی‌های اقلیمی و آب و هوایی منطقه، توپوگرافی و محل قرارگیری اثر به همراه وضعیت آلودگی‌های هوا، کلونی-های زیستی و حتی مداخلات انسانی را در بر می‌گیرد و ۳) هم‌چنین عامل زمان می‌توان خلاصه نمود. در طی قرن گذشته روش‌های متعددی از جمله قطع مجاورت سنگ با عوامل هوازدگی همچون رطوبت، نور، دما، عوامل زیستی و آلودگی‌های محیطی جهت پیشگیری و متوقف نمودن روند تخریب‌ها انجام شده است (Doehne et al., 2010: 5). اما در بسیاری از گونه-های میراث سنگی همانند معماری صخره‌ای[۳] روستای کندوان در ۶۲ کیلومتری شهر تبریز امکان جلوگیری از مجاورت و دور نمودن منابع آسیب‌رسان به سنگ وجود ندارد و شیوه‌های برخورد حفاظتی به واسطه وسعت محل و ملاحظات زیست‌محیطی مربوط به سکونت هم‌زمان انسان و دام در روستا موضوعی چالش‌برانگیز در امر حفاظت است. بنا بر اهمیت تاریخی، فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی این روستا، انجام مطالعات بنیادی در راستای ارائه راهکارهای حفاظتی مناسب برای جلوگیری از روند تخریب‌ها ضرورت دارد (رازانی و دیگران ۱۳۹۱). بنیادی‌ترین مرحله در این روند مرحله تشخیص[۴] عوامل آسیب‌رسان و چگونگی ساز و کارهای تخریب و هوازدگی سنگ است که مداخلات حفاظتی از قبیل تمیزکاری، استحکام‌بخشی و پوشش‌دهی سطوح سنگ می‌باید بر اساس نتایج برآمده از مرحله تشخیص انجام گیرد (Rodriguez, 2007). از این رو حفاظت و مرمت این سازه‌های سنگی در رأس اولویت‌های برنامه مدیریتی کلان روستا قرارگرفته است. تحقیق حاضر بخشی از طرح کلانِ مطالعات حفاظت و مرمت، معماری صخره‌ای روستای تاریخی کندوان با بررسی ویژگی‌های ذاتی سنگ از جمله ویژگی‌های سنگ‌شناسی، فیزیکی و دوام‌داری[۵] آن است، که سعی در شناخت نقش عیوب ذاتی[۶] سنگ در چگونگی روند هوازدگی و تخریب آن در قالب مطالعات ساختارشناسی و آسیب‌شناسی دارد.

۲- روش تحقیق

تحقیق پیش رو به روش تحلیلی – تجربی و بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای، میدانی و آزمایشگاهی انجام گرفته است. در مرحله مطالعات کتابخانه‌ای در قالب پیشینه تحقیق از متون، اسناد و تصاویر، پرونده‌های ثبتی، مقالات و طرح‌های پژوهشی انجام گرفته در جهت آشنایی با منطقه مورد نظر، روش‌ها و ابزارهای مطالعاتی و آزمایشگاهی مناسب استفاده شده است. در بخش مطالعات میدانی تحقیق با حضور در منطقه اقدام به مشاهده، ثبت و ضبط وضعیت کنونی تخریب‌ها و همچنین نمونه‌برداری برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی پرداخته شده و درنهایت نیز بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مراحل فوق به تحلیل اطلاعات در رابطه با موضوع مورد بحث اقدام شده است.

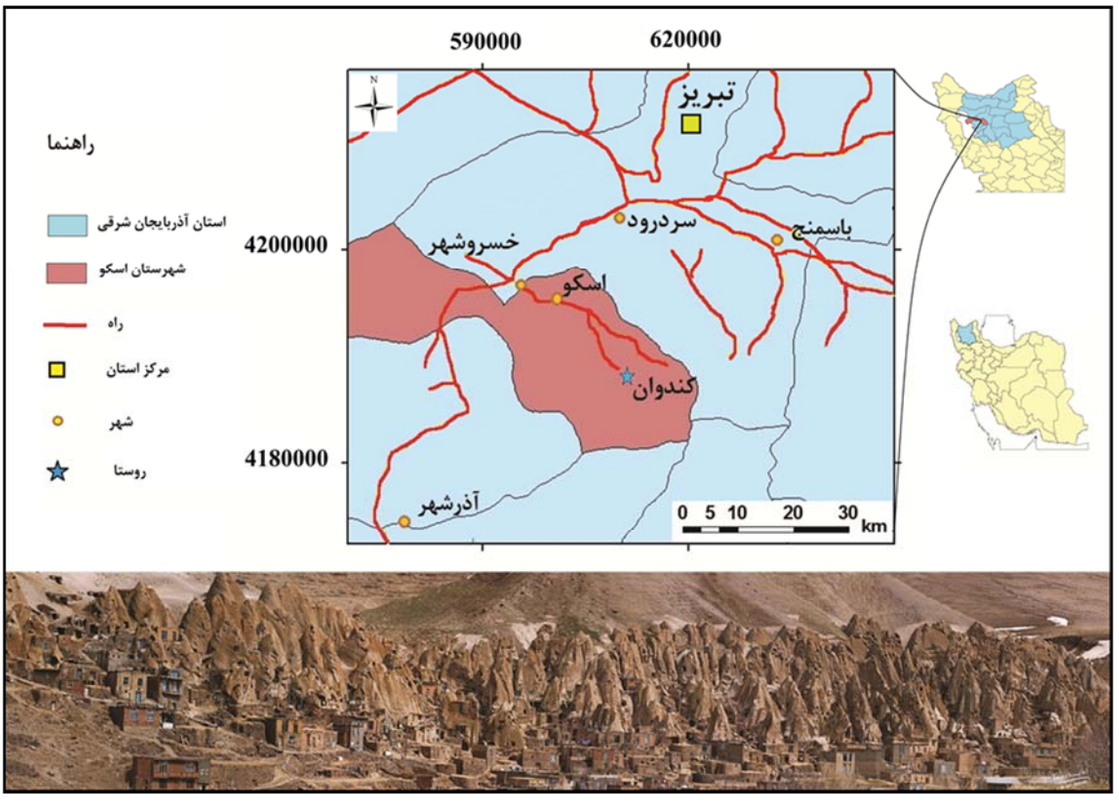
۳- پیشینه تحقیق

روستای کندوان (شکل ۱)، در ادامه دره ویدهر (اسکو چای) با ارتفاع ۲۲۲۵ متر در دامنه غربی کوه آتشفشانی سهند از سال ۱۳۵۳ تابه‌حال از جنبه‌های مختلفی شامل: معماری صخره‌ای (مجتهدزاده، ۱۳۵۳؛ همایون، ۱۳۵۶؛ قرائی‌مقدم، ۱۳۷۸؛ رضوانی، ۱۳۸۶؛ گرجی مهلبانی و همکاران، ۱۳۸۹)، مطالعات زمین شناسی و جغرافیای طبیعی (معین‌وزیری، ۱۳۷۷؛ غیوری ۱۳۸۱؛ اکبری و همکاران، ۱۳۸۷؛ مقیمی اسکوئی، ۱۳۹۰؛ پیرمحمدی، ۱۳۹۰؛ امینی بیرامی، ۱۳۹۲)، مطالعات گردشگری (خداوردیزاده و همکاران، ۱۳۷۸)، اکوتوریسم (اکبری و همکاران، ۱۳۸۷)، ژئوتوریسم (کرمی، ۱۳۸۶؛ گرجی

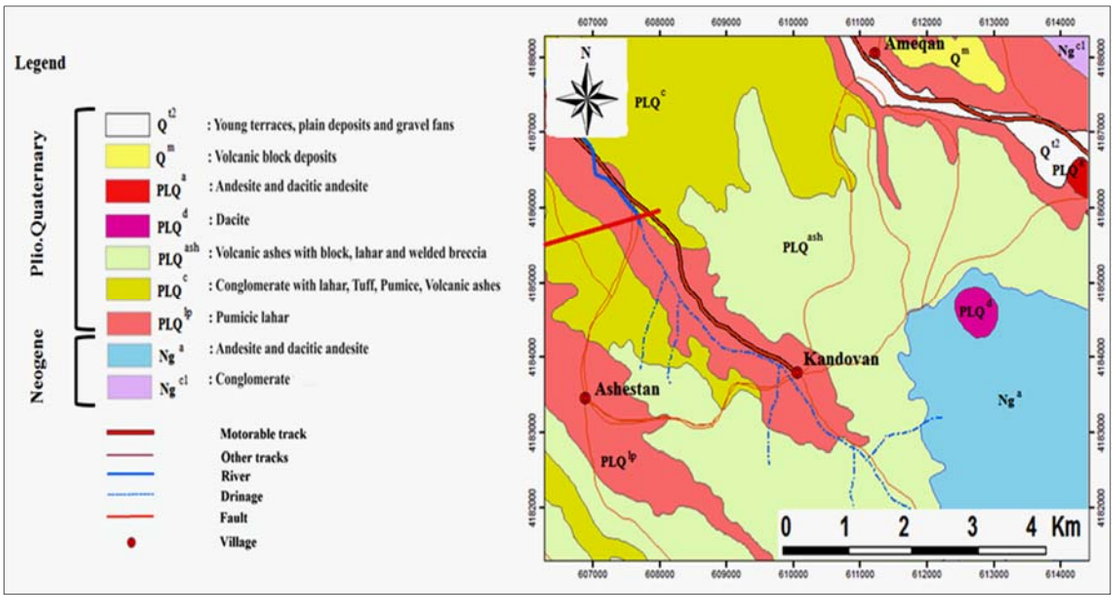
مهلبانی و همکاران، ۱۳۸۸)، و مطالعات طرح هادی و عمران روستایی (مهندسین مشاور پدیده صامت، ۱۳۸۷) مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات فوق کندوان را به‌عنوان یکی از قابلیت‌های مهم گردشگری استان آذربایجان شرقی و شمال غرب کشور معرفی نموده‌اند. بر اساس مطالعات موجود عموم گردشگران کندوان، در درجه نخست برای دیدن خانه‌های کله‌قندی، معماری صخره‌ای و در ادامه برای استفاده از مناظر طبیعی و آب معدنی روستا به این محل مسافرت می‌کنند (خداوردیزاده و همکاران، ۱۳۷۸). تدقیق قدمت روستای کندوان نیاز به مطالعات تخصصی باستان‌شناسی و اثبات یا رد نظریات موجود دارد. با توجه به مستندترین نظریه موجود در رابطه با آغاز سکونت در کندوان می‌توان گفت: بر اساس شواهد و سفال‌های یافت شده از منطقه، این روستا در زمان ایلخانیان (۶۵۴-۷۵۰ هـق) دارای سکنه بوده است (همایون، ۱۳۵۶؛ مجتهدزاده، ۱۳۵۳). تاکنون مطالعاتی مشابه در رابطه با ساختار شناسی و آسیب‌شناسی سنگ‌های معماری صخره‌ای روستای کندوان صورت نگرفته است.

۴- زمین‌شناسی و شرایط اقلیمی و آب و هوایی کندوان

منطقه مورد مطالعه در تقسیم‌بندی پهنه‌های رسوبی ساختاری ایران در پهنه ایران مرکزی قرار دارد (آقانباتی، ۱۳۸۳: ۱۱۲). عمده واحدهای تشکیل دهنده منطقه با توجه به نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسکو (شکل۲) واحدهای آذر آواری نئوژن و پلیوکواترنر هستند که به دلیل مقیاس نقشه منطقه و عدم امکان تفکیک بیشتر واحدهای سنگی، روستا در محدوده لاهار پامیسی واقع شده است. طبق مطالعات معین وزیری (۱۳۷۷) در دره کندوان یک روانه ضخیم ایگنیمبریت[۷] روی طبقات برش آتشفشانی قرار گرفته که توسط آگلومرا و روانه برشی پوشانده شده است (شکل۳)، از لحاظ طرز تشکیل ایگنیمبریت‌ها این‌گونه عنوان شده است که،



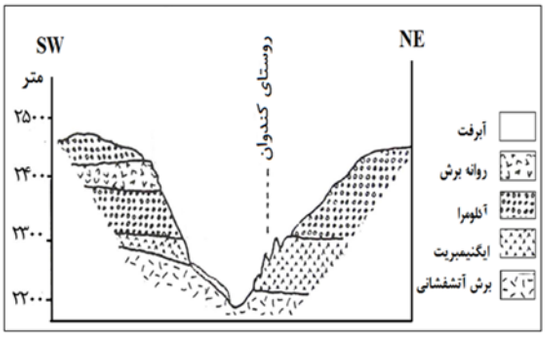
شکل ۱: نقشه موقعیت و راه‌های دسترسی به روستای کندوان و منظر فرهنگی آن از دید جنوبی.
(مأخذ نقشه: امینی بیرامی، ۱۳۹۲ : ۳۸، مأخذ تصویر: مهریار، ۱۳۹۰).



شکل ۲: موقعیت روستای کندوان در دامنه کوه سهند در بستر زمین‌شناسی منطقه (مأخذ : خدابنده و امینی فضل، ۱۳۷۴).

خاکسترهای آتشفشانی داغ (۴۰۰°C) بعد از فوران آتشفشان امکان دارد بر زمین ریخته شوند، در این صورت با پاره‌ای از کانی‌ها و یا گازها با اکسیژن هوای محبوس در خلل و فرج خاکستر ترکیب شده و عمل اکسیداسیون صورت می‌گیرد. در نتیجه اکسیداسیون، حرارت خاکستر بالا رفته (۸۰۰C°) موجب خمیری شدن ذرات شیشه (گدازه پودر شده و منجمد شده) و جوش خوردن این ذرات به یکدیگر می‌شود. در این حالت خاکستر آتشفشانی مانند یک گدازه می‌تواند حرکت کند و پس از انجماد و سرد شدن به صورت سنگی محکم درآید که آن را ایگنیمبریت می‌نامند (معین وزیری ودیگران،۱۳۸۳: ۶۴). اما در مورد جنس سنگ‌های تشکیل‌دهنده خانه‌های کله‌قندی روستای کندوان ابهاماتی وجود دارد. در مورد مراحل شکل‌گیری اشکال کله‌قندی نیز به نقش فرآیندهای هوازدگی و فرسایش لایه ایگنیمبریتی در امتداد سه دسته درزه اصلی با مشخصات جهت شیب / شیب برابر با ۳۱۹ / ۶۶ / ۲۲۱ / ۷۱ و ۰۷۷ / ۶۴ پرداخته شده است (امینی بیرامی، ۱۳۹۲: ۸۰).

شرایط اقلیمی منطقه که متأثر از زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی خاص آن است، از عوامل محیطی تأثیرگذار در روند تخریب سنگ محسوب می‌گردد به نحوی که توجه به اقلیم محلی[۸] و شناخت آن در راستای تحلیل مکانیسم‌های تخریب، هوازدگی و همین طور برای پیش‌بینی شدت پدیده‌ها و انجام اقدامات پیشگیرانه حفاظتی امری ضروری است. به‌منظور مطالعه اقلیم و شرایط آب و هوایی منطقه از اطلاعات هواشناسی ده ساله (۱۳۸۸-۱۳۷۹) ایستگاه تبخیر سنجی لیقوان، سازمان هواشناسی استان آذربایجان شرقی استفاده گردید. همچنین از آنجا که سنگ‌ها در اثر تر- خشک شدن و یخ زدن - ذوب شدن متوالی که متأثر از شرایط آب و هوایی منطقه است دچار تنش‌های حرارتی مکرر و در نتیجه فروپاشی می‌شوند، از نمودارهای دما و بارش روزانه برای تخمین تعداد چرخه‌های سالانه استفاده شده است. چرخه‌ی تر و خشک شدن سنگ زمانی اتفاق می‌افتد که در طول یک یا چند روز متوالی بارندگی رخ دهد و میزان کمینه دما در طول آن مدت بالای صفر درجه سانتی‌گراد باشد. علاوه بر چرخه یخ زدن - ذوب شدن سنگ در طول یک یا چند روز متوالی بارندگی رخ می‌دهد به شرطی که کمینه دما در آن مدت پایین صفر درجه سانتی‌گراد باشد که در این شرایط آب بارندگی که به سنگ نفوذ کرده، در منافذ آن منجمد می‌شود (Ergular, 2009 ؛Topal, 1995) که انبساط حجم آبِ جذب‌شده باعث ایجاد تنش در منافذ، ترک‌ها و لایه‌ها



شکل ۳: الف) تصویر هوایی از دره و روستای کندوان. ب) محل قرارگیری روستا درمیان لایه‌های مقطع زمین‌شناسی دره کندوان.
(مأخذ تصویر: Google Earth, 2013؛ مأخذ مقطع دره: معین وزیری، ۱۳۷۷: ۱۲۶)

می‌گردد. نتیجه این پدیده جدایش سطوح بیرونی در قالب آسیب فیزیکی در بخش‌های مجاور با محیط است. با توجه به داده‌های آب و هواشناسی و نمودارهای حاصل حداکثر میزان بارش منطقه در اردیبهشت ماه برابر با ۲۵/ ۶۳ میلی‌متر و حداقل آن در مرداد ماه برابر با ۱۲/۷۲ و میزان متوسط بارش سالانه حدود ۳۵۲/۲ میلی‌متر است. همچنین مرداد ماه با ۱۹/۲۵ درجه و دی ماه با ۲/۷۱- درجه سانتی‌گراد به ترتیب گرم‌ترین و سردترین ماه‌های سال هستند (شکل ۴).

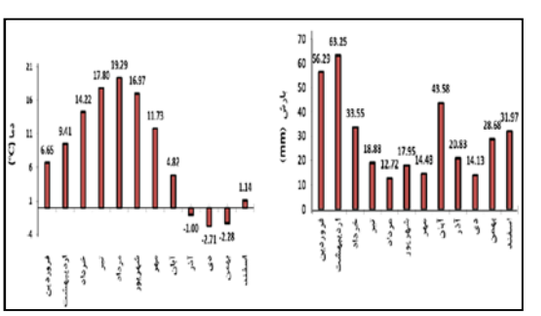
علاوه بر چرخه یخ زدن - ذوب شدن سنگ در طول یک یا چند روز متوالی بارندگی رخ می‌دهد به شرطی که کمینه دما در آن مدت پایین صفر درجه سانتی‌گراد باشد که در این شرایط آب بارندگی که به سنگ نفوذ کرده، در منافذ آن منجمد می‌شود (Topal, 1995؛ Ergular, 2009) که انبساط حجم آب جذب شده باعث ایجاد تنش در منافذ، ترک‌ها و لایه‌ها می‌گردد. نتیجه این پدیده جدایش سطوح بیرونی در قالب آسیب فیزیکی در بخش‌های مجاور با محیط است.

با توجه به داده‌های آب و هواشناسی و نمودارهای حاصل حداکثر میزان بارش منطقه در اردیبهشت ماه برابر با ۲۵/ ۶۳ میلی‌متر و حداقل آن در مرداد ماه برابر با ۱۲/۷۲ و میزان متوسط بارش سالانه حدود ۳۵۲/۲ میلی‌متر است. همچنین مرداد ماه با ۱۹/۲۵ درجه و دی ماه با ۲/۷۱- درجه سانتی‌گراد به ترتیب گرم‌ترین و سردترین ماه‌های سال هستند (شکل ۴). منطقه کندوان بر اساس اقلیم‌نمای آمبرژه۹ دارای اقلیم سرد و نیمه‌خشک است (علیزاده، ۱۳۸۸ : ۲۷۲، نقل از Emberger 1930). با توجه به نمودارهای دما و بارش روزانه طی دوره ده ساله (۱۳۷۹- ۱۳۸۸) سنگ کندوان سالانه ۲۸ چرخه تر و خشک شدن و ۱۴ چرخه ذوب و انجماد متحمل می‌شود (امینی بیرامی، ۱۳۹۲: ۴۶).

۵- مواد و روش‌ها

۵-۱- مواد و نمونه‌های آزمایش

برای انجام مطالعات آزمایشگاهی سنگ خانه‌های کندوان به دلیل عدم امکان نمونه‌برداری از بناهای ثبت ملی و احتمال ایجاد آسیب به خانه‌های دارای سکنه و همچنین اهداف مطالعه حاضر، مبتنی بر بررسی نقش عیوب ذاتی سنگ در میزان تخریب خانه‌های سنگی روستای کندوان، نمونه‌برداری از بخش‌های داخلی و سالم مخروط‌های فاقد سکنه و در حال حفاری در بخش غربی روستا- محدوده هتل لاله - انجام گرفت. جمعاً



شکل ۴: نمودار میزان بارش و درجه حرارت متوسط ماهانه برای دوره ده ساله (۱۳۷۹ - ۱۳۸۸)(مأخذ: امینی بیرامی، ۱۳۹۲)

جدول۱- آزمون‌های آزمایشگاهی، اهداف و مراجع استانداردها (ماخذ: نگارندگان)

آزمون‌ها	گونه آزمایش	هدف	استانداردها و تجهیزات
ساختار شناسی	سنگ شناسی (پتروگرافی مقطع نازک)	شناخت کانی‌ها، روابط بین دانه‌ای و بافت موجود، نام گذاری علمی سنگ	میکروسکوپ پلاریزان، مدل : Nikol، ساخت شرکت :Olympus ژاپن (۱۹۹۸)، دانشگاه تبریز آزمایشگاه کانی‌شناسی ASTM C 1721: 2009
	پراش پرتو ایکس (XRD)	تعیین فازهای کریستالی موجود در نمونه	مدل دستگاه: PW 1800، ساخت: شرکت PHILIPS هلند، شرکت تحقیقات معدنی کانساران بینالود.
ویژگی‌های فیزیکی	نرخ جذب آب[۱۴]	تعیین نرخ جذب آب سنگ	ASTM D1585, 2004
	درصد رطوبت طبیعی[۱۵]	تعیین درصد رطوبت سنگ برای پیش‌بینی رفتار آن.	ISRM, 1979
	چگالی خشک و تخلخل کل[۱۶]	تعیین میزان چگالی خشک و تخلخل‌کل برای درک رفتار هوازدگی سنگ	ISRM, 1979
	ضریب اشباع سنگ[۱۷]	تعیین مقاومت سنگ در برابر یخبندان	TS 699, 1987
ویژگی‌های دوام داری	شاخص دوام وارفتگی[۱۸]	تعیین شاخص دوام وارفتگی برای برآورد میزان دوام در برابر هوازدگی	ASTM D 4644, 2004
	آزمایش دوام در برابر یخ زدن و ذوب شدن متوالی[۱۹]	بررسی دوام سنگ در برابر یخ زدن و ذوب شدن متوالی	ASTM D 5312, 2004
	دوام در برابر تر و خشک شدن متوالی[۲۰]	بررسی دوام سنگ در برابر تر و خشک شدن متوالی	ASTM D 5312, 2004

به تعداد ۲۱ نمونه دستی در ابعاد تقریبی ۷×۷×۷ سانتی‌متر برای مطالعات انتخاب و به آزمایشگاه انتقال داده شد. از این تعداد، ۶ نمونه برای آزمایش‌های سنگ‌شناسی و ۱۵ نمونه برای تعیین خواص فیزیکی و دوام‌داری سنگ مورد استفاده قرار گرفته است.

۵-۲- مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی شامل آزمون‌های ساختارشناسی با تهیه و مطالعه مقاطع نازک[۱۰] میکروسکوپی، آنالیز پراش اشعه ایکس[۱۱]، آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های فیزیکی و دوام‌داری نمونه‌ها بر اساس استانداردهای ملی و بین‌المللی به انجام رسیده است (جدول ۱).

۵-۳- ساختار شناسی و سنگ‌شناسی

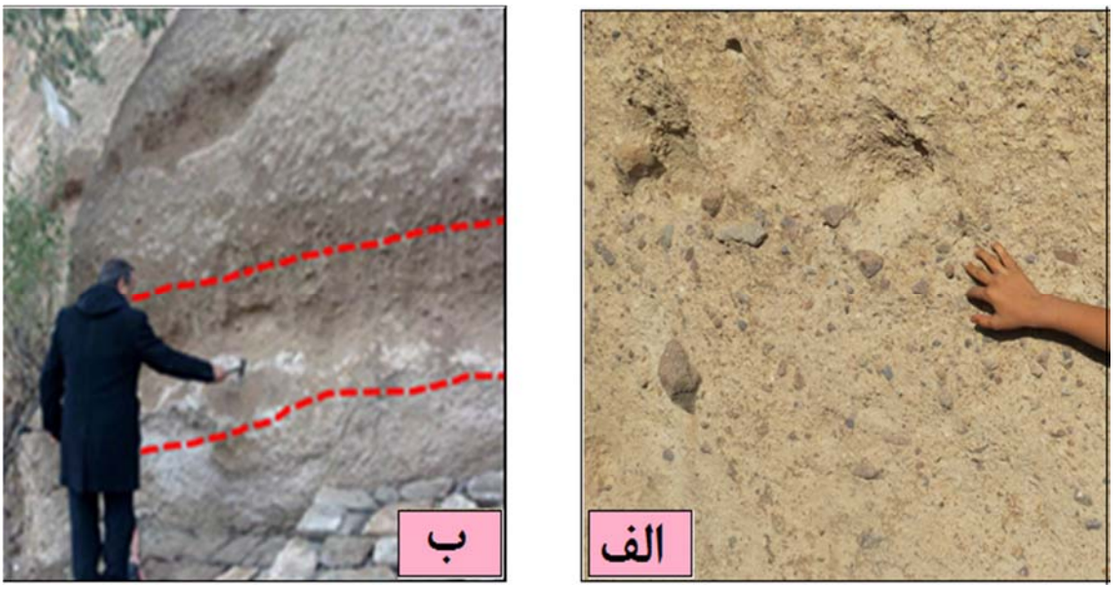
مطالعات ساختارشناسی و سنگ‌شناسی در مقیاس‌های ماکرو و میکرو از متداول‌ترین روش‌های بررسی ویژگی‌های ذاتی سنگ هستند و مواردی چون ترکیب کانی‌شناسی، منشأ، بافت - نحوه قرارگیری اجزا و کانی‌های سنگ در کنار یکدیگر، درصد کانی‌ها، ابعاد کانی‌ها، میزان هوازدگی، گونه دگرسانی و نحوه پراکندگی ریز ترک‌های سنگ و همچنین ارزیابی پتانسیل انحلال‌پذیری و زوال‌پذیری سنگ‌ها در برابر هوازدگی شیمیایی و فیزیکی را می‌توان از این روش‌ها مطالعه نمود (Dreesen et al., 2004). هر یک از این ویژگی‌ها تعیین‌کننده‌ی میزان دوام سنگ در برابر تنش-های وارده، همچون تنش‌های حرارتی، فشار روباره، فرسایش و غیره هستند.

- مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی

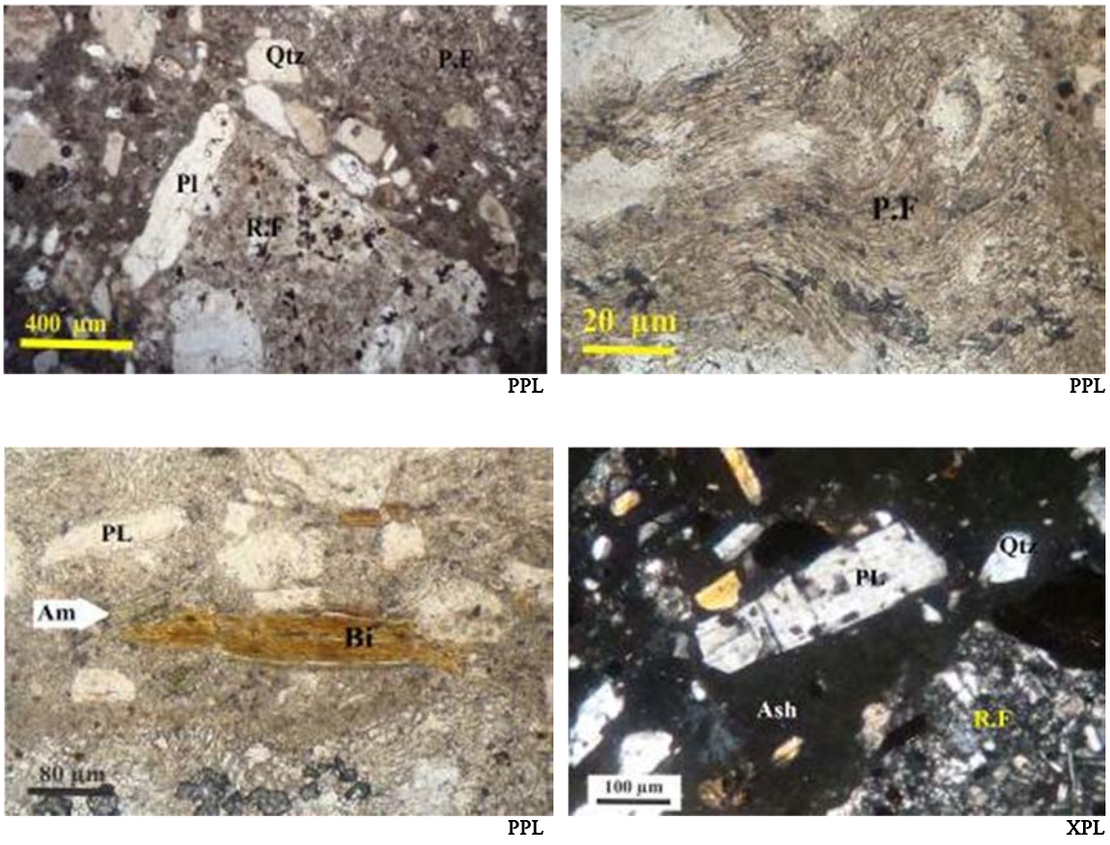
بررسی ویژگی‌های سنگ‌شناسی سنگ در معماری صخره‌ای کندوان مرحله نخست آزمایش‌ها بود که با تهیه مقطع نازک از جهات مختلف سنگ بر ۴ نمونه‌ی حاصله از بررسی‌های میدانی صورت گرفت که مقاطع فوق‌الذکر تحت نور پلاریزه مورد مطالعه قرار گرفتند (شکل‌های ۶-۷).

۵-۴- ویژگی‌های فیزیکی و دوام‌داری

آزمایشات تعیین ویژگی‌های فیزیکی و دوام‌داری این امکان را فراهم می‌کند تا عوامل ذاتی، مؤثر در میزان دوام سنگ در برابر هوازدگی و سایر عوامل مخرب تعیین شود. از آنجا که هیچ آزمایشی به تنهایی نمی‌تواند رفتار سنگ در برابر این عوامل مخرب را تشریح نماید. بنابراین ترکیبی از آزمایشات مورد استفاده قرار می‌گیرد (Fooks et al., 1982). در مطالعه حاضر ویژگی‌های

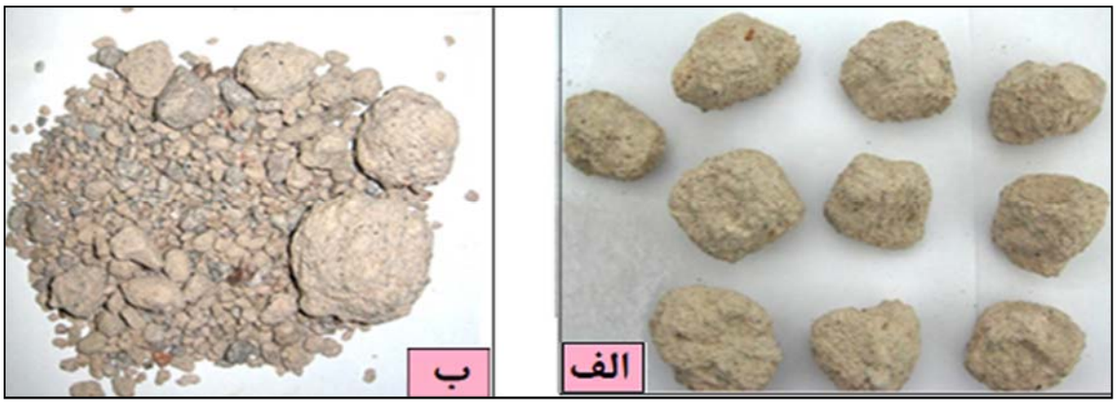


شکل ۵: الف) توده سنگ و ب) میان لایه‌های فرسایش یافته در توده سنگ روستای کندوان (ماخذ: نگارندگان ۱۳۹۲)



شکل ۶: تصاویر مقاطع میکروسکوپی از سنگ کندوان(مأخذ: نگارندگان)

P.F: قطعات پامیس؛ R.F: قطعات سنگی؛ Qtz: کوارتز؛ PL: آنورتیت (پلاژیوکلاز)؛ Bi: بیوتیت؛ Am: هورنبلند (آمفیبول)



شکل ۷: تغییرات نمونه‌ها در حین انجام آزمایش دوام‌داری. (الف) نمونه‌های اولیه و قبل از آزمایش، (ب) نمونه‌ها بعد از مرحله دوم آزمایش. (مأخذ : نگارندگان)

فیزیکی سنگ از جمله نرخ جذب آب، محتوی رطوبت طبیعی، چگالی خشک، تخلخل کل، ضریب اشباع سنگ و ویژگی‌های دوام‌داری از جمله، دوام در برابر وارفتگی، یخ زدن – ذوب شدن متوالی و تر و خشک شدن متوالی بررسی شده‌اند.

- نرخ جذب آب

به دلیل این که روش‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری سنگ در استانداردهای موجود برای قطعات سنگی تحت فشار اندازه‌گیری می‌شود و نمی‌توان نفوذپذیری سنگ را در فشار اتمسفری به دست آورد، از این روش به‌طور غیر-مستقیم برای اندازه‌گیری نرخ جذب آب اولیه (میزان آب جذب شده توسط منافذ مرتبط سنگ)، ثانویه (میزان آب جذب شده به فضاهای درون دانه‌ای سنگ) و ارتفاع زون موئینه سنگ در فشار اتمسفری استفاده شده است. اساس آزمایش محاسبه نرخ جذب آب توسط یک نمونه سنگ به واسطه افزایش وزن آن درنتیجه جذب آب به صورت تابعی از زمان است، در حالتی که فقط یک سطح از نمونه در معرض جذب آب قرار گرفته باشد. برای اندازه‌گیری این ویژگی از استاندارد ASTM D1585, 2004 استفاده شده است.

- محتوی رطوبت طبیعی

محتوی رطوبت یا محتوی آب، نسبت آب موجود در منافذ نمونه سنگ به وزن نمونه کاملاً خشک شده بر حسب درصد را گویند. رطوبت موجود در سنگ به علت برهم‌کنشی که با سطوح کانی‌های تشکیل دهنده دارد و تغییراتی که در مشخصات این سطوح و طبیعت پیوند بین آن‌ها ایجاد می‌کند، مقاومت سنگ را کاهش می-دهد. این کاهش ممکن است به سبب افزایش فشار آب موئینه[۱۲] و یا کاهش اصطکاک داخلی و چسبندگی ذرات باشد. از طرفی واکنش‌های شیمیایی که بین آب و سنگ اتفاق می‌افتد باعث تغییر فرمول شیمیایی کانی‌ها شده و اکثر این تغییرات در جهت تضعیف مقاومت سنگ عمل می‌کنند. تعیین درصد رطوبت سنگ‌ها برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی و مهندسی آن‌ها حائز اهمیت است (فهیمی‌فر و همکاران، ۱۳۸۰)، ویژگی فوق بر اساس استاندارد ISRM 1979 اندازه‌گیری شده است.

-تعیین چگالی خشک و تخلخل کل

چگالی سنگ تابعی از منافذ، درزه‌ها، شکاف‌ها و سایر فضاهای خالی موجود در سنگ است. چگالی یک نمونه مشخص سنگ، با افزایش شدت هوازدگی به خاطر افزایش درز و ترک در سنگ، تجزیه شیمیایی و تورم برخی از کانی‌ها کاهش می‌یابد. اختلاف در چگالی سنگ‌ها بیشتر مربوط به تخلخل آن‌ها است، زیرا چگالی دانه‌ای اکثر کانی‌ها نزدیک به هم است و بدین ترتیب همبستگی زیادی بین چگالی و تخلخل وجود دارد (فهیمی‌فر و همکاران، ۱۳۸۰). در اندازه‌گیری چگالی کمیت‌های مختلفی از آن مدنظر است که در

طبقه‌بندی‌های مهندسی طبق رابطه ۱ از چگالی خشک استفاده می‌شود، که چگالی خشک (ρ_d) وزن واحد حجم سنگ در حالت خشک است که در آن M_s وزن خشک نمونه‌ها و V_t حجم کل نمونه‌ها است. برای اندازه‌گیری این ویژگی از استاندارد ISRM, 1979 استفاده گردید.

$$\rho_d = M_s / V_t \qquad (۱)$$

تخلخل سنگ بستگی به شکل و توزیع ابعاد دانه‌ها، سمت‌وسوی دانه‌ها، درجه تراکم و سیمان‌شدگی دانه‌ها دارد. اگر سنگی دارای دانه‌های کروی با ابعاد مختلف باشد، تخلخل به حداقل می‌رسد. اگر تمام منافذ موجود در سنگ مدنظر باشند تخلخل کل و اگر تنها منافذی که به هم ارتباط دارند مدنظر باشند تخلخل مؤثر نامیده می‌شود. تخلخل کل نسبت حجم کل منافذ موجود در سنگ به حجم کل نمونه است. ممکن است یک سنگ تخلخل کل قابل‌ملاحظه‌ای داشته باشد درحالی‌که قابلیت گذردهی سیال آن به علت فقدان ارتباط منافذ در حد صفر باشد. تخلخل کل در حالت کلی به صورت رابطه ۲ به فرض حجم واحد برای نمونه‌ها به دست می‌آید، که در این رابطه V حجم کل نمونه سنگ، M_{sat} وزن اشباع، M_{sub} وزن غوطه‌وری نمونه و ρw چگالی آب است. برای محاسبه تخلخل کل از استاندارد ISRM, 1979 استفاده شده است.

$$V = (M_{sat} - M_{sub}) / \rho_w \qquad (۲)$$

- ضریب اشباع سنگ

ظرفیت طبیعی سنگ برای جذب آب، ضریب اشباع آن نامیده می‌شود. یک سنگ با ضریب اشباع آب بالا دوام کمتری نسبت به فرایند ذوب و انجماد متوالی دارد (Ross et al., 1991: 96). مقادیر ضریب اشباع سنگ‌ها بین ۰/۴ تا ۰/۹۵ است و اغلب سنگ‌ها ضریب اشباع بین ۰/۶۶ تا ۰/۷۷ دارند و سنگ‌هایی با ضریب اشباع بالای ۰/۸، بیش‌ترین حساسیت را به فرایند انجماد از خود نشان می‌دهند (TS 1978: 699؛ Ross et al., 1991: 96) که در حالت کلی به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود که در این رابطه W_d وزن خشک نمونه، W_c وزن اشباع نمونه در آب سرد و W_b وزن اشباع در آب جوش می‌باشد برای به دست آوردن ضریب اشباع سنگ از استاندارد TS 699, 1987 استفاده شده است.

$$S = (W_c - W_d) / (W_b - W_d) \qquad (۳)$$

- شاخص دوام وارفتگی

یکی از ویژگی‌های مهم سنگ‌ها قابلیت وارفتگی و تأثیرپذیری آن‌ها از فرایندهای هوازدگی مانند پوسته پوسته شدن، هیدراسیون، وارفتگی، انحلال، اکسیداسیون، سایش و غیره است که باعث تغییر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها شده و قابلیت باربری آن‌ها را کاهش می‌دهند (Johnson et al., 1988). حساسیت سنگ در مقابل تر و خشک شدن متوالی و تأثیرات شیمیایی آب، شاخص دوام وارفتگی است. آزمایش دوام وارفتگی روی نمونه سنگ کندوان طبق استاندارد ASTM D 4644, 2004 و در دو مرحله انجام شده است.

-دوام در برابر یخ زدن و ذوب شدن متوالی

این آزمایش به دوباره‌سازی تنش‌های ایجاد شده در سنگ به هنگام شکل‌گیری بلورهای یخ در منافذ آن توجه دارد و به‌طور کلی به وسیله تغییرات دما زیر و بالای صفر درجه سانتی‌گراد کنترل می‌شود (Topal et al., 1998). دوام در برابر یخ زدن و ذوب شدن متوالی همانند دوام تر و خشک شدن به درجه اشباع سنگ، تخلخل مؤثر سنگ، نحوه توزیع و اندازه حفرات و همچنین به دامنه تغییرات دمای محیط بستگی دارد (Chen et al., 2004 ; Winkler, 1994). این آزمایش طبق استاندارد ASTM D 5312, 2004 انجام گرفته است.

-دوام در برابر تر و خشک شدن متوالی

انبساط در برابر رطوبت معادل انبساط در ۵۰ درجه سانتی‌گراد دما است (رضازاده اردبیلی،۱۳۹۰). سنگ‌ها به دلیل جذب آب و انبساط و انقباض در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن دچار تنش‌هایی می‌شوند که باعث متلاشی‌شدن بافت سنگ و تخریب آن می‌شود که با انجام این آزمایش میزان دوام سنگ در برابر تر و خشک

شدن متوالی تخمین زده می‌شود. این آزمایش در مورد سنگ‌هایی مانند توف که ضریب بالای انبساط در برابر رطوبت را دارند، کاربرد دارد (Topal et al., 1998). برای اندازه‌گیری این ویژگی از استاندارد ASTM D 5313, 2004 استفاده شده است.

۶- نتایج

۶-۱- ساختارشناسی و سنگ‌شناسی

خانه‌های سنگی روستای کندوان در مقیاس وسیع یک لایه سنگ ضخیم آذر آواری هستند که در برخی از قسمت‌های آن میان‌لایه‌های ۱ تا ۲ متری ریزدانه‌تر از بقیه نواحی وجود دارد به دلیل انسجام بافتی کمتر این میان لایه‌ها، نسبت به بقیه بخش‌ها دچار فرسایش بیشتری گردیده‌اند (شکل ۵. الف). سنگ کندوان در نمونه دستی دارای رنگ سفید تا گِلی و جوش‌خوردگی بسیار ضعیف است، که از به هم جوش خوردگی قطعات پامیس، خرده‌سنگ (با رنگ‌ها و بافت‌های مختلف)، کانی‌های مجزا و خمیره ریزدانه (متشکل از همین مواد در اندازه خاکستر) تشکیل شده است، به نحوی که در نمونه دستی آن جهت‌یافتگی مشخصی قابل تشخیص نیست (شکل ۵. ب).

۶-۲- مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی

مطالعه مقاطع نازک نمونه‌های خانه‌های سنگی کندوان حاکی از آن است که سنگ کندوان دارای ساختاری ناهمگن بوده و مطابق با نمونه‌های دستی از قطعات سنگی سخت، پامیس بسیار متخلخل، تک کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز نوع آنورتیت و آمفیبول نوع هورنبلند هستند و به مقدار خیلی کمتر کانی‌های اپک (غیر سیلیکات)، بیوتیت و پیروکسن تشکیل شده است که مجموعه این اجزا با سیمان سست و ریزدانه‌ای که غالباً حاوی شیشه، کوارتز و پلاژیوکلاز است، در کنار هم قرار گرفته‌اند (شکل ۶).

هورنبلندها دارای انکلوزیون‌هایی[13] از کانی‌های اپک هستند، در برخی آنورتیت‌ها نیز این کانی‌های اپک دیده می‌شود که سبب بافت غربالی[14] آن‌ها گردیده است. توده سنگ کندوان دارای بافت اتاکسی[15] و فاقد جهت یافتگی، لایه‌بندی مشخص، کانی‌های رسی، دگرسانی کانی‌ها و ریزترک‌ها عواملی مهم در تضعیف ساختار است و اجزای تشکیل‌دهنده آن به دلیل آواری بودن، سنگِ خرد شده هستند. در نمونه دستی و مقاطع میکروسکوپی می‌توان طیف وسیعی از اندازه دانه‌ها از میکرون تا سانتی‌متر را مشاهده نمود که بر اساس طبقه-بندی‌های جرام[16] (2001) و پتی‌جان[17] (1987) سنگ کندوان دارای جورشدگی ضعیف، دانه‌هایی گردشده و با کرویت بالا دارند.

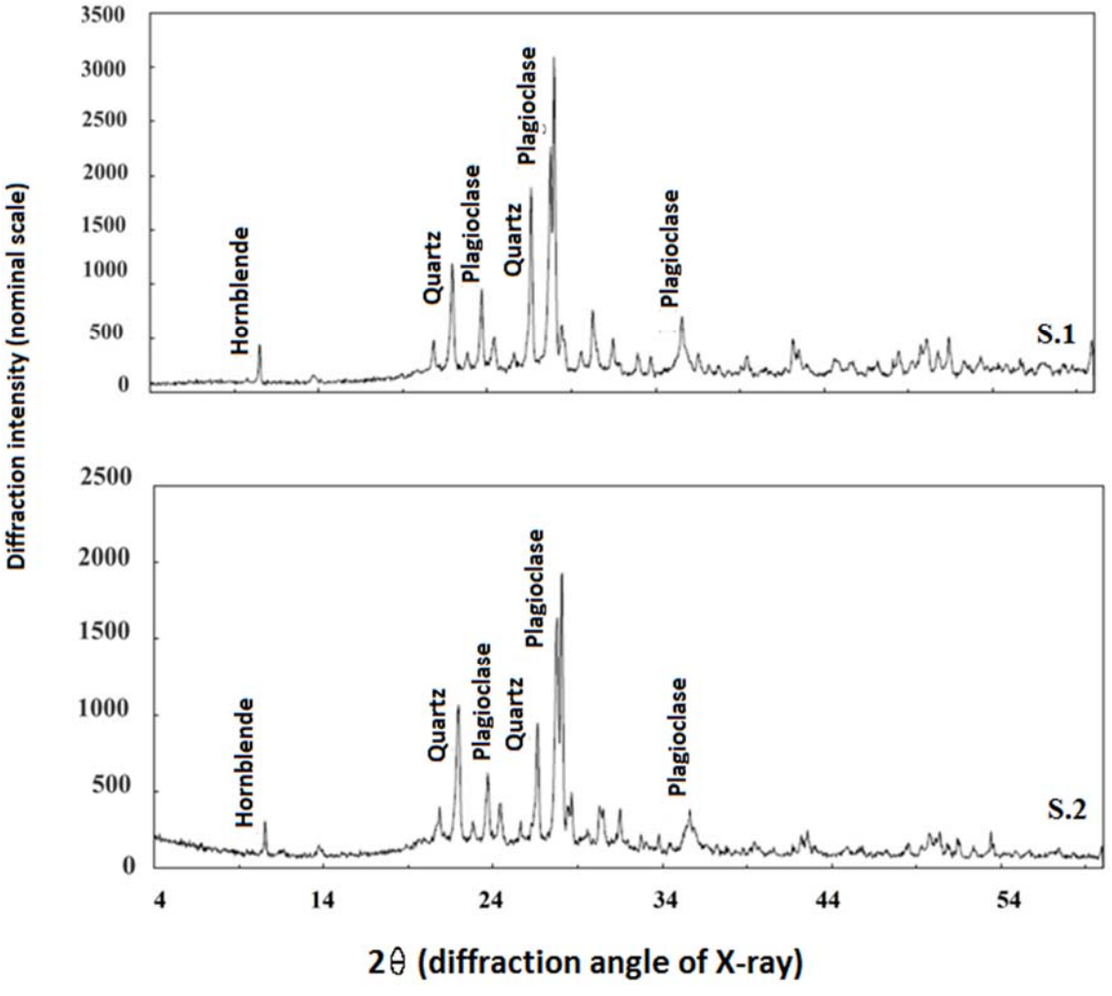
۶-۳- آنالیز پراش پرتو ایکس

نتایج فازهای شناسایی شده توسط آنالیز XRD در هر ۲ نمونه سالم نشان دهنده فازهای اصلی: پلاژیوکلاز نوع آنورتیت و کوارتز در کنار فازهای فرعی آمفیبول نوع هورنبلند و مواد آمورف (شیشه و خاکستر) است (جدول ۲. نمودار-۱). آنورتیت کانی سنگ‌سازی در سنگ‌های آذرین در واقع یک فلدسپار پلاژیوکلاز و مستعد هوازدگی است (کلاین و هارلبوت، ۱۳۸۵: ۵۹۴) به صورتی که در اثر فرایند کائولینیزه شدن[18] به ذرات ریز کائولینیت یا رس تبدیل می‌شوند، در نتیجه این عمل عناصر قلیایی موجود در فلدسپار تبدیل به نمک‌های محلول شده و از محیط خارج می‌شوند (پیشلر و ریگراف،۱۳۷۴: ۲۸۳). کوارتز از جمله کانی‌های معمول در سنگ‌های آذرین و کانی مقاومی در مقابل هوازدگی است.

ترکیب شیمیایی هورنبلند به عنوان یک کانی سنگ ساز نیز در اثر هوازدگی شیمیایی تغییر می‌کند(معزر لسکو و شریفیان عطار،۱۳۸۰: ۸۲) به صورتی که در مراحل انتهایی فرایندهای هوازدگی، کانی‌های رسی از آن برجای می‌ماند (پیشلر و ریگراف،۱۳۷۴: ۲۱۳). سنگ کندوان با توجه به قابلیت هوازدگی شیمیایی و تبدیل کانی‌های چون آنورتیت و هورنبلند به کانی‌های رسی مستعد تخریب بالاست چراکه کانی‌های رسی انرژی پیوند پایین دارند، به راحتی تحت تأثیر فرسایش فیزیکی

جدول.۲ نتایج داده‌های فاز شناسی پراش اشعه ایکس سنگ کندوان

نمونه	فاز(ها)	نام کانی	فرمول	PDF Number
S.1	Major Phase(s)	Anorthite	$(Ca,Na)(SiAl)_4O_8$	18-1220
		Quartz	SiO_2	33-1161
	Minor Phase(s)	Hornblende	$Ca_2(Fe.Mg)_4Al(Si_7Al)O_{22},(OH)_2$	45-1371
		Amorphous	–	–
S.2	Major Phase(s)	Anorthite	$(Ca,Na)(SiAl)_4O_8$	18-1220
		Quartz	SiO_2	33-1161
	Minor Phase(s)	Hornblende	$Ca_2(Fe.Mg)_4Al(Si_7Al)O_{22},(OH)_2$	45-1371
		Amorphous	–	–



نمودار ۱: نمودارهای آنالیز (XRD) سنگ سالم ایگنیمبریت خانه‌های صخره‌ای روستای کندوان

مثل آب‌های جاری قرار گرفته و از بستر جدا شده و موجب سنگ تخریب می‌گردند (Garcia-Vallés et al., 2003).

با توجه به مطالعات ساختار شناسی و سنگ‌شناسی انجام گرفته و طبقه‌بندی‌های سنگ‌های آذر آواری، سنگ خانه‌های روستای کندوان لاپیلی توف و لیتیک توف نام‌گذاری می‌شوند (Pettijohn, 1975: Fisher, 1966). علاوه بر این‌ها اولیور (1954) برای نام‌گذاری

نهشته‌های لاپیلی توف با بافت اتاکسی از اصطلاح ایگنیمبریت استفاده کرده است و برانی و همکاران (2002) نیز لاپیلی توف و لیتیک توف را به عنوان مهم‌ترین رخساره‌های ایگنیمبریتی معرفی نموده‌اند. بنابراین لاپیلی توف‌ها و لیتیک توف‌ها را می‌توان ایگنیمبریت نامید، همچنین با توجه به جوش خوردگی ضعیف سنگ اصطلاح ایگنیمبریت جوش نخورده بهترین نام برای سنگ کندوان خواهد بود.

۶-۴- ویژگی‌ها فیزیکی و دوام‌داری

نتایج حاصل از انجام آزمایشات ویژگی‌های فیزیکی و دوام‌داری در جدول ۳ آورده شده است. انجام مطالعات فیزیکی و دوام‌داری امکان بررسی کیفی سنگ را بر اساس طبقه بندی های مختلف فراهم نموده است که نتایج در جدول ۴ بیان شده است.

بر اساس این طبقه‌بندی‌ها، سنگ کندوان دارای چگالی بسیار پایین، تخلخل بسیار بالا و دوام پایینی در برابر فرایندهای هوازدگی و فرسایش است. تصویر ۷ روند تغییرات نمونه‌های سنگ را طی دو مرحله آزمایش دوام وارفتگی نشان می‌دهد.

ویژگی‌های سنگ‌شناسی، فیزیکی و دوام‌داری خاص سنگ کندوان سبب شده که این سنگ در اثر عوامل فرساینده و چرخه‌های یخ زدن – ذوب شدن و تر – خشک شدن متوالی ناشی از تغییرات آب‌وهوایی روزانه و فصلی دچار هوازدگی و تخریب شود که این فرآیند هوازدگی و تخریب موجب پدید آمدن الگوهایی تخریبی شناخته شده‌ای همچون: فرسایش‌های نامنظم[19]، تورق و فروپاشی دانه‌ای[20] سنگ، گردیده است (شکل‌های ۸ و ۹).

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

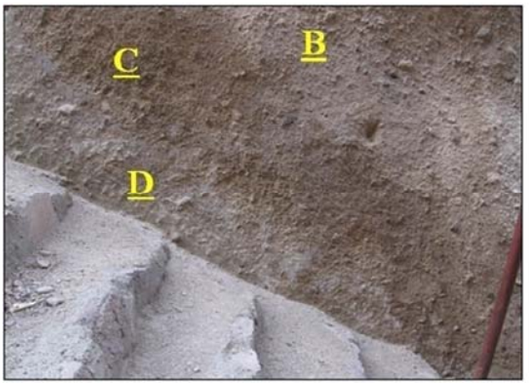
این تحقیق با هدف شناخت عوامل مؤثر در تخریب سنگ‌های ایگنیمبریتی در معماری صخره‌ای کندوان با تأکید بر نقش عیوب ذاتی سنگ به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل تأثیرگذار در فرآیند هوازدگی و

جدول ۳- نتایج حاصل از انجام آزمایشات ویژگی‌های فیزیکی و دوام‌داری توده سنگ کندوان(ماخذ: نگارندگان)

کمیت	روش آزمایش	مقدار	واحد
نرخ جذب آب اولیه	ASTM D1585, 2004	۰/۳۰	$mm/\sqrt{S}$
نرخ جذب ثانویه	ASTM D1585, 2004	۰/۰۱	$mm/\sqrt{S}$
محتوی رطوبت طبیعی	ISRM, 1979	۱۰ تا ۱۲	%
چگالی خشک	ISRM, 1979	۱/۵۰	gr/cm^3
تخلخل کل	ISRM, 1981	۴۵ – ۵۰	%
ضریب اشباع سنگ	TS 699, 1987	> ۰/۸	بدون واحد
دوام وارفتگی مرحله اول	ASTM D 4644, 2004	۴۱	%
دوام وارفتگی مرحله دوم	ASTM D 4644, 2004	۷۲	%
دوام یخ زدن و ذوب شدن متوالی	ASTM D 5312, 2004	۶۲ تا ۶۴	%
دوام تر و خشک شدن متوالی	ASTM D 5313, 2004	۲	%

جدول ۴- وضعیت کیفی سنگ کندوان براساس طبقه‌بندی‌های مختلف (ماخذ: نگارندگان)

کمیت	طبقه‌بندی‌ها	توصیف
چگالی خشک	Anon, 1979	بسیار پایین
تخلخل کل	Anon, 1979	بسیار بالا
ضریب اشباع	TS 699, 1987	حساسیت بالا در برابر انجماد
شاخص دوام وارفتگی مرحله اول	Franklin and Chandra, 1972	ضعیف
شاخص دوام وارفتگی مرحله دوم	Gamble, 1971	ضعیف



شکل‌های ۸ و ۹: برخی گونه‌های شاخص آسیب سنگ در معماری صخره‌ای کندوان. A) تورق شدید با بیش از ۵ سانتی‌متر جدایش از بستر اصلی. B) از دست رفتن زمینه .C) تغییر رنگ و تاول D) جدایش دانه‌ای (مأخذ: نگارندگان ۱۳۹۲).

همچنین حفاظت خانه‌های سنگی انجام شده است. خواص سنگ ایگنیمبریت و ویژگی‌های اقلیمی موجود در دامنه سهند حاکی از آن است که در کنار عوامل محیطی، عیوب ذاتی سنگ نقش اساسی در توسعه تخریب دارند به نحوی که بیش از آنکه تخریب سنگ کندوان به شرایط محیطی ارتباط یابد، مربوط به ساختار و ساختمان سنگ ایگنیمبریت است.

۱- نتایج بررسی‌های هواشناسی منطقه حاکی از آن است که متوسط چرخه تر و خشک شدن سالانه ۲۸ دفعه و ۱۴ چرخه ذوب و انجماد سنگ در منطقه روی می‌دهد و در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، آبان و آذرماه به‌طور متوسط با ۱۰ چرخه تر و خشک شدن و بهمن‌ماه با ۷ چرخه ذوب و انجماد باعث رخداد بیش‌ترین تأثیر مخرب فیزیکی بر خانه‌های سنگی روستا می‌شوند. لازم به ذکر است که به علت دمای کم روستا – متوسط ۷/۵ درجه سانتی‌گراد در طی سال – فرآیند خیس ماندن سطوح و ایجاد بستر مناسب برای رشد آفات زیستی و هوازدگی شیمیایی و تخریب سطحی در تمام طول سال فراهم است.

۲- مطالعات ساختار شناسی سنگ کندوان نشان می‌دهند. که به سبب بافت ناهمگن سنگ و حضور درصد بالایی از اجزای مستعد هوازدگی شیمیایی همچون آنورتیت و هورنبلند و همچنین میزان جورشدگی کم اجزا سنگ و گردشدگی نسبتاً خوب و کرویت بالای اجزای تشکیل‌دهنده آن، سنگ ایگنیمبریت کندوان از لحاظ ویژگی‌های سنگ‌شناسی، سنگی ضعیف و مستعد هوازدگی شیمیایی محسوب می‌گردد.

۳- نتایج حاصله از آزمایشات فیزیکی نشان می‌دهند سنگ ایگنیمبریت کندوان بر اساس تقسیم‌بندی‌های مختلف از ضعیف تا خیلی ضعیف ارزیابی می‌گردد، چگالی خشک آن بسیار پایین و تخلخل کلی‌اش بسیار بالاست. این میزان تخلخل بالای سنگ، ظرفیت طبیعی سنگ برای جذب نزولات جوی و رطوبت صعودی را افزایش می‌دهد که به دنبال آن تخریب و فرسودگی سنگ نیز افزایش می‌یابد.

۴- روش‌های ارزیابی دوام‌داری حاکی از آن است که این سنگ دارای شاخص دوام وارفتگی ضعیف بوده و حساسیت بسیار بالایی در برابر انجماد دارد به‌نحوی که چرخه‌های تر – خشک شدن و یخ زدن – ذوب شدن بر تخریب ساختار درونی سنگ تأثیر محسوسی دارند و باعث متلاشی شدن و تخریب آن می‌گردند. چرخه‌های فوق‌الذکر بروز آسیب‌های متفاوتی بسته به ارتفاع رطوبت صعودی و نزولی می‌شوند. در همین راستا عمده تخریب‌هایی که به‌صورت پودری شدن و جدایش دانه‌ای بروز می‌کنند، در ارتفاعات پایین و نزدیک به زمین بوده و در ارتفاعات بالا با آسیب تورق شدید و جدایش قطعات بزرگ سنگ مواجه هستیم، که این امر حساست سنگ خانه‌های کندوان را خصوصاً نسبت به تغییرات فازی آب نشان می‌دهد.

۵- امکان کاهش تخریب و زوال در سازه‌های

صخره‌ای روستای کندوان به واسطه حساسیت بسیار زیاد آن‌ها به آب و در پی آن یخزدگی و انجماد می‌تواند با کاهش و کنترل رطوبت صعودی در کنار محافظت از سطوح بیرونی در مقابل عوامل جوی حاصل شود. اما تابه‌حال اقدام درمان صحیحی بر سطوح بیرونی خانه‌های سنگی روستای کندوان صورت نگرفته است و اقدامات روستاییان از قبیل استفاده از بتن و سیمان برای حفاظت سطوح بیشتر موجب تخریب گردیده، بایستی مطالعات آینده بر ارائه راهکار حفاظتی مناسب و بدون نسخه‌برداری از نمونه‌های خارجی صورت گیرد، زیرا شرایط اقلیمی و محیط قرارگیری کندوان در کنار استفاده مسکونی و سکونت دائمی آن باعث بروز آسیب‌های متفاوتی نسبت به مناطق دیگر همچون کاپادوکیه در ترکیه گردیده است.

۵- خواص ذاتی ضعیف توف کندوان در کنار هوازدگی فیزیکی و چرخه‌های فوق‌الذکر باعث افزایش تخلخل در سطوح بیرونی خانه‌های سنگی می‌گردد و این افزایش تخلخل استعداد تخریب در برابر عوامل طبیعی همچون آفات زیستی و به خصوص گلسنگ‌ها که خود نیز تشدیدکننده آن هستند، را بالا خواهد برد. با این حال باید توجه داشت که این تخلخل سطحی می‌تواند عمق نفوذ استحکام بخش‌ها و عوامل ضد آب کننده را افزایش دهد که این ویژگی دوبعدی بایستی مورد توجه حفاظت گران قرار گیرد.

۶- با توجه به موارد ذکر شده به نظر می‌رسد، برنامه کلان مدیریت روستای کندوان در بخش حفاظت و مرمت خانه‌های سنگی بایست بر چند موضوع اساسی از قبیل : تعیین اولویت‌های حفاظت سطحی و سازه‌ای، برآورد عمق و شدت هوازدگی در سطوح بیرونی، ارزیابی و انتخاب روش‌های درمانی پیشگیرانه و حفاظتی متمرکز گردد که در این زمینه توجه به نقش عیوب ذاتی سنگ برای ارائه‌ی راهکارهای حفاظتی پایدار از اهمیت زیادی برخوردار است.

سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از مهندس سعید مهریار، آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشکده علوم طبیعی، شرکت پژوهش عمران راهور، آزمایشگاه مکانیک خاک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز به سبب مساعدت در مطالعات سپاسگزاری نمایند.

پی‌نوشت‌ها

1. Decay
2. Weathering
3. Rock-Cut Architecture
4. Diagnostic
5. Durability
6. Inherent Vice
7. Ignimbrite
8. Local Climate
9. Emberger
10. Thin Section Petrography
11. X-ray diffraction
12. Capillary
13. Inclusion
14. Sieve
15. Ataxia
16. Jerram
17. Pettijohn
18. Kaolinisation
19. Differential Erosion
20. Granular disintegration

منابع فارسی

آقانباتی، سید علی.(۱۳۸۳). زمین‌شناسی و توان معدنی استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل. جغرافیا. رشد آموزش زمین‌شناسی، (۳۹)، ۱۴ – ۲۳.

اکبری، سعید و بمانیان، محمدرضا.(۱۳۸۷). اکوتوریسم روستایی و نقش آن در توسعه پایدار روستای کندوان. روستا و توسعه، س.۱۱، (۱)، ۱۳۱ – ۱۵۰.

امینی بیرامی، فریده.(۱۳۹۲). بررسی عوامل زیست محیطی مخرب بر خانه‌های سنگی- مخروطی شکل روستای گردشگری کندوان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.

پیشلر، هانس وکورنیلا اشمیت ریگراف.(۱۳۷۴). کانی‌های سنگ‌ساز در مقطع نازک. ترجمه فریدون مهرابی. شیراز: دانشگاه شیراز [مرجع اصلی ۱۹۹۳].

پیرمحمدی، فرهاد.(۱۳۹۰). پترولوژی، ژئوشیمی و پتروژنز سنگ‌های آتشفشانی شرق و جنوب شرق آتشفشان سهند با

نگرشی ویژه بر سنگ‌های آذر آواری. رساله دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.

خداوردیزاده، محمد. حیاتی، باب اله و کاووسی کلاشمی، محمد.(۱۳۷۸). برآورد ارزش تفرجی روستای تاریخی کندوان آذربایجان شرقی با استفاده از روش ارزش گذاری مشروط. علوم محیطی، س.۵، (۴)، ۴۳-۵۲.

رازانی، مهدی، سید محمدامین امامی، علی‌رضا باغبانان، خوزه دلگادو رودریگوئز.(۱۳۹۳). لزوم به‌کارگیری مطالعات مکانیسم تخریب سنگ در سازه‌های دستکند روستای کندوان برای ارائه راهکار حفاظتی مناسب، مجموعه مقالات نشست تخصصی کاربرد علم باستان‌سنجی در مرمت آثار و بناهای تاریخی، اردیبهشت ۱۳۹۳. تبریز: دانشگاه هنر اسلامی تبریز.

رضازاده اردبیلی، مجتبی.(۱۳۹۰). مرمت آثار معماری، شناخت، آسیب‌شناسی، فن‌شناسی، چ،۱. تهران: دانشگاه تهران.

رضوانی، عبدالصمد.(۱۳۸۶). کندوان (هنر انطباق انسان با طبیعت). رشد آموزش جغرافیا، دوره۲، (۲۱)، ۴۸- ۵۵.

خدابنده، علی‌اکبر و امینی فضل، عباس.(۱۳۷۴). نقشه زمین-شناسی ۰۰۰ ۱۰۰ ۱:۱ اسکو، تهران: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

سازمان میراث فرهنگی استان آذربایجان شرقی.(۱۳۷۳). مردم‌شناسی روستای کندوان.طرح پژوهشی، مرکز اسناد میراث فرهنگی سازمان میراث فرهنگی و صنایع‌دستی و گردشگری استان آذربایجان شرقی.

علیزاده، امین.(۱۳۸۸). اصول هیدرولوژی کاربردی، مشهد: دانشگاه امام رضا (ع) آستان قدس رضوی.

غیوری خسرقی، ناصر.(۱۳۸۱). مطالعه چینه‌شناسی، پتروگرافی و ژئوشیمیایی افق‌های ایگنیمبریتی سهند، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم تهران.

فهیمی‌فر، احمد و سروش، حامد. (۱۳۸۰). آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها، جلد اول، آزمون‌های آزمایشگاهی تهران : دانشگاه امیرکبیر.

قرائی مقدم، امان‌الله.(۱۳۷۸). معماری صخره‌ای. هنر نامه معماری و شهرسازی، (۴)، ۱۰۸-۱۲۳.

کرمی، فریبا.(۱۳۸۶). توانمندی‌های ژئوتوریسم در توسعه روستای کندوان، جغرافیا و فضای جغرافیایی، س. ۷، (۲۰)، ۱۱۵-۱۳۰.

کلاین،کرنلیس و هارلبوت،کرنلیوس اس.(۱۳۸۵). راهنمای کانی‌شناسی.جلد ۲. مترجمان: فرید مر و سروش مدبری. تهران: مرکز نشر دانشگاهی.

گرجی مهلبانی، یوسف و سنائی، المیرا.(۱۳۸۹). معماری همساز با اقلیم روستای کندوان. مسکن و محیط روستا، س.۲۹، (۱۲۹)، ۲-۱۹.

مجتهدزاده، غلامحسین.(۱۳۵۳). دهکده‌ی صخره‌ای کندوان. هنر و معماری، سال ۴، (۱۲-۱۴)، ۱۰۴-۱۴۹.

معزر لسکو، ضرغام و شریفیان عطار، سروش، (۱۳۸۰). کانی‌شناسی نوری. مشهد: واژگان خرد.

معین‌وزیری، حسین و علی احمدی. (۱۳۸۳)، پتروگرافی و پترولوژی سنگ‌های آذرین. تهران: دانشگاه تربیت معلم.

معین‌وزیری، حسین.(۱۳۷۷). دیباچه‌ای بر ماگماتیسم در ایران. تهران: دانشگاه تربیت معلم.

مقیمی اسکویی، حمیدرضا(۱۳۹۰). اسکو زیبای خفته در دانه سهند تا دریاچه ارومیه با تأکید بر جاذبه‌های گردشگری کندوان، تبریز: هنر اول.

پدیده صامت. مهندسین مشاور.(۱۳۸۷).ساماندهی و حفاظت از روستاهای با ارزش روستای تاریخی کندوان، کارفرما: سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان آذربایجان شرقی.

همایون. غلامعلی .(۱۳۵۶). روستای تاریخی کندوان. مجله بررسی‌های تاریخی، سال ۱۲، (۱)، ۱۵۷-۲۱۶.

منابع لاتین

Anon. (1979). Classification of rocks and soils for engineering geological mapping, part. 1 Rocks and soils material. Bulletin International Association Engineering Geology, No. 19, 71-364.

ASTM. (2004). *Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control under Freezing & Thawing Conditions (D5312).* Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04. 08, 894 - 998.

ASTM. (2004). *Standard Test Method for Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control under Wetting & Drying Conditions (D5313).* Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04. 08, 890 - 893.

ASTM (2004). *Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks (D 4644). Annual Book of ASTM Stand ards, Vol. 04. 08.*

ASTM. (2004). *Standard Test Method for Measurement Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes (D 1585).* Annual Book of

ASTM Standards, Vol. 04. 08, 948-955.

ASTM. (2009). *Standard Guide for Petrographic Examination of Dimension Stone (C 1721).* Book of Standards, Volume: 04. 07.

Branney, M. J. Kokelaar, B. P. (2002). Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites. London, Geological Society of London.

Chen, T. C. Yeung, M. R & Mori, N. (2004). *Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action*. Cold Regions Science and Technology, 38 (2), 127-136.

Doehne, E & Price, C. A. (2010). Stone conservation: an overview of current research. Getty Publications.

Dreesen, R. & Dusar, M. (2004). *Historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium): role of petrography in provenance and durability assessment*. Materials Characterization, 56, 273-287

Emberger, L. (1930). La vegetation de la region mediterraneenne, Essai d'une classification des groupments vegetaux. Rev. Gen. Bot. 42: 641-662, 705-721.

Fisher, R. V. (1966) Mechanism of deposition from Pyroclastic flows. Amer. J. Sci. 264, 350-363.

Fookes, P. G. Gourley, C. S & Ihikere, C. (1982). *Rock Weathering in engineering time*. Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 21, 33-57.

Franklin, J. A. & Chandra, R. (1972). The slake durability index, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci, 9, 325-342.

Garcia-Vallés, M, Topal, T. Vendrell-Saz, M. (2003). *Lithenic growth as a factor in the physical deterioration or protection of Cappadocia monuments*. Environmental Geology 43, 776-781.

Google Earth., (2013). "Kandovan," 609968. 47 m E and 4183852. 93 m N. Google Earth. January 9, 2013. January 18, 2014

International Society for Rock Mechanics. (1979). *Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Absorption and related properties and swelling and slake–durability*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36, 139-153.

Jerram, D. A. (2001). *Visual comparators for degree of grain-size sorting in two and three-dimension*. Computers and Geosciences, 27, 485 - 489.

Johnson, R. B & Degraff, J. V. (1988). Principles of Engineering Geology, John Wiley and Sons, USA, 497 Pp.

Oliver, R. L. (1954). *Welded tuffs in the Borrowdale Volcanic Series, English Lake District, with a note on similar rocks in Wales*. Geological Magazine, 91: 473 - 83.

Pettijohn, F. J. (1975). Sedimentry Rocks, Harper & Row. New York.

Rodriguez, J. D. (2007). *Conservation of stone monuments. from diagnostic to practice*. Minbar Al Jamiaa n 7, Actes de la RIPAM (2005), Meknès, Maroc, pp. 287-295.

Ross, K., Hart, D., & Butlin, R. N. (1991). Durability tests for natural building stone. In *Durability of building materials and components. Proceedings of the Fifth International Conference held in Brighton, UK, 7-9 November 1990* (pp. 97-111). Chapman and Hall Ltd.; E. &FN Spon Ltd.

Topal, T. & Doyuran, V. (1998). *Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff, Turkey*. Environmental Geology, 34 (1), 5-20.

TS699. (1987). Tabii Yapi Tas lari - Muayene ve Deney metodlari, (Methods of testing for natural building stones) Turk Standartları Enstitusu, Ankara (in Turkish).

Verges-Belmin, V., ed. (2008). Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns. English-French ed. Paris: ICOMOS & ISCS (International Scientific Committee for Stone).

Winkler, E. M. (1994). Stone in Architecture: Properties, Durability. 3rd ed. Berlin and NY: Springer-Verlag.