ارزیابی هوازدگی و فرسایش سنگ‌های آذرآواری مخروطی شکل روستای کندوان

فریده امینی بیرامی، ابراهیم اصغری کلجاهی*؛
دانشگاه تبریز، گروه زمین‌شناسی
مسعود حاجی‌علیلوی بناب؛ دانشگاه تبریز، دانشکده عمران

تاریخ: دریافت ۹۲/٦/۲ **پذیرش** ۹۲/۱۲/۱۹

چکیده

روستای کندوان از مناطق گردشگری استان آذربایجان شرقی است که خانه‌های روستایی آن صدها سال پیش در داخل سنگ‌های آذرآواری مخروطی شکل موسوم به کِران حفاری شده‌اند. در مقاله حاضر بر اساس پژوهش‌های صحرایی و آزمایشگاهی به بررسی نقش ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌های آذرآواری کندوان در هوازدگی، فرسایش و تخریب آن‌ها پرداخته شده است. سنگ‌های آذرآواری کندوان به‌دلیل داشتن درصد زیادی از کانی‌های پلاژیوکلاز و قطعات پامیس با مقاومت کم، جوش‌خوردگی و جورشدگی اندک سنگ و کرویت و گردشدگی زیاد اجزای تشکیل‌دهندهٔ آن‌ها، مقاومت کمی در برابر عوامل هوازدگی و فرسایش دارند. اگر چه هوازدگی و فرسایش در امتداد درز و شکستگی‌های موجود در سنگ‌ها مهم‌ترین عامل به‌وجود آمدن شکل‌های مخروطی در کندوان است، اما ادامهٔ این فرآیند موجب تخریب و نابودی سنگ‌ها می‌شود. تخلخل زیاد سنگ‌ها این امکان را فراهم کرده است که آن‌ها ظرفیت جذب آب زیادی داشته باشند. درصد جذب زیاد آب، حساسیت سنگ‌ها در برابر انبساط و انقباض ناشی از تر- خشک شدن و ذوب- انجماد متوالی را افزایش داده است و سختی و استحکام درونی اندک آن‌ها، باعث شده که بافت سنگ‌ها در اثر عوامل محیطی هوازده شده و متلاشی گردد. هم‌چنین بافت سست سنگ‌های آذرآواری مذکور باعث فرسایش نسبتاً سریع آن‌ها در اثر بارندگی و جریان آب‌های سطحی و باد شده است.

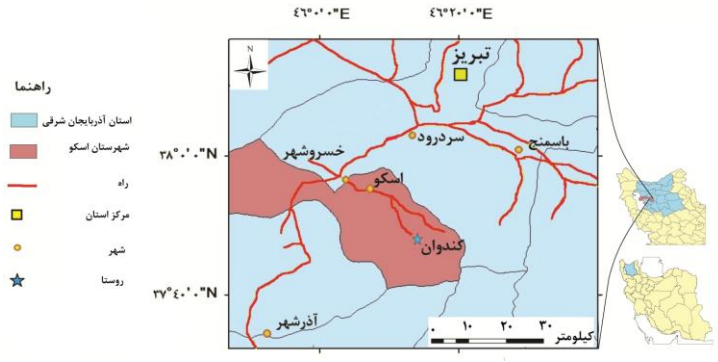
واژه‌های کلیدی: روستای کندوان، فرسایش، هوازدگی، سنگ‌های آذرآواری

* **نویسندهٔ مسئول** e-asghari@tabrizu.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

مقدمه

سنگ‌ها نخستین مواد تمدن‌سازند، که از آن‌ها در ساخت آثار مختلف تاریخی مانند کاخ و قلعه پادشاهان، نیایش‌گاه‌ها و عبادت‌گاه‌ها، مجسمه‌ها، سنگ نوشته‌ها، سنگ قبرها و غیره استفاده شده است. در مواردی نیز بشر با حفاری شکل‌ها و توده‌های سنگی در یک منطقه به‌منظور سکونت باعث شکل‌گیری اولین تمدن‌ها در آن منطقه شده است، مانند روستای گورمه[۱] در ترکیه، داکوتا[۲] در آمریکا، میمند در استان کرمان و روستای کندوان در استان آذربایجان‌شرقی که از این میان سنگ‌های مخروطی شکل روستای کندوان از مناطق گردشگری شمال‌غرب کشور محسوب می‌شوند که در اثر هوازدگی و فرسایش رسوبات آذرآواری (ایگنیمبریت) آتشفشان سهند شکل‌گرفته‌اند. روستائیان در گذشته داخل آن‌ها را به‌منظور سکونت حفاری کرده به‌صورتی که هم‌اکنون نیز سکونت ادامه دارد. این روستا با مختصات جغرافیایی "٤٠ و ' ٤٧ و ٣٧ درجهٔ شمالی و "٤٠ و ' ١٥ و ٤٦ درجهٔ شرقی در ٦٥ کیلومتری شهر تبریز قرار دارد (شکل ۱). این منطقه از نظر زمین‌شناسی در زون البرز غربی – آذربایجان واقع شده است [۱].



شکل ۱. نقشهٔ موقعیت روستای کندوان

طی بررسی‌های صحرایی اولیه مشخص شد که سنگ‌های مخروطی شکل این روستای تاریخی و گردشگری بافت سستی داشته و تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند هوازدگی، فرسایش، رشد گیاهان و غیره در حال تخریب هستند که در سال‌های اخیر به‌دلیل رشد گردشگری و فعالیت‌های غیراصولی اهالی، تخریب‌ها روند رو به رشدی پیدا کرده‌اند. تعدادی

۱. Goreme ۲. Dakota

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

از مخروط‌های سنگی تخریب شده و یا حفره‌های متعددی در سطح آن‌ها پدیدار شده است. در بخش‌هایی نیز سطوح سنگی در حال پوسته پوسته شدن و ریزش هستند. از این رو، پژوهش حاضر با استفاده از بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی به شناخت نقش ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی تودهٔ سنگ کندوان شامل ویژگی‌های سنگ‌شناسی، سیستم درز و شکستگی، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی در میزان و شدت هوازدگی، فرسایش و تخریب آن پرداخته است.

بررسی‌های مشابهی بر روی سنگ‌های روستای گورمه- آنتالیای مرکزی (ترکیه)- انجام گرفته است. سنگ‌های مخروطی شکل روستای گورمه به‌دلیل فرسایش واحدهای آذرآواری (توف) موجود در منطقه در امتداد سیستم درز و شکستگی حاکم بر آن شکل گرفته‌اند و بعدها درون آن‌ها به‌منظور سکونت حفاری شده‌اند [۲]. این سنگ‌ها تحت تأثیر عوامل جوی در معرض هوازدگی و فرسایش قرار داشته و به‌تدریج در حال تخریبند، از این رو، پژوهش‌های متعددی برای بررسی نقش ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی این سنگ‌ها از جمله ویژگی‌های فیزیکی، سیستم درزه و شکستگی [۳]، ویژگی‌های سنگ‌شناسی [٤] و ویژگی‌های‌دوام‌داری سنگ‌ها در برابر تر و خشک شدن، ذوب و انجماد متوالی و تبلور نمک [۵] و [٦] انجام گرفته است.

بررسی‌های مشابهی نیز به‌همین منظور بر روی سایر بناهای سنگی تاریخی ایران و جهان انجام گرفته است [۷] ، [۸] ،[۹]، [۱۰] ،[۱۱]، [۱۲]، [۱۳]. هر چند روستای کندوان نیز به صورت موردی و از جنبه‌های معماری صخره‌ای [١٤]، [۱۵] زمین‌شناسی و جغرافیای طبیعی [١٦] و [۱۷]، گردش‌گری و اکوتوریسم [۱۸]، ژئوتوریسم [۱۵] و [۱۹] و غیره بررسی شده اما تاکنون بررسی‌های مشابهی در این منطقه انجام نگرفته است.

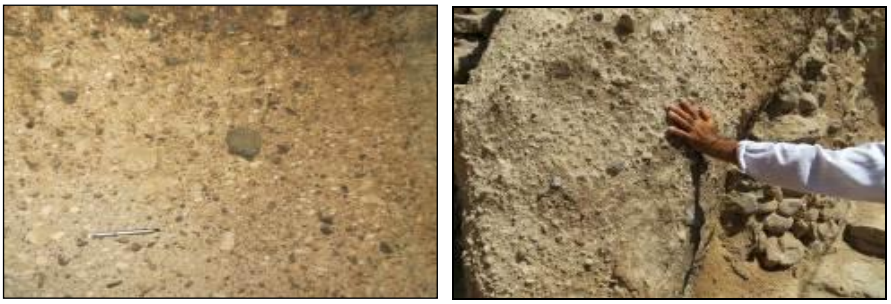
بررسی‌های سنگ‌شناسی

برای ارزیابی نقش ویژگی‌های سنگ‌شناسی تودهٔ سنگ کندوان در برابر هوازدگی و فرسایش به‌عنوان یکی از ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی این سنگ‌ها اقدام به نمونه‌برداری و تهیهٔ ٤ مقطع نازک از بخش‌های داخلی و سالم سنگ‌های در حال حفاری در بخش غربی

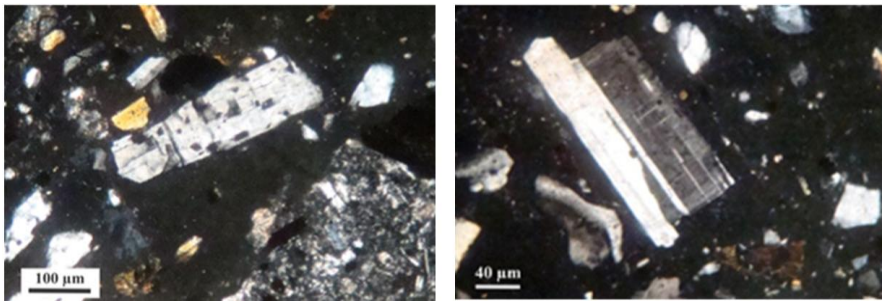
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

روستا (محدوده هتل لاله) در جهات مختلف شده و مقاطع با میکروسکوپ نور پلاریزان بررسی شدند.

چنان‌که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تودهٔ سنگ کندوان در نمونهٔ دستی از قطعات سنگی، قطعات پامیس و تک کانی‌هایی تشکیل شده است که به‌واسطهٔ سیمانی ریزدانه و سست در کنار هم قرار گرفته‌اند. در مقاطع نازک تهیه شده نیز می‌توان تک کانی‌هایی از نوع پلاژیوکلاز، کوارتز، هورنبلند و به‌مقدار کم‌تر بیوتیت و پیروکسن را در زمینهٔ شیشه‌ای تشخیص داد. پلاژیوکلازها به‌صورت کانی غالب قطعه‌های سنگی مختلف، درشت‌بلور (فنوکریست) شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و دارای ماکل پلی‌سنتتیک، کارلسباد و بافت غربالی و ریزبلور در زمینه قرار دارند (شکل ۳). آمفیبول‌ها فراوان‌ترین کانی فرومنیزیم موجود در سنگ هستند که به‌صورت درشت بلور در زمینهٔ شیشه‌ای و دارای ادخال‌هایی از کانی‌های اپک[1] و سیلیکاتی مشاهده می‌شوند (شکل ٤) و کوارتز نیز به‌صورت فنوکریست و به‌مقدار بیش‌تر در زمینهٔ ریزبلور قابل مشاهده است.

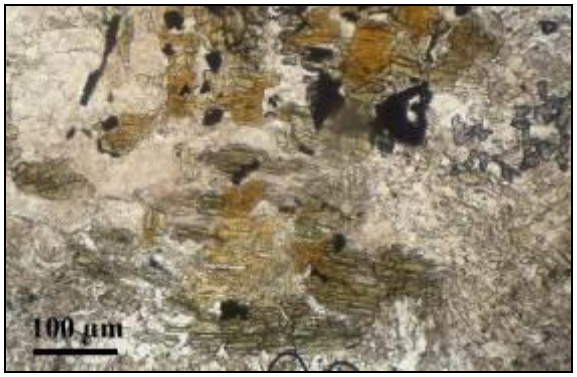


شکل ۲. بافت سنگ‌های آذرآواری روستای کندوان



شکل۳. عکس میکروسکوپی مقطع نازک سنگ با نور پلاریزان- تصویر راست: فنوکریست کانی پلاژیوکلاز دارای ماکل پلی سنتتیک و کارلسباد و تصویر چپ: بلور پلاژیوکلاز دارای بافت غربالی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]



شکل ٤. عکس میکروسکوپی مقطع نازک سنگ با نور طبیعی (فنوکریست‌های آمفیبول در زمینه‌ای از شیشه)

سنگ‌های آذرآواری کندوان فاقد جهت‌یافتگی، لایه‌بندی مشخص، کانی‌های دگرسانی و ریزترک‌ها به‌عنوان عوامل ضعف هستند اما عمدتاً از کانی پلاژیوکلاز، قطعات پامیس و خاکستر جوش نخورده تشکیل شده و اجزای تشکیل‌دهندهٔ آن به‌دلیل آواری بودن سنگ به‌شدت خرد شده هستند. در نمونه‌های دستی و مقاطع میکروسکوپی می‌توان طیف وسیعی از اندازهٔ دانه‌ها از چند میکرون تا چند سانتی‌متر را مشاهده کرد که بر اساس طبقه‌بندی‌های جرام[۱] (۲۰۰۱) [۲۰] و پتی‌جان[۲] (۱۹۸۷) [۲۱] این سنگ‌ها جورشدگی ضعیف دارند و اجزای تشکیل‌دهندهٔ آن‌ها گردشده و با کرویت زیاد هستند. مجموعهٔ این عوامل باعث ایجاد ساختاری نامقاوم در برابر تنش‌های وارده بر سنگ‌ها شده و آن‌ها را مستعد هوازدگی و فرسایش کرده است.

بررسی هوازدگی و فرسایش

از مهم‌ترین عوامل فرساینده سنگ‌های کندوان می‌توان به بارش باران و برف، جاری شدن آب‌های بارندگی و سطحی در سطح و در امتداد درز و شکاف سنگ‌ها و جهت و شدت وزش باد غالب در منطقه اشاره کرد. چنان‌که در شکل ۵ نشان داده شده است، وزش باد- جهت باد غالب (NE - SW) عمود بر سطح سنگ‌ها است- و برخورد آن به سطح سنگ باعث فرسایش و ایجاد اشکال حفره‌ای (تافونی[۳]) یا لانهٔ کبوتری در سطح آن‌ها شده است.

۱. Jerram ۲. Pettijohn ۳. Tafoni

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]



شکل ۵. نمایی از تافونی‌های ایجاد شده در سطح سنگ‌های کندوان

صفحه‌های درز و شکستگی در ابعاد مختلف در یک سنگ به‌عنوان سطوح ضعف عمل کرده و باعث افزایش سطح فرسایشی آن سنگ می‌شوند. با توجه به بررسی‌های انجام شده یک سیستم درز و شکستگی در منطقه وجود دارد که مشخصات آن در شکل ٦ بر روی عکس ماهواره‌ای و بر روی سنگ‌های محل نشان داده شده است.

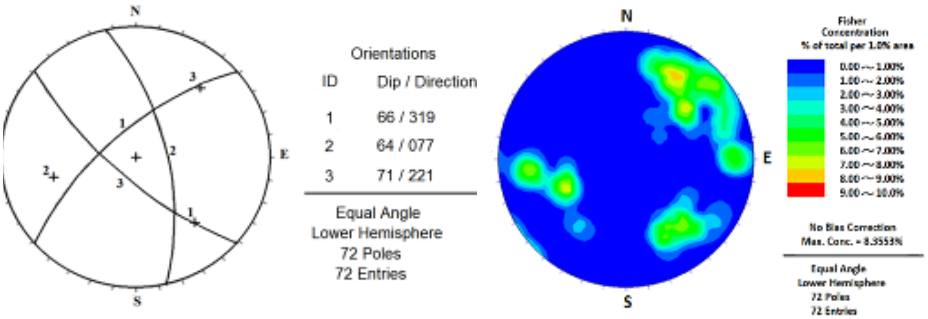


شکل ٦. عکس ماهواره‌ای روستای کندوان و روند شکستگی‌های اصلی در منطقه (راست) و تصویری از شکستگی‌ها موجود در سنگ (چپ)

برای تعیین مشخصات سطوح شکستگی، مقادیر شیب و جهت شیب آن‌ها اندازه‌گیری شده و با نرم‌افزار Dips تحلیل شدند. چنان‌که در شکل ۷ در استریوگرام مربوطه دیده می‌شود، سه دسته شکستگی با مشخصات ٦٦/۳۱۹، ٦٤/۰۷۷ و ۷۱/۲۲۱ درجه در منطقه وجود دارد. سیستم درز و شکستگی موجود در تودهٔ سنگ کندوان از نظر نحوهٔ شکل‌گیری سنگ‌های مخروطی شکل اهمیت دارند، به این مفهوم که هوازدگی و فرسایش به‌وسیلهٔ آب‌های جاری،

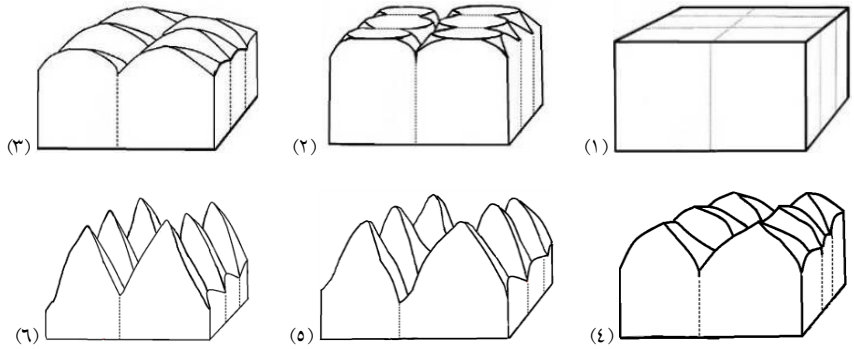
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

باد، باران و غیره در امتداد آن‌ها باعث شکل‌گیری مخروط‌ها شده است. بنا بر این می‌توان مراحل شکل‌گیری خانه‌های روستا را به‌صورت شکل ۸ نمایش داد.



الف ب

شکل ۷. الف) کانتور دیاگرام، ب) استریوگرام صفحه‌های شکستگی اصلی تودهٔ سنگ کندوان



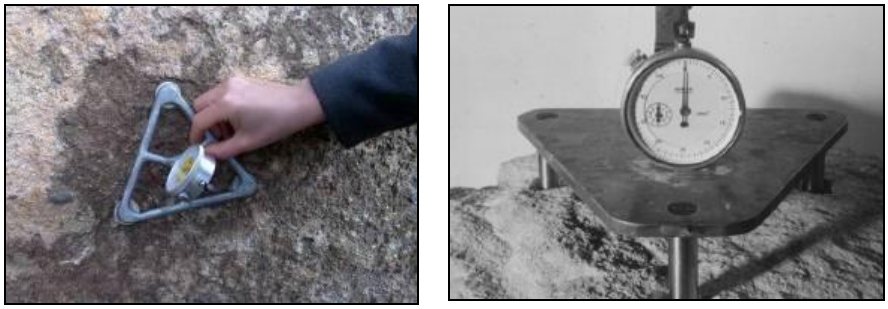
شکل ۸. طرح شماتیک مراحل شکل‌گیری مخروط‌های سنگی روستای کندوان

تداوم فرایند فرسایش، باعث تخریب هر چه بیش‌تر سنگ‌ها شده است. با اندازه‌گیری میزان فرسایش می‌توان مستقیماً میزان استحکام و پایداری درونی سنگ را تخمین زد. یکی از آسان‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری میزان فرسایش سنگ استفاده از ریزفرسایش‌سنج[۱] (MEM) است. هانا[۲] این ابزار را برای اولین بار در سال ۱۹٦٦ برای اندازه‌گیری میزان فرسایش سنگ آهک در غارهای آهکی استفاده کرده است [۲۲] و پس از آن برای اندازه‌گیری میزان فرسایش بادی و هوازدگی گرانیت [۲۳]، فرسایش سنگ‌های ساختمانی [۲٤]، بازالت، شیست

۱. Micro Erosion Meter ۲. Hanna

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

و ماسه سنگ [۲۵] نیز استفاده شده است. چنان‌که در شکل ۹ الف ملاحظه می‌شود این ابزار از سه پایه‌ای به‌شکل مثلث متوازی الاضلاع و یک گیج[۲] اندازه‌گیری در مرکز آن تشکیل شده است. ابزار روی سه میخ که روی سنگ ثابت شده‌اند، قرار می‌گیرد و عدد نشان داده شده طی بازهٔ زمانی مشخص با گیج، ارتفاع میخ و میزان فرسایش سنگ کف در آن بازه را نشان می‌دهد [۲٦]. از این ابزار برای اندازه‌گیری میزان فرسایش با دوره‌های زمانی متفاوت ماهانه تا سالیانه [۲۷] استفاده شده و مقایسهٔ نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری بین میزان فرسایش کوتاه‌مدت با بلندمدت وجود ندارد [۲۸]. برای اندازه‌گیری میزان فرسایش تودهٔ سنگ کندوان، نمونهٔ مشابه این ابزار ساخته شده و در ۱۵ نقطه در سطح سنگ‌ها با شرایط متفاوتی که در جدول ۱ ذکر شده است، میزان فرسایش با دقت صدم میلی‌متر و طی ۹ ماه اندازه‌گیری شده است (شکل ۹ ب).



(ب) (الف)

شکل ۹. الف) تصویری از ابزار ریزفرسایش سنج [۲٦]،
ب) تصویری از اندازه‌گیری فرسایش سطوح سنگی کندوان با ریزفرسایس‌سنج

مقادیر اندازه‌گیری شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که به‌طور متوسط سطوح سنگی ماهانه ۰/۲ میلی‌متر فرسایش می‌یابند. البته سطوحی از سنگ که گُلسنگ‌ها بر روی آن‌ها رشد کرده‌اند، کم‌تر در معرض فرسایش قرار گرفته‌اند و گُلسنگ تا حدودی به‌عنوان پوشش برای سنگ عمل کرده است. هم‌چنین سطوحی که رو به آفتاب هستند نسبت به قسمت‌های پشت به آفتاب، به‌علت تداوم چرخه‌های تر- خشک و ذوب- انجماد و قرارگیری در معرض باد بیش‌تـر دچار هوازدگی و فرسایش شده‌اند. بنا بر این در حالت کلی قسمت‌هایی از سنگ‌ها که

۱. Gauge

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

در معرض وزش باد و نور خورشید قرار داشته‌اند و فاقد پوشش‌های گُلسنگی بوده‌اند، بیش‌ترین مقدار فرسایش را نشان داده‌اند. این مقدار نشان می‌دهد که تودهٔ سنگ کندوان استحکام و سختی کافی برای مقاومت در برابر هوازدگی و فرسایش را ندارد.

جدول ۱. نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان فرسایش با ابزار ریز فرسایش‌سنج طی ۹ ماه

شماره	شرایط سطحی سنگ		متوسط میزان فرسایش ماهانه (میلی‌متر)
	رو به آفتاب بودن	فاقد گُلسنگ	
۱	*	*	۰/٤۷
۲	*		محسوس نبود
۳		*	۰/۲٦
٤		*	۰/۳۰
٥		*	۰/۲۲
٦	*		محسوس نبود
۷		*	۰/۲۰
۸			محسوس نبود
۹	*		محسوس نبود
۱۰	*	*	۰/٥۸
۱۱		*	۰/۲۳
۱۲			محسوس نبود
۱۳			محسوس نبود
۱٤		*	۰/۲
۱٥	*	*	۰/٥۹

ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تودهٔ سنگ

آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ این امکان را فراهم می‌کنند تا میزان حساسیت آن در برابر عوامل محیطی و تنش‌های وارده تعیین شود. هیچ آزمایشی به‌تنهایی نمی‌تواند به‌عنوان شاخصی برای تعیین رفتار سنگ در برابر هوازدگی یا فرسایش در نظر گرفته شود. بنا بر این ترکیبی از آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی برای انجام ارزیابی و دوام‌پذیری سنگ‌ها استفاده می‌شود [۲۹]. برای این منظور ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی شامل چگالی، تخلخل، ضریب

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

اشباع سنگ، دوام در برابر تر- خشک شدن و ذوب- انجماد متوالی، میزان جذب آب و ارتفاع زون موئینه و شاخص دوام وارفتگی در دو مرحله هر کدام بر روی ۱۵ نمونه سالم نمونه‌برداری شده از بخش‌های داخلی و سالم سنگ‌های در حال حفاری در بخش غربی روستا (محدودهٔ هتل لاله) و هم‌چنین سختی سنگ با چکش اشمیت بر روی بیش از ۲۰ نقطه در سطح خارجی سنگ‌ها بر اساس استانداردهای ISRM و ASTM اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی تودهٔ سنگ کندوان به‌صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج حاصل از آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی روی تودهٔ سنگ کندوان

کمیت	واحد	مقدار			روش آزمایش
		کمینه	بیشینه	میانگین	
چگالی خشک	gr/cm^3	۱/۳۲	۱/٦٤	۱/۵۰	ISRM, ۲۰۰۷
چگالی اشباع	gr/cm^3	۱/۳۸	۱/۷۵	۱/٦٤	ISRM, ۲۰۰۷
تخلخل کل	%	٤۵	۵۸	۵۰	ISRM, ۲۰۰۷
دوام تر و خشک شدن متوالی	%	۱/۳	۲/۵	۲	ASTM D ۵۳۱۳, ۲۰۰٤
دوام ذوب و انجماد متوالی	%	٤۸	۷۳	٦۳	ASTM D ۵۳۱۲, ۲۰۰٤
ضریب اشباع سنگ	بدون واحد	-	-	> ۰/۸	TS ٦۹۹, ۱۹۸۷
میزان جذب آب اولیه	$mm/\sqrt{S}$	۰/۲٦	۰/۳۵	۰/۳۰	ASTM D۱۵۸۵, ۲۰۰٤
میزان جذب ثانویه	$mm/\sqrt{S}$	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	ASTM D۱۵۸۵, ۲۰۰٤
دوام وارفتگی مرحلهٔ اول	%	۲۸	۵۱	٤۱	ASTM D ٤٦٤٤, ۲۰۰٤
دوام وارفتگی مرحله دوم	%	۵۸	۷٦	۷۲	ASTM D ٤٦٤٤, ۲۰۰٤
سختی	MPa	۱۸	۳۰	۲۵	ASTM D ۵۸۷۳, ۲۰۰۵

۱. تعیین چگالی و تخلخل سنگ‌ها

چگالی و تخلخل کل سنگ تابعی از منافذ، درزه‌ها، شکاف‌ها، شکل و توزیع ابعاد دانه‌ها، استحکام دانه‌ها، سمت و سوی دانه‌ها، درجه تراکم و سیمان شدگی دانه‌ها و سایر فضاهای موجود در سنگ است که هوازدگی سنگ باعث کاهش چگالی و افزایش تخلخل آن می‌شود. هرچه سنگی چگالی کم و تخلخل کل زیاد داشته باشد، مقاومت آن کاهش می‌یابد [۳۰]. چگالی خشک، اشباع و تخلخل کل سنگ کندوان به‌روش ISRM اندازه‌گیری شده است [۳۱].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

متوسط مقادیر به‌دست آمده برای چگالی خشک، اشباع به‌ترتیب برابر با ۱/۵۰ و ۱/٦٤ گرم بر سانتی‌متر مکعب و میزان تخلخل ۵۰ درصد است.

۲. آزمایش دوام در برابر تر و خشک شدن متوالی

سنگ‌ها به‌دلیل جذب آب و انبساط و انقباض در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن دچار تنش می‌شوند. انبساط در برابر رطوبت معادل انبساط در ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد دما است [۳۲]. این آزمایش در مورد سنگ‌های آذرآواری مانند توف استفاده می‌شود که ضریب انبساط زیاد در برابر رطوبت را دارد [٤]. آزمایش دوام در برابر تر و خشک شدن متوالی به‌روش ASTM D۵۳۱۳ انجام گرفته است [۳۳] و درصد افت وزنی به‌طور متوسط ۲ درصد به‌دست آمده است.

۳. آزمایش دوام در برابر انجماد و ذوب متوالی

این آزمایش به بازسازی تنش‌های ایجاد شده در سنگ به‌هنگام یخ‌زدن و شکل‌گیری بلورهای یخ در منافذ آن توجه دارد و به‌طورکلی با تغییرات دمای زیر و بالای صفر درجه سانتی‌گراد کنترل می‌شود [٤]. دوام در برابر انجماد و ذوب متوالی همانند دوام تر و خشک شدن به درجهٔ اشباع سنگ، تخلخل مؤثر سنگ، نحوهٔ توزیع و اندازهٔ حفره‌ها و دامنهٔ تغییرات دمای محیط بستگی دارد [۳٤]. آزمایش دوام در برابر انجماد و ذوب متوالی نیز به‌روش ASTM D۵۳۱۲ انجام شده است [۳۵] و درصد افت وزنی به‌طور متوسط ٦۳ درصد به‌دست آمده است.

٤. ضریب اشباع سنگ

ظرفیت طبیعی سنگ برای جذب آب ضریب اشباع آن نامیده می‌شود. سنگی با ضریب اشباع آب بیش‌تر دوام کم‌تری نسبت به فرایند ذوب و انجماد متوالی دارد. مقادیر ضریب اشباع سنگ‌ها بین ۰/٤۰ تا ۰/۹۵ متغیر است و اغلب آن‌ها ضریب اشباع بین ۰/٦٦ تا ۰/۷۷ دارند. سنگ‌هایی که ضریب اشباع بیش‌تر ۰/۸۰ دارند، بیش‌ترین حساسیت را نسبت به انجماد دارند [۳٦]. این کمیت به‌روش TS٦۹۹ اندازه‌گیری شده است [۳۷] و تمام نتایج مقادیر بیش ۰/۸ را به‌دست داده‌اند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

۵. اندازه‌گیری میزان جذب آب ناشی از موئینگی

به‌دلیل این که روش‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری سنگ در استانداردهای موجود برای قطعات سنگی با اعمال فشار به نمونهٔ سنگ اندازه‌گیری می‌شوند و نمی‌توان نفوذپذیری سنگ را در فشار اتمسفری به‌دست آورد، سعی شده تا از این روش به‌طور غیرمستقیم برای اندازه‌گیری میزان جذب آب به‌وسیلهٔ سنگ و ارتفاع زون موئینه در آن در فشار اتمسفری استفاده شود. اساس آزمایش محاسبهٔ میزان جذب آب به‌وسیلهٔ سنگ با افزایش وزن یک نمونه در نتیجه جذب آب به‌صورت تابعی از زمان است در حالتی که فقط یک سطح از نمونه در معرض آب قرار داشته باشد. برای انجام این آزمایش نمونه‌های سنگی به‌شکل مکعب مستطیل با ابعاد مشخص از سنگ سالم تهیه شده و تمام وجوه آن‌ها به جز وجهی که جذب آب از آن صورت خواهد گرفت، آب‌بندی می‌شوند. سطح آزاد هر نمونه طبق استاندارد ASTM D۱۵۸۵ درون یک سینی آب به‌صورتی که در طول آزمایش نمونه ۳ میلی‌متر در آب فرورفته باشد، قرار می‌گیرد و طبق زمان‌بندی جدول ۳ میزان افزایش وزن ناشی از جذب آب به‌وسیلهٔ نمونه اندازه‌گیری می‌شود. در این روش با استفاده از رابطهٔ ۱ مقدار جذب آب (I) بر حسب میلی‌متر محاسبه می‌شود که در آن mt تغییرات وزن نمونه نسبت به زمان بر حسب گرم، a مساحتی سطحی از نمونه که در تماس با آب قرار دارد بر حسب میلی‌متر مربع و d چگالی آب برحسب گرم بر سانتی‌متر مربع است [۳۸].

$$I = (mt / a) / d \qquad (۱)$$

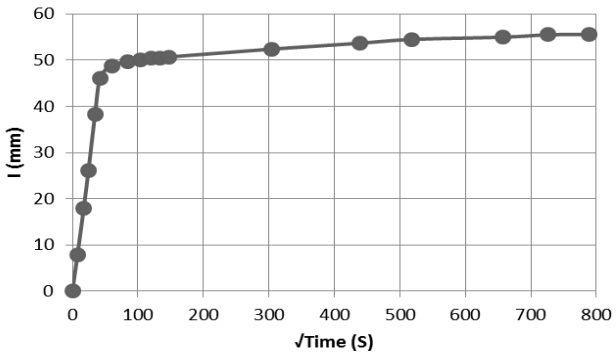
جدول ۳. زمان‌بندی برای آزمایش اندازه گیری میزان جذب آب ناشی از موییننگی

زمان	٦۰ ثانیه	۵ دقیقه	۱۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	٦۰ دقیقه	هر ساعت تا ٦ ساعت	هر روز تا ۸ روز
دامنه نوسان	۲ ثانیه	۱۰ ثانیه	۲ دقیقه	۲ دقیقه	۲ دقیقه	۲ دقیقه	۵ دقیقه	۲ ساعت

میزان جذب آب با واحد $mm/\sqrt{S}$ برابر با شیب نمودار جذب آب (I) نسبت به جذر زمان است که به دوصورت میزان جذب اولیه و ثانویه بیان می‌شود. میزان جذب اولیه یا میزان آب جذب شده با منافذ مرتبط سنگ، شیب نمودار از دقیقه اول تا ٦ ساعت بعد است و جذب ثانویه یا میزان آب جذب شده به فضاهای درون ذرات سنگ، شیب نمودار از روز اول تا ۷

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

روز بعد است [۳۸]. در شکل ۱۰ نتیجهٔ آزمایش انجام شده روی نمونه‌ای از سنگ کندوان ارائه شده است. حداکثر مقدار I بر حسب میلی‌متر ارتفاع زون موئینه در سنگ تحت فشار اتمسفری را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که به‌طور متوسط نمونه‌ها دارای متوسط میزان جذب اولیه ۰/۳ و ثانویه ۰/۰۱ میلی‌متر بر مجذور ثانیه است و حداکثر ارتفاع موئینه سنگ حدود ۵۵ میلی‌متر است. در سنگ بکر انتقال مایع و حجم آن به اندازهٔ منافذ سنگ و ارتباط آن‌ها با هم و درجهٔ اشباع یا تخلخل کل سنگ بستگی دارد [۳۹]. هم‌چنین ارتفاع زون موئینه نسبت عکس با قطر منافذ سنگ دارد به‌صورتی که هر چه قطر منافذ سنگ بیش‌تر باشد ارتفاع موئینه کاهش می‌یابد [٤٠]. بنا بر این زیاد بودن میزان جذب آب اولیه و پایین بودن ارتفاع زون موئینه در سنگ در شرایط اتمسفری نشان‌دهندهٔ زیاد بودن تخلخل کل و قطر منافذ سنگ و در نتیجه توان زیاد سنگ برای جذب آب پیرامون خود است.



شکل ۱۰. نمودار میزان جذب آب به وسیله نمونه سنگ کندوان

٦. شاخص دوام یا وارفتگی

حساسیت سنگ در برابر هوازده شدن با پارامتری به نام شاخص دوام و یا وارفتگی اندازه‌گیری می‌شود [۳۰]. این شاخص به نسبت تخلخل و نفوذپذیری سنگ، طبیعت سیال استفاده شده در آزمایش، مقاومت سنگ در برابر تورم، قطعه قطعه شدن، شکل قطعات سنگی استفاده شده در آزمایش و تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن بستگی دارد [٤١] آزمایش طبق استاندارد ASTMD٤٦٤٤، انجام شده است [٤٢]. تودهٔ سنگ کندوان به‌ترتیب متوسط شاخص

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

دوام مرحلهٔ اول ٤۱ و شاخص دوام دوم برابر با ۷۲ درصد را دارد. در شکل ۱۱ تغییر شکل نمونه‌ها حین این آزمایش نشان داده شده است. طبق طبقه‌بندی‌های گمبل (۱۹۷۱) و فرانکلین و چاندرا (۱۹۷۲) سنگ کندوان دوام ضعیفی در برابر وارفتگی دارد [٤۳]، [٤٤].



الف ب ج

شکل ۱۱. تغییرات نمونه‌ها در آزمایش وارفتگی، الف) قبل از انجام آزمایش، ب) بعد از مرحلهٔ اول، ج) مرحلهٔ دوم

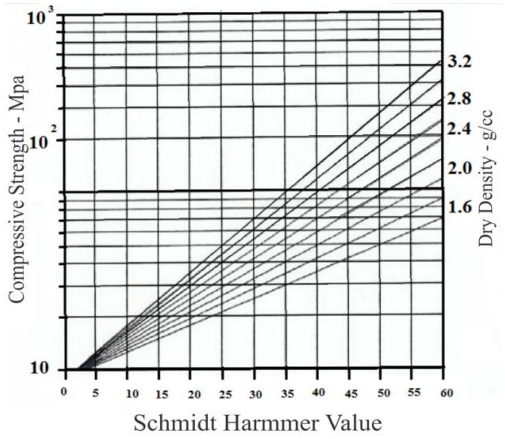
۷. سختی

سختی از مفاهیم رایجی است که برای توصیف رفتار سنگ‌ها به‌کار می‌رود. سختی تابعی از عوامل ذاتی متفاوتی مانند نوع کانی، ابعاد دانه‌ها، چسبندگی مرزی کانی‌ها، مقاومت و رفتار الاستیک و پلاستیک سنگ است. در بین روش‌های موجود برای تعیین سختی سنگ، روش استفاده از چکش اشمیت به‌دلیل سادگی و در دسترس بودن یکی از متداول‌ترین روش‌ها است. انجمن بین المللی مکانیک سنگ این روش را به‌صورت استاندارد درآورده است. عدد چکش اشمیت در سنگ‌هایی که هوازدگی شدیدتری دارند کم‌تر است [٤۵]. دییر و میلر[۱] (۱۹٦۵) در بررسی‌هایی که برای طبقه‌بندی سنگ‌ها انجام داده‌اند، رابطه‌ای بین مقدار عدد سختی اشمیت با مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ را ارائه کردند که نمودار آن در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود [۳۰].

سختی اشمیت در بیش از ۲۰ نقطه روی سطوح سنگ‌های آذرآواری کندوان طبق استاندارد ASTMD۵۸۷۳ اندازه‌گیری شده است [٤٦]. مقادیر سختی اندازه‌گیری شده با استفاده از چکش اشمیت به‌طور متوسط ۲۵ MPa و مقاومت فشارشی کم‌تر از ۲۰ MPa را نشان می‌دهند.

۱. Deere and Miller

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]



شکل۱۲. رابطهٔ بین مقدیر عددی چکش اشمیت و مقاومت فشاری تک‌محوره به‌عنوان تابعی از چگالی خشک (دیر و میلر، ۱۹۶۵ نقل از فهیمی‌فر و سروش،۱۳۸۰)

براساس طبقه‌بندی‌های موجود سنگ کندوان چگالی خشک خیلی کم و تخلخل کل خیلی زیاد [٤٧]، حساسیت زیاد در برابر انجماد [۳۷] و دوام ضعیف در برابر هوازدگی و فرسایش دارد و از لحاظ سختی از گروه سنگ‌های نیمه‌هوازده تا خیلی هوازده محسوب می‌شود [٤٨]. مقاومت فشارشی تک‌محوری کم این سنگ نیز نشان‌دهندهٔ مقاومت اندک سنگ برای متحمل شدن فشار روباره است. سنگ‌های آذرآواری کندوان به‌دلیل داشتن ویژگی‌های ذاتی و درونی ضعیف و سست خود در برابر عوامل فرساینده و چرخه‌های ذوب- انجماد و تر- خشک شدن متوالی ناشی از تغییرات آب و هوایی روزانه و فصلی دچار هوازدگی و تخریب شده است که در شکل ۱۳ تخریب سطوح سنگی نشان داده شده است.



شکل ۱۳. هوازدگی و تخریب سطوح مخروط‌های سنگی کندوان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌ها، سطوح سنگی تودهٔ سنگ مخروطی شکل دربردارندهٔ خانه‌های روستای کندوان (کِران‌ها)، ماهانه ۰/۲ میلی‌متر فرسایش می‌یابند. مهم‌ترین مشخصات زمین‌شناسی مهندسی تأثیرگذار بر روی هوازدگی و فرسایش سنگ‌های روستای کندوان شامل سیستم درز و شکستگی، ویژگی‌های سنگ‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها هستند. اگر چه شکستگی‌های موجود در سنگ باعث توسعهٔ هوازدگی و فرسایش در امتداد آن‌ها شده و شکل‌های مخروطی را ایجاد کرده است ولی تداوم فرسایش در امتداد آن‌ها باعث تخریب و نابودی آن‌ها نیز می‌شود. جوش‌خوردگی و جورشدگی ضعیف سنگ، گردشدگی زیاد اجزای تشکیل‌دهندهٔ سنگ از ویژگی‌های سنگ‌شناسی مؤثر روی دوام اندک سنگ‌های آذرآواری کندوان هستند که باعث کاهش مقاومت درونی آن در برابر تنش‌هایی مانند انبساط و انقباض، فشار روباره، فرسایش و غیره شده است. چگالی خشک کم و تخلخل کل زیاد تودهٔ سنگ کندوان باعث افزایش ظرفیت جذب آب باران و برف به داخل منافذ سنگ شده است. وجود ضریب اشباع بالای ۰/۸۰، افت وزنی زیاد در اثر ذوب و انجماد، شاخص دوام کم و سختی کم سنگ نشان‌دهندهٔ حساسیت زیاد سنگ به فرایندهای هوازدگی و فرسایش است. درصد جذب زیاد آب به‌همراه چرخه‌های تر–خشک شدن و ذوب–انجماد متوالی تحت تأثیر تغییرات جوی، باعث متلاشی شدن و ریزش سطح بیرونی آن شده است که با هر ذوب و انجماد، آب به عمق بیش‌تری از سنگ نفوذ کرده و به حجم بیش‌تری از آن آسیب می‌زند. بنا بر این سنگ کندوان به‌دلیل ویژگی‌های ذاتی خود مستعد هوازدگی و فرسایش است که برای کاهش روند تخریبی آن باید روش‌های کنترل هوازدگی و راه‌های مرمت آن‌ها بررسی شود.

منابع

۱. بوی م. ح.، *دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران*، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۵۵).

2. Sayin N. M. "Fairy chimney development in cappadocian ignimbrites (Centeral Anatolia, Turkey)", A thesis submitted to the graduate school of

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

natural and applied scince of Middle East Technicsl University (2008).

3. Topal T., Doyuran V., "Engineering geological properties and durability assessment of the Cappadocian tuff", Engineering Geology 68 (1997) 201-223.

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

5. Topal T., Sozmen B., "Deterioration mechanisms of tuffs in Midas monument", Engineering Geology 47 (2003) 175-187.

6. Erguler Z. A., "Field-based experimental determination of the weathering rates of the Cappadocian tuffs", Engineering Geology, 105 (2009) 186 - 199.

۷. شیروانی م.، عابد اصفهانی ع.، *آسیب‌شناسی سنگ‌های سیاه مجموعه پاسارگاد و پیشنهاد راه حل حفاظتی*، نشریه فرهنگ و هنر، مرمت و پژوهش، شمارهٔ ٤ (۱۳۸۷) ۱۸٦-۱۷۱.

۸. قبادی ا.، بهرمان ع.، طالبیان م. ح.، *آسیب‌شناسی نقش‌برجسته تنگه چوگان در بیشاپور*، نشریه فرهنگ و هنر، مرمت و پژوهش، شمارهٔ ٤ (۱۳۸۷) صفحات ۱۷۰-۱٦۱.

9. Vacchiano C. D., Incarnato L., Scarfato P., Acierno D., "Conservation of tuff – stone with polymeric resins", Conservation and Building Materials 22 (2008) 855-865.

10. Yavuz A. B., "Durability assesment of the Alacati tuff (Izmir) in western Turkey", Environ Earth Sci 67 (2012) 1909-1925.

11. Lee Hee C., Jo Hoon Y., Kim, J., " Damage evalation and conservation treatment of the tenth century Korean rock-carved Buddha statues, Environ Earth Sci 64 (2012) 1-14.

12. Wedekind W., Doncel L. R., Dohrman R., Siegesmund S., "Weathering

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

and deterioration of volcanic tuff rocks used as natural building stone caused by moisture expansion" , Geophysical Reserch Abstracts vol. 14, EGU (2012) 2012-3816.

13. Doncel L. R., Wedekind W., Dohrmann R., Siegesmund S., "Moisture expension associated to secondary porosity: an examle of the Loseros Tuff Guanajuato, Mexico", Environ Earth Sci 69 (2013) 1189-1201.

۱٤. صبری ح. ر.، *آذربایجان شناسی ۲، کندوان بهشت گمشده*، چاپ دوم، انتشارات هماذر (۱۳۸٦).

۱۵. گرجی مهلبانی ی.، سنائی ا.، *معماری همساز با اقلیم روستای کندوان*، مجلهٔ مسکن و محیط روستا، شمارهٔ ۱۲۹ (۱۳۸۸)۱۹-۲.

۱٦. مقیمی اسکویی ح. ر.، موسی‌زاده ا.، اشراقی اسکویی پ. و قره محمد لو م.، *اسکو از ساحل دریاچه ارومیه تا قلهٔ سهند با تأکید بر جاذبه‌های توریستی کندوان*، انتشارات شهرداری اسکو (۱۳۸۵).

۱۷. امینی بیرامی ف.، *بررسی عوامل زیست‌محیطی مخرب بر خانه‌های سنگی- مخروطی شکل روستای گردش‌گری کندوان*، پایان نامهٔ کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز (۱۳۹۲).

۱۸. اکبری س.، بمانیان م. ر.، *اکوتوریسم روستایی و نقش آن در توسعه پایدار روستای کندوان*، فصلنامهٔ روستا و توسعه، سال ۱۱، شمارهٔ ۱ (۱۳۸۷) ۱۵۰ – ۱۳۱.

۱۹. کرمی ف.، *توان‌مندی‌های ژئوتوریسم در توسعه روستای کندوان*، مجلهٔ فضای جغرافیا، سال ۷، شمارهٔ ۲۰ (۱۳۸٦) ۱۲۹-۱۱۵.

20. Jerram D. A., "Visual comparators for degree of grain-size sorting in 2D and 3D", computers in Geosciences 27 (2001).

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

22. Hanna F. K., "A technique for measuring the rate of erosion of cave passages", Proceedings University of Bristol Spelaeology Society, Vol.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

11 (1966) 83-86.

23. Spate A.P., Burgess J. S., Shevlin J., "Rates of rock surface lowering", Princess-Elizabeth-Land, Eastern Antarctica, Earth Surface Processes and Landforms 20 (1995) 567-573.

24. Kamh G. M. E., Hanna H., "Measuring rock surface roughness by Micro-erosion meter as indication of weathering intensity of St. John Medieval Church", Chester City, UK. Egyptian Journal of Geology 46 (2002) 461-469.

25. Trenhaile A. S., Lakhan C. V., "Transverse micro-erosion meter measurements; determining minimum sample size", Geomorphology 134 (2011) 431-439.

26. Stephenson W. J., Finlayson B. L., "Measuring erosion with the micro-erosion meter Contributions to understanding landform evolution", Earth-Science Reviews 95 (2009) 53-62.

27. Finlayson B. L., "Measurements of geomorphic processes in a small drainage basin", PhD Thesis, University of Bristol (1976).

28. Stephenson W. J., Kirk R. M., Kennedy D. M., Finlayson B. L., Chen Z., "Long term shore platform surface lowering rates: Revisiting Gill and Lang after 32 years", Marine Geology 299-302 (2012) 90-95.

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

۳۰. فهیمی‌فر ا.،سروش ح.، *آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها، آزمون‌های آزمایشگاهی*، انتشارات آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، جلد اول (۱۳۸۰).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

31. International Society for Rock Mechanics, "The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring", 1974-2006. In: Ulusay R., Hudson J. A. (Eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods. International Society for Rock Mechanics (ISRM), Ankara, Turkey (2007).

۳۲. رضازاده اردبیلی م.، *مرمت آثار معماری، شناخت، آسیب‌شناسی، فن‌شناسی*، انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۹۰).

33. ASTM, "Standard test method for evaluation of durability of rock for erosion control under wetting and drying conditions (D5313)", Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.08 (2004) 890-893.

34. Chen T. C., Yeung M. R., Mori N., "Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action Cold. Regions". Sci. Technol 38 (2004) 127-136.

35. ASTM, "Standard test method for evaluation of durability of rock for erosion control under freezing and thawing conditions (D 5312)", Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.08 (2004) 894-998.

36. RILM, "Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods commission 25-PEM", Meter. Struct, 13 (1980) 175-253.

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

38. ASTM, "Standard test method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes (D 1585)", Annual book of

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

ASTM Standards, Vol. 04.08 (2004) 948-955.

۳۹. خانلری غ. م.، *اصول مکانیک سنگ (برای مهندسین زمین‌شناسی، عمران و معدن)*، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا (۱۳۸۹).

٤٠. شمسایی ا.، *هیدرولیک جریان آب در محیط‌های متخلخل (جلد اول: مهندسی زهکشی)*، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر (۱۳۷۸).

41. Tuğrul A., Zarif I. H., "The influence of mineralogical textural and chemical characteristic on the durability of selected sandstone in Istanbul, Turkey", Bulletin of Engineering Geology and Environmental, 57 (1998) 185-190.

42. ASTM, "Standard test method for slake Durability of shales and similar weak rocks (D 4644)", Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.08 (2004).

43. Gamble J. C., "Durability plasticity classification of shales and other argillaceous rocks", PhD. Thesis. University of Illinois (1971).

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

45. Zorlu K., "Description of the weathering states of building stones by fractural geometry and fuzzy inference system in the Olba ancient city (Southern Turkey)", Engineering Geology 101 (2008) 124–133.

46. ASTM, "Standard test method for determination of rock hardness by Rebound Hammer Method (D 5873) ", Annual book of ASTM Standards, Vol. 05.08 (2005).

47. Anon, "Classification of rocks and soils for engineering geological mapping, part 1-Rocks and soils material", Bulletin international

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]

Association Engineering Geology, No 19 (1979) 71-364.

48. Brand W. E., Philipsonm H. B., "Site Investigation and Geotechnical Engineering Practice in Hong Kong", Getech. Eng. (J. Southeast Asian Geotech. Soc.), Sci. 2, 105 (1984).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.3.6]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2593]