

# مطالعات آزمایشگاهی استحکام بخشی سنگ در معماری صخره کند روستای تاریخی کندوان

مهدی رازانی\*، سیدمحمدامین امامی\*\*، علی رضا باغبانان\*\*\*، حیوانی باتیستا کروستا\*\*\*\*

۱۳۹۷/۱۰/۰۵

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۸/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله:

چکیده

کلیه سنگ‌های به کار رفته در ساخت یادمان‌های تاریخی و فرهنگی تحت تأثیر هوازدگی (به معنای ایجاد تغییرات ساختاری در سطح و عمق سنگ) دچار انواع مختلف آسیب و در نهایت تخریب می‌شوند. توف‌های آتش‌فشانی با خواصی چون نرمی، تخلخل بالا، سبکی، سهولت در کنده‌کاری و کارپذیری در ساخت بسیاری از آثار شاخص معماری جهان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این‌گونه سنگ از نظر دوام، جزو سنگ‌های ضعیف محسوب می‌شود. از این رو عوامل مختلفی موجب هوازدگی، پیشروی تخریب و در نهایت فرسایش سریع‌تر آن نسبت به دیگر سنگ‌های آذرین می‌شوند. از جمله روش‌های حفاظت سنگ‌های تاریخی، درمان‌های مبتنی بر استحکام‌بخشی و مقاوم‌نمودن سطح با استفاده از موادشیمیایی و رزین‌های پلیمری در برابر عوامل فرساینده است. هدف از این تحقیق ارزیابی عملکرد مهم‌ترین استحکام‌بخش‌های سیلیکاتی در راستای ارتقای مقاومت سطحی خانه‌های صخره کند روستای کندوان است. در همین راستا از روش‌های آنالیز پتروگرافی مقطع نازک، فلورسانس اشعه ایکس (XRF)، پراش پرتوی ایکس (XRD) و آزمون‌های مبتنی بر شناسایی خواص فیزیکی و مکانیکی شامل جذب آب در شرایط اتمسفری و جذب مویزگی، چگالی و تخلخل سنجی، به علاوه شاخص دوام و وارفتگی و مقاومت فشاری تک‌محوری برای ساختارشناسی و همچنین ارزیابی کارایی مواد مورد استفاده شامل مواد استحکام‌بخش اتیل سیلیکات و نانو سیلیکات استفاده شده است. نتایج مطالعه نشان‌دهنده خواص فیزیکی-مکانیکی بسیار ضعیف سنگ توف لیتیکی کندوان است که این امر باعث تشدید فرسایش و تخریب سطوح بیرونی گردیده است و دیگر اینکه کارایی این دو ماده در مقابل آزمون‌های مبتنی بر هوازدگی، مقاومت فشاری و مقایسه خواص فیزیکی در بهبود مقاومت مکانیکی سنگ هوازده کندوان نسبت به نمونه‌های هوازده و بکر اولیه قابل قبول است که انجام آزمون‌های میدانی استفاده از این مواد را توصیه می‌کند.

**کلمات کلیدی:** روستای تاریخی کندوان، سنگ توف آتش‌فشانی، تخریب، استحکام بخشی، اتیل سیلیکات، نانو سیلیکات.

\* استادیار دانشکده هنرهای کاربردی، دانشگاه هنر اسلامی، تبریز، ایران. m.razani@tabriziau.ac.ir

\*\* دانشیار دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.

\*\*\* دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

\*\*\*\* استاد تمام دانشکده علوم زمین، دانشگاه بیکوکا، میلان، ایتالیا.

و هوازدگی می‌شوند (Fitzner, 1994) و نیاز به عملیات درمانی و بخصوص استحکام‌بخشی در رابطه با میراث ساخته شده از این گونه سنگ را اجتناب‌ناپذیر کرده است. حفاظت و نگهداری یادمان‌ها و سازه‌های توفی، باتوجه به آنکه پدیده‌های تخریبی این آثار با سرعت و به‌طور جدی در حال پیشرفت هستند، ایجاب می‌کند که تغییرات اتفاق افتاده را شناسایی و به‌وسیله ارتقای شرایط پیرامونی و وضعیت اثر از طریق روش‌های حفاظتی و تقویت ساختار فیزیکی به‌کاهش میزان تخریب کمک کنیم. از مهم‌ترین راهکارهای حفاظت از سطوح سنگی استفاده از درمان‌های مبتنی بر استحکام‌بخشی و تقویت سطوح در حال فرسایش و همچنین ضدآب نمودن بدنه آن‌هاست. تنوع بسیار فراوانی از استحکام‌بخش‌های آلی و معدنی سنگ موجود است که در طی دو دهه اخیر تعداد زیادی از آن‌ها با استفاده از روش‌های استحکام‌بخشی، در رابطه با توف‌های آتش‌فشانی بکار گرفته شده‌اند. روستای تاریخی کندوان از مهم‌ترین معماری‌های صخره‌کند ایران است که در درون صخره‌های توفی دره کندوان در دامنه کوه آتش‌فشانی سهند ساخته شده است. امروزه با روند فرسایشی پیش‌رو در خانه‌های سنگی این روستا، ارائه راهکارهای حفاظتی جهت افزایش کیفیت و مقاومت این سنگ‌های ضعیف، با انجام عملیات استحکام‌بخشی آن‌ها، ضرورت دارد (امینی بیرامی و دیگران، ۱۳۹۴). از این‌رو تحقیق حاضر باهدف کمک به فرایند درمان حفاظتی مجموعه روستای تاریخی کندوان از طریق درمان‌های مبتنی بر استحکام‌بخشی، با انتخاب دوگونه شاخص استحکام‌بخش اتیل سیلیکات (Ethyl Silicate) و نانو سیلیکات (Nano Silicate) از میان ادبیات تحقیق به‌صورت آزمایشگاهی بررسی‌هایی را در رابطه با ارزیابی میزان کارآمدی این محصولات در تقویت

پدیده‌های تخریب و هوازدگی به‌عنوان نتیجه کلیه عوامل مخرب (فیزیکی - مکانیکی، شیمیایی و بیولوژیکی) در یادمان‌های سنگی که در مجاورت با آب‌وهوا و شرایط محیطی قرار دارند، از مهم‌ترین مسائل مورد توجه در حفاظت از آثار سنگی محسوب می‌گردند. 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 گونه‌های میراث سنگی امکان جلوگیری از مجاورت و دور نمودن منابع آسیب‌رسان وجود ندارد. این‌رو از راهکارهای دیگر و از جمله استحکام‌بخشی برای جلوگیری از تخریب سنگ استفاده می‌شود (D'Arienzo et al 2008). استحکام‌بخشی سنگ عمدتاً یک دخالت پرمخاطره است و به‌عنوان یک عمل برگشت‌ناپذیر اثرهای جانبی جدی دارد. از این‌رو تصمیم برای انجام آن همیشه دشوار است. نیاز به استحکام‌بخشی از آنجا ناشی می‌شود که سنگ‌های تخریب شده در قسمت‌های داخلی تا سطوح بیرونی چسبندگی مابین ذرات خود را از دست می‌دهند (Rodrigues, 2001). از طرفی توف‌های آتش‌فشانی در طول تاریخ بشر به‌واسطه نرمی و کارپذیری یکی از مصالح پرکاربرد در بسیاری از تمدن‌ها و فرهنگ‌ها بوده و مورد استفاده فراوان قرار گرفته‌اند. از نمونه‌های کاربرد توف در بناهای تاریخی به‌عنوان بستر ساخت بنا به معماری‌های دره گورمه در ترکیه، مجسمه‌های موآی در جزیره ایستر شیلی، پلکان کوپان در هندوراس و غیره می‌توان اشاره نمود اما از جنبه دیگر خواص ذکر شده باعث پایین آمدن مقاومت آن‌ها در مقابل تخریب

سیمان بین دانه‌ای است بهبود این شرایط عموماً هدف از درمان با استحکام بخش است (Wheeler, 2005). از آنجا که تخریب توف‌های آتش‌فشانی به واسطه دوام نسبتاً ضعیف، یکی از بزرگ‌ترین مشکلات و چالش‌ها در حفاظت از کارهای هنری ساخته شده از این سنگ است که منجر به استفاده از درمان‌های حفاظتی متعدد می‌گردد (Laurenzi et al, 1994). مطالعات متعددی در عرصه بین‌المللی در رابطه با استحکام بخشی سنگ توف با مواد و روش‌های مختلف صورت گرفته بر این اساس تعداد زیادی استحکام‌بخش و روش‌هایی متفاوتی در رابطه با این سنگ در طی چند دهه اخیر مورد استفاده قرار گرفته است. استحکام‌بخشی باهدف پیشگیری از فرایند تخریب نیز توسط سالازر هرناوندز و دیگران (Salazar-Hernández, et al 2014) بر روی توف سبز لوسروس در سازه‌های تاریخی گاناجاتو/ مکزیک انجام گرفت. در این مطالعه از فرمولاسیون هیبریدی بر پایه تترا اتیل ارتوسیلیکات (TEOS) سیلیس کلونیدی، پلی دی متیل سیلوکسان (PDMS-OH) استفاده گردید که ارزیابی عملکرد این مواد در ساختار فیزیکی و شیمیایی و خواص سنگ‌های موردنظر نشان داد میزان تخلخل کاهش یافته و سختی و مقاومت در مقابل نمک افزایش یافته است. مولر و دیگران (Müller et al. 2008) با هدف درمان استحکام‌بخشی توف‌های دروازه قصر شارلوتنبرگ برلین اقدام به استفاده از اتیل سیلیکات نمودند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد ماده موردنظر با تغییر ویژگی ذاتی سنگ‌های هوازده، باعث استحکام‌بخشی مناسب توف‌ها گردیده است. بررسی جنبه‌های منفی روش‌های مرمتی در سنگ توف‌های بنای هیدن پورتال (Heidenportal) در آلمان توسط استیندلبرگر (Steindlberger 2005)، با هدف ارزیابی مواد و فرآورده‌های مناسب برای بازسازی و حفاظت از

ساختار سنگ‌های کندوان نموده است. مهم‌ترین سؤالات تحقیق عبارت‌اند از اینکه: (۱) ساختارشناسی سنگ در معماری صخره کند کندوان چیست؟ (۲) بر مبنای ساختارشناسی سنگ کندوان کدام یک از راهکارهای درمانی مبتنی بر استفاده از استحکام بخش‌ها در روند استحکام بخشی سطوح بیرونی و افزایش سختی سطح مثرتر هستند؟ (۳) مقایسه کارآمدی مواد مورد استفاده چه چیزی را نشان می‌دهد؟ در همین راستا ساختارشناسی سنگ کندوان در کنار انجام آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی بر سنگ‌های درمان شده و درمان‌نشده از مهم‌ترین بخش‌های این تحقیق است.

### پیشینه حفاظت از توف‌های آتش‌فشانی به روش درمان استحکام‌بخشی

در حالت کلی مهم‌ترین عامل تخریب و هوازدگی هر سنگی از جمله توف‌های آتش‌فشانی وجود رطوبت در محیط پیرامون آن‌هاست (Borgia et al 2000). از این رو لزوم کاهش میزان جذب آب به واسطه پیامد ناشی از آن در منابع علمی مرتباً ذکر شده است (Doehne & Price, 2010; Fitzner, 1994). امروزه از مهم‌ترین راهکارهایی که خصوصاً در رابطه با آثار سنگی موجود در فضای باز گسترش جهانی یافته است استفاده از درمان‌های مبتنی بر حفاظت سطحی به وسیله رزین‌های پلیمری است (D'Arienzo et al 2008). استحکام بخشی به مثابه درمان برای شرایط مختلف استفاده شده است، به خصوص برای اشکال ویژه و مظاهر تخریبی همانند پوسته پوسته شدن، پوسته انداختن، و رآمدن پوسته و همچنین فروپاشی دانه‌ای و در شرایط معمول برای سنگی که از لحاظ مکانیکی تضعیف شده باشد. از آنجا که هر دو فروپاشی دانه‌ای و تضعیف مکانیکی سنگ غالباً در نتیجه از دست رفتن

بخش اعظم موادی که به عنوان مواد استحکام بخش سنگ به کار رفته و پیشنهاد شده اند پلیمرهای آلی بوده اند. به کارگیری مواد آب گریز نیز خصوصاً برای سنگ های توف به واسطه نقش مؤثر آب در تخریب آن ها به تناوب توصیه شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

### روستای تاریخی کندوان در دامنه کوه سهند

استان آذربایجان شرقی به خصوص دامنه سهند از مناطق مهم ایران از نظر وفور این گونه معماری است و این منطقه از تنوع و غنای بسیاری در زمینه معماری دستکند در بسترهای طبیعی برخوردار است که می توان به چندین روستا، دژ، معبد، مسکن و مقابر صخره ای اشاره نمود (شکاری نیری، ۱۳۷۲) به نحوی که طبیعت منطقه و قرارگیری در بستر کوه و به خصوص در بخش شمالی آن باعث شده بسیاری از روستاها از بدنه سنگی سهند به عنوان مأمن و مکان زندگی و همچنین برای تأمین مصالح ساختمانی بهره مند شوند. عمده ویژگی های معماری دستکند در روستاهای دامنه سهند عبارت اند از اینکه روستاهای فوق در ارتفاعی بالاتر از ۱۰۰۰ متر تا نزدیک به ۲۵۰۰ متر از سطح دریا در دامنه سهند واقع شده اند، همچنین اغلب این روستایی ها دارای جاذبه های طبیعی و فرهنگی هستند که یا به صورت مجموعه روستا (همانند روستای کندوان و حیلهور) و یا به صورت تک بنا، آثاری را در فهرست آثار ملی دارند که عموماً این آثار شامل مساجد و حمام های دستکند می باشد (رازانی، ۱۳۹۱). روستای تاریخی کندوان در ۶۲ کیلومتری شهر تبریز در استان آذربایجان شرقی با شاخص های طبیعی و انسانی به واسطه هوازگی و فرسایش توف های آتش فشانی نهشته شده در اثر فعالیت های کوه آتش فشانی سهند شکل گرفته

سنگ های توف مورد مطالعه قرار گرفت. مواد مورد استفاده در این مطالعه استحکام بخش های سیلیکاتی واکر بود. نتایج این مطالعه باعث پیشنهاد استفاده از محصولات استحکام بخش سیلیکاتی (با ویسکوزیته مناسب برای نفوذ) در بافت سنگ به وسیله پمپ خلأ برای تثبیت ترک های سنگ گردید. کوزلی و پاولیز (Kouzeli, & Pavelis, 2002) با هدف ساختارشناسی، آسیب شناسی و طرح درمان حفاظتی به وسیله استحکام بخشی ۴ گونه توف از محوطه آکروتیری ترا (Acrotiri, Thera) یونان اقدام به استفاده از مواد تگواکن A، واکر OH و سیلکس Silex OH نمودند، با روش استفاده از قلم مو تا حدی که دیگر جذبی صورت نگیرد. نتایج اعمال سه گونه استحکام بخش بر سنگ های توف هوانزده و سنجش فرایند عملکرد به تقلید از شرایط محوطه آن ها نشان داد در توف های غنی از سیلیکا، رسوب سیلیکا اتفاق نیفتاده است و هر سه ماده چسبندگی را افزایش و تردی را کاهش دادند. دی کاستا و دیگران (De Casa et al, 1994) برای حفاظت از مجسمه های موآی در جزیره ایستر براساس ارزیابی درمان های آزمایشگاهی اقدام به استفاده از اتیل سیلیکات نمود. نتایج این استحکام بخشی نشان دهنده عملکرد موفق اتیل سیلیکات به عنوان استحکام بخش سنگ توف داشت بخصوص اینکه این ماده در آزمون های مقاومت سایشی، مقاومت فشاری و آزمون جذب آب بسیار عملکرد خوبی داشته است. نتایج برآمده از مطالعات فوق که بر روی تنوع فراوانی از استحکام بخش های سنگ و مواد آب گریز آلی و معدنی صورت گرفته است، نشان دهنده آن است که بخصوص در سال های اخیر درمان های زیادی مبتنی بر کاربرد الکوکی سیلان صورت گرفته است که نتیجه آن نشست سیلیکا در منافذ سنگ است (Carola, 1997) و

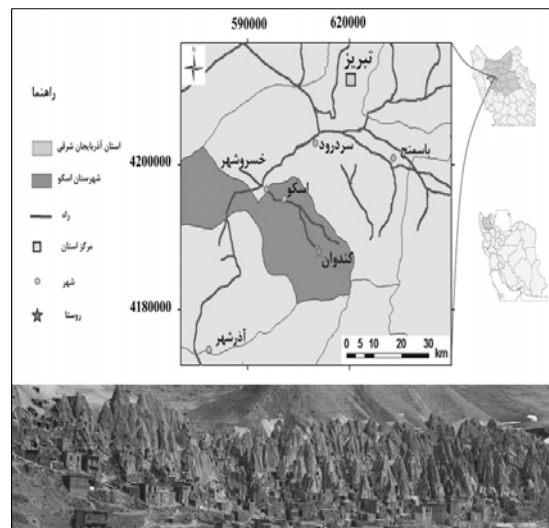


ت ۲. گونه‌های شاخص آسیب در معماری صخره‌ای کندوان، (A) تورق شدید با بیش از ۵ سانتی‌متر جدایش از بستر اصلی، (B) از دست رفتن زمینه، (C) تغییر رنگ و تاول.

#### شرایط اقلیمی و آب و هوایی دره کندوان

کندوان از نظر جغرافیایی در شهرستان اسکو و ارتفاعات سه‌سند قرار گرفته است. این ارتفاعات از لحاظ موقعیت جغرافیایی، آب و هوای از نیمه خشک سرد تا نیمه مرطوب سرد متغیر دارد و دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های معتدل است (کرمی، ۱۳۸۶). بارندگی آن بیشتر در فصول سرد سال بوده و تابستان‌های آن خشک و گاهی با بارندگی‌های رگباری همراه است. بیشتر بارش‌ها بهاره بوده که در اوایل بهار به صورت باران و برف و در اواسط آن به شکل باران هستند. از نیمه خرداد معمولاً بارندگی‌ها قطع و خشکی یا کم بارانی تا اواخر شهریور ادامه می‌یابد (رازانی و دیگران، ۱۳۹۷). با توجه به اینکه در ارتفاعات خیلی بالا و در بیشتر نقاط شهرستان ایستگاه هواشناسی وجود ندارد لذا می‌توان از رابطه دما با ارتفاع و بارش با ارتفاع، جهت محاسبه میزان دما و میزان بارش این مناطق بهره گرفت. همان‌طور که می‌دانیم با افزایش ارتفاع میزان دما، کاهش و میزان بارش، افزایش می‌یابد و این کاهش دما و

است و با توجه به مطالعات صورت گرفته از زمان ایلخانیان تا به امروز به صورت مکرر مورد استفاده قرار گرفته است (همایون، ۱۳۵۶) (تصویر شماره ۱) و امروزه به دلیل جاذبه‌های بالقوه طبیعی و فرهنگی از مناطق پر بازدید گردشگری شمال غرب کشور محسوب می‌شود. متأسفانه خانه‌های سنگی و معماری منحصر به فرد کندوان در حال حاضر دچار تخریب شدید سطحی هستند که این امر به واسطه دارا بودن تخلخل بالا، دوام کم و توان ذاتی پایین سنگ توف آتش فشانی مورد نظر برای مقاومت در برابر پدیده‌های مختلف هوازدگی و مکانیسم‌های ناشی از تأثیر آب است (امینی بیرامی و دیگران، ۱۳۹۴). عوامل تخریبی باعث گردیده است که آسیب‌هایی از قبیل تورم، لایه‌لایه شدن، جدایش دانه‌ای و پودری شدن (تصویر شماره ۲) نمایان گردند که در برخی موارد به همراه عوامل سازه‌ای موجب ویرانی کلی خانه‌های سنگی گردیده است لذا انجام مطالعات و عملیات حفاظت، مرمت و نگهداری در منطقه ضرورت دارد.



ت ۱. نقشه موقعیت و راه‌های دسترسی به روستای کندوان و منظر فرهنگی آن از دید جنوبی (مأخذ نقشه: امینی بیرامی و دیگران، ۱۳۹۴).

تبخیر سنجی ليقوان، نشان داد معماری سنگی روستای کندوان سالانه ۲۸ چرخه تر و خشک شدن و ۱۴ چرخه ذوب و انجماد متحمل می‌شوند (امینی بیرامی و دیگران، ۱۳۹۴).

### مواد و روش‌های آزمایشگاهی آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشی

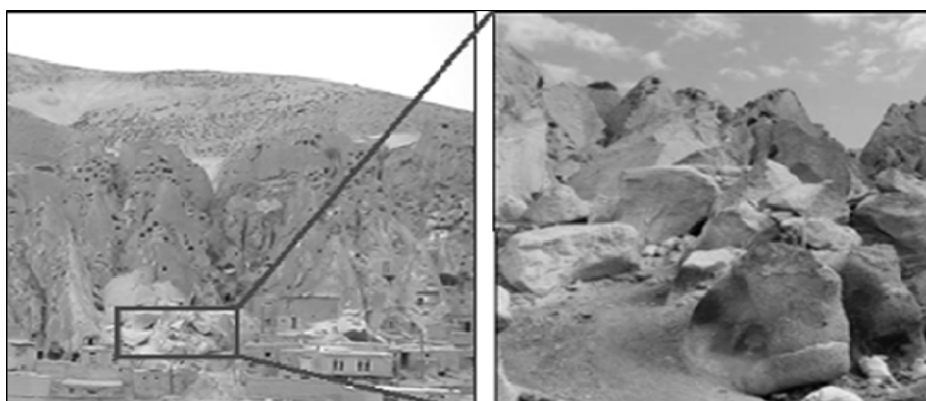
مرحله نخست در روند مرمت، حفاظت و استحکام بخشی از یک بنای سنگی، شناخت و بررسی ویژگی‌های سنگ‌شناسی و فیزیکی سنگ‌های سالم بنا برای سنجش واکنش آن‌ها در برابر عوامل مخرب است. برای انجام مطالعات آزمایشگاهی سنگ‌خانه‌های کندوان به دلیل عدم امکان نمونه‌برداری از بناهای ثبت ملی و ممانعت ساکنین از این اقدام و همچنین اهداف مطالعه حاضر، مبتنی بر ارزیابی اثرگذاری درمان‌های سطحی در میزان بهینه نمودن مقاومت سنگ، نمونه‌های در دودسته متفاوت «سنگ بکر» و «سنگ هوازده» تهیه گردید. به نحوی که نمونه‌های هوازده از سطوح بیرونی یکی از بناهای تخریب شده موجود در وسط روستای کندوان و نمونه‌های بکر از بخش‌های داخلی همین بنا و از قسمت‌هایی که به هیچ‌وجه در معرض هوازده‌گی قرار نگرفته بود، انجام شد (تصویر شماره ۳).

افزایش بارش با افزایش ارتفاع و بالعکس، یک رابطه خطی است. براساس مطالعاتی که با استفاده از داده‌های دمایی ایستگاه‌های منطقه صورت گرفته است رابطه‌های زیر براساس معادله‌های رگرسیون برای گرادیان حرارتی و گرادیان بارش منطقه پیشنهاد شده‌اند (مقیمی اسکویی، ۱۳۹۰، ۷۸-۸۵).

$$T = 22.3 + 0.0075 HM$$

$$P = 241.85 + 0.028 HM$$

در این روابط H ارتفاع از سطح دریا برحسب متر، T متوسط درجه حرارت سالیانه برحسب سانتی‌گراد و P بارش سالیانه برحسب میلی‌متر است. در این میان دمای متوسط سالیانه روستای کندوان براساس گرادیان فوق ۶/۶۱ 0C و میزان بارش آن ۳۰۴/۱۵mm خواهد بود. نتایج بررسی‌های هواشناسی منطقه حاکی از آن است که متوسط چرخه تر و خشک شدن سالانه ۲۸ دفعه و ۱۴ چرخه ذوب و انجماد در منطقه روی می‌دهد. 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. (امینی بیرامی و دیگران ۱۳۹۵) مطالعه ده‌ساله شرایط آب و هوایی منطقه (۱۳۷۹ - ۱۳۸۸) براساس ایستگاه



ت ۳. نمایی از روستای صخره کند کندوان و یکی از کِران‌های ویران شده حل نمونه برداری.

قالب ترکیبی از اسید و باز به شکل یک نمک و یک مولکول آب است که در نتیجه انباشتگی اسید با الکل که حاصلش یک استر و یک مولکول آب است تشکیل شود. چنان‌که اسید سیلیسیک دارای چهار موضع واکنش پذیر است و می‌تواند با چهار مولکول اتیل الکل ترکیب شود و به صورت اتیل سیلیکات و چهار مولکول آب درآید. اتیل سیلیکات ماده مناسبی برای استحکام بخشی مواد متخلخل آب دوست به صورت اشباع‌سازی است چرا که ویسکوزیته کمی دارد که می‌تواند به راحتی تا عمق منافذ و درزه‌ها به شکل سیلیسیک اسید نفوذ نماید و اگر مقداری آب و رطوبت نیز در دسترس باشد بعد از اعمال نمودن می‌تواند هیدرولیز شده و به صورت ذرات کلونیدی در ساختارهای متخلخل نفوذ نماید (180 Torraca, 2009, 178). مولکول‌های سیلیکا به صورت شیمیایی شبیه کانی‌های سیلیکاتی هستند و بنابراین آن‌ها یک سازگاری قابل قبولی را با سنگ‌هایی که ترکیب سیلیکاتی دارند از خود نشان می‌دهند (DelgadoRodriguez, 2001).

از طرف دیگر ذرات نانومتريک و کلوییدی سیلیکا به صورت سوسپانسیون در قالب محصولی بدون اثر زیست‌محیطی مخرب در قالب ماده نانو سیلیکای مورد استفاده قرار گرفت. این ماده دارای ویسکوزیته مشابه آب برای سطوح خیس، ساخته شده و می‌تواند در سطوح خیس به صورت تزریقی و به صورت پاشش بر سطح عمل نماید. (BASF 2015) کلیه نمونه‌های مورد استفاده در آزمون‌ها مکعب‌های (۴۰×۴۰×۴۰mm) بوده است که به روش غوطه‌وری و اشباع به مدت یک ساعت در رزین، عملیات استحکام بخشی بر روی آن‌ها انجام شده است. اطلاعات و مشخصات محصول اتیل سیلیکاتی و نانو سیلیکاتی مورد استفاده در جدول شماره ۱ آمده است.

با توجه به عدم موفقیت در عملیات مغزه‌گیری سنگ در محل و در آزمایشگاه به علت تردی و سستی بیش از حد سنگ کندوان نمونه‌های مورد مطالعه به وسیله سیم برش الماسه به صورت مکعبی با ابعاد (۴۰×۴۰×۴۰mm) تهیه شد و بارکدگذاری گردید (جدول شماره ۲). لازم به ذکر است مکعب‌ها براساس استاندارد می‌توانند در ابعاد مختلفی باشند. در این رابطه بنا بر استاندارد (UNE-EN 13755,2008) کوچک‌ترین ابعاد ۴ × ۴ × ۴ پیشنهاد شده است. در ادامه مطالعات ساختارشناسی (با استفاده از پتروگرافی مقطع نازک و آنالیزهای XRF, XRPD) و بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگ بکر و هوازده صورت گرفت. در ادامه اتیل سیلیکات و نانو سیلیکات به عنوان دو رزین متداول در مرمت آثار تاریخی جهت استحکام بخش نمونه‌های هوازده سنگ کندوان با استفاده از روش غوطه‌ورسازی نمونه سنگی در ماده استحکام بخش مورد استفاده قرار گرفت. به نحوی که نمونه‌های مکعبی از سنگ‌های هوازده یک ساعت در محلول استحکام بخش قرار گرفتند و در هر ۱۵ دقیقه جهت آن‌ها تغییر داده می‌شد تا دیگر هیچ‌گونه حباب هوایی از آن‌ها خارج نشود. در ادامه نمونه‌های استحکام بخشی شده برای تکمیل فرایند واکنش و خشک شدن به مدت یک ماه در هوای اتاق قرار داده شد و در نهایت آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی برای هر سه دسته سنگ‌های هوازده، سنگ‌های هوازده استحکام بخشی شده و سنگ‌های بکر استحکام بخشی نشده انجام گرفت.

#### - اتیل سیلیکات و نانو سیلیکات

احتمالاً اتیل سیلیکات پر استفاده‌ترین ماده از میان مواد استحکام بخش سنگ است (Delgado Rodriguez, 2001). که در واقع استر اتیل از اسید سیلیسیک در

نام کامل محصول	Kerakover Eco Silicato di Etile	Master Roc MP 320
ترکیب شیمیایی	Ethyl silicate	Nano silicate
فرم ماده	مایع	مایع
رنگ و ظاهر	بدن رنگ - شفاف	بدون رنگ و شفاف
بو	بوی تند، همانند الکل	بدون بو
دمای جوش	۱۶۸-۱۶۹ °C	۱۰۳ °C
قابلیت اشتعال	قابلیت اشتعال دارد	قابلیت اشتعال ندارد
نقطه اشتعال	۴۵ °C	با محتوای آب بالا تعیین نقطه اشتعال غیر ضروری است.
چگالی	۰.۹۳۳ g/cm <sup>3</sup> @ ۲۰ °C	۲.۰ g/cm <sup>3</sup> (۱.۰۷) @ ۲۰ °C تقریباً
ویسکوزیته	نامعلوم	۲۰ mPa.s (۱۰~) @ ۲۰ °C
قابلیت ترکیب با آب	واکنش با آب	مخلوط شدنی در (۲۰ °C)
سایز مولکول	نامعلوم	در مقیاس نانو
برخی مشخصات	بدون اثر زیست محیطی مخرب، انتشار بالای ماده استحکام بخش قوی بر پایه اتیل استر از اسید سیلیسیک، بدون خطر برای محیط زیست و اپراتور	بدون اثر زیست محیطی مخرب، ویسکوزیته پایین، دوغایی آبدوست برای استحکام بخشی و تحکیم سطوح خیس میزان اکسید سیلیسیم (SiO <sub>2</sub> ) = ۴۰ ± ۱%
تولید شرکت	KeraKoll/ Italy	BASF SE/ Germany

### ج ۱. ویژگی های فنی استحکام بخش های مورد استفاده در این مطالعه.

همچنین سنجش خواص استقامتی شامل مقاومت در مقابل چرخه های پیرسازی مصنوعی و مقاومت فشاری و مقاومت در دوام داری بر اساس استانداردهای ملی و بین المللی به انجام رسیده است (جدول شماره ۲).

### مطالعات آزمایشگاهی

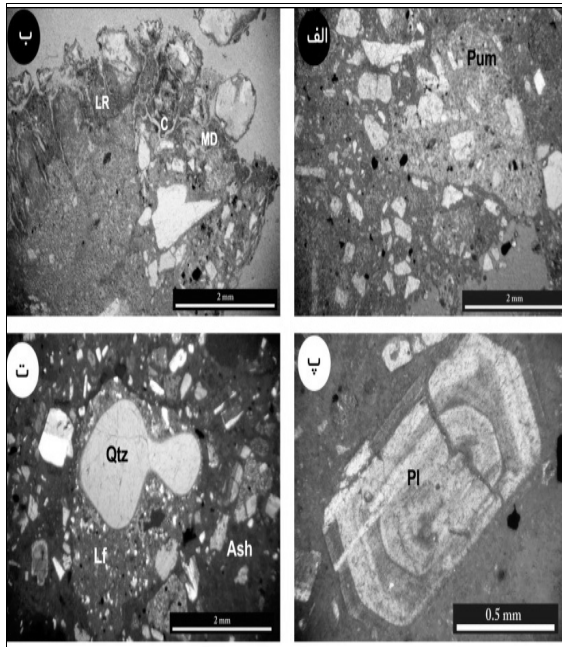
مطالعات آزمایشگاهی شامل تعیین خواص فیزیکی نمونه ها، ساختارشناسی و کانی شناسی با روش تعیین عناصر به شیوه XRF، XRD و پتروگرافی مقطع نازک

آزمایش	گونه آزمون	هدف	استاندارد
خواص فیزیکی	میزان رطوبت و جذب آب (%)	تعیین نرخ جذب آب در سنگ.	BSEN 1097-3, ASTM D1585, 2004
	چگالی و تخلخل	تعیین میزان چگالی و تخلخل برای درک رفتار هوازگی سنگ.	ISRM, 1979
	موینگی	تعیین مقاومت در برابر یخبندان.	UNE-EN 1925: 1999
ساختارشناسی و کانی شناسی	پتروگرافی مقطع نازک	مطالعه گونه سنگ و تغییرات ثانوی کانی های سنگ (کانی شناسی، بافت و ترکیب).	میکروسکوپ پلاریزان لایکا (۲۰۰۰) ساخت کشور آلمان در دانشگاه بیوکا
	X-ray Diffraction (XPRD)	تعیین فازهای کریستالی موجود در نمونه.	ساخت کارخانه: PHILIPS، مدل PW1800 آنالیز شده در شرکت کانساران بینالود تهران
ویژگی های استقامتی	شاخص دوام و ارتعاش <sup>۱</sup>	تعیین مقاومت نمونه تحت آزمون دوام داری.	ASTM D4644-87
	مقاومت فشاری تک محوری	تعیین مقاومت فشاری سنگ بکر و هواده، تعیین تفاوت میان تغییرات مقاومت فشاری سنگ درمان شده و درمان نشده کندوان.	سیستم تمام خودکار (250 kN)GD-VIS دانشگاه بیوکا ایتالیا.

### ج ۲. آنالیزهای ریز ساختارشناسی اهداف و مراجع استانداردها (مأخذ: نگارندگان).



دیده می‌شود. دگرسانی‌ها و کانی‌های ثانویه سنگ توف لیتیک کندوان شامل دگرش آمفیبول و بیوتیت به کلریتی (در حاشیه مسکویت) و کلریت به اکسید آهن (گوتیتی شدن) و سریسیت است.



ت. الف) تصویر عمومی از سنگ توف و قطعات پامیس محتوای آن (XPL+2.5X). ب) ریشه‌های گل‌سنگ (LR)، ترک‌ها (C)، کانی‌های رسوب کرده (MD) (XPL+2.5X... پ) پلاژیوکلاز زونار (PL) (XPL+2.5X). ت) کوارتز خلیجی (Qtz)، قطعات لیتیک (LF)، خاکست (PPL+2.5X). (مأخذ: نگارندگان)

### آنالیز پراش پرتو ایکس

نتایج فازهای شناسایی شده توسط آنالیز XRD در هر ۲ گونه نمونه سنگ بکر و سنگ هوازه نشان دهنده فازهای اصلی: پلاژیوکلاز (آنورتیت و آلپیت)، کوارتز در کنار فازهای آمفیبول از نوع منیزیوم هورنبلند آهن‌دار به همراه کانی‌های ایلیت و مسکویت به عنوان کانی‌های دگرسان شده و مستعد تخریب هستند (جدول شماره ۳).

### نتایج و بحث

#### مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی

بررسی مقاطع نازک نمونه‌های هوازه و بکر نشان داد سنگ کندوان دارای ساختاری ناهمگن بوده و مطابق با نمونه‌های دستی از قطعات سنگی سخت، پامیس بسیار متخلخل برخوردار است و در سطح بیرونی نیز لایه آمیخته با قارچ و گل‌سنگ دیده می‌شود که ضخامتش در بیشترین مقدار ۰/۵cm است. در بستر مطالعات پتروگرافی با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان موارد کانی‌های متفاوتی مشاهده می‌گردد. در این رابطه فنوکریست‌های مشاهده شده شامل پلاژیوکلاز عمدتاً از نوع آنورتیت (در مواردی زونار که از لحاظ اندازه در حد متوسط بوده و به صورت کلی و خرد شده، نیمه شکل دار تا بی‌شکل هستند و در برخی موارد دچار خوردگی شیمیایی شده‌اند) و ارتوکلاز عمدتاً از نوع سائیدین (در برخی موارد با حواشی خورد شده و خوردگی خلیجی) همچنین کانی‌های آمفیبول با بلورهای ایدیومورف و لوزی شکل هورنبلند با مجموعه بلورهای اپیدوت و متمایل به دگرسانی کلریت. به علاوه پوسته‌های ظریف بیوتیت که غالباً به کلریت تبدیل شده‌اند در بافت سنگ دیده می‌شوند. هورنبلندها دارای ادخال‌هایی از کانی‌های اپیک هستند، به این مجموعه باید تک کانی‌های کوارتز (با ابعاد متوسط)، قطعات لیتوکلاست در ابعاد مخالف و نیز تعدادی کانی‌های اپیک (غیر سیلیکات) را باید افزود. مجموعه این اجزا در ابعاد ریز در سیمان سست و ریزدانه‌ای خمیره و تا حدی به همراه شیشه ولکانیک، در کنار هم قرار گرفته‌اند (تصویر شماره ۴). بافت‌های قالب سنگ توف کندوان بافت پورفیری تا حدی بافت شیشه‌ای (ویتریک) و یا هیالوپورفیریک است و در مواردی بافت‌های دیگری چون گومرو پورفیری و برشی در آن

توف کندوان اصطلاح ایگنیمبریت جوش نخورده را پیشنهاد می‌کند.

**خواص فیزیکی و مقاومتی**

براساس نتایج برآمده از خواص فیزیکی سنگ بکر و هوازده سطوح بیرونی معماری صخره کند کندوان در مقایسه با نمونه‌های استحکام بخشی و درمان شده با اتیل سیلیکات و نانو سیلیکات (جدول شماره ۴) می‌توان گفت سنگ کندوان در حالت بکر و هوازده تفاوت چندانی از نظر خواص باهم ندارند و با میزان چگالی خشک کم و تخلخل کل بالا و همچنین میزان جذب آب خیلی بالا سنگی با طیف مقاومتی بسیار پایین در برابر فرایندهای هوازده‌گی و فرسایش تقسیم‌بندی می‌گردد. نتایج همچنین به وضوح نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه کاهش جذب آب نمونه‌های استحکام بخشی شده و بسته شدن لوله‌های موئین با توجه به داده‌های آزمون موئینگی است. آن‌چنان‌که نتایج جذب آب از طریق موئینگی نشان می‌دهند نمونه‌های هوازده و نمونه‌های سنگ بکر واکنش یکسانی به فرایند جذب آب دارند و همچنین هر دو جهت نمونه‌ها به‌صورت همسانگرد بوده و واکنش یکسانی را نشان می‌دهند اما در نمونه‌های استحکام بخشی شده واکنش کاملاً متفاوت است. در نمونه درمان شده اتیل سیلیکات جذبی ۱٪ در طی ۹۶ ساعت صورت گرفت و در نمونه اشباع شده با نانو سیلیکات عمده تغییرات که حاکی از جذب مقدار کمی آب و از طریق کشش موئینه بود بعد از طی شدن مدت مقرر اتفاق افتاد.

«این امر نشان‌دهنده پر بودن تخلخل‌ها و یا عدم وجود تخلخل‌های باز نسبتاً زیاد در مناطقی است که استحکام بخش در آن‌ها اثر داشته و نفوذ نموده است» (Vacchiano, 2008, p.21).

Plagioclase	Magnesianblend Ferrous	Quartz	Illite	Muscovite	نمونه
√	√	√	-	√	KFR
√	√	√	-	√	KWR
√	√	√	√	-	KWR-NST
√	-	-	√	-	KWR-EST
CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> & NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	(Na <sub>4</sub> K <sub>-01</sub> )(Ca <sub>1.8</sub> Fe <sub>2</sub> )(Mg <sub>3.1</sub> Fe <sub>1.5</sub> Al <sub>4</sub> )(Si <sub>7</sub> AlO <sub>22</sub> )(OH) <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	K(Al <sub>4</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>9</sub> (OH) <sub>3</sub> )	KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH, F) <sub>2</sub> )	فرمول شیمیایی
08-083-1606	00-083-0735	01-085-0797	01-070-3754	01-086-1385	Ref Number

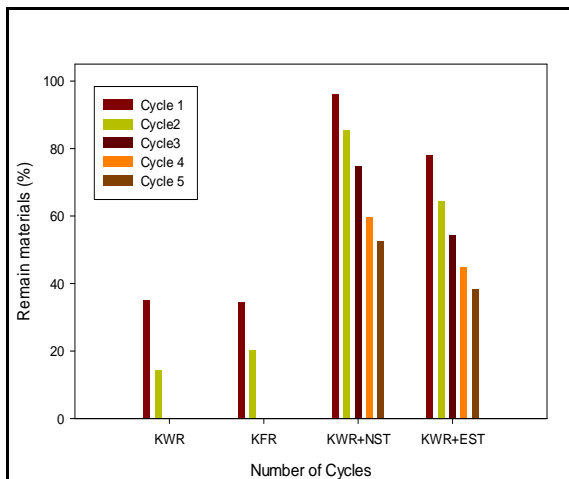
نمونه سنگ بکر کندوان KFR / نمونه سنگ هوازده کندوان KWR / نمونه سنگ هوازده کندوان استحکام بخشی شده با نانو سیلیکات KWR+NST / نمونه سنگ هوازده کندوان استحکام بخشی شده با اتیل سیلیکات KWR+EST

**ج ۳. نتایج داده‌های فازشناسی کیفی با استفاده از پراش اشعه ایکس به روش پودری از سنگ کندوان. (مأخذ: نگارندگان)**

براساس داده‌های حاصل از مطالعات پتروگرافی مقطع نازک می‌توان گفت نام علمی سنگ خانه‌های روستای کندوان در قالب طبقه‌بندی‌های سنگ‌های آذرآواری، توف لیتیک با ترکیبات تراکیت، آندزیت، داسیت و ریولیت است. درهمین راستا اولیور ( Oliver 1954) برای نام‌گذاری نهشته‌های لایلی توف و لیتیک توف از اصطلاح ایگنیمبریت استفاده کرده است. برانی و همکاران (Branney et al, 2002) نیز لایلی توف و لیتیک توف را به‌عنوان مهم‌ترین رخساره‌های ایگنیمبریتی معرفی نموده‌اند. بنابراین لیتیک توف‌های کندوان را می‌توان ایگنیمبرایت نامید. همچنان‌که معین وزیری و امین سبحانی (۱۳۵۶) نیز از این اصطلاح برای آن استفاده نموده‌اند. درهمین راستا پژوهشگران این حوزه (غیوری، ۱۳۸۱، ص ۸۱-۸۲، امینی بیرامی و دیگران ۱۳۹۴) با نظر به جوش خوردگی ضعیف سنگ

Id <sub>5</sub> (%)	Id <sub>4</sub> (%)	Id <sub>3</sub> (%)	Id <sub>2</sub> (%)	Id <sub>1</sub> (%)	نمونه‌های مورد آزمایش
-	-	-	۱۷.۱۴	۳۳/۹۴	سنگ هوازده سطح بیرونی (KWR)
			۲۰.۱۲	۳۴.۴۷	سنگ بکر (KFR)
۳۸/۲۷	۴۴/۷۱	۵۴/۱۷	۶۷/۲۸	۷۸/۰۳	سنگ درمان شده با اتیل سیلیکات KWR+EST
۵۲/۳۷	۵۹/۷۱	۷۴/۷۹	۸۵/۴۰	۹۶/۰۸	سنگ درمان شده با نانو سیلیکات KWR+NST
نمونه سنگ بکر کندوان KFR / نمونه سنگ هوازده کندوان KWR / نمونه سنگ هوازده کندوان استحکام بخشی شده با نانو سیلیکات KWR+NST / نمونه سنگ هوازده کندوان استحکام بخشی شده با اتیل سیلیکات KWR+EST / مشخص Id / دوام داری مرحله ۱-۵					

ج ۵. مقاومت دوام وارفتگی محاسبه شده برای نمونه‌های مورد آزمایش. (مأخذ: نگارندگان).



ن ۱. آزمون دوام‌داری برای سنگ هوازده و بکر کندوان به‌همراه نمونه‌های استحکام بخشی شده (مأخذ: نگارندگان).

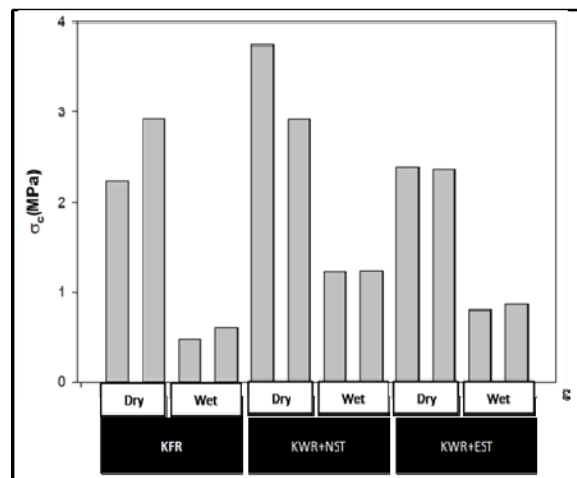
از طرف دیگر باهدف ارزیابی میزان بهبود مقاومت و خواص تغییر شکل‌پذیری، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در دو شرایط خیس و خشک برای نمونه‌های بکر و نمونه‌های هوازده استحکام بخشی شده انجام گرفت به‌نحوی که از هرگونه دو نمونه در شرایط خشک و دو نمونه در شرایط اشباع از آب مورد سنجش مقاومت فشاری قرار گرفتند و در همین راستا نتایج

گونه آزمایش	تعداد نمونه	KFR	KWR	KWR+NST	KWR+EST
درصد آب (%)	۳	۲۵-۲۳	۳۰-۲۵	۷	۴
چگالی خشک (gr/cm <sup>3</sup> )	۳	۱.۵۷	۱.۲۵	۱.۴۹	۱.۵۲
تخلخل کل (%)	۳	۳۹-۴۰	۴۲-۴۲	۴۱-۴۰	۳۷-۳۴
درصد شاخص پوکی (%)	۳	۴۵	۴۶-۴۴	۳۴	۳۵
موئینگی (g/m <sup>2</sup> /s)	۳	۲۳۰	۲۷۶	۵۶	۱
نمونه سنگ بکر کندوان KFR / نمونه سنگ هوازده کندوان KWR / نمونه سنگ هوازده کندوان استحکام بخشی شده با نانو سیلیکات KWR+NST / نمونه سنگ هوازده کندوان استحکام بخشی شده با اتیل سیلیکات KWR+EST					

ج ۴. نتایج حاصل از آزمایش‌های ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌های درمان شده و درمان نشده معماری صخره‌ای کندوان. (مأخذ: نگارندگان).

نتایج حاصل از آزمایش شاخص دوام وارفتگی سنگ در نمونه‌های بکر، هوازده و نمونه‌های استحکام بخشی شده با نانو سیلیکات و اتیل سیلیکات در جدول شماره ۵ و نمودار شماره ۱ آمده است و نشان‌دهنده مقادیر بالای کاهش وزن در چرخه‌های سایش و تر و خشک شدن برای نمونه‌های هوازده و بکر اتفاق می‌افتد و دو نمونه از لحاظ مقاومت در مقابل چرخه‌های دوام‌داری تفاوت چندانی باهم ندارند و وزن باقی‌مانده آن‌ها در طی دو چرخه به حدود ۱۸٪ می‌رسد. از این‌رو در تقسیم‌بندی‌های رایج همچون (ISRM 1981) و (ASTM D4644-87)، سنگ هوازده و سطحی کندوان و سنگ بکر کندوان در رده خیلی ضعیف از لحاظ دوام‌داری قرار می‌گیرند. از طرفی این آزمایش نشان داد در نمونه‌های استحکام بخشی شده تا بعد از ۵ چرخه در نمونه استحکام بخشی شده با اتیل سیلیکات وزنی تقریباً معادل چرخه نخست دوام‌داری سنگ بکر و هوازده می‌یابد و نمونه نانو سیلیکات بعد از پنج چرخه مقاومتی ۱/۵ برابری نسبت به سنگ بکر و هوازده دارد و خواص مقاومتی و دوام‌داری بهبود یافته است.

نشان‌دهنده آن است که مقاومت سنگ در حالت خشک در کلیه نمونه‌ها تقریباً دو برابر نمونه‌های تر در همان‌گونه است و همچنین می‌توان گفت در نمونه‌های بکر و استحکام بخشی شده تفاوت چندان محسوسی با شرایط خشک دیده نمی‌شود اما برعکس در شرایط اشباع از آب میزان مقاومت نمونه‌های استحکام بخشی شده در مقایسه با نمونه‌های بکر مابین ۰.۵-۱ MPa ارتقاء یافته است که در این زمینه استحکام بخشی با نانو سیلیکات نتایج بهتری را از خود نشان می‌دهد (نمودار شماره ۲).



۶. مقایسه نتایج آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری برای سه گروه نمونه‌های سنگ بکر و سنگ‌های هوازده و درمان شده با اتیل سیلیکات و نانو سیلیکات در شرایط خشک و اشباع (مأخذ: نگارندگان).

### نتیجه

فرایندهای تخریبی در میراث سنگی روستای کندوان به‌واسطه ساختار فیزیکی ضعیف توف‌های آتش‌فشانی، شرایط اقلیمی سخت با تعداد چرخه‌های بالای یخ بردن، در کنار عوامل انسانی باعث تسریع فرایندهای تخریب و در نهایت فرسایش سطوح بیرونی معماری

صخره کند کندوان گردیده است. از این رو درمان‌هایی که بتوانند سطوح بیرونی را در مقابل این عامل تخریبی در قالب مواردی چون استحکام بخشی و ضدآب سازی تقویت نمایند مورد توجه هستند. نتایج مطالعات ساختارشناسی، آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ کندوان نشان می‌دهند که سنگ توف کندوان از لحاظ ویژگی‌های سنگ‌شناسی، سنگی ضعیف و مستعد فرسایش و هوازدهی است. از این رو نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی نشان از کارآمدی مواد استحکام بخش به‌ترتیب نانو سیلیکات و اتیل سیلیکات در راستای درمان سطحی و بهبود مقاومت سطحی و مقاومت در شرایط خیس و اشباع از آب دارند و می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های مناسبی در مطالعات میدانی مورد استفاده و ارزیابی قرار گیرند. چرا که نتایج حاکی از افزایش مقاومت نسبی و بهبود خواص در سنگ‌های استحکام بخشی شده با نانو سیلیکات نسبت به اتیل سیلیکات است و در فاصله دورتر نسبت به نمونه‌های استحکام بخشی نشده است. در کل با توجه به آنکه سطوح معماری صخره کند کندوان در طول چهار فصل سال خیس هستند اتیل سیلیکات به‌واسطه واکنش با آب و در ساختارهای خیس می‌تواند گزینه مناسبی برای پوشش سطحی باشد و نانو سیلیکات می‌تواند به‌غیر از استحکام بخشی سطحی به‌صورت تزریقی برای تحکیم سطوح زیرسطحی مورد استفاده قرار گیرد. به نظر می‌رسد علت تقویت نسبی سنگ‌های استحکام بخشی شده با نانو سیلیکات نسبت به اتیل سیلیکات نفوذ ذرات نانو در تخلخل‌های سنگ و مسدود نمودن آن‌ها باشد که با افزایش تراکم سطحی توانسته منجر به افزایش مقاومت نمونه‌ها گردد. لازم به ذکر است مسئله عمر مفید هر ماده استحکام بخش بسته به روش استفاده و اعمال ماده، عمق نفوذ در لایه‌های مختلف هوازده و

مطالعات آینده در محل و با توجه به وجود آفات زیستی (شامل انواع جلبک، خزه، گل‌سنگ و غیره) بر روی خانه‌های صخره کند صورت گیرد اگرچه آفت کشی می‌تواند اقدامی مفید قبل از استحکام بخشی باشد اما هرگونه تصمیمی در راستای زدودن آفات زیستی بایستی براساس مطالعات و داشتن برنامه‌ای مشخص و برآمده از آزمون‌های متعدد برای پوشش‌دهی مناسب بعد از این اقدام باشد.

### تشکر و قدردانی

تحقیق فوق با حمایت مالی و آزمایشگاهی دانشگاه بیکوکا، شهر میلان، ایتالیا انجام شده است که بدین وسیله از اعضای هیئت علمی این دانشگاه سپاسگزاری می‌گردد. همچنین از سازمان میراث فرهنگی استان آذربایجان شرقی در راستای همکاری با نویسنده در مدت کار میدانی تشکر می‌گردد.

### پی‌نوشت

۱- شاخص دوام وارفنگی: یکی از ویژگی‌های مهم سنگ‌ها قابلیت وارفنگی و تأثیرپذیری آن‌ها از فرایندهای هوازدگی مانند پوسته‌پوسته‌شدن، هیدراسیون، وارفنگی، 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 وارفنگی است. آزمایش دوام وارفنگی بر روی نمونه سنگ کندوان طبق استاندارد ASTM D 4644, 2004 انجام شده است.

۲- باهدف طبقه‌بندی و تعیین خصوصیات هوازدگی سنگ‌ها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، آزمایش دوام وارفنگی (شکفتگی) به کار گرفته می‌شود. در مطالعه حاضر این روش باهدف تعیین شاخص دوام وارفنگی و ثبت تغییرات دوام از سطح هوازده نسبت به سنگ بکر، همچنین تعیین این شاخص در نمونه‌های استحکام بخشی شده بوده است چراکه این روش شاخصی مناسب برای درک وضعیت دوام سنگ‌ها و حساسیت آن‌ها در مقابل تر و خشک شدن متوالی و تأثیرات شیمیایی آب به‌صورت نسبی بوده و آن‌ها را نسبت به هم

شرایط نگهداری (در این مورد مجاورت با رطوبت) و حفاظت از سطح می‌تواند متغیر باشد از این‌رو برهم‌کنش‌های این مواد با مسائل موجود می‌تواند باعث تغییراتی در شکل‌گیری واکنش آن‌ها گردیده و عمر مفید آن‌ها را کاهش دهند. نکته مهم این است که به علت ساختار سیلیکاتی این دوماده که هر دو در نهایت به ماده معدنی تبدیل می‌شوند می‌توان انتظار داشت بانفوذ در داخل سیستم تخلخلی اثر، واکنشی مشابه سطوح پذیرای ماده داشته و به تقویت لایه‌هایی که در آن‌ها نفوذ کرده‌اند بیانجامد. نکته دیگری که در رابطه با چنین تحقیقاتی می‌تواند مد نظر قرار گیرد مسئله هزینه و فایده استفاده از محصولات گران‌قیمت استحکام بخشی و پوشش‌دهی است. از منظر حفاظت بهترین حالت آن است که بتوان با رعایت اقدامات پیشگیرانه و موارد کم‌هزینه اقدام به حفاظت و نگهداری آثار و ابنیه تاریخی نمود اما در زمانی که مسئله تخریب تا جایی پیشرفت کرده باشد که دیگر نتوان بدون مداخلات فنی اقدام به نگهداری و حفظ سطوح نمود مجبور به استفاده از مواد استحکام بخش هستیم و این امر با توجه به ارزش‌های ملی و فرهنگی آثاری همچون روستای تاریخی کندوان که قابلیت فراوانی برای ثبت جهانی دارند می‌تواند توجه اقتصادی داشته باشد. در همین راستا بایستی تأکید کرد مطالعات در ابتدای راه است و حصول نتیجه مناسب که بتواند هم در آزمایشگاه و هم در محل کارایی لازم را داشته باشد زمان‌بر خواهد بود. چراکه تنها نمی‌توان به مطالعات آزمایشگاهی اکتفا نمود و بایستی پس از اعمال مواد استحکام بخش و پوشش‌های آب‌گریز سطح دیوارهای سنگی مطابق با شرایط جوی حاکم بر منطقه مطالعه و بررسی نتایج حاصل به مدت حداقل یک‌سال مطابق استانداردهای بین‌المللی ارزیابی شود. در این زمینه پیشنهاد می‌گردد

درجه‌بندی خواهد کرد. لازم به ذکر است این روش در سال ۱۹۷۱ توسط فرانکلین و چاندرا پیشنهاد شد (Franklin and Chandra, 1972) و در ادامه توسط ASTM (ASTM D4644-87) استانداردسازی شد (فهیمی فر و سروش ۱۳۸۰). براساس استاندارد ASTM D4644-87 برای انجام آزمایش دوام‌داری ۱۰ نمونه سنگ مورد نظر که هر یک وزنی معادل ۴۰-۶۰ گرم داشته باشند و فاقد ناپیوستگی باشند، نیاز است. در ادامه نمونه‌ها به مدت ۴-۶ ساعت در خشک‌کن با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود پس از خروج نمونه‌ها از خشک‌کن جرم اولیه اندازه‌گیری می‌شود و سپس نمونه‌ها در داخل سبدهای استوانه‌ای دستگاه به قطر ۱۴۰ و طول ۱۱۰ میلی‌متر که یک توری فلزی با دهانه ۲ میلی‌متر ساخته شده (Franklin, 1979) با آب مقطر (تنها براساس استاندارد ASTM و بدون حساسیت نسبت به نوع آب در استاندارد ISRM) با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد پر شده قرار گرفته و استوانه مدت ۱۰ دقیقه با سرعت دور در دقیقه توسط ماشین چرخانده می‌شود. سپس نمونه‌ها را به مدت ۲۴ ساعت در خشک‌کن قرار داده و پس از خروج از خشک‌کن توزین می‌کنیم (ثابت جرم بعد از چرخه اول) دوباره به همین ترتیب نمونه‌ها را داخل خشک‌کن قرار داده و چرخه را تکرار می‌کنیم. در نهایت شاخص دوام‌داری یا ID هر مرحله براساس نسبت جرم خشک باقی‌مانده پس از هر چرخه به جرم اولیه نمونه‌ها به دست می‌آید و به صورت درصد بیان می‌شود. براساس اینکه آزمایش در یک مرحله یا دو مرحله انجام شود طبقه‌بندی‌هایی از میزان مقاومت نسبی سنگ در مقابل وارفتگی مطرح شده است.

اگر چه این آزمون به صورت استاندارد در دو چرخه انجام می‌گیرد اما در برخی تحقیقات می‌توان برای ارزیابی دوام سنگ و مقایسه بین نمونه‌ها تعداد چرخه‌ها را افزایش داد (ISRM, 1981) نتایج این آنالیز براساس جدول استاندارد از دوام تا خیلی ضعیف تقسیم بندی می‌شود و مشخص شده و قابل تفسیر هستند (ISRM 1981; Kincaid et al. 2010) در همین راستا فرانکلین و چاندرا (1972) سنگ‌ها را براساس شاخص دوام اولین مرحله رده‌بندی نموده‌اند (1972) در صورتی که دومین مرحله با استفاده از آب معمولی به دست آید، گمبل یک رده‌بندی از شاخص و دوام‌وارفتگی برای سنگ‌ها ارائه می‌دهد. (Gamble 1971:57)

### فهرست منابع

- امینی بیرامی، فریده؛ رازانی، مهدی؛ اصغری کلجاهی، ابراهیم؛ امامی، محمدمامین؛ باغبانان، علیرضا. (۱۳۹۴). تحلیل ساختارشناسی سنگ‌های آذرآواری در معماری صخره‌کند روستای تاریخی کندوان. دوفصلنامه علمی پژوهشی پژوهش

باستان سنجی، ۱ (۱): صص ۱۶-۱.

- رازانی، مهدی؛ سیدمحمدمامین، امامی؛ علی‌رضا، باغبانان. (۱۳۹۱)، لزوم بکارگیری 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 ۱۳۹۱. تبریز: دانشگاه هنر اسلامی تبریز.

- رازانی، مهدی؛ سیدمحمدمامین، امامی؛ علی‌رضا باغبانان. (۱۳۹۷)، بهینه‌سازی ملات‌های سنتی پایه آهکی برای جایگزینی سیمان در راستای حفاظت سازگار از معماری صخره‌کند روستای تاریخی کندوان، مجله مسکن و محیط روستا، سال ۳۷، ش. ۱۶۱. بهار ۱۳۹۷، صص ۱۳۸-۱۲۵.

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

- شکاری نیری، ج. (۱۳۷۲)، معماری صخره‌ای در آذربایجان و زنجان، مجله معماری و شهرسازی، ش. ۲۲-۲۳، س. ۵.

- مقصودی، مهران؛ خوش اخلاق، فرامرز؛ حنفی، علی؛ روستا، ایمان. (۱۳۸۹)، پهنه‌بندی فرایندهای هوازدگی سنگ‌ها بر اساس مدل‌های پلتیر در شمال غرب ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ش. ۷۴. ۳۵-۴۶.

- کریمی، فریبا (۱۳۸۶). توانمندی‌های ژئوتوریسم در توسعه روستای کندوان، مجله جغرافیا فضای جغرافیایی، سال ۷، (۲۰)، صص ۱۳۰-۱۱۵.

- معین‌وزیری، حسیم؛ امین سبحانی، امیر. (۱۳۵۶)، ولکانولوژی و ولکانوسدیمانولوژی منطقه سهند، تهران: دانشگاه تربیت معلم.

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

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

- ASTM Standard (2008). Standard Guide for Selection and Use of Stone Consolidants (E2167 - 01).ASTM International, West Conshohocken, by Ginell, W. S., D. Wessel, And C. Searles, West Conshohocken, PA PA, 2008,

- Doehne, E & Price, C. A. (2010). Stone conservation: an overview of current research. Getty Publications.
- Fitzner, B. (1994). Volcanic tuffs: the description and quantitative recording of their weathered state. In Lavas and volcanic tuffs: proceedings of the international meeting, Easter Island, Chile, 25-31 October, 1990 (pp. 33-53). Rome:ICCROM
- Fookes, P. G., Dearman, W. R., & Franklin, J. A. (1971). Some engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere. *Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 4(3), 139-185.
- Franklin, J.A. (Coordinator) (1979) Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties. *Int.J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 16, No.2, pp. 141-156.
- Goodman, R.E., (1989). *Introduction to Rock Mechanics*, 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley and Sons, New York, 562 pp.
- ISRM (1979). Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Absorption and related properties and swelling and slake – durability. *International Society for Rock Mechanics (ISRM) International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 139-153.
- Johnson, R. B & Degraff, J. V. (1988). *Principles of Engineering Geology*, John Wiley and Sons, USA, 497 Pp.
- Kaljahi, E. A., & Birami, F. A. (2015). Engineering geological properties of the pyroclastic cone-shaped rocky houses of Kandovan, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(3), 959-969.
- Kaljahi, E. A., Birami, F. A., & Hajjalilue, M. (2015). 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* (pp. 231-234). Springer International Publishing.
- Kouzeli, K., & Pavelis, C. (2004). Silicates for the consolidation of volcanic tuffs from the Prehistoric Acrotiri, Thera. In *I silicati nella conservazione: indagini, esperienze e valutazioni per il consolidamento dei manufatti storici. Congresso internazionale, 13-15 febbraio 2002: volume degli atti* (pp. 61-70).
- Müller, Urs., Riedl, Martin., Lukaszewicz, Jadwiga. W.(2008). Volcanic tuff from Ettringen, Germany and its interaction with agents used for stone conservation., 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: 15-20 DOI: 10.1520/E2167-01R08 , www.astm.org
- ASTM (2004). Standard test method for slake Durability of shales and similar weak rocks (D 4644). *Annual book of ASTM Standards*, 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 Standard C170-90 (1999) Standard test method for compressive strength of dimension stone. ASTM International, USA
- BASF (2015) MasterRoc MP 320:cataloge of product: Retrieved from [https://assets.master-builders-solutions.basf.com/SharedDocuments/PDF/English\(Asia\)/basf-masterroc-mp-320-tds.pdf](https://assets.master-builders-solutions.basf.com/SharedDocuments/PDF/English(Asia)/basf-masterroc-mp-320-tds.pdf)
- Bianchetti, P. L., Lombardi, G., Marini, S., & Meucci, C. (1990). The volcanic rocks of the monuments of the Forum and Palatine (Rome): characterization, alterations, results of chemical treatments; Lavas and volcanic tuffs: proceedings of the international meeting, Easter Island, Chile, 25-31 October, 1990 (pp. 151-165) Rome:ICCROM
- Branney, M. J. Kokelaar, B. P. (2002). *Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites*. London, Geological Society of London.
- Charola, A. E. (1997). *Death of a moai: Easter Island statues: their nature, deterioration and conservation*. Bearsville Press and Cloud Mountain Press; Easter Island Foundation.
- Cocca, M. D'Arienzo, L. D'Orazio, & Martuscelli, E. (2005). In situ Polymerisation of Urethane-Urea Copolymers for Tuff Consolidation. In *Macromolecular symposia* (Vol. 228, No. 1, pp. 245-254). WILEY-VCH Verlag.
- Cruz, S., Pérez, N. A., Cárdenas, J., Vidal-Solano, J. R., & Alatorre, L. (2014, January). Conservation of Volcanic Tuffs Bearing Rock Paintings at La Pintada, Sonora Archaeological Site. In *MRS Proceedings* (Vol. 1618, pp. imrc2013-s8a). Cambridge University Press
- D'Arienzo, L. Scarfato, P & Incarnato, L. (2008). New polymeric nanocomposites for improving the protective and consolidating efficiency of tuff stone. *Journal of Cultural Heritage*, 9(3), 253-260.
- De Casa, G., Giglio, G., Lombardi, G., & Mariottini, M. (1994). Characterization and state of decay of the volcanic tuff of the Tabularium in the Roman Forum, Italy. Lavas and volcanic tuffs: proceedings of the international meeting, Easter Island, Chile, 25-31 October, 1990 (pp. 107-127). Rome:ICCROM

- September 2008, Torun, Poland:1001-1009
- 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.
  - Rodrigues, J. D. (2001). Consolidation of decayed stones. A delicate problem with few practical solutions. Historical Constructions, 3-14
  - Salazar-Hernández, C., Cervantes, J., Puy-Alquiza, M. J., & Miranda, R. (2015). Conservation of building materials of historic monuments using a hybrid formulation. Journal of Cultural Heritage, 16(2), 185-191.
  - Steindlberger, E. (2005). Neue Ansätze zur Konservierung von Schalstein: Ein Zwischenbericht zu einem Modellvorhaben am Heidenportal des Wetzlarer Doms. "New statements on the conservation of Schalstein (volcanic tuff): report of a pilot project for the Heidenportal of the Cathedral of Wetzlar" Denkmalpflege & Kulturgeschichte, (2), 13-18.
  - Stück, H., Forgó, L. Z., Rüdrieh, J., Siegesmund, S., & Török, A. (2008). The behaviour of consolidated volcanic tuffs: weathering mechanisms under simulated laboratory conditions. Environmental geology, 56(3-4), 699-
  - Torraca, G. (2009). Lectures on materials science for architectural conservation. Getty Conservation Institute.
  - Vacchiano, C. D., Incarnato, L., Scarfato, P., & Acierno, D. (2008). Conservation of tuff-stone with polymeric resins. Construction and Building Materials, 22(5), 855-865.
  - Wheeler, G. (2005). Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone. Getty Publications.