

مطالعات آزمایشگاهی استحکام بخشی سنگ در معماری صخره کندووان

مهدى رازانى*, سيد محمد امین امامى**, علی رضا باغانان***، جیوانی باتیستا کروستا ****

۱۳۹۷/۱۰/۰۵

۱۳۹۸/۰۴/۱۵

تاریخ دریافت مقاله:

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 درنهایت تخریب می‌شوند. توف‌های آتش‌فشنایی 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 درنهایت فرسایش سریع تر آن نسبت به دیگر سنگ‌های آذرین می‌شوند. از جمله روش‌های حفاظت سنگ‌های تاریخی، درمان‌های مبتنی بر استحکام بخشی و مقاوم نمودن سطح با استفاده از مواد شیمیایی و رزین‌های پلیمری دربرابر عوامل فرساینده است. هدف از این تحقیق ارزیابی عملکرد مهم‌ترین استحکام بخش‌های سیلیکاتی در راستای ارتقای مقاومت سطحی خانه‌های صخره کندووان است. در همین راستا از روش‌های آنالیز پتروگرافی مقطع نازک، فلورسانس اشعه ایکس (XRF)، پراش پرتوایکس (XRD) و آزمون‌های مبتنی بر شناسایی خواص فیزیکی و مکانیکی شامل جذب آب در شرایط اتمسفری و جذب مویینگی، چگالی و تخلخل سنگی، بهلاوه شاخص دوام وارفتگی و مقاومت فشاری تکمحوری برای ساختارشناسی و همچنین ارزیابی کارایی مواد مورد استفاده شامل مواد استحکام بخش اتیل سیلیکات و نانو سیلیکات استفاده شده است. نتایج مطالعه نشان‌هندۀ خواص فیزیکی-مکانیکی بسیار ضعیف سنگ توف لیتیکی کندووان 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 کندووان 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 کندووان، سنگ توف آتش‌فشنایی، 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.

مقدمه

پدیده‌های تخریب و هوازدگی به عنوان نتیجه کلیه عوامل مخرب (فیزیکی- مکانیکی، شیمیایی و بیولوژیکی) در یادمان‌های سنگی که در مجاورت با آب و هوا 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 انجام‌شده است (Doehne et al, 2010: 5). اما در بسیاری از گونه‌های میراث سنگی امکان جلوگیری از مجاورت و دورنمودن منابع آسیب‌رسان وجود ندارد. از 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 پر مخاطره است و به عنوان 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 به واسطه 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 بنای‌های تاریخی به عنوان بستر ساخت بنا به معماری‌های دره گورمه در ترکیه، مجسمه‌های موآی در جزیره ایستر شیلی، پلکان کوپیان در هندوراس و غیره می‌توان اشاره نمود اما از جنبه دیگر خواص ذکر شده باعث پایین آمدن مقاومت آن‌ها در مقابل تخریب

و هوازدگی می‌شوند (Fitzner, 1994) و نیاز به عملیات درمانی و بخصوص استحکام‌بخشی در رابطه با میراث ساخته شده از این گونه سنگ را اجتناب ناپذیر کرده است. حفاظت و نگهداری یادمان‌ها و سازه‌های توفی، با توجه به آنکه پدیده‌های تخریبی این آثار با سرعت و به طور جدی در حال پیشرفت هستند، ایجاد می‌کند که تغییرات اتفاق افتاده را شناسایی و به وسیله ارتقای شرایط پیرامونی و تقویت اثر از طریق روش‌های حفاظتی و تقویت ساختار فیزیکی به کاهش 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 بدن 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 صخره کند ایران است که در درون صخره‌های توپی 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 استحکام بخش اتیل سیلیکات (Ethyl Silicate) و نانو سیلیکات (Nano Silicate) از میان ادبیات تحقیق به صورت آزمایشگاهی بررسی‌هایی را در رابطه با ارزیابی میزان کارآمدی این محصولات در تقویت

سیمان بین‌دانه‌ای است بهبود این شرایط عموماً هدف از درمان با استحکام بخش است (Wheeler, 2005). از آنجا که تخریب توف‌های آتش‌فشانی به‌واسطه دوام نسبتاً ضعیف، یکی از برگترین 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 براین 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 هرناندز و دیگران (Salazar-Hernández, et al 2014) بر روی توف سبز لوسروس در سازه‌های تاریخی گاناچاتو/مکزیک انجام گرفت. در این مطالعه از فرمولاسیون هیبریدی بر پایه تترا اتیل ارتوسیلیکات (TEOS) سیلیس کلوئیدی، 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 فراورده‌های مناسب برای بازسازی و حفاظت از

ساختار سنگ‌های کندوان نموده است. مهم‌ترین سوالات تحقیق عبارت‌اند از اینکه: ۱) ساختارشناسی سنگ در معماری صخره کند کندوان چیست؟ ۲) بر مبنای ساختارشناسی سنگ کندوان کدام‌یک از راهکارهای درمانی مبتنی بر استفاده از استحکام بخش‌ها در روند استحکام‌بخشی سطوح بیرونی و افزایش سختی سطح مشترک هستند؟ ۳) مقایسه کارآمدی مواد مورد استفاده چه‌چیزی 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.

پیشنهاد حفاظت از توف‌های آتش‌فشانی به‌روش 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). ازین‌رو لزوم کاهش میزان جذب آب به‌واسطه پیامد ناشی از آن در منابع علمی مرتبأ ذکر شده است (Doehne & Price, 2010; Fitzner, 1994) 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 به‌وسیله رزین‌های پلیمری است (D'Arienzo et al 2008). استحکام‌بخشی به‌مثابه درمان برای شرایط مختلف استفاده شده است، به‌خصوص 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 ازلحاظ مکانیکی تضعیف شده باشد. از آنجا که هر دو فروپاشی دانه‌ای و تضعیف مکانیکی سنگ غالباً درنتیجه از دست رفتن

سنگ‌های توف مورد مطالعه قرار گرفت. مواد مورد استفاده در این مطالعه استحکام بخش‌های 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 خلا برای تثبیت ترک‌های سنگ گردید. کوزلی و پاویلز (Kouzeli, & Pavelis, 2002) با هدف ساختارشناسی، آسیب‌شناسی و طرح درمان حفاظتی به وسیله استحکام بخشی ۴ گونه توف از محوطه آکروتیری ترا (Acrotiri, Thera) یونان اقدام به استفاده از مواد تگوواکن 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 سنگ‌های توف هوانزده و سنجش فرایند عملکرد به تقلید از شرایط محوطه آن‌ها نشان داد در توف‌های 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 مجسمه‌های موآی در جزیره ایستر براساس ارزیابی درمان‌های آزمایشگاهی اقدام به استفاده از اتیل سیلیکات نمود. نتایج این استحکام بخشی نشان‌دهنده عملکرد موفق اتیل سیلیکات به عنوان استحکام بخش سنگ توف داشت بخصوص اینکه این ماده در آزمون‌های 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 بخش‌های سنگ و مواد آب‌گریز آلی و معدنی صورت گرفته است، نشان‌دهنده آن است که بخصوص در سال‌های اخیر درمان‌های زیادی مبتنی بر کاربرد الکوکسی سیلان صورت گرفته است که نتیجه آن نشست سیلیکا در منافذ سنگ است (Carola, 1997) و

بخش اعظم موادی که به عنوان مواد استحکام بخش سنگ به کار رفته و پیشنهاد شده‌اند پلیمرهای آلی بوده‌اند. به کارگیری مواد آب‌گریز نیز خصوصاً برای سنگ‌های توف به واسطه نقش مؤثر آب در تخریب آن‌ها به تناوب توصیه شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

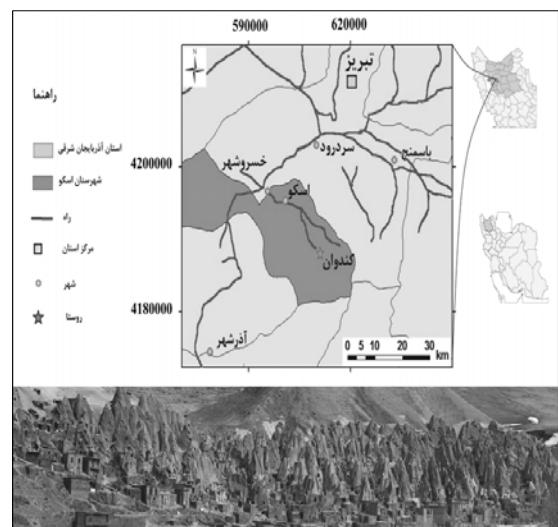
روستای تاریخی کندوان در دامنه کوه سهند
استان آذربایجان شرقی به خصوص دامنه سهند از مناطق مهم ایران از نظر وفور این گونه معماری است و این منطقه از تنوع و غنای بسیاری در زمینه معماری دستکند در بسترها طبیعی برخوردار است که می‌توان به چندین روستا، دژ، معبد، مسکن و مقابر صخره‌ای اشاره نمود (شکاری نیری، ۱۳۷۲) به نحوی که طبیعت منطقه و قرارگیری در بستر کوه و به خصوص در بخش شمالی آن باعث شده بسیاری از روستاهای از بدن سهندی سهند به عنوان مأمن و مکان زندگی و همچنین برای تأمین مصالح ساختمانی بهره‌مند شوند. عمدت ویژگی‌های معماری دستکند در روستاهای دامنه سهند عبارت‌اند از اینکه روستاهای فوق در ارتفاعی بالاتر از ۱۰۰۰ متر تا نزدیک به ۲۵۰۰ متر از سطح دریا در دامنه سهند واقع شده‌اند، همچنین اغلب این روستایی‌ها دارای جاذبه‌های طبیعی و فرهنگی هستند که یا به صورت مجموعه روستا (همانند روستای کندوان و حیله‌ور) و یا به صورت تک‌بنا، آثاری را در فهرست آثار ملی دارند که عموماً این آثار شامل مساجد و حمام‌های دستکند می‌باشد (رازانی، ۱۳۹۱). روستای تاریخی کندوان در ۶۲ کیلومتری شهر تبریز در استان آذربایجان شرقی با شاخص‌های طبیعی و انسانی به واسطه هوازدگی و فرسایش توف‌های آتش‌نشانی نهشته شده در اثر فعالیت‌های کوه آتش‌نشانی سهند شکل گرفته



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 سهند قرار گرفته است. این ارتفاعات از لحاظ موقعیت جغرافیایی، آب و هوایی از نیمه‌خشک 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 بدلیل 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 به‌واسطه دارا بودن تخلخل بالا، دوام کم و توان ذاتی پایین سنگ توف آتش‌فشاری موردنظر 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.



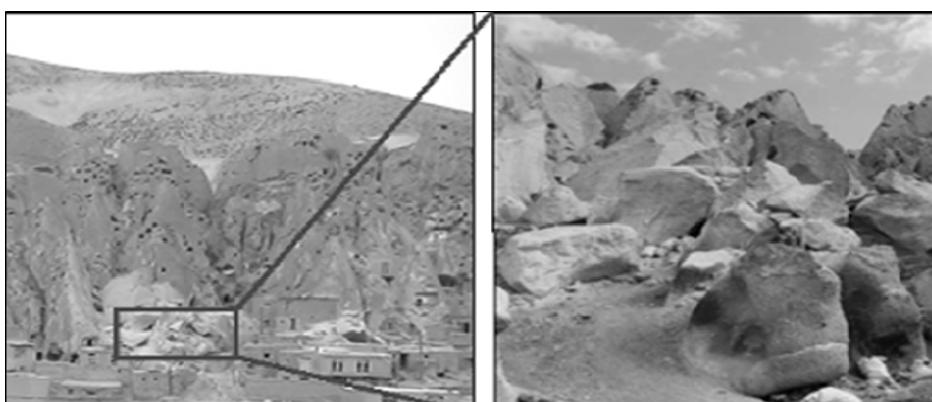
ت ۱. نقشه موقعیت و راههای دسترسی به روستای کندوان و منظر فرهنگی آن از دید جنوبی (مأخذ نقشه: امینی بیرامی و دیگران، ۱۳۹۴).

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 (مقیمه‌ی اسکویی، ۱۳۹۰، ۸۵-۷۸).

$$\text{گرادیان دمای منطقه: } T = 22.3 + 0.0075 \text{ HM}$$

$$\text{گرادیان بارش منطقه: } P = 241.85 + 0.028 \text{ HM}$$

در این روابط H ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر، T متوسط درجه حرارت سالیانه بر حسب میلی‌متر است. در این میان دمای بارش سالیانه بر حسب میلی‌متر است. در این میان دمای متوسط سالیانه روستای کندوان براساس گرادیان فوق 6761°C و میزان بارش آن $304/15\text{mm}$ خواهد بود. نتایج بررسی‌های هواشناسی منطقه حاکی از آن است که متوسط چرخه تر و خشک شدن سالانه 28 دفعه و 14 چرخه ذوب و انجماد در منطقه روی می‌دهد. در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، آبان و آذرماه به طور متوسط با 10 چرخه تر و خشک شدن و بهمن ماه با 7 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 (۱۳۸۸ - ۱۳۷۹) براساس ایستگاه



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

قالب ترکیبی از اسید و باز به‌شکل یک نمک و یک مولکول آب است که در نتیجه انباشتگی اسید با الكل 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 الكل 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 درزهای 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 کلوئیدی در ساختارهای متخلخل نفوذ نماید (178, Torraca, 2009). مولکول‌های سیلیکا به صورت شیمیابی شبیه کانی‌های سیلیکاتی هستند و بنابراین آن‌ها یک سازگاری قابل قبولی را با سنگ‌هایی که ترکیب سیلیکاتی دارند از خود نشان می‌دهند (Delgado Rodriguez, 2001).

از طرف دیگر ذرات نانومتریک و کلوییدی سیلیکا به صورت سوسپانسیون در قالب محصولی بدون اثر زیستمحیطی مخرب در قالب ماده نانو سیلیکاتی 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 بسطح عمل نماید. (BASF 2015) کلیه نمونه‌های مورد استفاده در آزمون‌ها مکعب‌های (40×40×40 mm) 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 معزه‌گیری 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 (40×40 mm) 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 پیشنهادشده است. در ادامه مطالعات ساختارشناسی (با استفاده از پتروگرافی XRPD، XRF) و بررسی مقطع نازک و آنالیزهای (XRD) خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگ بکر و هوازده صورت گرفت. در ادامه اتیل سیلیکات و نانو سیلیکات به عنوان دو رزین متدائل در مرمت آثار تاریخی جهت استحکام‌بخش نمونه‌های هوازده سنگ کندوان با استفاده از روش غوطه‌ورسازی نمونه سنگی در ماده استحکام‌بخش مورد استفاده قرار گرفت. به‌نحوی 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 درنهایت 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 پراستفاده‌ترین 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	بدن رنگ و شفاف
بو	بوی تن، همانند الکل	بدون بو
دمای جوش	°C ۱۶۹-۱۶۸	°C ۱۰۳
قابلیت اشتعال	قابلیت اشتعال دارد	قابلیت اشتعال ندارد
نقطه اشتعال	°C ۴۵	با محتوای آب بالا تعیین نقطه اشتعال غیرضروری است.
چگالی	°C ۲۰ g/cm³ ۰.۹۳۳	۰°C (۱۰.۷) ۲۰ g/cm³ تقریباً
ویسکوزیته	نامعلوم	(°C) ۲۰ mPa.s (۱۰~)
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 برپایه اتيل استر از اسید سیلیسیک، بدون خطر برای محیط زیست و اپراتور	بدون اثر زیست محیطی مخرب، ویسکوزیته پایین، دوغابی آبدوست برای استحکام بخشی و تحکیم سطوح خیس میزان اکسید سیلیسیم (SiO₂) = ۴۰ ± ۱%
تولید شرکت	KeraKoll / Italy	BASF SE/ Germany

ج ۱. ویژگی‌های فنی استحکام بخش‌های مورد استفاده در این مطالعه.

همچنین سنجش خواص استقامتی شامل مقاومت در مقابل چرخه‌ای پیرسازی مصنوعی و مقاومت فشاری و مقاومت در دوام داری براساس استانداردهای ملی و بین‌المللی به انجام رسیده است (جدول شماره ۲).

مطالعات آزمایشگاهی
مطالعات آزمایشگاهی شامل تعیین خواص فیزیکی نمونه‌ها، ساختارشناسی و کانی‌شناسی 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 هوازدگی سنگ.	ISRM, 1979
	مویستیگی	تعیین مقاومت در برابر یخیندان.	UNE-EN 1925: 1999
ساختارشناسی و کانی‌شناسی	پتروگرافی مقطع نازک	مطالعه گونه سنگ و تغییرات ثانوی کانی‌های سنگ (کانی‌شناسی، یافت و ترکیب).	میکروسکوپ پلاریزان لایکا (۲۰۰۰) ساخت کشور آلمان در دانشگاه بیکوکا
	X-ray Diffraction (XPRD)	تعیین فازهای کریستالی موجود در نمونه.	ساخت کارخانه: PHILIPS PW1800 ، مدل آنالیز شده در شرکت کاساران بیتلود تهران
ویژگی‌های استقامتی	شاخص دوام وارتفکنگی ^۱	تعیین مقاومت نمونه تحت آزمون دوام داری.	ASTM D4644-87
	مقاومت فشاری تک محوری	تعیین مقاومت فشاری سنگ بکر و هوازده، تعیین تفاوت میان تغییرات مقاومت فشاری سنگ درمان شده و درمان نشده کنלוان.	سیستم تمام خود کار GD-VIS (250 kN)

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

نتایج و بحث

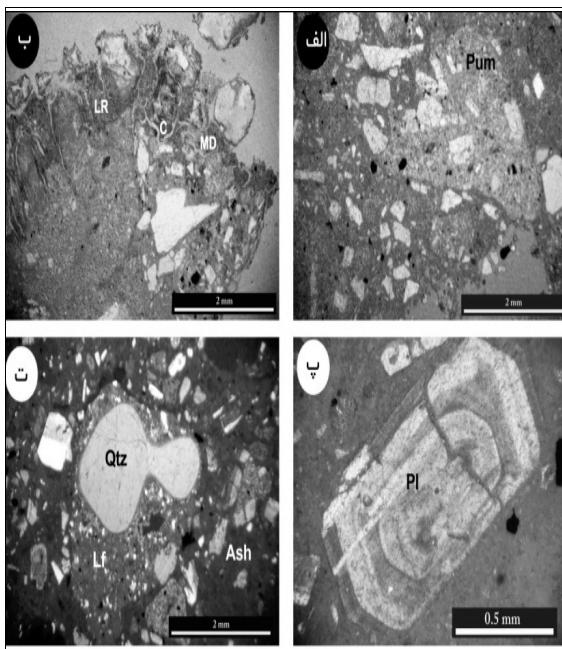
مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی

بررسی مقاطع نازک نمونه‌های هوازده 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 5 cm 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 سانیدین (در برخی موارد با حواشی خورده شده و خوردگی خلیجی) همچنین کانی‌های آمفیبول با بلورهای ایدیومorf و لوزی شکل هورنبلند با مجموعه

بلورهای اپیدوت و متمایل به دگرسانی کلریت. به علاوه پوسته‌های طریف بیوتیت که غالباً به کلریت تبدیل شده‌اند در بافت سنگ دیده می‌شوند. هورنبلندها دارای ادخال‌هایی از کانی‌های اپک هستند، به این مجموعه باید تک کانی‌های کوارتز (با ابعاد متوسط)، قطعات لیتوکلاست در ابعاد مخالف و نیز تعدادی کانی‌های اپک (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 گلومرو پورفیری و برشی در آن

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 ۴. 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 (XPL+2.5X ، (PL) . ت) کوارتز خلیجی (Qtz)، قطعات لیتیک (LF)، خاکست PPL+2.5X . (مأخذ: نگارندگان)

آنالیز پراش پرتوایکس

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

توف کندوان اصطلاح ایگنیمبریت جوش نخورده را پیشنهاد می‌کنند.

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 مویین با توجه به داده‌های آزمون مویینگی است. آنچنان که نتایج جذب آب از طریق مویینگی نشان می‌دهند نمونه‌های هوازده و نمونه‌های سنگ بکر واکنش یکسانی به فرایند جذب آب دارند و همچنین هر دو جهت نمونه‌ها به صورت 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 مویینه 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	Magnesiohornblende Ferrous	Quartz	Illite	Muscovite	نمونه
✓	✓	✓	-	✓	KFR
✓	✓	✓	-	✓	KWR
✓	✓	✓	✓	-	KWR-NST
✓	-	-	✓	-	KWR-EST
CaAl ₂ Si ₃ O ₈ & NaAlSi ₃ O ₈	(Na ₄ K _{0.01})(Ca _{1.8} Fe _{2.2})(Mg _{3.1} Fe _{1.5} Al _{4.0})(Si _{7.7} AlO ₂₂)(OH) ₂	SiO ₂	K(Al ₄ Si ₂ O ₉ (OH) ₃)	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH, F) ₂	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)

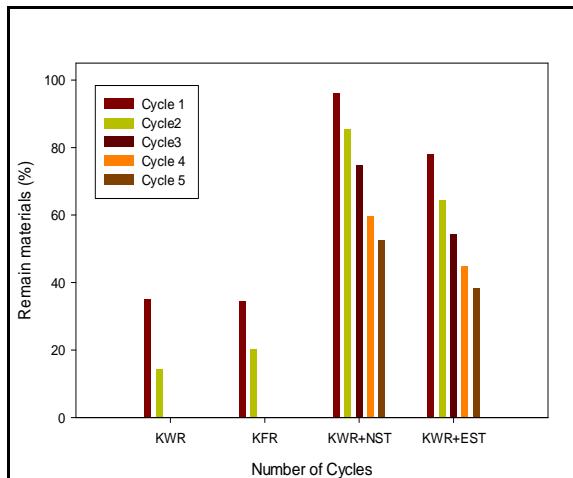
براساس داده‌های حاصل از مطالعات پتروگرافی مقطع نازک می‌توان گفت نام علمی سنگ خانه‌های رostوای کندوان در قالب طبقه‌بندی‌های سنگ‌های آذرآواری، توف لیتیک با ترکیبات تراکیت، آندزیت، داسیت و ریولیت است. در همین راستا اولیور (Oliver 1954) برای نام‌گذاری نهشته‌های لاپلی توف و لیتیک توف از اصطلاح ایگنیمبریت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

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

گونه آزمایش	تعداد نمونه	KFR	KWR	KWR+NST	KWR+EST
درصد آب (%)	۳	۲۵-۲۳	۳۰-۲۵	۷	۴
چگالی خشک (gr/cm ³)	۳	۱.۵۷	۱.۲۵	۱.۴۹	۱.۰۲
تخلخل کل (%)	۳	۳۹-۴۰	۴۲-۴۲	۴۱-۴۰	۳۷-۳۴
درصد شاخص پوکی (%)	۳	۴۵	۴۶-۴۴	۳۴	۳۵
موئینگی (g/m ² /s)	۳	۲۳۰	۲۷۶	۵۶	۱

نمونه سنگ پکر 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. ۵. مقاومت دوام وارفتگی محاسبه شده برای نمونه های مورد آزمایش. (مأخذ: نگارندگان).



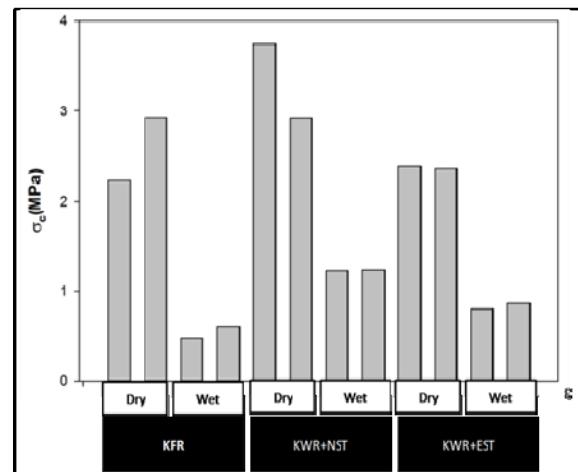
ن. ۱. آزمون دوام داری برای سنگ هوازده و پکر کندوان به همراه نمونه های استحکام بخشی شده (مأخذ: نگارندگان).

از طرف دیگر با هدف ارزیابی میزان بهبود مقاومت و خواص تغییر شکل پذیری، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در دو شرایط خیس و خشک برای نمونه های پکر و نمونه های هوازده استحکام بخشی شده انجام گرفت به نحوی که از هر گونه دو نمونه در شرایط خشک و دو نمونه در شرایط اشباع از آب مورد سنجش مقاومت فشاری قرار گرفتند و در همین راستا نتایج

ج. ۴. نتایج حاصل از آزمایش های ویژگی های فیزیکی سنگ های درمان شده و درمان نشده معماری صخره ای کندوان. (مأخذ: نگارندگان).

نتایج حاصل از آزمایش شاخص دوام وارفتگی سنگ در نمونه های پکر، هوازده و نمونه های استحکام بخشی شده با نانو سیلیکات و اتیل سیلیکات در جدول شماره ۵ و نمودار شماره ۱ آمده است و نشان دهنده مقادیر بالای کاهش وزن در چرخه های سایش و تر و خشک شدن برای نمونه های هوازده و پکر اتفاق می افتد و دو نمونه از لحاظ مقاومت در مقابل چرخه های دوام داری تفاوت چندانی با هم ندارند و وزن باقی مانده آنها در طی دو چرخه به حدود ۱۸٪ می رسد. از این رو در تقسیم بندی های رایج همچون (ISRM 1981) و (ASTM D4644-87)، سنگ هوازده و سطحی کندوان و سنگ پکر کندوان در رده خیلی ضعیف از لحاظ دوام داری قرار می گیرند. از طرفی این آزمایش نشان داد در نمونه های استحکام بخشی شده با اتیل سیلیکات چرخه در نمونه استحکام بخشی شده با اتیل سیلیکات وزنی تقریباً معادل چرخه نخست دوام داری سنگ پکر و هوازده می یابد و نمونه نانو سیلیکات بعد از پنج چرخه مقاومتی ۱/۵ برابری نسبت به سنگ پکر و هوازده دارد و خواص مقاومتی و دوام داری بهبود یافته است.

نشان دهنده آن است که مقاومت سنگ در حالت خشک در کلیه نمونه ها تقریباً دو برابر نمونه های تر در همان گونه است و همچنین می توان گفت در نمونه های بکر و استحکام بخشی شده تفاوت چندان محسوسی با شرایط خشک دیده نمی شود اما بر عکس در شرایط اشباع از آب میزان مقاومت نمونه های استحکام بخشی شده در مقایسه با نمونه های بکر مایین ۰.۵ MPa ارتقاء یافته است که در این زمینه استحکام بخشی با نانو سیلیکات نتایج بهتری را از خود نشان می دهد (نمودار شماره ۲).



۶. مقایسه نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری برای سه گروه نمونه های سنگ بکر و سنگ های هوازده و درمان شده با اتيل سیلیکات و نانو سیلیکات در شرایط خشک و اشباع (مأخذ: نگارندگان).

نتیجه

فرایندهای تخریبی در میراث سنگی روستای کندوان به واسطه ساختار فیزیکی ضعیف توف های آتش فشانی، شرایط اقلیمی سخت با تعداد چرخه های بالای یخ بر شدن، در کنار عوامل انسانی باعث تسریع فرایندهای تخریب و درنهایت فرسایش سطوح بیرونی معماری

صخره کند کندوان گردیده است. از این رو درمان هایی 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 ساختار شناسی، آزمایش های فیزیکی و مکانیکی سنگ کندوان نشان می دهد که سنگ توف کندوان از لحاظ ویژگی های سنگ شناسی، سنگی ضعیف و مستعد فرسایش و هوازدگی است. از این رو نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی نشان از کارآمدی مواد استحکام بخش به ترتیب نانو سیلیکات و اتيل سیلیکات در راستای درمان سطحی و بهبود مقاومت سطحی و مقاومت در شرایط خیس و اشباع از آب دارند و می توانند به عنوان گزینه های مناسبی در مطالعات میدانی مورد استفاده و ارزیابی قرار گیرند. چرا که نتایج حاکی از افزایش مقاومت نسبی و بهبود خواص در سنگ های استحکام بخشی شده با نانو سیلیکات نسبت به اتيل سیلیکات است و در فاصله دورتر نسبت به نمونه های استحکام بخشی نشده است. در کل با توجه به آنکه سطوح معماری صخره کند کندوان در طول چهار فصل سال خیس هستند اتيل سیلیکات به واسطه واکنش با آب و در ساختارهای خیس می تواند گزینه مناسبی برای پوشش سطحی باشد و نانو سیلیکات می تواند به غیر از استحکام بخشی سطحی به صورت تزریقی برای تحکیم سطوح زیر سطحی مورد استفاده قرار گیرد. به نظر می رسد علت تقویت نسبی سنگ های استحکام بخشی شده با نانو سیلیکات نسبت به اتيل سیلیکات نفوذ ذرات نانو در تخلخل های سنگ و مسدود نمودن آن ها باشد که با افزایش تراکم سطحی توانسته منجر به افزایش مقاومت نمونه ها گردد. لازم به ذکر است مسئله عمر مفید هر ماده استحکام بخش بسته به روش استفاده و اعمال ماده، عمق نفوذ در لایه های مختلف هوازده و

مطالعات آینده در محل و با توجه به وجود آفات زیستی (شامل انواع جلبک، خزه، گلشنگ 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 زوددن آفات زیستی بایستی براساس مطالعات و داشتن برنامه‌ای مشخص و برآمده از آزمون‌های متعدد برای پوشش دهی 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 بدین‌وسیله از اعضای هیئت علمی این دانشگاه سپاس‌گزاری می‌گردد. همچنین از سازمان میراث فرهنگی استان آذربایجان شرقی در راستای همکاری با نویسنده درمدت کار میدانی تشکر می‌گردد.

پی‌نوشت

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

۲- باهدف طبقه‌بندی و تعیین خصوصیات هوازگی سنگ‌ها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، آزمایش دوام وارفتگی (شکفتگی) به کار گرفته می‌شود. در مطالعه حاضر این روش باهدف تعیین شاخص دوام وارفتگی 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 به صورت 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 شکل گیری واکنش آن‌ها گردیده و عمر مفید آن‌ها را کاهش دهنده. نکته مهم این است که به علت ساختار سیلیکاتی این دوماده که هردو درنهایت به ماده معدنی تبدیل می‌شوند می‌توان انتظار داشت با نفوذ 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 پوشش دهی است. از منظر حفاظت بهترین حالت آن است که بتوان با رعایت اقدامات پیشگیرانه و موارد کم‌هزینه اقدام به حفاظت و نگهداری آثار و اینه 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 روزتای تاریخی کندوان که قابلیت فراوانی برای ثبت جهانی دارند می‌تواند توجیه 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 زمان برخواهد بود. چراکه تنها نمی‌توان به مطالعات آزمایشگاهی اکتفا نمود و بایستی پس از اعمال مواد استحکام بخش و پوشش‌های آب‌گرین سطح دیوارهای سنگی مطابق با شرایط جوی حاکم بر منطقه مطالعه و بررسی نتایج حاصل به‌مدت 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) در ادامه توسعه (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 ۶۰-۴۰ گرم داشته باشند و فاقد ناپیوستگی باشند، نیاز است. در ادامه نمونه‌ها به مدت ۶-۴ 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 (نهایا براساس استاندارد ASTM D4644-87) با دمای ۲۰ 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 (ثبت جرم بعد از چرخه اول) دوباره به همین ترتیب نمونه‌ها را داخل خشک‌کن قرار داده و چرخه را تکرار می‌کنیم. درنهایت 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 وارونگی 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 نمودنده‌ها تعداد چرخه‌ها را افزایش داد (ISRM, 1981) نتایج این آنالیز براساس جدول استانداردی از با دوام تا خیلی ضعیف تقسیم ISRM 1981 می‌شود و مشخص شده و قابل تفسیر هستند (ISRM 1981؛ Kincal 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 دوام‌وارفتنگی برای سنگ‌ها ارائه می‌دهد. (Gamble 1971:57)

فهرست منابع

- اینی بیرامی، فریده؛ رازانی، مهدی؛ اصغری کلجه‌ای،
ابراهیم؛ امامی، محمدامین؛ باگبانان، علیرضا. (۱۳۹۴)، تحلیل
ساختارشناسی سنگ‌های آذراواری در معماری صخره کند
روستای تاریخی کندوان. دوفصلنامه علمی پژوهشی پژوهه

باستان سنجی، ۱(۱): صص ۱-۱۶.

- رازانی، مهدی؛ سید محمد امین، امامی؛ علی رضا، باغبانان.

(۱۳۹۱)، لزوم بکارگیری مطالعات مکانیسم تخریب سنگ در سازه‌های دستکنند 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؛ سید محمد امین، امامی؛ علی رضا باغبانان.

(۱۳۹۷)، بهینه‌سازی ملات‌های سنتی پایه آهکی برای جایگزینی سیمان در راستای حفاظت سازگار از معماری صخره کند روستای تاریخی کندوان، مجله مسکن و محیط روستا، سال ۳۷، ش. ۱۶۱. بهار ۱۳۹۷، صص ۱۲۵-۱۳۸.

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

- شکاری نیری، ج. (۱۳۷۲)، معماری صخره‌ای در آذربایجان و زنجان، مجله معماری و شهرسازی، ش. ۲۲، ۲۳-۲۴، س. ۵.

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

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

- معین وزیری، حسین؛ امین سبحانی، امیر. (۱۳۵۶)، ولکانولوژی و ولکانوسیدمان‌تولوژی 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.

- 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*, 2nd 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 & Degriff, 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., & Hajialilue, 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 Modelvorhaben 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., Rüdrich, J., Siegesmund, S., & Török, A. (2008). The behaviour of consolidated volcanic tuffs: weathering mechanisms under simulated laboratory conditions. *Environmental geology*, 56(3-4), 699-
 - Torraça, 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). Alkoxy silanes and the Consolidation of Stone. Getty Publications.
- <https://doi.org/10.22034/38.167.99>