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

مهدی رازانی*، سیدمحمدامین امامی، علی‌رضا باغبانان***، جیوانی باتیستا کروستا******

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۰۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۱۵

چکیده
کلیه سنگ‌های به‌کار رفته در ساخت یادمان‌های تاریخی و فرهنگی تحت تأثیر هوازدگی (به‌معنای ایجاد تغییرات ساختاری در سطح و عمق سنگ) دچار انواع مختلف آسیب و درنهایت 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 ازنظر دوام، جزو سنگ‌های ضعیف محسوب می‌شود. از این رو عوامل مختلفی موجب هوازدگی، پیشروی تخریب و درنهایت فرسایش سریع‌تر آن نسبت به دیگر سنگ‌های آذرین می‌شوند. ازجمله روش‌های حفاظت سنگ‌های تاریخی، درمان‌های مبتنی بر استحکام‌بخشی و مقاوم‌نمودن سطح با استفاده از موادشیمیایی و رزین‌های پلیمری دربرابر عوامل فرساینده است. هدف از این تحقیق ارزیابی عملکرد مهم‌ترین استحکام بخش‌های سیلیکاتی در راستای ارتقای مقاومت سطحی خانه‌های صخره کند روستای کندوان است. درهمین راستا از روش‌های آنالیز پتروگرافی مقطع نازک، فلورسانس اشعه ایکس (XRF)، پراش پرتوایکس (XRD) و آزمون‌های مبتنی برشناسایی خواص فیزیکی و مکانیکی شامل جذب آب در شرایط اتمسفری و جذب مویینگی، چگالی و تخلخل سنجی، به‌علاوه 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 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.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

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.

مقدمه

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 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 پرمخاطره است و به‌عنوان یک عمل برگشت‌ناپذیر اثرهای جانبی جدی دارد. از این رو تصمیم برای انجام آن همیشه دشوار است. نیاز به استحکام بخشی 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 و هوازدگی می‌شوند (Fitzner,1994) و نیاز به عملیات درمانی و بخصوص استحکام‌بخشی در رابطه با میراث ساخته شده ازاین‌گونه 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 استحکام بخشی و تقویت سطوح در حال فرسایش و همچنین ضدآب نمودن بدنه آن‌هاست. تنوع بسیار فراوانی از استحکام بخش‌های آلی و معدنی سنگ موجود است که در طی دو دهه اخیر تعداد زیادی از آن‌ها با استفاده از روش‌های استحکام بخشی، در رابطه با توف‌های آتش‌فشانی بکار گرفته شده‌اند. روستای تاریخی کندوان از مهم‌ترین معماری‌های صخره کند 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 استحکام بخشی آن‌ها، ضرورت دارد (امینی بیرامی و دیگران،۱۳۹٤). ازاین‌رو 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 به‌صورت آزمایشگاهی بررسی‌هایی را در رابطه با ارزیابی میزان کارآمدی این محصولات در تقویت

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 کدام‌یک از راهکارهای درمانی مبتنی بر استفاده از استحکام بخش‌ها درروند استحکام بخشی سطوح بیرونی و افزایش سختی سطح مثمرتر 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.

پیشینه حفاظت از توف‌های آتش‌فشانی به‌روش درمان استحکام‌بخشی

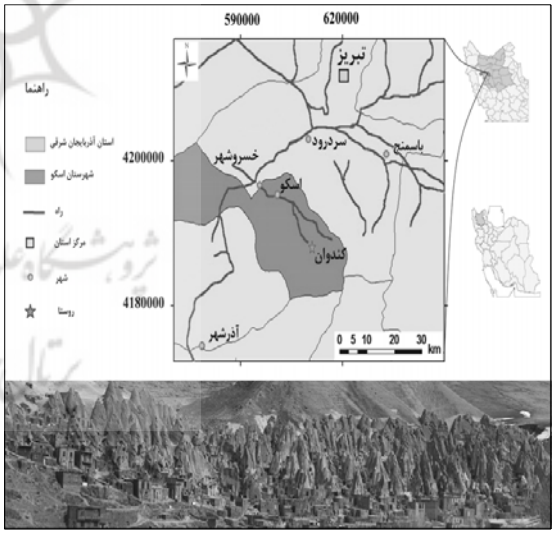
در حالت کلی مهم‌ترین عامل تخریب و هوازدگی هر سنگی ازجمله توف‌های آتش‌فشانی وجود رطوبت در محیط پیرامون آن‌هاست (Borgia et al 2000). ازاین‌رو لزوم کاهش میزان جذب آب به‌واسطه پیامد ناشی از آن در منابع علمی مرتباً ذکر شده است (Doehne & Price, 2010; Fitzner, 1994). امروزه از مهم‌ترین راهکارهایی که خصوصاً در رابطه با آثار سنگی موجود در فضای باز گسترش جهانی یافته است استفاده از درمان‌های مبتنی بر حفاظت سطحی به‌وسیله رزین‌های پلیمری است (D'Arienzo et al 2008). استحکام بخشی به‌مثابه درمان برای شرایط مختلف استفاده‌شده است، به‌خصوص برای اشکال ویژه و مظاهر تخریبی همانند پوسته پوسته شدن، پوسته انداختن، ورآمدن 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 سیمان بین‌دانه‌ای است بهبود این شرایط عموماً هدف از درمان با استحکام بخش است (Wheeler, 2005). ازآنجا که تخریب توف‌های آتش‌فشانی به‌واسطه 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 براین‌اساس تعداد زیادی استحکام‌بخش و روش‌هایی متفاوتی در رابطه با این سنگ در طی چند دهه اخیر مورد استفاده قرارگرفته 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 گاناجاتو/ 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 کاهش‌یافته و سختی و مقاومت در مقابل نمک افزایش‌یافته 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

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 به‌وسیله پمپ خلأ برای تثبیت ترک‌های سنگ گردید. کوزلی و پاویلز (Kouzeli, & Pavelis,2002) با هدف ساختارشناسی، آسیب‌شناسی و طرح درمان حفاظتی به‌وسیله استحکام بخشی ٤ گونه توف از محوطه آکروتیری ترا (Acrotiri, Thera) یونان اقدام به استفاده از مواد تگوواکن A ، واکر OH وسیلکس Silex OH نمودند، با روش استفاده از قلم‌مو تا حدی که دیگر جذبی صورت نگیرد. نتایج اعمال سه‌گونه استحکام‌بخش 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 به‌عنوان 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 استحکام‌بخش‌های 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 به‌عنوان مواد استحکام‌بخش سنگ به کار رفته و پیشنهاد شده‌اند پلیمرهای آلی بوده‌اند. به‌کارگیری مواد آب‌گریز نیز خصوصاً برای سنگ‌های توف به‌واسطه 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 به‌خصوص دامنه سهند از مناطق مهم ایران ازنظر وفور این‌گونه معماری است و این منطقه از تنوع و غنای بسیاری درزمینه معماری دستکند در بسترهای طبیعی برخوردار است که می‌توان به‌چندین روستا، دژ، معبد، مسکن و مقابر صخره‌ای اشاره نمود (شکاری نیری،۱۳۷۲) به‌نحوی که طبیعت منطقه و قرارگیری در بستر کوه و به‌خصوص در بخش شمالی آن باعث شده بسیاری از روستاها از بدنه سنگی سهند به‌عنوان مأمن و مکان زندگی و همچنین برای تأمین مصالح ساختمانی بهره‌مند شوند. عمده 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 به‌صورت مجموعه روستا (همانند روستای کندوان و حیله‌ور) و یا به‌صورت تک‌بنا، آثاری را در فهرست آثار ملی دارند که عموماً این آثار شامل مساجد و حمام‌های دستکند می‌باشد (رازانی، ۱۳۹۱). روستای تاریخی کندوان در ٦٢ کیلومتری شهر تبریز در استان آذربایجان شرقی با شاخص‌های طبیعی و انسانی به‌واسطه هوازدگی و فرسایش توف‌های آتش‌فشانی نهشته شده در اثر فعالیت‌های کوه آتش‌فشانی سهند شکل گرفته

است و با توجه بـه مطالعـات صـورت گرفتـه از زمـان ایلخانیان تا به امـروز بـه‌صـورت مکـرر مـورد اسـتفاده قرارگرفتـــه اســـت (همـــایون،۱۳۵٦) (تصـــویر شماره ۱) و امروزه به‌دلیل جاذبه‌هـای بـالقوه طبیعـی و فرهنگی از مناطق پر بازدیـد گردشـگری شـمال غـرب کشور محسوب می‌شود. متأسـفانه خانـه‌هـای سـنگی و معماری منحصربه‌فـرد کنـدوان در حـال حاضـر دچـار تخریب شدید سطحی هستند که این امر بـه‌واسـطه دارا بودن تخلخل بالا، دوام کم و تـوان ذاتـی پـایین سـنگ توف آتش‌فشـانی مـورد نظـر بـرای مقاومـت در برابـر پدیده‌های مختلف هوازدگی و مکانیسـم‌هـای ناشـی از تأثیر آب است (امینی بیرامی و دیگران، ۱۳۹٤). عوامـل تخریبی باعث گردیده اسـت کـه آسـیب‌هـایی از قبیـل تورم، لایه‌لایه شدن، جـدایش دانـه‌ای و پـودری شـدن (تصویرشماره ۲) نمایان گردند که در برخـی مـوارد بـه همراه عوامل سازه‌ای موجـب ویرانـی کلـی خانـه‌هـای سنگی گردیـده اسـت لـذا انجـام مطالعـات و عملیـات حفاظت، مرمت و نگهداری در منطقه ضرورت دارد.



ت ۱. نقشه موقعیت و راه‌های دسترسی به روستای کنـدوان و منظر فرهنگی آن از دید جنوبی (مأخذ نقشه: امینی بیرامی و دیگران، ۱۳۹٤).

ت ۲. گونه‌های شـاخص آسـیب در معمـاری صـخره‌ای کندوان، A) تورق شدید با بیش از ۵ سانتی‌متـر جـدایش از بسـتر اصـلی، B) از دسـت رفـتن زمینـه، C) تغییـر رنگ و تاول.

شرایط اقلیمی و آب و هوایی دره کندوان

کنـدوان ازنظـر جغرافیـایی در شهرسـتان اسـکو و ارتفاعات سهند قرارگرفته است. این ارتفاعات ازلحـاظ موقعیت جغرافیایی، آب‌وهوای از نیمه‌خشـک سـرد تـا نیمه مرطوب سرد متغیر دارد و دارای زمستان‌های سـرد و تابستان‌های معتدل است (کرمی ۱۳۸٦). بارنـدگی آن بیشتر در فصول سرد سال بوده و تابستان‌های آن خشک و گاهی با بارندگی‌هـای رگبـاری همـراه اسـت. بیشـتر بارش‌ها بهاره بوده که در اوایل بهار به‌صـورت بـاران و برف و در اواسط آن بـه شـکل بـاران هسـتند. از نیمـه خرداد معمولاً بارندگی‌ها قطع و خشکی یا کم بارانی تـا اواخر شهریور ادامه می‌یابد (رازانی و دیگـران، ۱۳۹۷). با توجه به‌اینکه در ارتفاعات خیلی بالا و در بیشتر نقاط شهرستان ایستگاه هواشناسی وجود ندارد لذا می‌توان از رابطه دما با ارتفاع و بارش با ارتفـاع ، جهـت محاسـبه میـزان دمـا و میـزان بـارش ایـن منـاطق بهـره گرفـت. همان‌طور که می‌دانیم با افزایش ارتفاع میزان دما، کاهش و میزان بارش، افـزایش مـی‌یابـد و ایـن کـاهش دمـا و

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 پیشنهادشده‌اند (مقیمی اسکویی، ۱۳۹۰، ۷۸-۸۵).

گرادیان دمای منطقه :T=22.3 + 0.0075 HM ***

گرادیان بارش منطقه: 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 خشک‌شدن 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 تبخیر سنجی لیقوان، نشان داد معماری سنگی روستای کندوان سالانه ۲۸ چرخه تر و خشک‌شدن و ۱۴ چرخه ذوب و انجماد متحمل می‌شوند (امینی بیرامی و دیگران،۱۳۹۴).

مواد و روش‌های آزمایشگاهی

آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشی

مرحله نخست درروند 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 سنگ خانه‌های کندوان به‌دلیل 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. به‌نحوی که نمونه‌های هوازده از سطوح بیرونی یکی از بناهای تخریب‌شده موجود در وسط روستای کندوان و نمونه‌های بکر از بخش‌های داخلی همین بنا و از قسمت‌هایی که به‌هیچ‌وجه در معرض هوازدگی قرار نگرفته بود، انجام شد (تصویر شماره ۳).

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

با توجه به‌عدم موفقیت در عملیات مغزه‌گیری سنگ در محل و در آزمایشگاه به‌علت تردی و سستی بیش از حد سنگ کندوان نمونه‌های مورد مطالعه به‌وسیله سیم برش الماسه به صورت مکعبی با ابعاد (۴۰×۴۰×۴۰mm) تهیه شد و بارکدگذاری گردید (جدول شماره۲). لازم به ذکر است مکعب‌ها براساس استاندارد می‌توانند در ابعاد مختلفی باشند. در این رابطه بنا بر استاندارد (UNE-EN 13755,2008) کوچک‌ترین ابعاد ٤ × ٤ × ٤ پیشنهادشده است. در ادامه مطالعات ساختارشناسی (با استفاده از پتروگرافی مقطع نازک و آنالیزهای XRPD, XRF,) و بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگ بکر و هوازده صورت گرفت. در ادامه اتیل سیلیکات و نانو سیلیکات به‌عنوان دو رزین متداول 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 به‌مدت 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 نانوسیلیکات

احتمالاً اتیل سیلیکات پراستفاده‌ترین ماده از میان مواد استحکام بخش سنگ است (Delgado Rodriguez, 2001). که درواقع استر اتیلِ از اسید سیلیسیک در قالب ترکیبی از اسید و باز به‌شکل 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 واکنش‌پذیر است و می‌تواند با چهار مولکول اتیل الکل ترکیب شود و به‌صورت اتیل سیلیکات و چهار مولکول آب درآید. اتیل سیلیکات ماده مناسبی برای استحکام بخشی مواد متخلخل آب دوست به‌صورت 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 به‌صورت ذرات کلوئیدی در ساختارهای متخلخل نفوذ نماید (Torraca, 2009, 178 180). مولکول‌های سیلیکا به‌صورت 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 نانومتریک و کلوییدی سیلیکا به‌صورت سوسپانسیون در قالب محصولی بدون اثر زیست‌محیطی مخرب در قالب ماده نانو سیلیکای مورداستفاده قرار گرفت. این ماده دارای ویسکوزیته مشابه آب برای سطوح خیس، ساخته‌شده و می‌تواند در سطوح خیس به‌صورت تزریقی و به‌صورت پاشش برسطح 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 مورداستفاده در جدول شماره ۱ آمده است.

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	°C ۱۶۹-۱۶۸	**°C ۱۰۳**
قابلیت اشتعال	قابلیت اشتعال دارد	قابلیت اشتعال ندارد
نقطه اشتعال	°C ٤٥	با محتوای آب بالا تعیین نقطه اشتعال غیرضروری است.
چگالی	°C ۲۰ g/cm3۰.۹۳۳	°C)۲۰ g/cm3 (۱.۰۷ 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 زیست‌محیطی مخرب، انتشار بالای ماده استحکام بخش قوی برپایه اتیل استر از اسید سیلیسیک، بدون خطر برای محیط‌زیست و اپراتور	بدون اثر زیست‌محیطی مخرب، ویسکوزیته پایین، دوغابی آب‌دوست برای استحکام بخشی و تحکیم سطوح خیس میزان اکسید سیلیسیم(SiO_2) = ۱ ± ٤٠%
تولید شرکت	KeraKoll/ Italy	BASF SE/ Germany

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

مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی شامل تعیین خواص فیزیکی نمونه‌ها، ساختارشناسی و کانی‌شناسی با روش تعیین عناصر به شیوه XRF، XRD و پتروگرافی مقطع نازک همچنین سنجش خواص استقامتی شامل مقاومت در مقابل چرخه‌ای پیرسازی مصنوعی و مقاومت فشاری و مقاومت در دوام‌داری براساس استانداردهای ملی و بین‌المللی به انجام رسیده است (جدول شماره ۲).

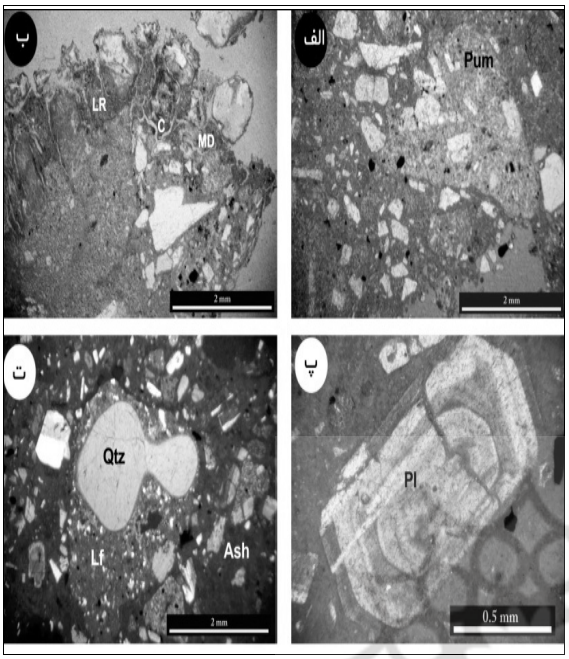
آزمایش	گونه آزمون	هدف	استاندارد
خواص فیزیکی	میزان رطوبت و جذب آب(٪)	تعیین نرخ جذب آب در سنگ.	BSEN 1097-3, ASTM D1585, 2004
	چگالی و تخلخل	تعیین میزان چگالی و تخلخل برای درک رفتار هوازدگی سنگ.	ISRM, 1979
	مویینگی	تعیین مقاومت در برابر یخبندان.	UNE-EN 1925: 1999
ساختارشناسی و کانی‌شناختی	پتروگرافی مقطع نازک	مطالعه گونه سنگ و تغییرات ثانوی کانی‌های سنگ (کانی‌شناسی، بافت 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 ، مدلPW1800 **آنالیز شده در شرکت کانساران بینالود تهران**
ویژگی‌های استقامتی	شاخص دوام وارفتگی[1]	تعیین مقاومت نمونه تحت آزمون دوام‌داری.	ASTM D4644-87
	مقاومت فشاری تک‌محوری	تعیین مقاومت فشاری سنگ سنگ بکر و هوازده، تعیین تفاوت میان تغییرات مقاومت فشاری سنگ درمان شده و درمان‌نشده کندوان.	**سیستم تمام‌خودکار GD-VIS(250 kN) دانشگاه بیکوکا ایتالیا.**

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

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 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 به‌صورت 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 ایدیومورف و لوزی شکل هورنبلند با مجموعه بلورهای اپیدوت و متمایل به دگرسانی کلریت. به‌علاوه پوسته‌های ظریف 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 قرارگرفته‌اند (تصویر شماره ٤). بافت‌های قالب سنگ توف کندوان بافت پورفیری تا حدی بافت شیشه‌ای (ویتریک) و یا هیالوپورفیریک است و درمواردی 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 ٤. 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 پرتوایکس

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

نمونه	Muscovite	Illite	Quartz	Magnesiohornblende Ferrous	Plagioclase
KFR	√	–	√	√	√
KWR	√	–	√	√	√
KWR-NST	–	√	√	√	√
KWR-EST	–	√	–	–	√
فرمول شیمیایی	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH,F)_2$	$K(Al_4Si_2O_9(OH)_3)$	SiO_2	$(Na_4K_{.01})(Ca_{1.8}Fe_{.2})(Mg_{3.1}Fe_{1.5}Al_{.4})(Si_{7.}AlO_{22})(OH)_2$	$CaAl_2Si_2O_8$ &$NaAlSi_3O_8$
Ref Number	01-086-1385	01-070-3754	01-085-0797	00-083-0735	08-083-1606

نمونه سنگ بکر کندوانKFR نمونه سنگ هوازده کندوانKWR / نمونه سنگ هوازده کندوان استحکام بخشی شده با نانو سیلیکاتKWR+NST / نمونه سنگ هوازده کندوان استحکام بخشی شده با اتیل سیلیکاتKWR+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 لاپیلی توف و لیتیک توف از اصطلاح ایگنیمبریت استفاده کرده است. برانی و همکاران (Branney et al, 2002) نیز لاپیلی توف و لیتیک توف را به‌عنوان مهم‌ترین رخساره‌های ایگنیمبریتی معرفی نموده‌اند. بنابراین لیتیک توف‌های کندوان را می‌توان ایگنیمبرایت نامید. همچنان که معین وزیری و امین سبحانی (۱۳۵٦) نیز از این اصطلاح برای آن استفاده نموده‌اند. درهمین راستا پژوهشگران این حوزه (غیوری،۱۳۸۱،ص ۸۱-۸۲، امینی بیرامی و دیگران ۱۳۹٤) با نظر به جوش خوردگی ضعیف سنگ 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 ٤) می‌توان گفت سنگ کندوان در حالت بکر و هوازده تفاوت چندانی ازنظر 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 هوازدگی 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 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 ۹٦ 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).

گونه آزمایش	تعداد نمونه	KFR	KWR	KWR+NST	KWR+EST
درصد آب (٪)	۳	۲۵–۲۳	۳۰–۲۵	۷	٤
چگالی خشک(gr/cm^3)	۳	۱.۵۷	۱.۲۵	۱.٤۹	۱.۵۲
تخلخل کل (٪)	۳	۳۹–٤۰	٤۲–٤۲	٤۱–٤۰	۳۷–۳٤
درصد شاخص پوکی(٪)	۳	٤۵	٤٦–٤٤	۳٤	۳۵
موئینگی ($g/m2/\sqrt{s}$)	۳	۲۳۰	۲۷٦	۵٦	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

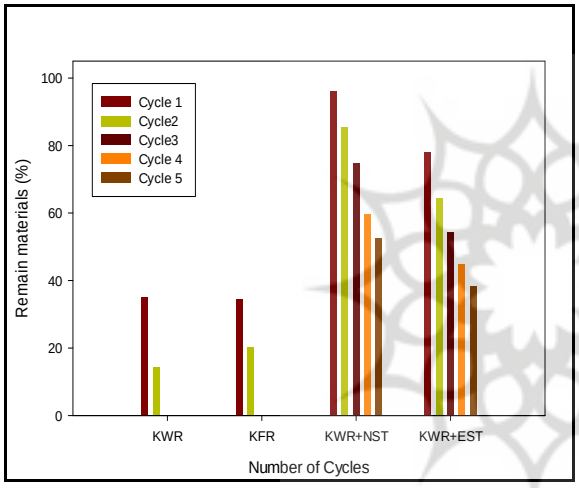
ج٤. نتایج حاصل از آزمایش‌های ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌های درمان شده و درمان نشده معماری صخره‌ای کندوان. (مأخذ: نگارندگان).

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 ازلحاظ مقاومت در مقابل چرخه‌های دوام‌داری تفاوت چندانی باهم ندارند و وزن باقی‌مانده آن‌ها در طی دوچرخه به حدود ۱۸٪ می‌رسد. ازاین‌رو در تقسیم‌بندی‌های رایج همچون (ISRM 1981) و (ASTM D4644-87)، سنگ هوازده و سطحی کندوان و سنگ بکر کندوان در رده خیلی ضعیف ازلحاظ 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 دوام داری 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.

نمونه‌های مورد آزمایش	Id_1(٪)	Id_2(٪)	Id_3(٪)	Id_4(٪)	Id_5(٪)
سنگ هوازده سطح بیرونی (KWR)	۳۳/۹٤	۱۷.۱٤	–	–	–
سنگ بکر (KFR)	۳٤.٤۷	۲۰.۱۲			
سنگ درمان شده با اتیل سیلیکات KWR+EST	۷۸/۰۳	٦۷/۲۸	۵٤/۱۷	٤٤/۷۱	۳۸/۲۷
سنگ درمان شده با نانو سیلیکات KWR+NST	۹٦/۰۸	۸۵/٤۰	۷٤/۷۹	۵۹/۷۱	۵۲/۳۷

نمونه سنگ بکر کندوانKFR / 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 / Id شاخص دوام داری مرحله ۱–۵)

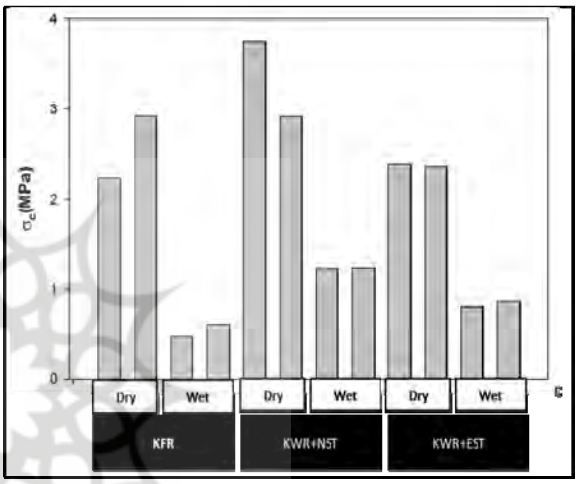
ج ۵. مقاومت دوام وارفتگی محاسبه شده برای نمونه‌های مورد آزمایش. (مأخذ: نگارندگان).



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 به‌نحوی‌که از هرگونه دو نمونه در شرایط خشک و دو نمونه در شرایط اشباع از آب مورد سنجش مقاومت فشاری قرار گرفتند و درهمین راستا نتایج

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 MPa ۱- ۰.۵ ارتقاء یافته است که در این زمینه استحکام بخشی با نانو سیلیکات نتایج بهتری را از خود نشان می‌دهد (نمودار شماره ۲).



ت ٦. 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 برشدن، در کنار عوامل انسانی باعث تسریع فرایندهای تخریب و درنهایت 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 ازلحاظ ویژگی‌های سنگ‌شناسی، سنگی ضعیف و مستعد فرسایش و هوازدگی است. ازاین‌رو 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 مورداستفاده 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. درکل با توجه به آنکه سطوح معماری صخره کند کندوان در طول چهارفصل سال خیس هستند اتیل سیلیکات به‌واسطه واکنش با آب و در ساختارهای خیس می‌تواند گزینه مناسبی برای پوشش سطحی باشد و نانو سیلیکات می‌تواند به‌غیراز استحکام بخشی سطحی به‌صورت تزریقی برای تحکیم سطوح زیرسطحی مورداستفاده 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

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

شرایط نگهداری (در این مورد مجاورت با رطوبت) و حفاظت از سطح می‌تواند متغیر باشد ازاین‌رو برهم‌کنش‌های این مواد با مسائل موجود می‌توانند باعث تغییراتی در شکل‌گیری واکنش آن‌ها گردیده و عمرمفید آن‌ها را کاهش دهند. نکته مهم این است که به علت ساختار سیلیکاتی این دوماده که هردو درنهایت به ماده معدنی تبدیل می‌شوند می‌توان انتظار داشت بانفوذ در داخل سیستم تخلخلی اثر، واکنشی مشابه سطوح پذیرای ماده داشته و به‌تقویت 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 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 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 به‌مدت حداقل یک‌سال مطابق استانداردهای بین‌المللی ارزیابی شود. در این زمینه پیشنهاد می‌گردد 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 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 به‌صورت نسبی بوده و آن‌ها را نسبت به هم

درجه‌بندی خواهد کرد. لازم به‌ذکر 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 ٤٠-٦٠ گرم داشته باشند و فاقد ناپیوستگی باشند، نیاز است. در ادامه نمونه‌ها به مدت ٤-٦ 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 ۱٤۰ و طول ۱۱۰ میلی‌متر که یک توری فلزی با دهانه ۲ میلی‌متر ساخته‌شده (Franklin,1979) با آب مقطر (تنها براساس استاندارد ASTM و بدون حساسیت نسبت به نوع آب در استاندارد ISRM) با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد پرشده قرارگرفته و استوانه مدت ۱۰ دقیقه با سرعت دور در دقیقه توسط ماشین چرخانده می‌شود. سپس نمونه‌ها را به مدت ٢٤ 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 به‌صورت 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 استانداردی از با دوام تا خیلی ضعیف تقسیم بندی می‌شود و مشخص شده و قابل تفسیر هستند (ISRM 1981; Kıncal et al. 2010) در همین راستا فرانکلین و چاندرا (1972) سنگ‌ها را براساس شاخص دوام اولین مرحله رده‌بندی نموده‌اند (1972) درصورتی که دومین مرحله با استفاده از آب معمولی به‌دست 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، محمدامین؛ باغبانان، علیرضا. (۱۳۹٤)، تحلیل ساختارشناسی سنگ های آذرآواری در معماری صخره کند روستای تاریخی کندوان. دوفصلنامه علمی پژوهشی پژوهه باستان سنجی، ۱ (۱): صص ۱٦-۱.

– رازانی، مهدی؛ سیدمحمدامین، 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؛ سیدمحمدامین، امامی؛ علی‌رضا باغبانان. (۱۳۹۷)، بهینه‌سازی ملات‌های سنتی پایه آهکی برای جایگزینی سیمان در راستای حفاظت سازگار از معماری صخره کند روستای تاریخی کندوان، مجله مسکن ومحیط روستا، سال۳۷، ش. ۱٦۱. 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 فرانیدهای هوازدگی سنگ‌ها بر اساس مدل‌های پلتیر در شمال غرب ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ش.۷٤. ۳۵-٤٦.

– کرمی، فریبا (۱۳۸٦). توانمندی‌های ژئوتوریسم در توسعه روستای کندوان، مجله جغرافیا فضای جغرافیایی، سال ۷، (۲۰)، صص ۱۳۰-۱۱۵.

– معین‌وزیری، حسیم؛ امین سبحانی، امیر. (۱۳۵٦)، ولکانولوژی و ولکانوسدیمانتولوژی منطقهٔ 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. (۱۳۵٦)، روستای تاریخی کندوان. مجله بررسی‌های تاریخی، سال ۱۲، (۱)، صص ۲۱٦-۱۵۷.

- 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, 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 & 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., & 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
- 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). NeueAnsätzezurKonservierung von Schalstein: Ein Zwischenberichtzueinem Modelvorhaben am Heidenportal des WetzlarerDoms. "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-
- 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.

- https://doi.org/10.22034/38.167.99

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی