

بهینه‌سازی ملات‌های سنتی پایه آهکی برای جایگزینی سیمان در راستای حفاظت سازگار از معماری صخره‌کند روستای تاریخی کندوان

مهدی رازانی*، علی‌رضا باغبانان**، سید محمدامین امامی***، خوزه دلگادو رودریگوئز****

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۵/۰۶/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۵/۱۲/۰۱

چکیده

هدف این پژوهش پیشنهاد ملاتی بوم‌آورد برای جایگزین ملات ماسه-سیمان جهت استفاده در سطوح بیرونی و همچنین پر کردن ترک‌ها و شکاف‌های سازه‌ای در راستای حفاظتی سازگار با معماری صخره‌کند و تاریخی کندوان است. معماری صخره‌ای کندوان از لحاظ زمین‌شناسی بر یک توده آذر آواری قرار دارد که فرسایش طبیعی دره کندوان موجب شکل‌گیری سازه‌های کله‌قندی آن شده است. امروزه تشدید تخریب و هوازدگی در کندوان باعث نامناسب شدن شرایط زندگی، ویرانی، سکونت فصلی و یا غیرمسکونی شدن برخی خانه‌های صخره‌ای گردیده است. حفاظت و نگهداری از چنین سازه‌های سنگی، باتوجه به آنکه پدیده‌های تخریبی این آثار با سرعت و به‌طور جدی در حال پیشرفت هستند، ایجاب می‌کند وضعیت اثر را با کاهش نرخ تخریب با تقویت ساختار فیزیکی آن از طریق روش‌های حفاظتی بهبود بخشید. در طی نیم قرن گذشته تخریب‌های متعدد و آسیب‌های این یادمان سنگی باعث گردیده تا از سیمان به‌عنوان ماده‌ای در دسترس، ارزان و پرکاربرد در صنعت ساختمان برای انجام تعمیرات و نگهداری از این ابنیه استفاده شود. با توجه به آنکه سیمان به‌واسطه تفاوت تخلخل و ضریب انبساط حرارتی و رطوبتی متفاوت، غیر برگشت پذیر بودن، همچنین ایجاد نمک‌های مخرب خود از عوامل اصلی تخریب میراث فرهنگی به‌شمار می‌رود، از این رو با توجه به کم‌خطر بودن ملات‌های ساختمانی بر پایه آهک، ارزان‌ی، بوم‌آوردی و سازگاری با معماری کندوان، تحقیق پیش رو با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی در منطقه دامنه سهند اقدام به ساخت و آزمایش ۲۴ رده ملات پایه آهکی نموده است. نتایج حاصل از آزمون‌های پیرسازی تسریعی شامل چرخه‌های ذوب و انجماد، تر و خشک شدن مداوم در آب و نمک سولفات سدیم آنه دراته، همچنین سنجش خواص فیزیکی (درصد جذب آب، چگالی خشک، تخلخل کل، درصد شاخص پوکی، موئینگی و گذر امواج صوتی) و ویژگی‌های استقامتی (دوام در برابر وارفتگی و مقاومت فشاری تک محوری) در کنار آنالیز پراش اشعه ایکس نشان‌دهنده مزیت استفاده از ترکیب بهینه ملات آهک پوزولانی به‌همراه خاکستر چوب نسبت به دیگر ترکیبات است. به‌نحوی که مقاومت فشاری تک محوری ملات فوق‌الذکر در برابر سنگ کندوان در حدود دو برابر و چگالی آن به مراتب پایین‌تر از سنگ کندوان است.

واژگان کلیدی: ملات‌های پایه آهکی، ملات آهک پوزولانی، ملات ماسه-سیمان، معماری صخره‌کند، روستای تاریخی کندوان.

* عضو هیئت علمی دانشکده هنرهای کاربردی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز. m.razani@tabriziau.ac.ir

** دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان.

*** استادیار دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.

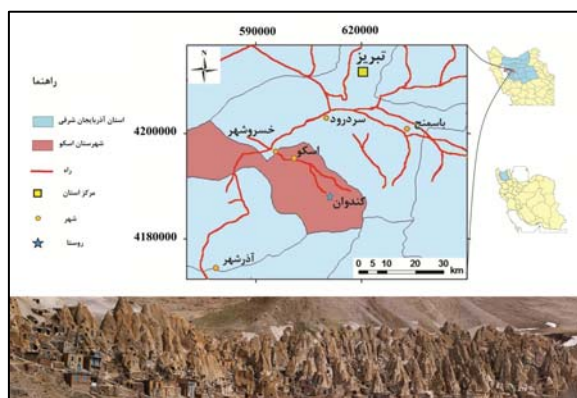
**** استاد آزمایشگاه ملی مهندسی عمران (LNEC)، لیسبون، پرتغال.

مقاله فوق مستخرج از پایان‌نامه دکتری مهدی رازانی به راهنمایی و مشاوره سایر همکاران این تحقیق در رشته مرمت اشیا تاریخی و فرهنگی دانشگاه هنر اصفهان است که با عنوان مکانیسم تخریب توف‌های آتش‌فشانی معماری صخره‌کند روستای تاریخی کندوان به‌منظور ارائه راهکارهای حفاظتی در سطوح بیرونی خانه‌های سنگی به تصویب رسیده است.

مقدمه

بیش از ۲۰۰ اثر میراث صخره‌ای در فهرست میراث فرهنگی ایران به ثبت رسیده است (امینی و دیگران، ۱۳۹۴). یکی از مهم‌ترین آن‌ها روستاها و از جمله روستای صخره‌کند کندوان در دامنه کوه سهند آذربایجان شرقی است (تصویر شماره ۱). معماری شاخص این روستا در صخره‌های کله قندی که از جنس سنگ توف آتشفشانی هستند، ساخته شده است. توف‌های آتشفشانی به واسطه سختی پایین، تخلخل بالا، سبکی، سهولت در کنده‌کاری و کارپذیری از مصالح پرکاربرد در بسیاری از تمدن‌ها و فرهنگ‌ها بوده و مورد استفاده فراوانی قرار گرفته‌اند. از طرفی این گونه سنگ از نظر دوام جزء سنگ‌های ضعیف محسوب می‌شود. امروزه شاهد گسترش ابعاد تخریب در سطوح بیرونی معماری این روستا هستیم که موجب ویرانی کلی و یا غیر مسکونی شدن فصلی برخی خانه‌های صخره‌کند گشته است. از جمله مشکلات حفاظتی روستای کندوان و شاید محوطه مشابه، استفاده ساکنین از ملات ماسه - سیمان به‌عنوان یک ماده پوششی بدنه‌ها، پرکردن ترک‌ها و درزگیری ابنیه است که این امر بیش از آنکه اقدامی مفید باشد در بلند مدت با توجه به شرایط اقلیمی منطقه باعث تخریب بیشتر سازه‌های سنگی شده است. با توجه به مقرون به صرفه نبودن درمان‌های مبتنی بر استحکام بخشی با مواد آلی و عدم کارایی قابل توجه آن‌ها در یادمان‌های بزرگ موجود در فضای باز، به‌خصوص اینکه عمدتاً به نیروی حرفه‌ای جهت آماده‌سازی و اعمال نیاز دارند، از این رو تحقیق حاضر با هدف کمک به درمان‌های حفاظتی پایدارتر از طریق بهینه‌سازی ملات‌های بوم آورد پایه آهکی جایگزین سیمان در روستای کندوان انجام شده است. مهم‌ترین سوالات این تحقیق عبارتند از: براساس شرایط اقلیمی

منطقه کندوان مهم‌ترین آسیب‌های بروز کرده بر معماری صخره‌کند مسکونی کدامند؟ چگونه می‌توان از مصالح موجود در منطقه برای حفاظت - مرمت سازگار با معماری صخره‌کند بومی و محیط زیست طبیعی استفاده نمود؟ چگونه می‌توان ملاتی بوم آورد را از لحاظ آزمایشگاهی بررسی نمود و توسعه داد تا به شرایط مطلوب برای استفاده در اقدامات حفاظتی برسد؟ تحقیق پیش رو با روش توسعه‌ای - تجربی و بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای، میدانی و آزمایشگاهی انجام شده است. در بخش مطالعات میدانی تحقیق اقدام ثبت وضعیت کنونی تخریب‌ها و نمونه برداری شد و در ادامه براساس نتایج حاصله اقدام به ساخت ملات‌های حفاظتی جایگزین ملات ماسه سیمان گردیده که بعد از آزمون‌های پیرسازی بر مبنای شرایط اقلیمی کندوان و تحلیل اطلاعات نمونه ملات بهینه و سازگار پیشنهاد شده است.



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

پیشینه تحقیق

در تعمیرات ابنیه سنگی از سیمان به وفور استفاده شده و نقش مخرب آن در تعامل با ساختار عمده سنگ‌ها به اثبات رسیده است. شکل‌پذیری و سادگی اجرا، ارزانی و

انجام داد راه حلی مبتنی بر ایجاد پوششی از ملات سنگین به ضخامت حداقل ۳cm شامل سیمان، آهک و توف (سنگدانه) و در صورت امکان مقدار کمی رزین مناسب برای سطوح افقی را پیشنهاد نمود (Bowen, 1987:77). مؤسسه گتی در حفاظت از پلکان توفی و منقوش کویان در کشور هندوراس از ملات‌های پوزولانی استفاده کرده‌اند (GCI and IHAH, 2006). تاکنون هیچ‌گونه پژوهش علمی مبتنی بر بهینه‌سازی ملات‌های پایه آهکی برای کاربرد در معماری صخره‌ای شمال غرب ایران بر مبنای مطابقت ملات با سنگ توف آتشفشانی به‌عنوان بستر نیازمند حفاظت براساس داده‌های اقلیمی محلی صورت نگرفته است. چند پژوهش انتشار نیافته به بهینه‌سازی ملات جایگزین سیمان پرداخته‌اند که عمدتاً برای استفاده در بناهای هخامنشی فارس بوده و در مخلوط مواد مورد استفاده، سیمان خود جزئی از ترکیب بوده است که از آن جمله مطالعات مهدی‌نژاد (۱۳۷۴) براساس ترکیب سیمان، پوزولان (خاکستر بادی)، آهک برای سنگ‌های تخت جمشید و شیخ‌الاسلامی (۱۳۸۷) براساس ملات ماسه-سیمان با میکروسلیس قابل ذکر هستند. پژوهش حاضر در راستای حفاظت از یادمان‌های معماری صخره‌ای روستای کندوان سعی در شناخت ملات بهینه جایگزین سیمان-ماسه بر مبنای تحلیل‌های علمی و آزمایشگاهی و براساس شرایط اقلیمی منطقه دارد. در این تحقیق ۲۴ ترکیب ملات پایه آهکی ساخته و مورد آزمایش پیرسازی تسریعی و بررسی‌های آزمایشگاهی قرار گرفته و نتایج آزمایش‌های مختلف بر روی ملات مقایسه و تحلیل گردیده است.

آشنایی با معماری صخره‌کند روستای تاریخی کندوان
روستای تاریخی کندوان از توابع شهرستان اسکو در

دسترس آسان، عدم نیاز به نیروی متخصص، مقاومت بالا بعد از خشک شدن، از جذابیت‌های استفاده از آن برای تعمیرات ساختمانی است. عدم سازگاری ملات سیمان از لحاظ انبساط حرارتی متفاوت با سنگ‌ها، تخلخل کم و جذب آب بالا، باعث بروز مشکلات زیادی می‌گردد (Torraca, 2009: 64). از دهه‌های گذشته به‌صورت غیر قابل‌کنترلی از سیمان برای تعمیرات مصالح توفی استفاده شده است در واقع مصالح سیمانی می‌توانند به‌واسطه تغییرات حجمی (انقباض، انبساط حرارتی) و آثار شیمیایی (واکنش‌های سیلیکات‌قلیایی و سولفات‌شدن^۱ و غیره) موجب آسیب‌گردند (Vacchiano, 2004). بیش از ۸۰ (سال ۱۳۱۲) سال است که از ملات ماسه-سیمان برای کاربردهای از جمله ماده درزگیر، پرکننده، ماده چسباننده تقویت‌کننده و اندود در حجم وسیع در مرمت ابنیه شاخصی چون تخت جمشید و پاسارگاد استفاده شده است (عابد اصفهانی و اردستانی ۱۳۸۷؛ شیخ‌الاسلامی، ۱۳۸۷). در معماری صخره‌کند کندوان نیز برای جلوگیری از نفوذ رطوبت و آب بند نمودن بدنه‌ها در ۵۰ سال گذشته از سیمان استفاده شده است. ملات سیمان تخلخل کمتری از سنگ توف دارد، از این رو اجازه نمی‌دهد آب با همان نرخ سنگ از ملات نفوذ کند و ملات به‌طور مؤثر به مثابه یک مانع رطوبت عمل کرده و میزان زیادی رطوبت در محل‌های استفاده باقی می‌ماند. بنابراین محل‌هایی که با سیمان مرمت شده بسیار بیش از اصل اثر مرطوب باقی می‌مانند. این رطوبت از طریق رنگ تیره‌اش نسبت به دیگر بخش‌های سنگ شناخته می‌شود (Charola, 1997). پیشنهاد استفاده از ملات‌های غیر سیمانی برای حفاظت از ساختارهای توفی به دهه ۱۹۷۰ بر می‌گردد. در مطالعاتی که باون به‌منظور حفاظت سطحی از یادمان‌های صخره‌ای (توفی) دره گورمه ترکیه



کندوان ۱۳۷۵



کندوان ۱۳۸۴

ت ۳. نمایی از معماری صخره‌ای کندوان و یکی از کران‌های ویران شده.

شرایط اقلیمی و آب و هوایی دره کندوان

منطقه اسکو و ارتفاعات سهند 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). با توجه به اینکه در ارتفاعات خیلی بالا و در بیشتر نقاط شهرستان ایستگاه هواشناسی موجود نیست لذا می‌توان از رابطه دما با ارتفاع و بارش با ارتفاع جهت محاسبه میزان دما و میزان بارش این مناطق بهره گرفت. همانطور که

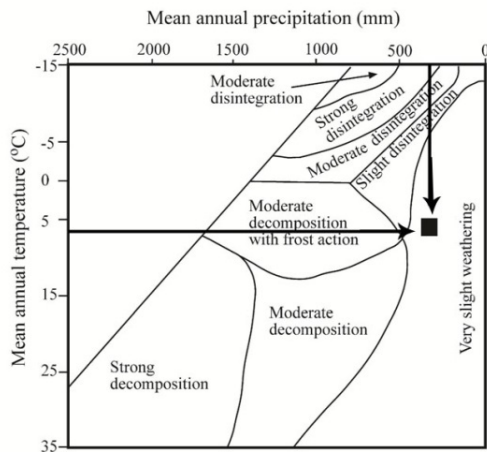
۶۲ کیومتری شهر تبریز استان آذربایجان شرقی است (تصویر شماره ۱).

براساس نظریه‌های موجود از دوره ایلخانی تا به حال مردم در خانه‌های کله‌قندی آن ساکن بوده‌اند (مصاحبه با عمرانی، ۱۳۹۵). به واسطه خانه‌های حفر شده در دل صخره‌های توفی سربرافراشته در دامنه کوه آتشفشان سهند روستای کندوان به سال ۱۳۷۶ در فهرست میراث فرهنگی کشور ثبت گردیده و هم اکنون از مهم‌ترین جاذبه‌های گردشگری شمال غرب کشور است. اما متأسفانه امروزه معماری صخره‌کند دچار تخریب و فرسایش شدید در سطوح بیرونی گشته است که این امر به واسطه دارا بودن تخلخل بالا، دوام کم و توان ذاتی پایین سنگ توف آتشفشانی مورد نظر برای مقاومت در برابر پدیده‌های مختلف هوازدگی و فرایندهای ناشی از تأثیر آب است (امینی بیرامی و دیگران، ۱۳۹۴). عوامل تخریبی باعث گردیده است که آسیب‌هایی از قبیل تورم و تاول شدن^۱، لایه لایه شدن^۲، فروپاشی دانه‌ای^۳ و پودری شدن^۴ (تصویر شماره ۲) نمایان گردند که در برخی موارد به همراه عوامل سازه‌ای موجب ویرانی کلی خانه‌های سنگی گردیده است (تصویر شماره ۳).



ت ۲. گونه‌های آسیب در معماری صخره‌ای کندوان. (A) تورق شدید، (B) از دست رفتن زمینه، (C) تغییر رنگ و تاول.

مطالعاتی که مقصودی و دیگران (۱۳۸۹) بر پهنه‌بندی فرایندهای هوازدگی سنگ‌ها براساس مدل‌های پلتیر در شمال غرب ایران انجام دادند این منطقه را از نظر آب و هوایی جزء نواحی نیمه خشک و از لحاظ گونه هوازدگی دارای هوازدگی مکانیکی با شدت ضعیف ارزیابی نموده‌اند. براساس ترسیم نمودار پلتیر بر پایه متوسط نمودار بارش و دمای سالیانه در روستای کندوان انتظار می‌رود هوازدگی منطقه عمدتاً بسیار خفیف بوده و همچنین میزان تأثیر هوازدگی فیزیکی و مکانیکی در فرایند تخریب نسبت به هوازدگی شیمیایی بیشتر باشد (تصویر شماره ۴).



ت ۴. نمودار پلتیر براساس داده‌های متوسط آمار سالیانه کندوان که مربع سیاه در این سیستم شاخص هوازدگی را نشان می‌دهد (Fookes et al. 1971).

عوامل تخریب سنگ توف معماری صخره‌کند کندوان
پدیده‌های تخریب و هوازدگی به‌عنوان نتیجه کلیه عوامل مخرب (فیزیکی-مکانیکی، شیمیایی و بیولوژیکی)، از مهم‌ترین مسائل مورد توجه در حفاظت از یادمان‌های سنگی و آثاری که در مجاورت آب- هوا و شرایط محیطی قرار دارند، محسوب می‌گردند. در همین راستا برای شناخت وضعیت موجود و ثبت و ضبط آسیب‌ها و شناسایی محل‌های نمونه برداری با

می‌دانیم با افزایش ارتفاع میزان دما کاهش و میزان بارش افزایش می‌یابد و این کاهش دما 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 پیشنهاد شده‌اند.

$$T = 22/3 - 0 + 0.075 H_M$$

گرادیان دمای منطقه:

$$P = 241/85 + 0.028 H_M$$

گرادیان بارش منطقه:

که در این روابط H ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر، T متوسط درجه حرارت سالیانه بر حسب سانتی در گراد و P بارش سالیانه بر حسب میلی‌متر است. در این میان دمای متوسط سالیانه روستای کندوان براساس گرادیان فوق $6.61^\circ C$ و میزان بارش آن $304/15$ mm 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 (مقیمی اسکویی، ۱۳۹۱).

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 (جدول شماره ۱).

گونه اقلیم	نیمه خشک سرد تا نیمه مرطوب سرد
ارتفاع از سطح دریا	۲۲۲۵ متر
کمینه و بیشینه دما سالانه	$20^\circ C$ (بهار) - $20^\circ C$ (مرداد)
بیشترین روزهای خشک	وسط خرداد تا آخر شهریور ۱۰۰ روز
متوسط دمای سالیانه	$6.61^\circ C$
تعداد چرخه تر و خشک شدن در متوسط سالانه	۲۸ چرخه
تعداد چرخه ذوب و انجماد در متوسط سالانه	۱۴ چرخه
متوسط بارش سالیانه	۳۰۴ mm
جهت باد و باران	جنوب غربی و غرب- شرقی (باد تابستانه- گجیل و مه نیلی؛ باد زمستانه و بهاره- آخ-یل) است.

ج ۱. وضعیت اقلیمی روستای تاریخی کندوان (Kaljahi et al., 2015، رازانی و دیگران ۱۳۹۳).

بررسی میدانی، مستندنگاری روستای کندوان براساس فرم‌های ارزیابی محیطی در آبان سال ۱۳۹۳ انجام گرفت. نتایج نشان داد مهم‌ترین عوامل تخریب در کران‌های سنگی روستای کندوان به ترتیب اثرگذاری عبارتند از: (۱) عوامل انسانی، (۲) موقعیت زمین‌شناسی، (۳) شرایط اقلیمی منطقه، (۴) عوامل ذاتی سنگ و (۵) تجمع زیستی که تشدید عوامل فوق در طی چند دهه اخیر باعث گسترش فرایند تخریب گردیده است. تعمیرات با ملات ماسه-سیمان در روستای کندوان (تصویر شماره ۵)، باعث تشدید تخریب به واسطه جذب و نگهداری آب در سطح سنگ و تولید نمک‌ها گردیده است. همچنین با تغییراتی که در سبک زندگی ساکنین با دادن انشعاب‌های آب، برق و تلفن به کران‌ها و متعاقب آن استفاده از گاز مایع به جای آتش روی داده است، به غیر از تغییرات در منظر طبیعی و ناهمگنی بافت، موارد فوق منجر به تخریب فراوان خانه‌های سنگی در راستای مدرن شدن روستا گردیده است.



ت ۵. شکستگی نمک حاصل از کاربرد وسیع سیمان در عایق کاری و پوشش معماری صخره‌کند.

مواد و روش‌ها

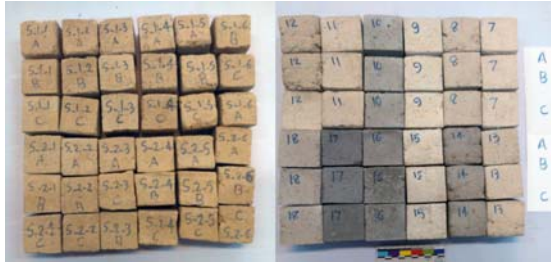
در این بخش به شیوه آماده‌سازی نمونه‌های مورد مطالعه ملات پایه آهکی و همچنین روش‌های آنالیز آزمون‌ها و تجهیزات مورد استفاده پرداخته شده است.

روش نمونه‌سازی و ترکیب نمونه‌ها

با توجه به نقش مخرب سیمان در صورتی که بتوان از مصالح بوم آورد همانند آهک، ماسه و پوزولان (که از نظر ساختاری با خانه‌های صخره‌کند کندوان شباهت بیشتری دارند) استفاده نمود، می‌توان کارایی مناسب‌تری نسبت به دیگر مواد حفاظتی آلی و پوشش‌دهنده را انتظار داشت. برای بهینه‌سازی ملات پایه آهکی به تبعیت از منطق سنتی در اختلاط ملات‌های آهکی ایران و اروپا اقدام شد، به نحوی که براساس مطالعات انجام شده (حامی، ۱۳۸۴) و همچنین فرمول‌های سنتی (Trocca 2009) مبنی بر ثابت نگه داشتن میزان آهک مابین ۲۰ الی ۳۰٪ اقدام شد. نسبت‌های فوق آهک در ترکیب با سایر مصالح موجود در منطقه شامل ماسه رودخانه‌ای، خاک، پوزولان^۶ و خاکستر چوب استفاده گردید. با استفاده از مواد فوق ۲۴ ترکیب ملات و از هر ترکیب ملات ۱۲ نمونه در ابعاد ۴×۴×۴cm ساخته شد (جدول شماره ۲ و تصویر شماره ۶). برای کامل شدن واکنش شیمیایی ترکیبات کلیه نمونه‌ها به مدت ۳۰ روز با قرار دادن نمونه‌های مرطوب بلافاصله بعد از خارج نمودن از قالب بر روی سینی و پوشش دادن آن با یک پوشش نایلونی با تعدادی سوراخ اقدام شد و پس از طی این دوره آزمایشات انجام گرفت. همچنین لازم به ذکر است آب مورد استفاده در کلیه این ترکیبات آب آشامیدنی شهری بوده است. نتایج پراش پرتو ایکس^۷ و دانه‌بندی مواد مورد استفاده در ملات جدول شماره ۳ و نمودار شماره ۱ ارائه شده است.

- آهک

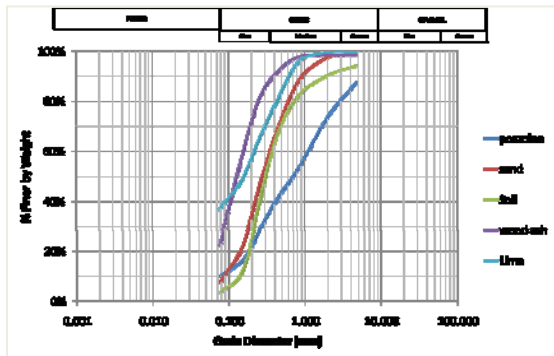
از منابع اصلی آهک شمال غرب کشور آهک‌های نیمه صنعتی تولید شده در شهرستان آذرشهر در فاصله کمتر از ۱۰۰ کیلومتری روستای کندوان است. آهک فوق‌الذکر از خلوص بالایی برخوردار نیست. آهک



ت ۶. ترکیبات و میزان مواد مورد استفاده در ساخت.

Minerals(Formula)	ترکیب
Portlandite (Ca(OH)2)/ Periclase(MgO)/ Lime(Cao) / Calcite(CaCO3)	آهک
Quartz (SiO2) / Calcite(CaCO3) / Albite((Na,Ca) Al(Si,Al)3OH) / Muscovite(H4K2(Al, Fe)6Si6O24) / Chlorite(Mg2Al3(Si3Al)O.10(O)8)	خاک
Quartz (SiO2) Albite((Na,Ca) Al(Si,Al)3OH) / Muscovite(H4K2(Al, Fe)6Si6O24) / Chlorite (Mg2Al3(Si3Al)O.10(O)8) / Hematite(Fe2O3)	ماسه
Anortite(CaAl2Si2O8) / Mica/illite(H4K2(Al, Fe)6Si6O24) / Magnesiohomblende Ferrous((Na.4K) (Ca1.8Fe2) (Mg3.1Fe.5Al4) (Si7.Al.O22) (OH)2)	پوزولان
Quartz (SiO2) / Calcite(CaCO3) / Fairchildite (K2Ca(CO3)2)	خاکستر

ج ۳. نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس ترکیبات ملات.



ن ۱. نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس ترکیبات ملات.

- ماسه و خاک

رودخانه کندوان که از سمت شرق به غرب دره کندوان جریان دارد و از منابع سنتی و محلی تولید شن و ماسه است اما از آنجا که ماسه به مقدار زیاد در این منطقه در دسترس نیست و همچنین تهیه ماسه نیاز به هزینه چندانی ندارد از این رو می توان اقدام به خرید

مورد نظر بیشتر شکفته شده بود، از این رو به وسیله الک دستی دانه های سنگ آن جدا گردید. آهک فوق به صورت خشک به مقدار یک سوم در ترکیبات استفاده گردید و در دو سوم مابقی به صورت خمیر آهک به وسیله غوطه و رسازی آهک الک شده به مدت ۲۴ ساعت در آب آماده شده و مورد استفاده قرار گرفت.

نمونه	پوزولان %	ماسه %	خاک %	آهک %	خاکستر چوب %
S1-1	۱۵	۵	۶۰	۲۰	۰
S1-2	۱۰	۱۰	۶۰	۲۰	۰
S1-3	۵	۱۵	۶۰	۲۰	۰
S1-4	۲۰	۰	۶۰	۲۰	۰
S1-5	۰	۲۰	۶۰	۲۰	۰
S1-6	۲۰	۰	۶۰	۲۰	۰
دسته دوم ملات های آزمایشی شیره آهک با مواد دیگر					
S2-1	۱۵	۵	۶۰	۲۰	۰
S2-2	۱۰	۱۰	۶۰	۲۰	۰
S2-3	۵	۱۵	۶۰	۲۰	۰
S2-4	۲۰	۰	۶۰	۲۰	۰
S2-5	۰	۲۰	۶۰	۲۰	۰
S2-6	(بدون لیتیک) ۲۰	۰	۶۰	۲۰	۰
S2-7	۷۰	۰	۰	۳۰	۰
S2-8	۳۵	۰	۳۵	۳۰	۰
S2-9	۳۵	۰	۳۵	۳۰	۰
S2-10	۳۵	۰	۰	۳۰	۳۵
S2-11	۲۵	۲۲.۵	۲۲.۵	۳۰	۰
S2-12	۰	۰	۷۰	۳۰	۰
S2-13	۰	۳۵	۳۵	۳۰	۰
S2-14	۰	۰	۳۵	۳۰	۳۵
S2-15	۰	۷۰	۰	۳۰	۰
S2-16	۰	۳۵	۰	۳۰	۳۵
S2-17	۰	۰	۰	۳۰	۷۰
S2-18	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۰

ج ۲. دسته اول ملات های آزمایشی با آهک زنده با مواد دیگر.

ماسه از کارخانه‌های ماسه شویی منطقه نمود که برای تعمیرات عمده‌تر مقرون به صرفه است. در آزمایش فوق از ماسه معروف به ماسه امامیه تبریز استفاده گردید. خاک به کار رفته در آزمایش از خاک‌های الک شده مورد استفاده در کارهای بنایی روستا و به خصوص در ساخت ملات گچ و خاک بوده است.

- خاکستر چوب

در این منطقه خاکستر چوب و خاکستر محصولات کشاورزی و همچنین فضولات حیوانی به وفور یافت می‌شوند. در این مطالعه برای ترکیب یک جزء پرکننده در ابعاد زیر میکرون از خاکستر چوب در ترکیبات ملات استفاده گردید.

- پوزولان طبیعی (پودر سنگ کندوان)

پوزولان ماده‌ای طبیعی یا مصنوعی حاوی سیلیس غیر بلوری و آلومینای فعال و فاقد ارزش چسبندگی هستند. این ماده هنگامی که به صورت پودر شده با هیدراکسید کلسیم اضافه شود با واکنش شیمیایی که در حضور رطوبت می‌دهند تشکیل هیدرو سیلیکات مضاعف کلسیم آلومینیم ($\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 5\text{SiO}_2, 5\text{H}_2\text{O}$) را که خواص چسبندگی دارند، بوجود می‌آورد (خسروی و دیگران، ۱۳۸۵). برای آزمودن ملاتی مقاوم و بوم‌آورد، به دست آوردن دانه‌بندی مشابه و همچنین نزدیک رنگی به سنگ کندوان از پودر سنگ معماری صخره‌کند کندوان که در واقع همان پوزولان طبیعی حاصل از خاکسترهای آتشفشانی سهند است استفاده گردید اما از آنجا که سنگ کندوان دارای قطعات لیتیک کوچک و بزرگ است پودر سنگ کندوان به صورت دستی الک گردید تا قطعات بزرگتر از ترکیب خارج شوند.

معرفی روش‌های آزمایشگاهی

براساس شرایط اقلیمی کندوان مهم‌ترین فاکتور تخریب آب است و چرخه‌های تر و خشک شدن و

انجماد و ذوب مداوماً در حال فعالیت هستند، از این رو بهترین ترکیب ملات ترکیبی می‌توانست باشد که بالاترین دوام را در مقابل این چرخه‌ها از خود نشان دهد. از این رو ۳ نمونه آزمایشی از ۲۴ ترکیب موجود در ابتدا براساس این دو آزمون مورد مطالعه قرار گرفتند و نمونه‌های ملات منتخب که از مقاومت بالاتری برخوردار بودند، غربال شده و آنالیزهای تکمیلی روی آن‌ها انجام شد.

ملات‌های آزمایشی پایه آهکی

آزمون‌های خواص فیزیکی (نرخ جذب آب^۱، درصد رطوبت طبیعی^۲، چگالی خشک و تخلخل کل^۱ و سنجش خواص صوتی^۱، موئینگی)، همچنین آنالیز پراش پرتو ایکس پودری، و ویژگی‌های استقامتی از جمله، دوام در برابر وارفتگی^۲، مقاومت فشاری تک محوری، دوام در مقابل چرخه‌های نمکی انجام گرفت (جدول شماره ۴) (جهت اطلاع از نتایج ساختارشناسی سنگ کندوان رجوع کنید به: امینی و دیگران ۱۳۹۴).

نتایج و یافته‌های تحقیق

نتایج آزمایشات برای دستیابی به ملات منتخب و انجام آزمون‌های مقاومتی و خواص فیزیکی و همچنین شناخت ساختار ماده تشکیل شده در ملات منتخب برای مقایسه با سنگ کندوان در این بخش آمده است.

نتایج چرخه‌های هوازدگی تسریعی

مصلح ساختمانی به دلیل جذب آب و چرخه‌های تر و خشک شدن و ذوب و انجماد دچار تنش‌های شدید انبساطی و انقباضی می‌شوند که تداوم این عوامل باعث متلاشی شدن بافت و تخریب آن‌ها می‌گردد. آنچنان که ذکر شد از هر ترکیب ۳ نمونه (جمعاً ۷۲ نمونه) برای انجام آزمون‌های دوام در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی و دوام در برابر چرخه‌های انجماد و ذوب انتخاب و آزمون انجام شد. به علاوه از نمونه منتخبی که

گردید و میزان تغییرات وزنی آن‌ها ثبت شد و نتایج به درصد بیان گردید. نمونه‌های مورد مطالعه در چرخه‌های هوازگی تسریعی به کمک نمک بعد از طی شدن چرخه‌های ۳۲ گانه در طی ۸ چرخه به کمک آب مقطر نمک زدایی شدند و بعد از خشک شدن بار دیگر وزن سنجی گردیدند (نمودارهای شماره ۲ الی ۴).

از این دو آزمایش بیشترین استقامت را از خود نشان داده بود آزمون هوازگی تسریعی در مقابل چرخه‌های تر و خشک شدن در محلول نمکی سولفات سدیم بی آب (تناردیت) انجام گرفت (جدول شماره ۵). بعد از انجام چرخه‌های تر و خشک شدن و ذوب و انجماد نمونه‌ها با دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد در آون خشک

آزمون‌ها	گونه آزمایش	هدف	استانداردها و تجهیزات
ویژگی‌های استقامتی	مقاومت فشاری تک محوری	تعیین مقاومت فشاری تک محوری	ASTM C170
	شاخص دوام وارفتگی	تعیین مقاومت نمونه تحت آزمون دوام داری	ASTM D 4644, 2004
	یخ زدن و ذوب شدن متوالی ^{۱۳}	بررسی دوام سنگ در برابر یخ زدن و ذوب	UNE-EN 12371:2011
	تر و خشک شدن متوالی ^{۱۴}	بررسی دوام سنگ در برابر تر و خشک شدن متوالی	UNE-EN 12370:1999
	نمک سولفات سدیم بی‌آب	تخمین دوام سنگ و ملات در برابر حمله نمکی	UNE-EN 12370:1999
ویژگی‌های فیزیکی	درصد جذب آب	تعیین درصد جذب آب	ISRM, 1981
	چگالی خشک و تخلخل کل	درک رفتار مصالح با تعیین چگالی خشک، تخلخل کل	ISRM, 1979
	سنجش خواص صوتی	شاخص کیفیت ملات با خواص صوتی	ASTM 597, ASTM D 2845- 83
	شاخص پوکی	سنجش شاخص پوکی که ویژگی‌های هوازگی مصالح وابسته است	ISRM, 1981
	موئینگی	محاسبه خواص موئینگی سنگ کندوان و ملات منتخب	UNE-EN 1925: 1999
ساختار شناسی	پراش پرتو ایکس به روش پودری (XRRD)	تعیین فازهای موجود در نمونه سنگ مصالح و ملات منتخب	مدل: D5000 .Simens آلمان، سازمان زمین شناسی کشور واحد آذربایجان شرقی

ج ۴. آزمون‌های آزمایشگاهی، اهداف و مراجع استانداردها.

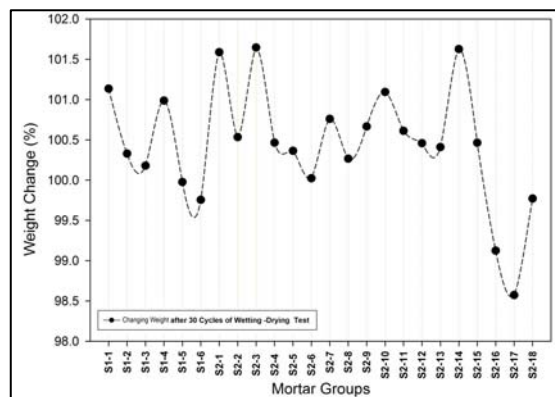
آزمون	تعداد چرخه	تعداد نمونه	نتایج میانگین تغییرات وزنی و باقی مانده (%)
میزان کاهش وزن بعد از تر و خشک شدن مداوم	۱۴	۵	۰
میزان کاهش وزن بعد از انجماد و ذوب مداوم	۷	۶	۰
میزان کاهش وزن بعد از حمله نمک Na ₂ SO ₄	۶	۶	۰
نتایج آزمون‌های هوازگی تسریعی بر روی نمونه‌های ملات منتخب (S2-10)			
آزمون	تعداد چرخه	تعداد نمونه	نتایج میانگین تغییرات وزنی و باقی مانده ترکیب منتخب (%)
میزان کاهش وزن بعد از تر و خشک شدن مداوم	۳۰	۳	۱۰۰
میزان کاهش وزن بعد از انجماد و ذوب شدن مداوم	۲۰	۳	۹۸.۵۶
میزان کاهش وزن بعد از حمله نمک Na ₂ SO ₄	۳۲	۳	۱۰۰

ج ۵. نتایج آزمون‌های هوازگی تسریعی بر روی نمونه‌های سنگ توف کندوان.

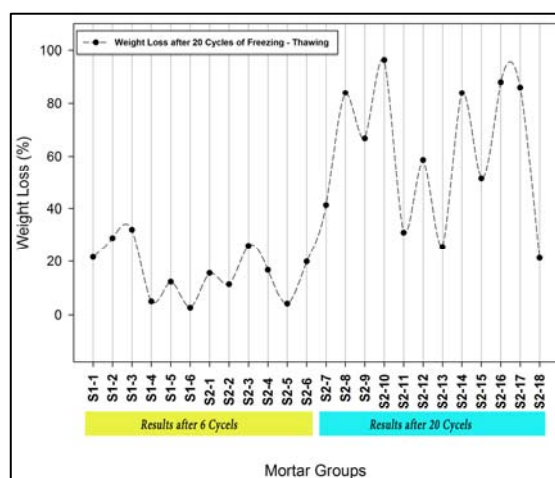
نتایج چرخه‌های پیرسازی تسریعی در آزمون تر شدن و خشک شدن مداوم براساس درصد میانگین تغییرات وزنی کلیه ترکیبات نشان می‌دهد که تنها تغییرات کاهش‌ی وزن در شش نمونه (S1-4, S1-5, S2-16, S2-17, S2-18) اتفاق افتاده است و مابقی نمونه‌ها دچار افزایش وزن شده‌اند. این افزایش وزن ناشی از میزان نمک‌های جذب شدن در طی فرایند چرخه است. همچنین واریسی نمونه‌ها نشان می‌دهند که عمده تغییرات مخرب شامل ایجاد ترک‌ها و پوسته شدن‌ها در همین نمونه‌هایی است که دچار کاهش وزن شده‌اند و مابقی نمونه‌ها تغییرات ظاهری واضحی نداشته‌اند. نتایج چرخه‌های پیرسازی تسریعی در آزمون انجماد و ذوب که براساس درصد تغییرات وزنی و میزان ماده از دست رفته بر روی کلیه ترکیبات انجام شده است نشان می‌دهد میزان تغییرات در نمونه‌هایی که در ترکیب آن‌ها از آهک تا ۲۰٪ استفاده شده در هر دو نمونه آهک الک شده خشک (S1-1) تا S1-6) و خمیر آهک (S2-1 تا S2-6) بسیار بالاست و نتایج بعد از ۶ چرخه به هیچ وجه رضایت بخش نیست. از طرف دیگر نتایج به وضوح نشان‌دهنده مؤثر بودن استفاده از میزان بهینه ۳۰٪ آهک در مابقی نمونه‌هاست که تقریباً کلیه نمونه‌هایی که میزان ۳۰٪ خمیر آهک داشته‌اند پس از طی نمودن بیست چرخه حداقل ۴۰٪ و حداکثر ۹۸٪ آن‌ها باقی مانده است. با توجه به دو آزمون تسریعی بالا می‌توان بهترین نمونه‌ها در رابطه با مقاومت در مقابل چرخه‌های فوق نمونه‌های دسته دوم ترکیبات دانست که به ترتیب ۵ رده اولیه عبارتند از:

$$S2-10 > S2-8 > S2-15 > S2-9 > S2-12$$

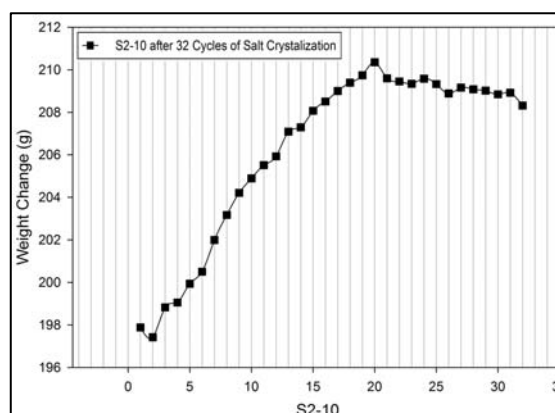
بر این اساس بهترین نمونه که با اختلاف از مابقی قرار دارد در واقع بوم‌آوردترین نمونه از ترکیبات آهک پوزولانی S2-10 است که در ادامه تحقیق به‌عنوان نمونه منتخب مورد مطالعه و انجام آزمون‌های تکمیلی قرار گرفته بوده است. در همین راستا ملات منتخب در



ن ۲. میانگین تغییرات وزنی کلیه ترکیبات ملات در چرخه‌های تر و خشک شدن.



ن ۳. میانگین تغییرات وزنی ترکیبات ملات در چرخه‌های انجماد و ذوب.



ن ۴. میانگین تغییرات وزنی ملات منتخب در چرخه‌های تر و خشک شدن نمک محلول

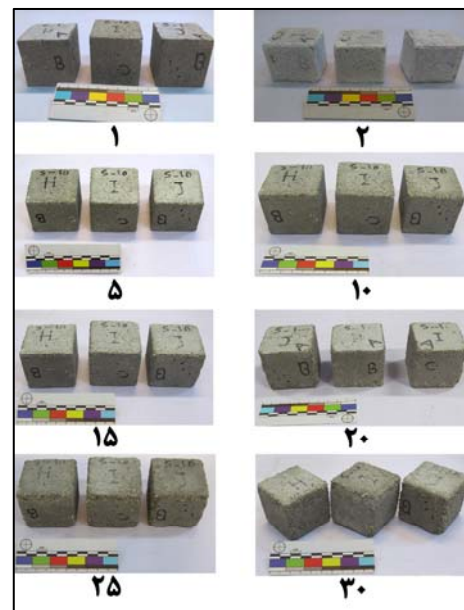
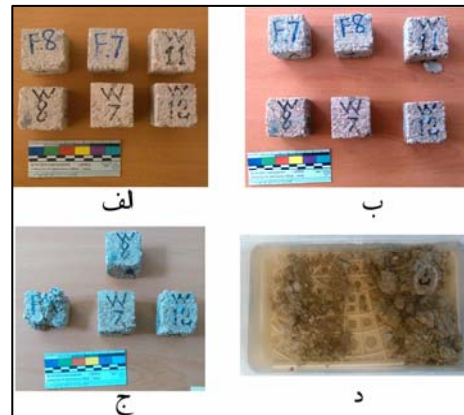
نتایج شناسایی خواص فیزیکی

انجام مطالعات فیزیکی امکان بررسی کیفی سنگ و همچنین ملات را براساس طبقه بندی های مختلف فراهم می نماید. نتایج حاصل از انجام آزمایشات ویژگی های فیزیکی سنگ کندوان در مقایسه با ملات منتخب در جدول شماره ۶ آورده شده است. از نظر چگالی خشک، تخلخل کل و درصد جذب آب سنگ کندوان و ملات منتخب با ویژگی های ضعیف و مقاومت نسبتاً پایین ارزیابی می شوند. اما با مقایسه تک تک داده ها می توان استنباط نمود که ملات دارای ویژگی هایی به مراتب بهتر از سنگ مورد نظر است به نحوی که موارد فوق باعث استقامت چند برابری نسبت به سنگ کندوان گردیده است. سنگ کندوان براساس اطلاعات فوق با ویژگی هایی چون چگالی خشک بسیار پایین و تخلخل بسیار بالا دوام پایینی در برابر فرایندهای هوازدگی و فرسایش خواهد داشت که این امر در موارد آزمایشات مربوط به پیرسازی تسریعی و خواص استقامتی به وضوح مشاهده گردید.

گونه آزمایش	تعداد نمونه سنگ	تعداد نمونه ملات منتخب	تعداد دفعات آزمون	سنگ کندوان	ملات منتخب
درصد جذب آب (%)	۶	۱۲	۲	۲۳-۲۳	۲۰-۲۳
چگالی خشک (gr/cm^3)	۶	۱۲	۲	۱.۴۳	۱.۲۳
تخلخل کل (%)	۶	۱۲	۲	۳۵-۴۰	۲۱.۰۸
درصد شاخص پوکی (%)	۶	۱۲	۲	۲۱.۸	۱۵.۱۰
کاپیلارینه ($g/m^2/\sqrt{s}$)	۶	۳	۲	۲۳۰	۷۲.۳۸
گذر امواج صوتی (m/s)	۴	۴	۲	۱.۷۸	۱.۹۱

ج ۶. نتایج حاصل از آزمایشات ویژگی های فیزیکی سنگ کندوان در مقایسه با ملات منتخب.

رابطه با چالش حمله نمک های مخرب Na_2SO_4 مورد آزمون قرار گرفت که نتیجه بعد از ۳۲ چرخه چندان تغییر محسوسی در نمونه ها به وجود نیامده بود و تنها شکستگی نمکی اندک در طی مراحل اولیه و پوسته شدن های ریز و میکروسکوپی در نمونه ها مشاهده گردید. میزان کاهش وزن بعد از مراحل نمک زدایی تنها ۲٪ مشاهده گردید (تصویر شماره ۷).

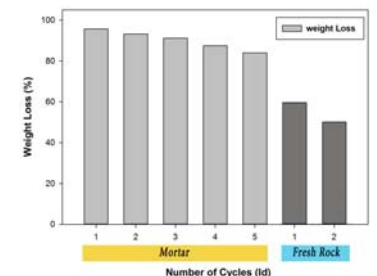
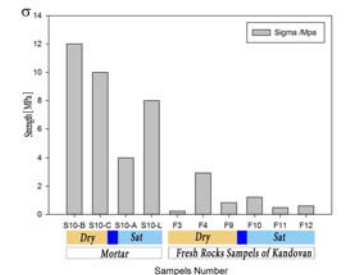
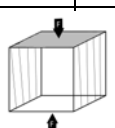


ت ۷. (تصویر بالا) نمونه های مورد آزمایش سنگ کندوان در آزمون چرخه های نمکی تخریب ۱۰۰٪ بعد از ۴ چرخه، (تصویر پایین) نمونه های ملات منتخب بعد از ۳۲ چرخه آزمون نمک و ۸ مرحله نمک زدایی.

نتایج آزمایش‌های خواص استقامتی

خواص مکانیکی و شاخص دوام و ارتگگی مقادیر بالای کاهش وزن در چرخه‌های سایش و تر و خشک شدن را نشان می‌دهد. اینکه سنگ‌های مورد نظر به چه میزان مستعد تخریب بوده براساس جدول استاندارد از با دوام تا خیلی ضعیف تقسیم‌بندی می‌شود. در این زمینه تقسیم‌بندی‌های متفاوتی وجود دارد، همچنین فرانکلین و چاندرا (۱۹۷۲) سنگ‌ها را براساس شاخص دوام اولین مرحله رده‌بندی نموده‌اند (Franklin and Chandra 1972). در صورتی که در دومین مرحله با استفاده از آب معمولی 20°C به دست آید گمبل رده‌بندی از شاخص و دوام و ارتگگی برای سنگ‌ها ارائه می‌دهد (Gamble 1971:57). براساس این طبقه‌بندی‌ها، سنگ کندوان در تقسیم‌بندی ضعیف (Gamble 1971:57) و

متوسط (Franklin and Chandra, 1972) قرار می‌گیرد و ملات منتخب براساس تقسیم‌بندی گامبل در رده کم مقاوم تا حدودی مقاوم و براساس تقسیم‌بندی فرانکلین و چاندرا در رده خیلی مقاوم قرار می‌گردد. مقایسه میان نتایج حاصل از مقاومت فشاری تک محوری در رابطه با سنگ کندوان و ملات منتخب نشان می‌دهند ملات منتخب در حالت خشک تا ۴ برابر و در حالت خیس و اشباع از آب تا ۶ برابر نسبت به سنگ کندوان از مقاومت بیشتری برخوردار است. همچنین مقاومت ملات استاندارد آهک پوزولانی بایستی بعد از ۲۸ روز که در زیر آب فرآوری و آماده‌سازی می‌گردد مقاومت فشاری تک محوری آن در حدود 6MPa باشد (Torraca 2009, p.56). ملات منتخب و ارائه شده در این تحقیق دو برابر این مقاومت را احراز می‌کند (جدول شماره ۷).

	ملات منتخب	سنگ کندوان	شاخص دوام و ارتگگی	
	مرحله ۱ (٪)	۹۵/۶۴	۵۹.۵۹	
	مرحله ۲ (٪)	۹۳/۲۳	۴۹.۹۹	
مرحله ۵ (٪)	۸۲/۰۲	۰		
میزان باقی مانده سنگ کندوان در مقایسه با ملات منتخب در چرخه‌های دوام داری				
	ملات منتخب	سنگ کندوان	مقاومت فشاری تک محوری	
	۱۲	۲	در حالت خشک (MPa)	
	۸		در حالت (اشباع) MPa	
				
مقایسه عددی مقاومت فشاری تک محوری در نمونه‌های ملات منتخب با سنگ کندوان در حالت خشک و اشباع از آب.		جهت شکست متداول و معمول کلیه نمونه‌های سنگ کندوان و ملات منتخب		

ج ۷. خواص استقامتی ناشی از مقاومت در برابر چرخه‌های دوام و ارتگگی و مقاومت فشاری تک محوری برای نمونه‌های سنگ کندوان و ملات منتخب.

مخرب ناشی از عوامل انسانی است که تا به حال مطالعات چندانی در این زمینه صورت نگرفته است. به نحوی که عمده تعمیرات با استفاده از ملات ماسه و سیمان توسط مردم محلی انجام می شود. نتایج آزمایشات صورت گرفته بر روی ۲۴ رده ملات حاکی از قابلیت مناسب ملات آهک پوزولانی بهینه شده با خاکستر در مقایسه با دیگر ترکیبات است. نتایج حاصله از آزمایشات فیزیکی نشان می دهند ملات منتخب نسبت به سنگ کندوان از ویژگی های مناسب تری از نظر چگالی کمتر و تراکم بیشتر و مقاومت بیشتر برخوردار است. مزیت های فوق باعث می گردد بتوان ترکیب ملات منتخب را به عنوان ملات جایگزین سیمان برای استفاده های حفاظتی در روستای کندوان پیشنهاد نمود. در نهایت برای بررسی موفقیت این ملات در میدان عمل پیشنهاد می شود برخی اقدامات حفاظتی در معماری صخره کند کندوان با استفاده از این ملات در قالب پوشش قربانی شونده در سطوح بیرونی و همچنین در مسدود نمودن و پر کردن درزه ها و ترک ها انجام شود تا میزان کار آمدی آن در مقابل چرخه های طبیعی و در اتصال با بدنه های معماری مورد ارزیابی قرار گیرد.

پی نوشت

1. Sulphitation
2. Blistering
3. Delamination
4. Granular Disintegration
5. Powdering
6. Pozzolan
7. X-ray diffraction
8. Rate of Absorption of Water by Hydraulic-
9. Water Content
10. Dry density and Total Porosity
11. P-Wave Ultrasonic Velocity
12. Slake Durability
13. Freezing – Thawing
14. Wetting and Drying

آنالیز پراش پرتو ایکس

نتایج فازهای شناسایی شده با XRD در هر ۲ نمونه ملات منتخب و نمونه سنگ بکر کندوان نشان دهنده فازهای اصلی: پلاژیوکلاز و کوارتز در کنار فازهای آمفیبول نوع هورنبلند و مواد آمورف (شیشه و خاکستر) همچنین کانی های ناشی از تجزیه فاز شیشه ای و دگرسانی فلدسپارها و آمفیبول ها شامل ایلیت/مسکویت هستند (جدول شماره ۸). تفاوت عمده ملات و سنگ کندوان در فازهای سیلیکاتی کلریت و همچنین کلسیت بسیار غنی در ملات منتخب است که مطمئناً وجوه استقامتی ملات نسبت به سنگ کندوان ناشی از خاصیت چسبانندگی اجزا ملات توسط کلسیت است. میزان بالای کلسیت و در نمونه ملات فارغ از بست آهکی می تواند ناشی از محتوای کلسیتی چوب باشد که دردمای کم تبدیل به خاکستر شده است (Sakthivel et al., 2012).

Minerals	Kandovan Rocks	Mortar	Formula
Anortite	√	√	CaAl ₂ Si ₂ O ₈
Quartz	√	√	SiO ₂
Mica/Illite	√	√	H ₄ K ₂ (Al, Fe)6Si ₆ O ₂₄
Chlorite	-	√	Mg ₂ Al ₃ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈
Calcite	-	√	CaCO ₃
Magnesian hornblende Ferrous	√	-	(Na ₄ K ₀) (Ca _{1.8} Fe ₂) (Mg _{3.1} Fe _{1.5} Al ₄) (Si ₇ Al _{0.22}) (OH) ₂

ج ۸. مقایسه نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس در سنگ توف کندوان و ملات منتخب.

نتیجه

بر اساس آنچه در این پژوهش بیان گردید حفاظت از میراث معماری صخره کند و به خصوص نمونه موردی این مطالعه با چالش هایی مواجه است. از جمله چالش ها تخریب شدید بدنه های توفی به واسطه خواص ذاتی ضعیف سنگ کندوان، عوامل اقلیمی و مداخلات

فهرست منابع

- ASTM. (2004). Standard test method for evaluation of durability of rock for erosion control under wetting & drying conditions (D5313). Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.08, 890 - 893.
- ASTM. (2004). Standard test method for Measurement Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes (D 1585). Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.08, 948-955.
- ASTM. (2009). Standard Guide for Petrographic Examination of Dimension Stone (C 1721). Book of Standards, Vol: 04.07.
- 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.
- Doehne, E & Price, C. A. (2010). Stone conservation: an overview of current research. Getty Publications.
- Fookes, P. G. Gourley, C. S & Ihikere., C. (1982). Rock Weathering in engineering time. Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 21, 33 - 57.
- Franklin, J. A. & Chandra, R. (1972). The slake durability index, Int. J. Rock Mech. Min. Sci, 9, 325 - 342.
- GCI, and IHAH. (2006) "Testing of Stone and Masonry Conservation Techniques and Materials-Copan Hieroglyphic Stairway,". http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/copan.
- Sakthivel, S. R., Tilley, E., & Udert, K. M. (2012). Wood ash as a magnesium source for phosphorus recovery from source-separated urine. Science of the Total Environment, 419, 68-75.
- Torraca, G. (2009). Lectures on materials science for architectural conservation. Getty Conservation Institute.
- Ulusay, R., Gokceoglu, C., Topal, T., Sonmez, H., Tuncay, E., Erguler, Z. A., & Kasmer, O. (2006). Assessment of environmental and engineering geological problems for the possible re-use of an abandoned rock-hewn settlement in Urgüp (Cappadocia), Turkey. Environmental Geology, 50(4), 473-494.
- 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.
- <https://doi.org/10.22034/37.161.125>
- امینی بیرامی، فریده. (۱۳۹۲. الف). بررسی عوامل زیست محیطی مخرب بر خانه‌های سنگی - مخروطی شکل (روستای گردشگری کندوان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی زمین‌شناسی. دانشگاه تبریز.
- امینی بیرامی، فریده؛ رازانی، مهدی و دیگران. (۱۳۹۴). تحلیل ساختار شناسی سنگ‌های آذرآواری در معماری صخره‌کند روستای تاریخی کندوان، دوفصلنامه پژوهش باستان‌سنجی س. ۱، ش. ۱، صص ۱-۲۵.
- خسروی، مرتضی، نوروزیان، ابراهیم، عطارنژاد، رضا؛ تجربه کار، شبنم. (۱۳۸۵). بررسی ساخت بتن آب‌بند با استفاده از ملات ساروج، مجله علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، س. ۱۶، ش. ۶۰، صص ۴۷-۵۳.
- شیخ‌الاسلامی، رضا. (۱۳۸۷). بررسی و امکان‌سنجی استفاده از سیمان‌های بهینه شده با میکروسیلیس در مرمت آثار سنگی مجموعه جهانی پارسه- پاسارگاد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه هنر اصفهان (دانشکده مرمت)، چاپ نشده.
- عابد اصفهانی عباس، هراتی اردستانی، ناهید. (۱۳۸۷). بررسی تأثیرات ملات ماسه و سیمان در مرمت آثار سنگی محوطه میراث جهانی تخت جمشید، دوفصلنامه مرمت و پژوهش، س. ۲، ش. ۴، صص ۷۹-۸۴.
- کریمی، فریبا. (۱۳۸۶). توانمندی‌های ژئوتوریسم در توسعه روستای کندوان، جغرافیا فضای جغرافیایی، س ۷۰، (۲۰)، ۱۱۵-۱۳۰.
- مقیمی اسکویی، حمید، رضا، (۱۳۹۱). اسکو زیبای خفته در دامنه سهند تا دریاچه ارومیه با تأکید بر جاذبه‌های گردشگری کندوان. تبریز: هنر اول.
- 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 evaluation of durability of rock for erosion control under freezing & thawing conditions (D5312). Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.08, 894 - 998.