



Assessment of Lime-Based Mortars to Conservation of Architectural Remains from Archaeological Excavations

Mehdi Razani¹ & Nasrin Dadashzadeh²
(67-92)

Next to the archaeological excavations, conservation and restoration of remains of monuments in the fields have received the attention of scientific archaeological excavations. Exposure of new finding materials to the microclimate conditions of earth surface causes to encourage their degradation process. Humidity and cryogenic fluctuations are the most important destructive factors for the architecture remains. Since a number of sites in the north and northwest of Iran encounter precipitation humidity and consequently the destruction of architecture remains, it appears that isolating outer remains of these structures using the compatible mortar is one of the best methods to reduce their damage. Lime mortar is appropriate for this purpose owing to its acceptable characteristics against the humidity. In this research, cow dung ash, rice husk ash and wood (with specific gradation) were used to optimize the lime mortar. The mix of these materials with lime paste prepared 6 different types of lime-pozzolan mortar. To determine the appropriate sample in terms of durability and consolidation against the natural cycles, accelerated aging tests including wetting and drying cycles, freezing & thawing and salt attack cycles as well as physical characteristics (densitometry, water absorption, and durability) for all types. The results of above processes indicated that the compositions of cow dung ash pozzolan's have better resistance to the aging cycles and other physical experiments. Using XRD and XRF analyses, the structure and the amount of mineral phases were determined. Based on the results, it is recommended that lime mortar (optimized with cow dung ash) be used in the historic monuments and the humid climates of the north and northwest of Iran.

Conservation of the historical works while archeological excavations and the conservation, restoration, and maintenance of the obtained remnants in the excavation area, including tombs, architectural remnants, foundations, and even some of the ornaments after excavation are among the moral and professional principles of the scientific archeology. (Sease, 1996) The necessity of the conservation of the archeological remnants in the recent century has been one of the most significant parts included in the macro planning of the archaeological approaches and cultural heritage-related knowledge. Among the measures taken for the conservation of the architectural clay and adobe remains after archaeological excavations are: 1) temporary conservation of the hills within the excavation times; 2) re-burial by re-filling the excavation area; 3) bricklaying and covering the walls and the remnants works in the area; 4) implementing roofs and shelters in the area for the temporary or permanent conservation; 5) using chemical and biological substances to strengthen the walls; 6) the use of geotextiles (permeable polymer textiles), and 7) coating the surface in the cold or humid regions. (Baghbanan et al, 2016; Rahmani, 2006, Stanley Price, 1999; Jandro et al 1999) Also, the northwest of Iran is among the rich regions of Iran in terms of archeology and tourism attractions, with an area of 7.2% out of the country's total area. (Negahban, 1998) The northwest part of Iran is among the mountainous regions with a cold and dry climate in terms of climate conditions, causing the ancient sites to be severely damaged after archeological excavations. Therefore, it is necessary to prioritize compatible solutions in conservation measures. One of these measures is the use of protective mortars. The construction technology and mix design of this kind of mortars must be recognized to achieve the most efficient and stable formula; because it leads to the principled conservation in maintaining the obtained

doi
10.22059/jarcs.2020.271630.142655
Print ISSN: 2676-4288- Online ISSN: 2251-9297
<https://jarcs.uta.ac.ir>

Received: 24 December 2018; Accepted: 19 January 2021

1. Corresponding Author Email: m.razani@tabriziau.ac.ir. Assistant Professor, Faculty of Cultural Materials Conservation, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.

2. M.Sc. Archaeometry, Faculty of Cultural Materials Conservation, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.

remnants in the ancient sites and saving the conservation costs in the future, in addition to achieving a mixture and processing methods and making the optimal mortar. (table 1)

How to use compatible mortars to protect architectural remains from archaeological excavations in the northwestern climate of Iran. What variable depends on the quality of compatible lime-based mortar with natural fillers? The protection of ancient sites after exploration in the northwestern climate can be done with compatible and eco-friendly calcareous mortar. The quality of lime-based mortar compatible with natural fillers depends on the high silica content of the filler.

Mortar Manufacturing: Lime was kept constant at 30%, and wood ash, rice husk, and animal waste were used as a pozzolan to mix the mortar filler to optimize the lime-based mortar. Six lime-based mortar mixtures with different amounts of rice husk ash (20, 35%), wood ash, and animal waste (10 and 35%) were used. 16 cubes were prepared from each mortar sample. Mortar samples were tested and analyzed to complete the setting reactions after 27 days from manufacture time. (Table 2). Laboratory Studies: Laboratory studies include the determining examinations of the physical features of the samples (humidity percentage and water absorption, density, and porosity), (table.3) geological structure by determining the elements using X-Ray Fluorescence (XRF) analysis method, fuzzy determination using X-Ray Diffraction (XRD) analysis, and assessment of endurance properties based on the national and international standards (Table 7-8, Figures 10-11). The consecutive wetting and drying cycle, Freeze-Thaw cycle, the endurance against salt hydration cycle, mortar samples durability test. (Figure 1-3- 6-8 and Table.4-6).

After archeological excavations, the key issue of historical sites is increasing the humidity percentage and cold and heat fluctuations. As stated in the research literature, there are various solutions to reduce and manage humidity and cold fluctuations. In this study, using a durable and optimized mortar system were studied to reduce the destructive effect of the above factors, especially in the northwestern region of the country. Accordingly, native and natural pozzolans were used to optimize the lime-based mortar. The applied pozzolans in this study include rice husk ashes, cow dung ash, and wood ash. According to the conducted studies, six different groups of mortar with different ratios were manufactured from the combination of three pozzolans along with sand and lime paste. Then, after 27 days to complete the mortar reaction, the proper samples were prepared for laboratory tests. These tests include accelerating aging methods (drying and wetting cycles, freeze-thaw cycle, and salt cycle) and the physical features (densitometry, porosimetry, water absorption, and durability (durability test)) implemented for all samples. The results of the examinations showed that the mortar with compounds and mix percentage (30% lime paste + 35% sand + 35% animal waste ash) has good resistance to aging, freezing and thawing cycles, and salt cycle. The selected sample showed satisfactory results after three durability cycles and was placed in a durable mortar class. Given the important role of grading in the durability and quality of the mortar, the results obtained from the grading diagram show that the pozzolan of the cow dung ash enjoys a proper grading than other pozzolans. According to the results of the above research, it is proposed that the pozzolan-lime mortars with the formula of 30% lime paste + 35% sand + 35% cow dung ash are used to overcome the descending humidity and environmental corrosion in the architectural remnants of the excavated historical sites in the cold climates, such as the ancient sites of the northwest of the country to evaluate the results in practice as well. The results indicate this mix's efficiency in the humid regions and salty regions near the wetting and drying cycles and freezing.

Mortar reversibility is another considerable point in using the coating mortars. Although reversibility is not entirely possible concerning some protective measures and materials, such as reinforcement and coating with polymeric materials in porous materials, the remarkable thing about applying mortars to protect the architectural remains from its archaeological excavations is that these mortars are suitable for reversibility. Their coating property depends on the depth of penetration of the mortar adhesive in the substrate and because this penetration is not very high (maximum 1 cm of slurry). Mortars use the substrate as a support in the coating state, and the principal setting occurs in the mortar and its components. Therefore, their function will be as a sacrificed layer in conservation. Based on the conditions of the studied mortars, in the case of proper monitoring and solving the critical causes of the destruction of the selected mortar, it seems that they will be efficient for at least five years. Finally, after the destruction process, their surface can be reconstructed, or the coating mortar can be implemented again.

Keywords: lime based mortar, pozzolan, cow dung ash, rice husk ash and wood ash, Architectural Remnants.

ارزیابی ملاط‌های پایه آهکی در حفاظت از بقایای معماری حاصل از کاوش‌های باستان‌شناسی

مهدی رازانی*

استادیار گروه مرمت آثار تاریخی و باستان‌سنجی، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.

نسرین داداش زاده

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد باستان‌سنجی، دانشکده حفاظت آثار فرهنگی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰

چکیده

مرمت بقایای معماری بعد از کاوش‌های باستان‌شناسی از مسائل مهم مورد توجه باستان‌شناسان و مرمتگران آثار تاریخی است، مواجهه آثار کاوش شده و از زیر خاک بیرون آمده با شرایط خرد اقلیم جدید (که دارای نوسانات رطوبتی و برودتی متفاوتی از قبل است) موجب تغییر تعادل مصالح معماری و تخریب زودرس آن می‌گردد، این امر به‌ویژه در شمال و شمال غربی کشور باعث تسریع فرآیند تخریب آن‌ها می‌گردد. از جمله روش‌های کاهش فرآیند تخریب ایزوله سازی بقایای معماری با ملاط‌های سازگار باشد. در این تحقیق برای بهینه‌سازی ملاط‌های پایه آهکی از پوزولان‌های طبیعی شامل: خاکسترهای پوسته برنج، فضولات حیوانی و چوب استفاده گردید و از ترکیب این مواد با خمیر آهک ۶ رده ملاط‌های آهک-پوزولانی تهیه شد. در ادامه باهدف تعیین نمونه منتخب از لحاظ دوام و استقامت در مقابل چرخه‌های طبیعی، از آزمون‌های پیرسازی تسریعی (شامل چرخه‌های تر و خشک شدن، حمله نمک‌ها و چرخه‌های مینی بر انجماد و یخ‌گشایی) و مقایسه خواص فیزیکی (چگالی، جذب آب، تخلخل) برای کلیه رده‌های ملاط استفاده گردید. نتایج نشان داد ملاط‌های دارای پوزولان خاکستر فضولات حیوانی در مقابل چرخه‌های پیرسازی و سایر آزمایش‌های فیزیکی مقاومت بهتری دارند؛ درنهایت با آنالیزهای XRD و XRF عناصر تشکیل‌دهنده پوزولان‌ها و فازهای تشکیل شده در ملاط منتخب مشخص گردید.

واژه‌های کلیدی: ملاط پایه آهکی، پوزولان، خاکستر پوسته برنج، خاکستر فضولات حیوانی، خاکستر چوب، بقایای معماری

۱- مقدمه

حفاظت آثار تاریخی در حین کاوش‌های باستان‌شناسی و همچنین حفاظت و مرمت و نگهداری بقایای به‌دست‌آمده در محوطه کاوش: شامل گورها، بقایای معماری و پی‌ها و حتی برخی تزئینات بعد از کاوش از جمله اصول اخلاقی و حرفه‌ای باستان‌شناسی علمی است. از این‌رو حفاظت و مرمت ابنیه تاریخی و بقایای برجها در محوطه‌های تاریخی بعد از کاوش‌های علمی از چالش‌های قابل توجه مطالعات باستان‌شناسی بوده است (استانلی پرایس، ۱۳۷۷؛ استابز، ۱۳۷۷). نکته مورد توجه در این زمینه ماهیت بقایای معماری از لحاظ مواد و مصالح ساختمانی است که در منابع حفاظت و مرمت و همچنین منابع مربوط به حفاظت در حین کاوش کمتر بدان پرداخته شده است (Sease, 1996) به نحوی که بخشی عمده‌ای از این بقایا شامل: معماری خشت‌وگلی و بخش شایان توجهی معماری قلوه‌سنگی به همراه بقایایی از ملاط‌های مختلف پایه آهکی و پایه گچی هستند. به‌علاوه در مواردی بقایای سنگ‌چین بدون ملاط پس از کاوش‌ها در قالب دیواره‌ها و پی‌ها مواجه می‌شویم. در موارد پیچیده تمامی این موارد به صورت معماری ترکیبی بعد از کاوش‌های باستان‌شناسی حاصل می‌شوند. به علل مختلف و عوامل متعددی که در آسیب دیدن این بقایا مؤثر هستند (جدول- ۱) و همچنین بسیاری بقایای معماری که در طی دو قرن گذشته خصوصاً در ناحیه غرب آسیا از دست‌رفته‌اند و امروزه هیچ‌گونه اثری از آن محوطه‌ها در دست نیست. ضرورت پرداختن به موضوع حفاظت از بقایای باستان‌شناسی در طی قرن اخیر از بخش‌های مهم گنجانده‌شده در برنامه‌ریزی کلان رویکردهای باستان‌شناسی و دانش‌های مرتبط با میراث فرهنگی بوده و اهمیت این امر به تناوب در عرصه‌های بین‌المللی چون: قطعنامه آتن در سال ۱۹۳۳ (بند: ۴)، توصیه‌نامه بین‌المللی در مورد کاوش‌های باستان‌شناسی ۱۹۵۶ (بند: ۲۱) (یونسکو، ۱۳۸۳)، منشور ونیز ۱۹۶۴ (بندهای ۱۵ به بعد) و در نهایت منشور مدیریت میراث باستان‌شناسی ایکوموس در سال ۱۹۹۰ لوزان (فیلدن و یوکیلتو، ۱۳۸۶) به نحو شایسته‌ای مطرح گردیده است.

جدول ۱- مهم‌ترین گونه‌های آسیب در بقایای معماری بعد از کاوش‌های باستان‌شناسی (مأخذ: نگارندگان)

Table 1- The most important types of damage in architectural remains after archaeological excavations

نتیجه	عوامل	علت	سیمای ظاهری
فرسایش فیزیکی	نوسانات برودتی و سطوح خیس	یخ بردن	پودری شدن سطوح
تغییر شکل سازه	رطوبت صعودی، نزولی، تعریق	اشباع بقایای معماری از آب	خیس خوردن و گل شدن در بقایا خشت‌وگلی
فرسایش فیزیکی	شرایط زیستی مناسب بعد از کاوش	رشد ریشه گیاهان و علف‌ها	سست شدن اتصالات و دیواره‌ها
فرسایش فیزیکی / مکانیکی	نوسانات دمایی و نوسانات رطوبتی	انقباض و انبساط شب و روز	ترک‌خوردگی لایه‌های سطحی
فرسایش فیزیکی / مکانیکی	وجود نمک و نوسانات دمایی / باد و تسریع در خشک شدن سطوح	انتقال نمک‌های خاک به سطح	سفیدک زدن و تشدید چرخه‌های نمکی
فرسایش فیزیکی سطح	باد شدید با قدرت حمل ذرات	عملکرد فرسایشی ذرات بادآورده	آسیب ضربه و زبر شدن سطوح
فرسایش مکانیکی	گردشگران، بازدیدکنندگان و حفاران غیرمجاز	عوامل انسانی (عمدی و غیرعمدی)	پودری شدن و ریختگی سطوح

از جمله پیشنهادهای یا اقداماتی که از گذشته تا به حال برای حفاظت از بقایای معماری خشت‌وگلی بعد از کاوش‌های باستان‌شناختی انجام‌گرفته است موارد زیر قابل‌ذکر هستند؛ (۱) محافظت موقت از تپه‌ها در بین فصول حفاری، (۲) دفن مجدد با پر کردن دوباره محوطه کاوش، (۳) آجرکشی و پوشاندن دیوارها و آثار باقی‌مانده در محل، (۴) زدن سقف‌ها و جان‌پناه‌ها روی محوطه برای حفاظت دائمی یا موقت، (۵) استفاده از مواد شیمیایی و زیستی برای استحکام‌بخشی دیواره‌ها، (۶) استفاده از ژئوتکستایل (منسوجات پلیمری نفوذپذیر) (۷) اندودکاری سطح (جاندر و همکاران، ۱۳۷۷؛ استانی پرایس، ۱۳۷۷، رحمانی، ۱۳۸۴، باغبانان و دیگران، ۱۳۹۴). در ایران مبحث حفاظت از بازمانده‌های خشتی و دیوارهای برآمده از کاوش‌های باستان‌شناسی تا حوالی سال ۱۳۳۶ ه.ش و کاوش‌های دایسون در تپه حسنلو در ۹ km شمال شرقی نقده شهرستان چندان شناخته شده نبوده است (نگهبان ۱۳۷۶: ۱۲۷). در همین راستا ضرورت حفظ و مرمت علمی بقایای باستانی (شامل: دیوار و بندکشی‌های آن، پی و چینه‌های خشت‌وگلی، به همراه دیگر مصالح) در مناطق مرطوب که فرآیند تخریب با سرعت بیشتری در جریان است، ایجاب می‌کند تا استفاده از راه‌کارهای سازگار در اولویت اقدامات حفاظتی قرار گیرند. از جمله این اقدامات استفاده از ملاط‌های حفاظتی است که بایستی نسبت به شناخت فناوری ساخت و طرح اختلاط این‌گونه ملاط‌ها برای دستیابی به کارآمدترین فرمول مناسب و پایدار اقدام گردد. چراکه این امر افزون بر دستیابی به ترکیب و روش‌های عمل‌آوری و ساخت ملاط بهینه، منجر به حفاظت اصولی در نگهداری بقایای به‌دست‌آمده در محل محوطه‌های باستانی و صرفه‌جویی در هزینه‌های حفاظت در سال‌های متمادی خواهد شد.

از جمله ویژگی‌های ملاط مناسب جهت استفاده در محوطه‌های باستانی و مرمت بناهای تاریخی به موارد ایده‌آلی همانند: (۱) ماندگاری و اتصال به لایه اصلی و یا لایه تحکیم شده مصالح معماری (هماهنگی از لحاظ انقباض و انبساط)، (۲) قابلیت برگشت‌پذیری و تجدیدپذیری (خنثی بودن از نظر ایجاد تخریب‌های بعدی همانند ایجاد نمک مخرب و رشد آفات زیستی)، (۳) قابلیت استفاده در پوشش دهی و اندودکاری سطوح و دیوارچینی به صورت ملاطی حفاظتی چندکاره، (۴) قابلیت استفاده در پر کردن درزه‌ها و شکاف‌ها (یعنی بتواند در شرایط داخل درزه‌ها و ترک‌ها خشک و مقاوم شود، مقاومت برشی را افزایش دهد و مقاومت فشاری مناسبی داشته باشد، (۵) مطابقت و سازگاری با محیط‌زیست و سطوح بیرونی که روی آن‌ها اعمال می‌شود (از نظر تخلخل، جذب و دفع آب، چگالی، هماهنگی بافتی و رنگی)، (۶) هزینه پایین‌تر نسبت به روش‌های دیگر حفاظتی (۷) عدم نیاز به اپراتور حرفه‌ای و تجهیزات ویژه می‌توان اشاره کرد (رازانی، ۱۳۹۷: ۲۴۵). در همین راستا این تحقیق باهدف دستیابی به ملاطی بهینه برای استفاده در حفاظت بقایای معماری بعد از کاوش‌های باستان‌شناسی به صورت آزمایشگاهی اقدام به ساخت رده‌های مختلف ملاط‌های آهک پوزولانی و سنجش ویژگی‌های مختلف ترکیبات با استفاده از آنالیزهای فیزیکی و مقاومتی بر مبنای اقلیم ناحیه شمال غرب کشور نموده است چراکه در این ناحیه محوطه‌های باستانی متعددی وجود دارد و شرایط اقلیمی نیز موجب تشدید فرایند آسیب دیدن محوطه‌ها می‌گردد.

۲- جغرافیای طبیعی و اقلیم منطقه شمال غرب ایران

شمال غرب کشور پهنه ایست که استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل و زنجان را در برمی‌گیرد. این بخش از کشور ۱۲۶۵۴۴/۴ کیلومترمربع وسعت دارد که ۷/۲٪ از کل مساحت کشور را به خود اختصاص داده است (عساکره و رزمی، ۱۳۹۰). شمال غرب ایران، به‌ویژه منطقه آذربایجان به لحاظ باستان‌شناسی و جاذبه‌های گردشگری جزو مناطق بسیار غنی ایران محسوب می‌گردد، این منطقه به لحاظ موقعیت جغرافیایی در چهارراه ارتباطی فرهنگ‌های مهم پیش‌ازتاریخی ایران، بین‌النهرین، آسیای صغیر و قفقاز قرار گرفته است. حفاری‌ها و بررسی‌های باستان‌شناسی که در شش دهه اخیر در این منطقه صورت گرفته است تا اندازه‌ای سیمای باستان‌شناسی و دوره‌های فرهنگی آن را به‌ویژه در حوزه دریاچه ارومیه تعریف شدنی کرده است. این منطقه از مراکز مهم فرهنگی-تاریخی است که درگذر تاریخ سهم ارزنده‌ای در شکوفایی فرهنگی آن داشته است. از جمله این محوطه‌های تاریخی می‌توان به تپه حسنلو، دین‌خواه تپه، تپه هفتوان، گوی تپه و یانیک تپه اشاره کرد (طلایی، ۱۳۸۸: ۷۰).

ارتفاعات و ناهمواری‌های این ناحیه از کشور به دو دسته کوه‌های نسبتاً کم ارتفاع و کوه‌های مرتفع تقسیم می‌شود. در مجاورت این ناهمواری‌ها، سرزمین‌های نسبتاً هموار و پست نظیر: خوی، مرند، اردبیل و جلگه مغان و همچنین جلگه اطراف دریاچه ارومیه دیده می‌شوند. اقلیم محلی، رفتارهای جوی در امتداد زمان است و یکی از شرایطی که اقلیم را شکل می‌دهد مسئله بارش است. بارش شمال غرب کشور به‌وسیله مجموعه‌ای از عوامل زمانی و مکانی کنترل می‌شود. مطالعات اقلیم‌شناسی نشان می‌دهند که وضعیت بارش این پهنه از کشور یکنواخت و همگون نیست. درواقع مناطق کم بارش در شمال شرقی مستقرشده‌اند درحالی‌که میزان بارش در سمت جنوب غربی بیشتر است (عساکره و رزمی، ۱۳۹۱). به‌طورکلی شمال غرب کشور که در منطقه کوهستانی ایران و در اقلیم سرد و خشک قرار می‌گیرد در این منطقه عواملی همچون ارتفاع بالا از سطح دریا و میزان بارش (برف و باران و تگرگ)، بادهای فصلی و میزان کم تابش نور خورشید و دما نه چندان بالا و متعاقب آن تعداد روزهای یخبندان، نسبت به دیگر مناطق کشور شرایط برای هوازدگی نسبتاً شدید فراهم است و منجر به بروز آسیب‌هایی همانند یخ بردن و تر و خشک شدن متوالی به‌عنوان عوامل آسیب‌جدی در منطقه می‌گردد. که این امر باعث شده نواحی باستانی بعد از کاوش‌های باستان‌شناسی به‌شدت در معرض تخریب قرار گیرند (کاوینی و مسعودیان، ۱۳۸۷).

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- راهبرد انتخاب و طرح اختلاط مواد برای ساخت ملاط

برای بهینه‌سازی ملاط پایه آهکی به تبعیت از منطق سنتی در اختلاط ملاط‌های آهکی ایران و اروپا اقدام شد. به‌نحوی که بر اساس مطالعات انجام‌شده (حامی، ۱۳۸۴: ص ۱۰۴) و همچنین فرمول‌های سنتی (Torraca, 2009; 56) مبنی بر ثابت نگه داشتن میزان آهک به میزان ۳۰٪ که نتایج موفقیت‌آمیزی به دست داده است، عمل گردید. مطالعه بر روی ملاط‌های آهکی پوزولانی (خاکستر دار) نشان داده است که به‌منظور تولید ملاط‌های آهکی قوی و با استحکام بالا، می‌توان از خاکسترها و خاک‌های ریزدانه درون ملاط‌های آهکی استفاده نمود. این عمل موجب کاهش عمل انقباض حجمی در هنگام گیرش ملاط گردیده، ساختار منافذ داخلی ملاط را درنهایت

ظرافت قرار می‌دهد. لذا عمل نفوذپذیری ملاط‌های آهکی با مصرف خاکسترهای سیلیسی بسیار کاهش می‌یابد (Shen, 2007). با توجه به اینکه در منطقه شمال غرب خاکستر چوب و خاکستر محصولات کشاورزی و همچنین فضولات حیوانی به‌وفور یافت می‌شوند. در این مطالعه برای ترکیب نمودن جزء پرکننده از خاکستر چوب، پوسته برنج و فضولات حیوانی در ترکیبات ملاط به‌عنوان پوزولان استفاده گردید. نسبت فوق آهک در ترکیب با ماسه و سه نوع پوزولان (خاکستر) در جدول ۲ آمده است. پیش از اقدام موردنظر دانه‌بندی کلیه اجزا تشکیل‌دهنده ملاط بر اساس استاندارد (ASTM D422-63-2007)، اندازه‌گیری و محاسبه گردید (ر.ک به تصویر ۶).

جدول ۲. میزان اختلاط اجزا افزوده با ملاط پایه آهکی (مأخذ: نگارندگان)

Table 2. Mixing rate of added components with calcareous base mortar

کد نمونه	آهک %	ماسه %	خاکستر پوسته برنج %	خاکستر چوب %	خاکستر فضولات حیوانی %
S ₁	30	35	-	35	-
S ₂	30	35	-	-	35
S ₃	30	60	0	-	10
S ₄	30	35	35	-	-
S ₅	30	40	10	10	10
S ₆	30	50	20	-	-

۳-۱-۱- آهک و ماسه

آهک‌های تولیدشده در آذرشهر از منابع اصلی آهک در منطقه شمال غرب است که به‌صورت تولید نیمه‌صنعتی در دسترس است. آهک فوق‌الذکر از خلوص بالایی برخوردار نیست. به جهت بهینه‌سازی گیرش آهک در ملاط ابتدا به‌وسیله الک دستی دانه‌های سنگ آن جدا گردید و از بخش الک شده آزمون دانه‌بندی انجام گرفت. در همین راستا برای به دست آوردن شیره آهک مورد استفاده در ساخت ملاط‌ها اقدام به غوطه‌ورسازی در آب به مدت یک هفته آماده شده و مورد استفاده قرار گرفت. ماسه مورد استفاده در ساخت ملاط از نوع ماسه شسته شهرستان شبستر از توابع استان آذربایجان شرقی بوده و از دانه‌های ریز و درشت برخوردار بود که بزرگ‌ترین دانه ($> 5 \text{ mm}$) با استفاده از الک کردن از آن جدا گردید.

۳-۱-۲- پوزولان خاکستر چوب

خاکستر چوب در بسیاری از ملاط‌های سنتی به‌عنوان ماده پوزولانی به‌کاررفته است. تفاوت عمده‌ای بین مواد شیمیایی خاکستر چوب از نظر نوع سوختن وجود دارد. باید توجه داشت که وجود درصد بالای عناصری مثل (Ca, Al, Mn, S) در خاکستر چوب دارای اهمیت زیادی است چراکه در ترکیب ملاط نقش مهمی در استحکام و ایجاد شبکه پیوندی قوی دارد. خاکستر چوب مورد استفاده در این پژوهش، حاصل از پسماند سوختن زغال چوب در قهوه‌خانه‌های سنتی است. خاکسترها قبل از استفاده با الک معمولی غربال شدند تا مواد ناخالص و زغال‌های سیاه نسوخته از آن جدا گردد.

۳-۱-۳- پوزولان خاکستر پوسته برنج

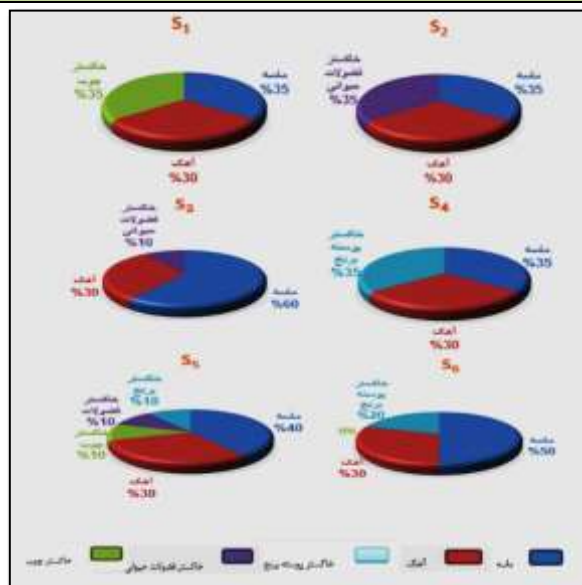
در سالیان اخیر توجه خاصی به استفاده از ضایعات کشاورزی به‌عنوان پرکننده در بتن و مصالح ساختمانی شده است. از جمله مهم‌ترین مواد ضایعات کشاورزی، پوسته برنج است. در هنگام عمل شالی کوبی ۲۲٪ از وزن شالی به‌صورت پوسته شلتوک و بقیه به‌صورت برنج، برنج شکسته و سیبوس درمی‌آید. به علت خواص ضعیف تغذیه‌ای پوسته برنج، از آن به‌عنوان خوراک دام نمی‌توان استفاده نمود. در یک برآورد ساده برای تهیه هر تن برنج، در حدود 200Kg پوسته برنج تولید می‌شود که سوزاندن آن منجر به تولید 40 Kg خاکستر پوسته برنج می‌گردد (باقری و دیگران، ۱۳۷۷، ص ۲۴). در این پژوهش برای تهیه خاکستر پوسته برنج، از کوره برقی^۲ استفاده شد؛ و پوسته‌های برنج با استفاده از ظرف حلبی به درون کوره منتقل گردید. دمای کوره نیز به‌صورت صعودی تنظیم شد تا تدریجاً به دمای 700 °C برسد. زمان سوختن نیز 4 ساعت در نظر گرفته شد. با توجه به این نکته که ریزی ذرات خاکستر پوسته برنج تأثیر پوزولانی خوبی بر روی ملاط دارد، خاکسترها قبل از استفاده در هاون آسیاب گردید.

۴-۱-۳- پوزولان خاکستر فضولات حیوانی

فضولات حیوانی حاصل باقی‌مانده‌ی مواد گیاهی هضم نشده در دستگاه گوارشی حیوانات است که دفع شده‌اند. خاکستر فضولات گاو (CDA)^۳ که در دمای مناسب سوخته باشد غنی از سیلیس خواهد بود (Omoniyi, et al, 2014). منظور از دمای مناسب بر اساس مطالعات انجام‌شده که موجب تشکیل فازهای فضولات حیوانی بعد از سوختن در دامنه‌ی دمایی 400-500 °C تبدیل به خاکستر شده و پس از سرد شدن آسیاب می‌شوند تا ذرات آن ریزتر گردند. درصد بالای اکسیدهای مهمی همانند اکسید کلسیم (CaO)، اکسید آلومینیم (Al₂O₃) و اکسید آهن (Fe₂O₃) نشان می‌دهد که افزودن این خاکستر در بتن باعث افزایش ترکیبات باارزشی چون تری کلسیم سیلیکات (Ca₃Si)، تری کلسیم آلومینات (Ca₃Al) و تتراکلسیم آلومینات فریت (Ca₄AlFe) می‌گردد که نقش عمده‌ای در افزایش قدرت اولیه لازم برای بتن دارند. در این پژوهش برای تهیه خاکستر از فضولات گاو استفاده‌شده است. ابتدا تکه‌های فضولات به‌گونه‌ای روی هم چیده شدند که مابین آن‌ها فضای خالی باقی بماند تا در حین سوختن هوا به‌راحتی جریان یابد و فضولات به‌طور کامل بسوزند و تبدیل به خاکستر شوند. پس از اتمام، خاکسترها الک گردیدند تا مواد ناخالص و سنگ‌ریزه‌ها از ترکیب جدا گردند.

۵-۱-۳- طرح اختلاط ملاط و آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت رسیدن به اهداف پژوهش، در مجموع شش اختلاط ملاط آهکی طراحی شد. جزئیات میزان اختلاط‌های طراحی‌شده در تصویر ۲ ارائه‌شده و درصد‌های متفاوت خاکستر پوسته برنج (۲۰، ۳۵٪)، خاکستر چوب و فضولات حیوانی (۱۰ و ۳۵٪) در نظر گرفته‌شده است. این نمونه‌ها نیز قبل از اینکه درون قالب‌ها ریخته شوند به مدت یک ساعت ورز داده شدند. از هر نمونه ملاط به تعداد ۱۶ مکعب تهیه گردید که ۱۲ عدد از قالب‌های مکعب‌ها در ابعاد 5×5×5 cm و ۴ عدد در ابعاد 2×5×5 cm است. نمونه‌های ملاط برای تکمیل واکنش‌های گیرش بعد از گذشت ۲۷ روز از زمان ساخت مورد آزمایش و آنالیز قرار گرفتند (تصویر ۱).



تصویر ۱. طرح اختلاط نمونه‌های ملاط مورد مطالعه (مأخذ: نگارندگان)

Figure 1. Mixing scheme of studied mortar samples

۳-۲- مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی شامل آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها، ساختارشناسی با روش تعیین عناصر به شیوه آنالیز فلورسانس اشعه ایکس (XRF)، تعیین فاز به شیوه آنالیز پراش سنجی پرتو ایکس (XRD) و همچنین سنجش خواص استقامتی بر اساس استانداردهای ملی و بین‌المللی به انجام رسیده است.

۳-۲-۱- سنجش خواص فیزیکی

۳-۲-۱-۱- درصد رطوبت و جذب آب

منظور از درصد رطوبت یا آب محتوی هر ماده‌ای برابراست با نسبت جرم آب موجود در آن به جرم ماده خشک آن و جذب آب نشان دهنده‌ی حداکثر مقدار آبی است که ماده می‌تواند در شرایط متعارف در خود نگه دارد. در نتیجه این کمیت، برابر اختلاف رطوبت ماده در دو حالت کاملاً خشک و اشباع است. میزان جذب آب مواد تابع حجم و بزرگی خلل و فرج، شکل، اندازه و طبیعت ذرات ماده است (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰: ۷۰)، در این تحقیق ویژگی فوق بر اساس استاندارد *ISRM, 1979* اندازه‌گیری شده است^۴. بر اساس تعاریف فوق می‌توان روابط زیر را نوشت:

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \times 100$$

$$W_{ab} = m_{sat} - m_{dm}$$

m_2 = جرم ماده در حالت مرطوب m_1 = جرم ماده در حالت خشک m_{sat} = جرم ماده در حالت اشباع
 m_{dm} = جرم ماده در حالت خشک‌شده در حرارت ۱۰۵ درجه سلسیوس W = میزان رطوبت = پتانسیل جذب آب در این روش، مقدار آب محتوی نمونه به آب به‌صورت درصدی از وزن نمونه خشک شده در آن تعیین می‌گردد. این مقدار برای محاسبه پارامترهایی چون: درصد اشباع، تخلخل، چگالی تر و خشک استفاده می‌شود.

۳-۲-۱-۲- چگالی و تخلخل

چگالی بر اساس تعریف جرم واحد حجم است. چگالی مواد بستگی به منافذ، درزها، شکاف‌ها و فضاهای باز آنها دارد. از طرفی تخلخل، حجم فضاهای خالی در واحد حجم جسم است و درجه پوکی آن را مشخص می‌کند و از نسبت بین حجم فضاهای خالی (خلل و فرج) جسم و حجم فضایی آن محاسبه می‌شود. هوازگی باعث کاهش چگالی و افزایش تخلخل مواد می‌شود. از آنجا که ارتباط مستقیمی بین چگالی و تخلخل وجود دارد، این آزمایش به منظور اندازه‌گیری مقدار تخلخل و چگالی خشک نمونه‌ها انجام گردید. میزان تحمل نیرو، سرما، گرما، جذب آب، درجه یخبندان، ضریب هدایت حرارتی و جذب و انعکاس نور و صدای مصالح، بستگی به میزان تخلخل و فشردگی آنها دارد (فهیمی فر، ۱۳۷۹:۷۴). دستورالعمل آزمایش بر اساس روش پیشنهادی (ISRM, 1979) انجام شده است.^۵

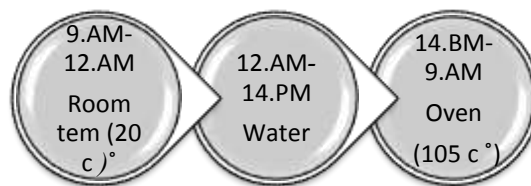
۳-۲-۲- ساختارشناسی و کانی‌شناسی

در راستای تعیین عناصر موجود در پوزولان‌های تولیدشده و نمونه ملاط منتخب از آنالیز فلورسانس اشعه ایکس^۶ (XRF) استفاده گردید همچنین از آزمایش پراش پرتو ایکس^۷ (XRD)، به روش پودری برای شناسایی فازهای موجود و فازهای تشکیل شده در ملاط استفاده گردید.

۳-۲-۳- سنجش ویژگی‌های استقامتی

۳-۲-۳-۱- چرخه تر و خشک شدن متوالی

کلیه مصالح ساختمانی بر اثر تغییر دما دچار تغییرات ابعادی می‌گردند و این امر به‌ویژه در مصالح ساختمانی و پوششی از اهمیت زیادی برخوردار است. انبساط حرارتی نشان‌دهنده افزایش طول ماده ساختمانی بر اثر افزایش دماست که برای بیان کمی آن از ضریبی موسوم به ضریب انبساط حرارتی استفاده می‌شود. ضریب انبساط حرارتی ممکن است به صورت حجمی (افزایش حجم به ازای افزایش دما) یا خطی (افزایش طول به ازای افزایش هر درجه دما) بیان گردد (رحیمی، ۱۳۸۵:۳۰). این آزمون، طبق روش استاندارد (ASTM C531, 2004) صورت گرفت (تصویر ۲).



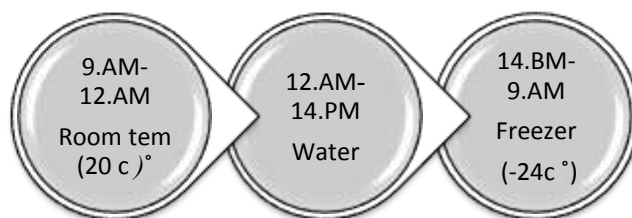
تصویر ۲. نمودار آزمایش چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی (مأخذ: نگارندگان)

Figure 2. Test chart of wet and drying cycles

۳-۲-۳-۲- چرخه انجماد و یخ‌گشایی

یخ زدن و ذوب شدن مکرر، یکی از عوامل مخرب فیزیکی در مصالح ساختمانی به شمار می‌رود. مقاومت در برابر یخبندان به معنای توانایی مصالح اشباع‌شده از آب برای تحمل مکرر یخ و ذوب شدن است. مقاومت مصالح

در برابر یخبندان بستگی به وزن مخصوص و میزان جذب آب آن‌ها دارد. مصالح دارای چگالی بیشتر، مقاومت بیشتری در برابر یخبندان نشان می‌دهند (سرتیبی پور، ۱۳۸۸:۱۸). به طور عام، یخ زدن آب در داخل مصالح یعنی گذر آن از حالت مایع به جامد که موجب افزایش حجمی تا میزان ۹٪ می‌شود و خلل و فرج جسم را که قبلاً از هوا و آب پر شده بود از ماده دیگری می‌آکند. در صورت نبود حفره‌ها و منافذ خالی، افزایش حجم آب یخ‌زده، ایجاد تنش در مصالح می‌کند و از آنجا خرابی و تلاشی مصالح شروع می‌شود. از این رو در انتخاب مصالح برای مقاومت در برابر یخبندان، باید به ظرفیت جذب آب و دمای انجماد آب در درون منافذ مصالح توجه خاصی مبذول کرد. آزمون مقاومت در برابر یخ زدن و ذوب شدن متوالی به دوباره‌سازی تنش‌های ایجاد شده در مصالح به هنگام شکل‌گیری بلورهای یخ در منافذ آن توجه دارد و به‌طور کلی به‌وسیله تغییرات دمای زیر و بالای صفر درجه کنترل می‌شود (امینی بیرامی و دیگران، ۱۳۹۴:۹). این آزمایش طبق استاندارد (ASTM D 5312, 2004) صورت گرفت. روش کار به این صورت است که ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب خیس‌انده شده و سپس چرخه آغاز می‌گردد. نمونه‌ها پس از ۳ ساعت ماندن در دمای محیط به درون فریزر با دمای 24°C زیر صفر و مدت زمان ۴ ساعت منتقل شده و سپس ۳ ساعت در دمای محیط باقی‌مانده و پس از به تعادل رسیدن با هوای محیط به درون ظرف آب منتقل گردید. این چرخه تا زمانی ادامه یافت که نمونه‌ها وزن اولیه خود را از دست بدهند. نمونه‌ای که از چرخه خارج می‌گردد در آن خشک‌شده و وزن می‌گردند (تصویر ۳).



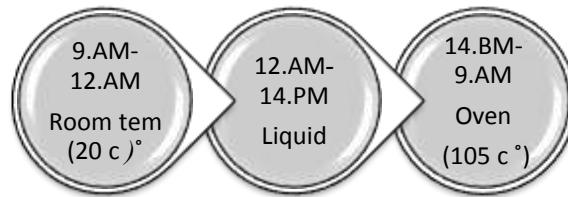
تصویر ۳. نمودار چرخه‌های آزمون انجماد و ذوب (مأخذ: نگارندگان).

Figure 3. Test Chart of Freezing and thawing cycles

۳-۲-۳-۲- میزان دوام در برابر چرخه‌های شکستگی نمکی

نمک‌های محلول از مهم‌ترین عوامل تخریب در ملاط‌ها هستند که از چند طریق باعث تخریب ملاط می‌شوند. مهم‌ترین آن‌ها رشد بلورهای نمک در خلل و فرج موجود در ملاط است که می‌تواند باعث ایجاد تنش شود و از این طریق بر مقاومت کششی آن غلبه کرده و باعث متلاشی شدن و درنهایت تبدیل به پودر آن شود. رشد نمک‌های آسیب‌رسان معمولاً از طریق فرآیند تبلور ناشی از تبخیر و سرد شدن محلول نمک‌دار در داخل منافذ ملاط است. در این تحقیق نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس استاندارد (UNE-EN 12370:2002) مورد آزمون قرار دوام در مقابل شکستگی نمک گرفته‌اند به نحوی که همگی بعد از خشک شدن در دمای 105°C و سپس خنک شدن به مدت ۲ ساعت در آب مقطر حاوی نمک سدیم کلرید (NaCl) به صورت غوطه‌وری اشباع شدند

و بعد از این مدت بلافاصله به مدت ۱۹ ساعت در خشک‌کن در دمای 105°C قرار گرفتند بعد از آن در دمای اتاق به مدت سه ساعت قرار گرفتند که وزن سنجی هر مرحله پس از این بخش آزمایش انجام می‌شود و چرخه بار دیگر بر همین منوال تکرار گردید. چرخه فوق برای نمونه‌های ملاط مورد آزمایش ۵۱ مرتبه تکرار گشت و میزان تغییرات وزنی در انتهای چرخه‌ها بعد از خشک نمودن در دمای 105°C ثبت گردید و بعد از بیان نتایج، سطوح ظاهری و بقایا نیز توصیف گردید (تصویر ۴).



تصویر ۴. نمودار چرخه‌های آزمون شکفتگی نمکی (مأخذ: نگارندگان)

Figure 4. Test chart of salt efflorescence cycles

۴-۳-۲-۳-۴ آزمون دوام‌داری نمونه‌های ملاط

دوام یا پایداری هر ماده ساختمانی به معنی مقاومت آن در مقابل اثرها و شرایط اقلیمی و عوامل مخرب ناشی از آن مانند گرم و سرد شدن، رطوبت، یخبندان، ذوب و تر شدن و خشک شدن و غیره است. این پارامتر با میزان کاهش مقاومت خود بر اثر عوامل مختلف سنجیده می‌شود که این کاهش مقاومت خود ممکن است بر اثر تغییرات تنش (اثر مکانیکی) یا تغییرات شیمیایی (تجزیه، خوردگی، فساد) حاصل گردد (رحیمی، ۱۳۸۵: ۳۵). هدف این آزمایش تعیین میزان مقاومت نمونه‌ها، تحت تأثیر دو مرحله‌ی تر و خشک شدن متوالی در قفسه‌های توری در حین حرکت است. شاخص دوام وارفنگی، مقدار درصد وزنی باقی‌مانده‌ی نمونه پس از این دو مرحله‌ی تر و خشک شدن است که نشانگر میزان پایداری در برابر هوازنگی کمتر است (فهیمی فر، ۱۳۷۹: ۱۲۱). با انجام این آزمایش روی نمونه‌های ملاط که در معرض یک یا چند چرخه تر و خشک شدن متوالی قرار گرفته، میزان مقاومت نمونه در برابر وارفنگی (شکفتگی) مشخص می‌گردد. این روش آزمایش بر اساس استاندارد (ISRM, ASTM D4644) انجام گرفت. روش کار به این صورت است که ابتدا ده قطعه ملاط ۴۰ gr تا ۶۰ که در کل وزنی معادل ۴۵۰ الی ۵۵۰ gr داشته باشد تهیه می‌گردد. قطعات ملاط داخل استوانه مشبک ریخته شده ظرف درون تشت قرار گرفته و محور آن به موتور متصل می‌شود. تشت تا ارتفاع ۲۰ mm زیر محور استوانه از آب 20°C پر می‌شود. ظرف استوانه‌ای با سرعت ۲۰ دور در دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه دوران داده می‌شود. بلافاصله پس از اتمام دوران، ظرف استوانه‌ای از تشت خارج شده و باقی‌مانده نمونه‌ها در آن با دمای 105°C تا رسیدن به وزن ثابت خشک می‌گردد. این چرخه در مراحل بعد نیز تکرار می‌گردد و در نهایت جرم نمونه خشک باقی‌مانده اندازه‌گیری می‌شود. شاخص دوام وارفنگی پس از دو مرحله‌ی تر و خشک شدن متوالی، به صورت درصدی از نسبت جرم خشک نهایی باقی‌مانده به جرم خشک اولیه نمونه به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد (فهیمی فر، ۱۳۷۹: ۱۲۱).

$$I_{d1} = \frac{(B-D)}{(A-D)} \cdot 100\%$$

B: جرم خشک استوانه و نمونه پس از مرحله اول
D: جرم استوانه مشبک
C: جرم خشک نهایی استوانه و نمونه پس از مرحله دوم

$$I_{d2} = \frac{(C-D)}{(A-D)} \cdot 100\%$$

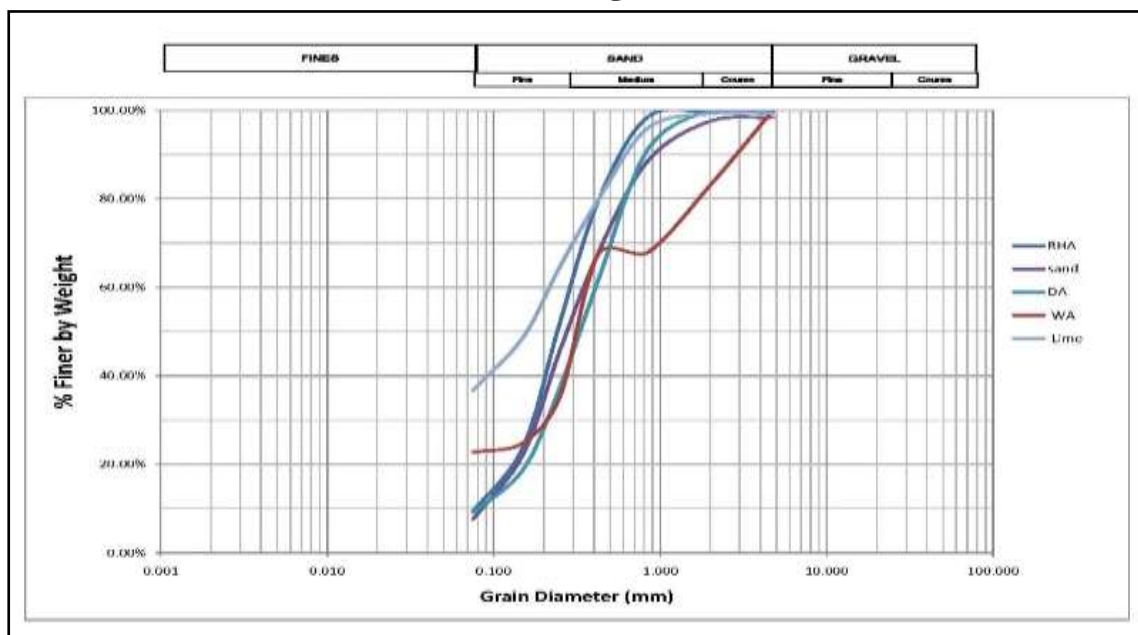
Id1 شاخص دوام وارفنگی بعد از یک مرحله
Id2 شاخص دوام وارفنگی بعد از دو مرحله
A: جرم خشک اولیه استوانه و نمونه

اگرچه این آزمون به صورت استاندارد در دو چرخه انجام می‌گیرد اما در برخی تحقیقات می‌توان برای ارزیابی دوام نمونه و مقایسه با دیگر نمونه‌ها تعداد چرخه‌ها را افزایش داد و نتایج را با یکدیگر مقایسه نمود.

۴- نتایج و بحث‌ها

۴-۱- نتایج آزمون دانه‌بندی مصالح بکار رفته در ملات

توزیع اندازه دانه‌ها در رفتار مهندسی مواد دانه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این رو برای به دست آوردن توزیع اندازه دانه‌ها در کلیه ترکیبات اختلاط از این آزمایش استفاده گردید. دانه‌بندی نقش مهمی در دوام و کیفیت مصالح دارد و بسته به نوع توزیع ذرات سه نوع دانه‌بندی وجود دارد که شامل: دانه‌بندی پیوسته (مناسب)، دانه‌بندی یکنواخت (متوسط) و دانه‌بندی گسسته (ضعیف) هستند. بر اساس نمودار نتایج آزمون دانه‌بندی، ماسه و خاکستر فضولات حیوانی به دلیل دارا بودن همه طیف‌های ذرات در رده‌ی دانه‌بندی پیوسته قرار گرفته است. منحنی خاکستر پیوسته برنج ابتدا به صورت خطی و افقی حرکت کرده و طیف زیادی از دانه‌بندی درشت تا متوسط را طی کرده و دانه‌بندی ریز دارد و تقریباً نزدیک به نوع دانه‌بندی یکنواخت است. دانه‌بندی آهک نیز طیفی از ذرات ریز را ندارد و در رده متوسط قرار دارد. دانه‌بندی چوب نامنظم و گسسته است و از این نظر در رده نامناسب و نامرغوب طبقه‌بندی می‌گردد.



تصویر ۵. نمودار دانه‌بندی مصالح به کار رفته در نمونه‌های ملات (مأخذ: نگارندگان)

Figure 5. Grading diagram of materials used in mortar samples

۲-۴- خواص فیزیکی ترکیبات ملاط

بر اساس آنچه در شرح آزمایش‌ها اشاره کردید کلیه نمونه‌ها برای شناسایی خواص فیزیکی و مقایسه تفاوت آن‌ها تا رسیدن به نمونه مرغوب مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج در ادامه آمده است در مقایسه وضعیت جذب آب نمونه‌ها، ملاط S_5 نسبت به سایر نمونه‌ها میزان جذب کمتری داشته است و ملاط S_4 جذب آب بیشتری داشته و سریع‌تر به نقطه اشباع رسید. نمونه‌های S_3 ، S_1 و S_6 از نظر جذب بسیار شبیه هم بوده، طوری که در نمودار روی هم منطبق شده‌اند (جدول ۳).

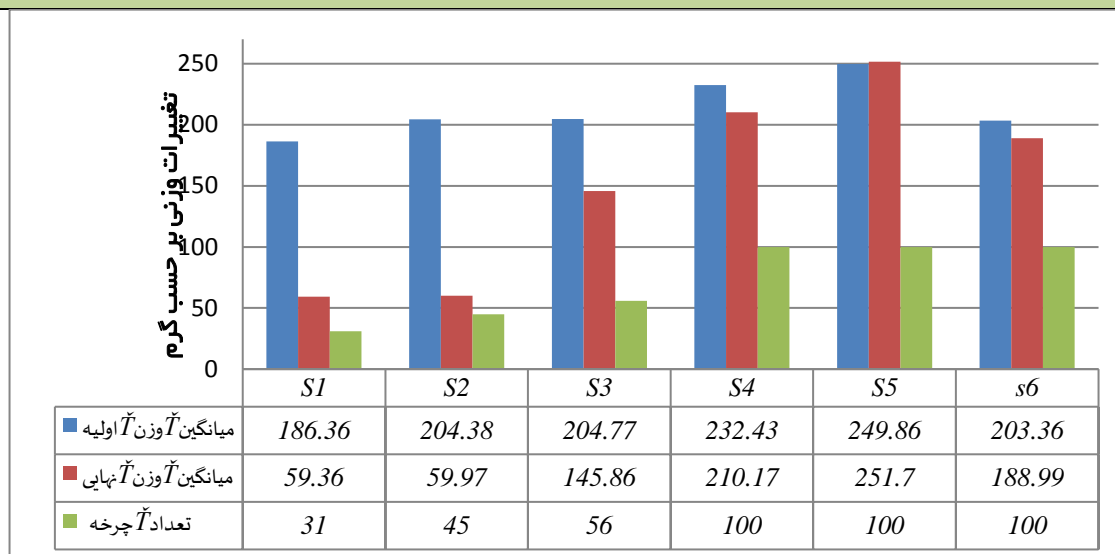
جدول ۳. جرم حجمی، تخلخل و جذب آب نمونه‌ها (مأخذ: نگارندگان)

Table 3. Volumetric mass, porosity and water absorption of samples

نمونه	چگالی (gr/cm^3)	تخلخل (%)	حجم ظاهری نمونه (cm^3)	وزن نمونه اشباع از آب بعد از ۲۴ ساعت (gr)	A: وزن خشک نمونه بر حسب (gr)	میانگین درصد رطوبت (W)	جذب آب (W_{ab})
S_1	13.80	17.97	125	248.01	223.54	17.96	24.66
S_2	10.29	22.13	125	227.92	200.25	20.95	19.22
S_3	10.49	22/17	125	232.10	204.33	21.59	19.72
S_4	12.50	20.69	125	285.69	232.82	1.99	44.44
S_5	26.90	8.4	125	266.03	256.02	8.32	15.44
S_6	10.8	22.17	125	236.85	209.12	20.96	23.85

۴-۳- نتایج آزمون چرخه تر و خشک شدن

نتایج چرخه تر و خشک شدن نمونه‌ها (تصویر ۶) به صورت مقایسه‌ای آورده شده است. همچنین تصاویر وضعیت تغییرات نمونه‌ها بر اثر تنش‌های وارده در هر دهه بیان شده است. در این چرخه، نمونه اول با ترکیب (۳۰٪ آهک + ۳۵٪ ماسه + ۳۵٪ خاکستر چوب)، کم دوام‌ترین ملاط بوده و در اثر حرارت و انبساط حجم، آب خود را از دست‌داده و به صورت ترد و شکننده درآمد و پودر گردید و پس از ۳۱ چرخه از بین رفت. نمونه‌های دوم و سوم نیز دچار ترک‌های طولی و عرضی شده و پس از طی ۴۵ و ۵۶ دوره از بین رفتند. نمونه S_4 و S_5 و S_6 نسبت به نمونه‌ها کیفیت خوبی داشته و تا ۱۰۰ چرخه را بدون تغییرات ظاهری محسوس طی کرده‌اند. از این سه بهترین و باکیفیت‌ترین نمونه نیز ملاط S_5 با ترکیب (۳۰٪ خمیر آهک + ۴۰٪ ماسه + ۱۰٪ خاکستر پوسته برنج + ۱۰٪ خاکستر فضولات حیوانی + ۱۰٪ خاکستر چوب) بوده و پس از طی ۱۰۰ چرخه، همچنان بدون کاهش وزن و هیچ‌گونه تغییرات ظاهری دوام فوق‌العاده‌ای دارد. به احتمال زیاد علت مقاومت ایده‌آل این نمونه به دلیل تنوع دانه‌بندی در ساختار ملاط باشد (جدول ۴).



تصویر ۶- نمودار نتایج آزمون چرخه تر و خشک شدن متوالی (مأخذ: نگارندگان)

Figure 6 - results graph of test wet and drying cycle

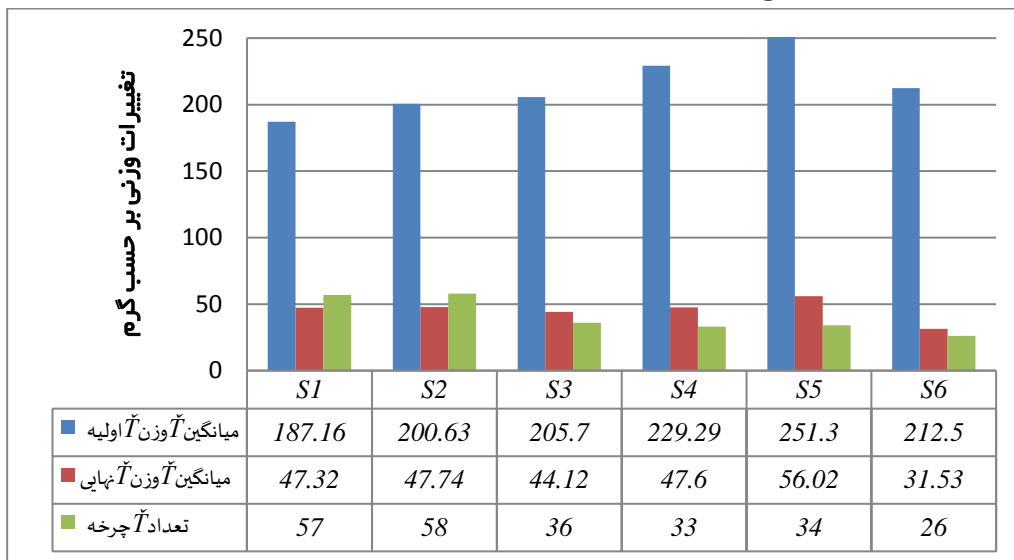
جدول ۴. تغییرات نمونه‌ها با گذر زمان در پیرسازی چرخه تر و خشک شدن (مأخذ: نگارندگان)

Table 4. Changes in samples over time in wet cycle wet and drying

نمونه / روز	S1	S2	S3	S4	S5	S6
۳۰						
۵۰	حذف از چرخه					
۷۰	حذف از چرخه					
۹۰	حذف از چرخه					
۱۱۰	حذف از چرخه					

۴-۴- نتایج چرخه انجماد و یخ‌گشایی

در این چرخه، به ترتیب نمونه S_1 در ابتدای چرخه به شدت کاهش وزن داشته و به حالت پودری درآمده و پس از رسیدن به یک وزن ثابت کاهش وزنی مشاهده نگردید و دوام نسبتاً خوبی در مقابل یخبندان نشان داد. نمونه S_2 ، در بین همه نمونه‌ها مقاوم‌ترین ملاط بوده و دوام قابل قبولی در مقابل یخبندان نشان داد. نمونه‌های S_3, S_4, S_5 خصوصیات مشابه به هم داشته و از دوام متوسطی برخوردار بوده‌اند و پس از سه چرخه از بین رفتند. نمونه S_6 نیز در این چرخه بی‌کیفیت‌ترین نمونه بوده و از اوایل دهه اول به شدت کاهش وزن یافته و اولین نمونه‌ای بود که از چرخه خارج شد (تصویر ۷. جدول ۵).



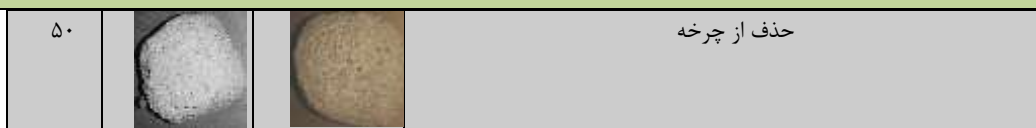
تصویر ۷. نمودار نتایج آزمون پیرسازی انجماد و یخ‌گشایی (مأخذ: نگارندگان)

Figure 7. Graph of freezing and thawing aging test results

جدول ۵ تغییرات نمونه‌ها در چرخه پیرسازی انجماد و ذوب با گذر زمان (روز) (مأخذ: نگارندگان)

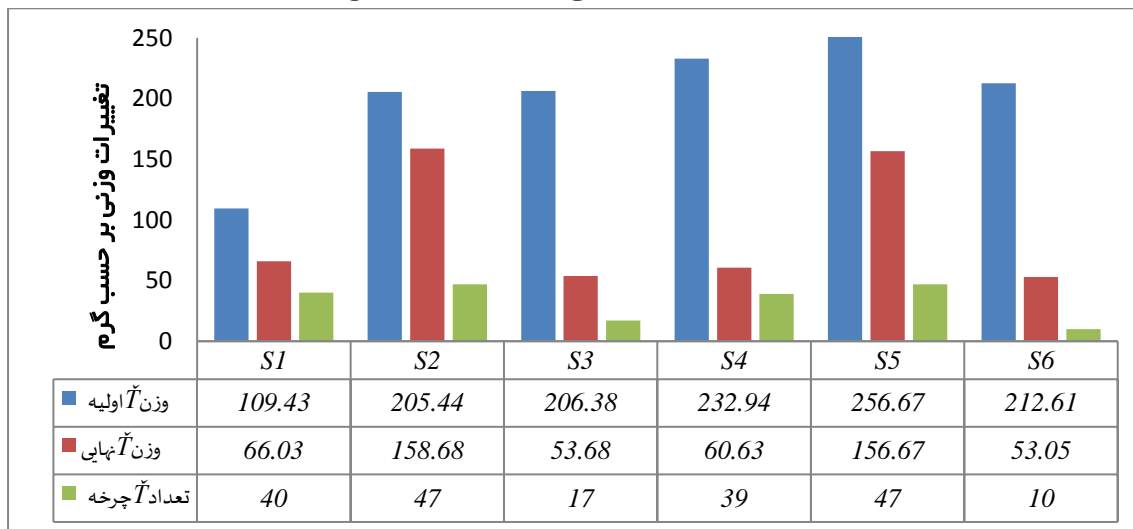
Table 5 Changes of samples in the freezing and thawing aging cycle over time (days)

نمونه \ چرخه	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
۱۰						
۲۰						
۳۰						حذف از چرخه
۴۰			حذف از چرخه			



۵-۴- نتایج آزمون چرخه‌های نمک

نتایج مقاومت نمونه‌ها در مقابل تنش‌های ناشی از تبلور نمک، در جدول ۶ نشان می‌دهد که به ترتیب، نمونه S1 دوام متوسطی داشته و در اثر تنش‌های وارده ترد و شکننده شده و کاهش وزن محسوس داشته و ۴۰ چرخه را طی نمود. نمونه S2 دوام خوبی داشته و تا ۴۷ چرخه بدون کاهش وزن محسوس با کیفیت‌ترین نمونه انتخاب شد. ملاط S3 دوام قابل قبولی نداشته و پس از ۱۷ چرخه از رده خارج شد. نمونه ملاط S4 وضعیتی مشابه ملاط اول داشته و از دوام متوسطی برخوردار بود. نمونه‌ی S5 دوام و کیفیت قابل قبولی نداشته و پس از طی یک بازه زمانی کوتاه از چرخه خارج گردید. بدترین و بی‌کیفیت‌ترین ملاط این چرخه که مقاومت پایینی در مقابل تبلور نمک کلرید سدیم از خود نشان داد نمونه S6 با ترکیب (۳۰٪ آهک + ۵۰٪ ماسه + ۲۰٪ خاکستر پوسته برنج + شلتوک برنج به‌عنوان لویی) است که در یک دهه متلاشی‌شده و از چرخه خارج گشت (تصویر ۸).





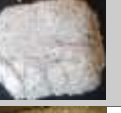


تصویر ۸. نمودار نتایج چرخه پیرسازی شکستگی نمک (مأخذ: نگارندگان)

Figure 8. results graph of the salt aging cycle

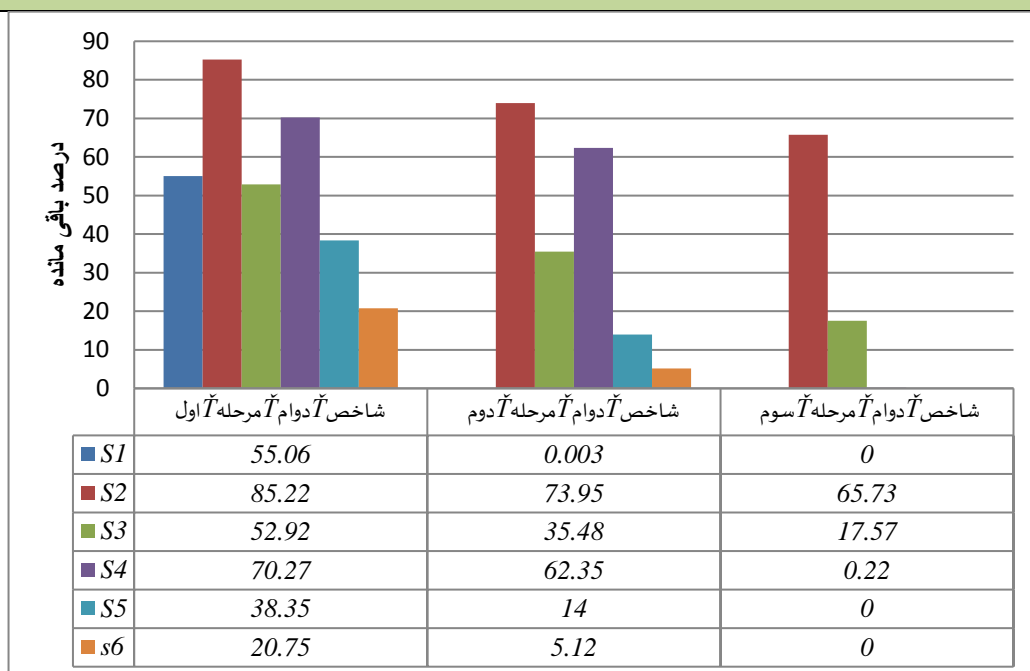
جدول ۶. تغییرات نمونه‌ها در چرخه پیرسازی نمک با گذر زمان (مأخذ: نگارندگان)

Table 6. Changes of samples in the salt aging cycle over time

کد نمونه دهه	S1	S2	S3	S4	S5	S6
۱۰						
۲۰						حذف از چرخه
۳۰			حذف از چرخه			
۴۰			حذف از چرخه			
۵۰	حذف از چرخه		حذف از چرخه			
	حذف از چرخه			حذف از چرخه		

۶-۴- نتایج آزمون دوام‌داری

آزمون دوام‌داری در کلیه رده‌های ملاط مورد مطالعه قرار گرفت. شاخص دوام وارفتگی مقادیر بالای کاهش وزن در چرخه‌های این آزمایش را در کلیه نمونه‌ها نشان می‌دهد و حاکی از آن است که نمونه $S6, S2, S1, S5$ لحاظ مقاومت در مقابل چرخه‌های دوام‌داری بسیار ضعیف بوده و در طی دو چرخه به کلی از بین رفته‌اند. در عوض دو نمونه $S2, S3$ توانسته‌اند تا چرخه سوم با ۶۵% برای $S2$ و ۱۷% برای $S3$ در چرخه باقی بمانند با توجه به نتایج فوق می‌توان گفت نمونه $S2$ از لحاظ مقاومت در مقابل این چرخه‌ها بهترین عملکرد را داشته است (تصویر ۹)



تصویر ۹. نمودار نتایج آزمون دوام‌داری (مأخذ: نگارندگان)

Figure 9. Graph of the durability test results

بر اساس نتایج برآمده از آزمایش‌های فوق می‌توان گفت رده ترکیبی S2 ملاط منتخب است زیرا در برابر آزمون‌های فیزیکی و آزمون تر و خشک شدن انجام شده مقاومت قابل قبولی داشته و در برابر آزمون‌های یخ بر شدن و حمله نمک‌ها و آزمون دوام‌داری نیز بیشترین مقاومت را از خود نشان داده، از این رو در مرحله بعد به ساختارشناسی این ترکیب پرداخته شده است.

۵- نتایج ساختارشناسی

۵-۱- نتایج آنالیزهای ساختاری مواد (XRF)

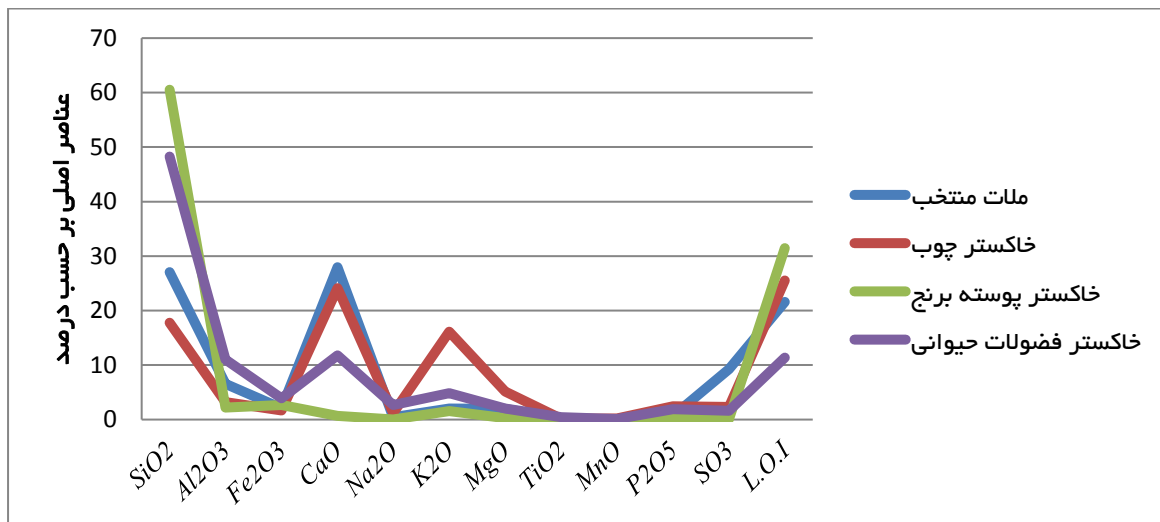
حفاظت گران بر اساس تجربه‌های قدیمی معمولاً ملاط‌های ساخته‌شده با خمیر آهک با فرآوری طولانی مدت را بهتر از دیگر انواع ملاط ساخته شده با آهک خشک فعلی که هیدراته ارزیابی می‌کنند، فاریا و دیگران به منظور ارزیابی این ادعای تجربی، یک با مقایسه این دو گونه ملاط انجام دادند که نتیجه کار آنها نشان می‌دهد که استفاده از خمیرهای آهکی با دوره‌های فرآوری طولانی در ملاط‌ها باعث عملکرد بهتر، به ویژه در کارپذیری و مقاومت در برابر نمک‌های سولفاتی می‌شود (Faria, et al. 2008). به نظر می‌رسد کنترل دقیق فرآیند پخت مواد مورد استفاده در راستای تولید پوزولان خالص و همچنین تلاش در دستیابی به حداکثر میزان سیلیکا پس از سوختن مواد به همراه خارج سازی عناصر دیگر مثلاً با فرآیند انحلال می‌تواند منجر به دستیابی به نتایج بهتری گردد در رابطه با خاکستر فضولات حیوانی اگر بتوان دمای پخت را از حالت سنتی و سوختن در محیط طبیعی خارج نمود و دما را تا حدود ۷۰۰ درجه افزایش داد میزان خلوص سیلیکای نمونه به واسطه تجزیه برخی عناصر دیگر بیشتر خواهد شد (Sivakumar & Amutha, 2012) در همین راستا نتایج حاصل از تجزیه عنصری نمونه ملاط منتخب، (نمونه S2) و دیگر مواد در ترکیب رده‌های ملاط آمده است نتایج

اکسیدهای اصلی خاکستر پوسته برنج، نشان‌دهنده وجود میزان بالای اکسید سیلیس است که البته این مقدار می‌توانسته با پخت مناسب‌تر افزایش یافته و تا بالای ۹۰٪ بالا برود. مقایسه نتایج درصد عناصر خاکستر فضولات حیوانی با نمونه‌های دیگر در مقالات علمی نشان‌دهنده سوختن و تولید این پوزولان قابل قبول و رضایت‌بخش است. همچنین میزان در صد $L.O.I^8$ در خاکسترهای مورد استفاده در این تحقیق چندان زیاد نیست و می‌تواند با سوخت مناسب این میزان بهینه گردد (جدول ۷ و تصویر ۱۰).

جدول ۷- مقایسه نتایج آنالیز شیمیایی پوزولان‌ها و نمونه ملاط منتخب بر اساس درصد وزنی اکسیدهای اصلی با استفاده از روش تجزیه شیمیایی (XRF) (مأخذ: نگارندگان)

Table 7. Comparison of the results of chemical analysis of pozzolans and the sample of selected mortar based on the weight percentage of the main oxides using the chemical analysis method (XRF)

عناصر اصلی	ملاط منتخب	خاکستر چوب	خاکستر پوسته برنج	خاکستر فضولات حیوانی
SiO_2	27.05	17.75	60.53	48.26
Al_2O_3	6.56	3.19	2.21	11.03
Fe_2O_3	2.11	1.69	2.69	3.89
CaO	27.96	24.11	0.66	11.78
Na_2O	0.42	1.22	0.02	2.69
K_2O	2.01	16.11	1.53	4.84
MgO	1.98	5.16	0.26	2.02
TiO_2	0.221	0.149	0.032	0.456
MnO	0.042	0.221	0.089	0.102
P_2O_5	0.672	2.435	0.223	1.926
SO_3	9.25	2.35	0.1	1.63
$L.O.I$	21.57	25.52	31.46	11.38



تصویر ۱۰. نمودار خطی مقایسه نتایج آنالیز شیمیایی پوزولان‌ها و نمونه ملاط منتخب بر اساس درصد وزنی اکسیدهای اصلی با استفاده از (XRF) (مأخذ: نگارندگان)

Figure 10. Comparative graph of the results of chemical analysis of pozzolans and selected mortar samples based on the weight percentage of the main oxides using (XRF)

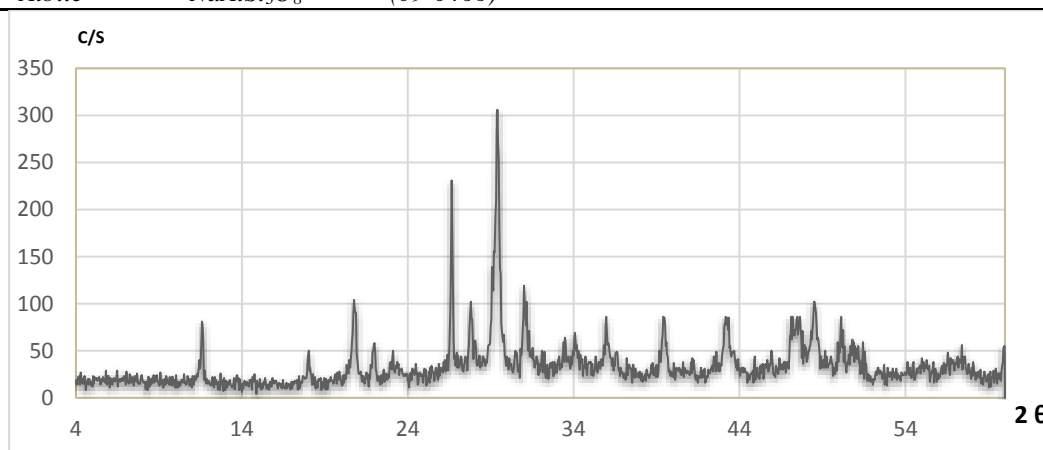
۲-۵- نتایج فاز شناسی ملاط منتخب با پراش پرتو ایکس (XRD)

در بهترین حالت برای ملاط‌های ما سه آهکی انتظار می‌رود فازهای سیلیکات کلسیم تشکیل گردد اما این فازها به ندرت در ملاط‌های بهینه‌سازی شده و در شرایط آزمایشگاهی قابل مشاهده هستند (رازانی و دیگران، ۱۳۹۷). آن‌چنان‌که در نمونه‌های این تحقیق نیز چنین فازی مشاهده نشد و فازهای تشکیل شده شامل اکسید سیلیسیم در قالب دو فاز اصلی کوارتز و کریستوبالیت، کربنات کلسیم در فاز اصلی کلسیت و پرتلندیت. همچنین فازهای ژپس و آلبیت که از جمله فازهای معمول در ملاط‌های پایه آهکی هستند، شناسایی گردید (تصویر ۱۱، جدول ۸). لوکه و دیگران با استفاده از آنالیز پراش پرتو ایکس بر روی ملاط‌های آزمایشی اثبات نمودند که در اثر واکنش کربناته شدن^۹ هر چه زمان از ساخت ملاط آهکی می‌گذرد میزان فازهای پرتلندیت کاهش یافته و در عوض میزان کربنات کلسیم افزایش می‌یابد (Luque et al. 2010) این مطالعات نشان دهنده آن است که در شرایط طبیعی فرایند کربناته شدن آهسته‌تر است و در مقابل با افزایش میزان کربنات کلسیم گیرایی و مقاومت بیشتر ملاط در طی زمان به آهستگی رخ خواهد داد، ولی در این رابطه تاثیر عوامل محیطی و هوازدگی را در ملاط‌های اعمال شده در فضای باز از نظر دور داشت.

جدول ۸. آنالیز پراش پرتو ایکس برای نمونه ملاط منتخب بر اساس فازهای شناسایی شده اصلی و فرعی (مأخذ: نگارندگان).

Table 8. X-ray diffraction analysis for selected mortar samples based on identified main and sub-phases

Major Phase(s)	Chemical formula	Ref	Minor Phase(s)	Chemical formula	Ref
Calcite	CaCO ₃	(05-0586)	Portlandite	Ca(OH) ₂	(04-0733)
Quartz	SiO ₂	(33-1161)	Cristobalite	SiO ₂	(39-1425)
Gypsum	CaSO ₄ · 2H ₂ O	(33-0311)			
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	(09-0466)			



تصویر ۱۱. شناسایی فازهای ملاط منتخب به روش پراش پرتو ایکس (مأخذ: نگارندگان).

Figure 11. Identification of selected mortar phases by X-ray diffraction method

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مشکل اصلی محوطه‌های تاریخی بعد از کاوش‌های باستان‌شناسی، عمدتاً افزایش درصد رطوبت و نوسانات برودتی و حرارتی است. آن‌چنان‌که در بخش ادبیات تحقیق آمده است راهکارهای مختلفی برای کاهش رطوبت و مدیریت نوسانات رطوبتی و برودتی وجود دارد. در این پژوهش برای کاهش میزان تأثیر مخرب عوامل فوق‌بخصوص در ناحیه شمال غرب کشور استفاده از سیستم ملاط مقام و بهینه شده مورد مطالعه قرار گرفت بر این اساس ملاط‌های پایه آهکی به دلیل دارا بودن خواص مناسب در مقابل رطوبت مورد آزمایش قرار گرفت، به‌منظور بهینه‌سازی ملاط پایه آهکی از پوزولان‌های مواد طبیعی و بوم آورد استفاده گردید. پوزولان‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل: خاکسترهای پوسته برنج، فضولات حیوانی و چوب بود. بر اساس مطالعات انجام‌شده، از ترکیب این سه پوزولان به همراه ماسه و خمیر آهک، شش گروه ملاط با نسبت‌های متفاوت ساخته شد و پس از ۲۷ روز انتظار جهت تکمیل واکنش ملاط، نمونه‌های مناسب جهت آزمون‌های آزمایشگاهی مهیا گشت. این آزمون‌ها شامل روش‌های پیرسازی تسریعی (چرخه‌های تر و خشک شدن، انجماد و یخ‌گشایی و چرخه نمک) و همچنین خواص فیزیکی (چگالی سنجی، تخلخل سنجی، میزان جذب آب و مقاومت سنجی (آزمون دوام‌داری) برای کلیه نمونه‌ها استفاده گردید. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد، ملاطی که دارای ترکیبات و درصد اختلاط (۳۰٪ خمیر آهک + ۳۵٪ ماسه + ۳۵٪ خاکستر فضولات حیوانی) است، مقاومت خوبی در برابر چرخه‌های پیرسازی انجماد و یخ‌گشایی و چرخه نمک دارد. نمونه منتخب پس از طی سه چرخه دوام‌داری نتایج رضایت‌بخشی داشته و در رده بندی ملاط‌های مقاوم قرار گرفت. با توجه به نقش مهمی که دانه‌بندی در دوام و کیفیت ملاط ایفا می‌کند، نتایج حاصل از گراف دانه‌بندی نشان می‌دهد که پوزولان خاکستر فضولات حیوانی نسبت به سایر پوزولان‌ها از دانه‌بندی مناسبی برخوردار است. بر اساس نتایج تحقیق فوق پیشنهاد می‌گردد از ملاط‌های آهک-پوزولانی با فرمولاسیون ترکیب ۳۰٪ خمیر آهک + ۳۵٪ ماسه + ۳۵٪ خاکستر فضولات حیوانی در برابر رطوبت نزولی و فرسایش محیطی در بقایای معماری محوطه‌های تاریخی کاوش شده در اقلیم‌های سرد همانند محوطه‌های باستانی شمال غربی کشور استفاده گردد تا نتایج حاصل در عمل نیز موردسنجش قرار گیرد. نتایج نشان‌دهنده کارآمدی این ترکیب در مناطق مرطوب و همچنین مناطق نمکی که در مجاورت چرخه‌های تر و خشک شدن و همچنین یخ بردن قرار می‌گیرند، است.

نکته قابل توجه دیگر در رابطه با استفاده از ملاط‌های پوششی مسئله برگشت‌پذیری است گرچه می‌دانیم برگشت‌پذیری در رابطه با برخی اقدامات و مواد حفاظتی مانند استحکام‌بخشی و پوشش دهی با مواد پلیمری در مواد متخلخل کاملاً امکان‌پذیر نیست؛ اما نکته قابل توجه در رابطه با استفاده از ملاط‌ها در راستای حفاظت از بقایای معماری حاصل از کاوش‌های باستان‌شناسی آن است که این ملاط‌ها به‌واقع قابلیت برگشت‌پذیری مناسبی دارند، چراکه خاصیت پوششی آن‌ها وابسته به عمق نفوذ بخش چسباننده ملاط در لایه زیرین است و به علت آنکه این نفوذ چندان زیاد (نهایت ۱ سانتیمتر دوغابی) نیست. ملاط‌ها در حالت پوششی از لایه زیرین به‌عنوان تکیه‌گاه استفاده می‌کنند و گیرش اصلی در ملاط و اجزا خود آن اتفاق می‌افتد و از این‌رو عملکرد آن‌ها در حفاظت به‌صورت لایه قربانی شونده خواهد بود، وابسته به شرایط در رابطه با ملاط‌های مورد مطالعه به نظر می‌رسد در صورت پایش مناسب و برطرف نمودن علل اصلی تخریب این ملاط منتخب بتوانند حداقل ۵ سال

به صورت مفید کارایی داشته باشند و در نهایت بعد از طی نمودن فرآیند تخریب می‌توان سطح آن را بازسازی و یا ملاط پوششی را اعمال مجدد نمود.

سپاسگزاری

این مقاله حاصل بخشی از تحقیقات بر روی ملاط‌های مقاوم چندکاره در برابر شرایط اقلیمی شمال غرب کشور است که در دانشگاه هنر اسلامی تبریز در حال انجام است، از این‌رو از دانشکده حفاظت آثار فرهنگی این دانشگاه که شرایط را برای انجام این تحقیق فراهم نمودند سپاسگزاری می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

^۱. Geotextile

^۲. مدل (ATBIN- 82600) موجود در کارگاه سفال، دانشکده هنرهای صناعی دانشگاه هنر اسلامی تبریز

^۳. Cow During Ash

^۴. برای به دست آوردن این کمیت ابتدا نمونه‌ها را در گرم‌خانه تحت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده و وزن خشک (M_s) آن به دست آورده می‌شود، سپس آن را به مدت ۲۴ ساعت در آب اشباع کرده و وزن اشباع (M_{sat}) آن نیز به دست آورده و با استفاده از رابطه زیر درصد جذب آب محاسبه می‌شود (BSI, 1975).

$$W = (M_{sat} - M_s) \times 100 / M_s \quad \text{درصد جذب آب}$$

^۵. برای محاسبه تخلخل ملاط از روش اشباع نمونه و شناورسازی استفاده شده است. برای انجام این آزمایش، سطح قطعات موردنظر پاک‌سازی گردید تا گردوخاک روی آن باقی نماند. نمونه‌های به مدت حداقل ۴ ساعت اشباع شده و وزن اشباع (M_{sat}) به دست آمده است. سپس نمونه‌ها به داخل یک سبد توری منتقل و در آب غوطه‌ور شد تا وزن غوطه‌وری نمونه اندازه گرفته شود (M_{sub}). آنگاه نمونه‌ها داخل گرم‌خانه با حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شوند و وزن خشک آن‌ها تعیین می‌شود. برای به دست آوردن تخلخل، ابتدا حجم کل نمونه و فضاهای خالی را طبق روابط (۳) و (۴) به دست آورده و آن‌ها را در رابطه (۲) جایگذاری می‌کنند.

$$n = (V_v / V) \times 100 \quad (۲)$$

$$V = (M_{sat} - M_{sub}) / \rho_w \quad (۳)$$

$$V_v = (M_{sat} - M_s) / \rho_w \quad (۴)$$

^۶. توسط دستگاه XRF ساخت کمپانی: PHILIPS، مدل: PW1480 به روش ذوب شرکت کانساران بینالود

^۷. دستگاه دیفرانسیال: PHILIPS مدل PW1800 با تیوپ تولیدکننده پرتو ایکس از جنس مس ($Cu - pw3373/00$) و با اختلاف پتانسیل ۴۰ kv و شدت جریان ۳۰ Am، از زاویه ۴ تا ۵۴ و درجه ۲θ شرکت کانساران بینالود تهران

^۸. Loss On Ignition

^۹. Carbonation

منابع

- استابز، جان، (۱۳۷۷). «نگهداری و حفاظت بقایای به‌دست‌آمده معماری از حفريات کاوش‌های باستان‌شناسی». در استانی پرایس، نیکلاس. *حفاظت و مرمت در کاوش‌های باستان‌شناسی*، ترجمه: میر محسن موسوی. تهران: دانشگاه هنر.
- استانی پرایس، نیکلاس. (۱۳۷۷). «حفاظت و مرمت در کاوش‌های باستان‌شناسی». ترجمه: میرحسن موسوی. تهران: دانشگاه هنر.
- امینی بیرامی، فریده، مهدی رازانی، ابراهیم اصغر کلجاهی، سید محمدامین امامی، علی‌رضا باغبانیان، (۱۳۹۴)، «تحلیل ساختارشناسی سنگ‌های آذرآواری در معماری صخره‌کند تاریخی کندوان، دو فصلنامه پژوهش باستان‌سنجی، س. ۱، ش. ۱، صص ۱-۱۸.
- جاندرود، آل، بالدراما، آلوا، و موکیاری، بیاکو. (۱۳۷۷). «مرمت و حفاظت ساختمان‌های خشتی به‌دست‌آمده از کاوش‌های باستان‌شناسی». در استانی پرایس، نیکلاس. *حفاظت و مرمت در کاوش‌های باستان‌شناسی*، ترجمه: میر محسن موسوی. تهران: دانشگاه هنر.
- حامی، احمد، (۱۳۸۴). *مصالح ساختمانی*، چاپ ۱۶، تهران: دانشگاه تهران.
- رازانی، مهدی، امامی، سید محمد امین، باغبانان، علی رضا، خوزه دلگادو رودریگوئیز (۱۳۹۷) «پژوهشی در ملات‌های آهکی بهینه‌سازی شده جهت جایگزینی با ملات سیمان - ماسه برای استفاده در تعمیرات معماری صخره‌کند روستای تاریخی کندوان»، معماری مسکن و محیط روستا، س. ۳۷، ش. ۱۶۱، صص: ۱۳۸-۱۲۵
- رحمانی، رضا، (۱۳۸۴) «حفاظت اضطراری از بقایای خشتی در محوطه‌های باستان‌شناسی»، فصلنامه علمی، فنی اثر. س. ۲۵، ش. ۳۶-۳۷، صص ۸۷-۹۱
- سرتیپی پور، محسن، (۱۳۸۸)، *مصالح در ساختمان و معماری*، تهران: انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.
- عساکره، حسین و رباب رزمی. (۱۳۹۱). «تحلیل تغییرات بارش سالانه شمال غرب ایران». *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*. س. ۲۳، پیاپی ۴۷، ش ۳، صص ۱۴۷-۱۶۲
- عساکره، حسین؛ رباب رزمی (۱۳۹۰) «اقلیم‌شناسی بارش شمال غرب ایران»، فصلنامه جغرافیا و توسعه، س. ۹، ش ۲۵، صص ۱۳۷-۱۵۸
- باغبانان، علیرضا؛ فرشاد رضانی فر، حمید هاشم الحسینی، مهدی، رازانی (۱۳۹۵) «امکان‌سنجی استفاده از دوغاب زیستی برای تثبیت ماسه‌های روان در مناطق کویری با رویکرد حفاظت از بقایای باستان‌شناسی»، دو فصلنامه علمی پژوهشی پژوهش باستان‌سنجی، س. ۲، ش. ۳، صص ۱۷-۲۷
- فهیمی‌فر، احمد و سروش، حامد. (۱۳۸۰). *آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها*، ج. ۱، آزمون‌های آزمایشگاهی تهران: دانشگاه امیر کبیر.
- فیلدن، برنارد.م. و یوکیلتو، یوکا. (۱۳۸۶). راهنمای مدیریت در محوطه‌های میراث جهانی. ترجمه و افزوده: پیروز حناچی. تهران: موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.
- کاویانی محمدرضا؛ مسعودیان، سیدابوالفضل. (۱۳۸۷). *اقلیم‌شناسی ایران*، اصفهان: دانشگاه اصفهان
- باقری، علیرضا و دیگران (۱۳۷۷). «مواد جایگزین سیمان در بتن، مجموعه بتن‌شناسی» (شماره ۲) تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- مدندوست، رحمت، سید یاسین موسوی، (۱۳۹۳)، «تأثیر استفاده ترکیبی از خاکستر پوسته برنج و دوده سیلیس بر خواص بتن تازه و سخت شده خود متراکم»، ششمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران- تهران، ۱۵ مهرماه
- مدندوست، رحمت و پویا رحیمی پله شاه، (۱۳۹۰)، «بررسی بتن حاوی پوسته برنج»، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۷ و ۸ اردیبهشت دانشگاه سمنان، ایران
- نگهبان، عزت‌الله. (۱۳۷۶). *مروری بر پنجاه سال باستان‌شناسی در ایران*. تهران: سازمان میراث فرهنگی.

- Amini Birami, F. et al. 2015. Characterization of Pyroclastic Stones in the Cut Rock Historical Architecture of Kandovan Village. *JRA.*; 1 (1) :1-16 [in Persian]
- Asakereh, H. Razmi. R. 2011. Climatology of rainfall in northwestern Iran, *Quarterly Journal of Geography and Development*, 9(25), 137-158 [in Persian]
- Asakereh, H. Razmi, R. 2012. Analysis of Annual Precipitation Changes in Northwest of Iran. *Geography and Environmental Planning*, 23(3), 147-162. [in Persian]
- Baghbanan, A. et al. 2016. Possibility of Using BiogROUT for Stabilization of Sand Dunes in Desert Areas with Approach in Conservation of Archaeological Remains. *JRA.*; 2 (1) :17-27 [in Persian]
- Bagheri, A. et al., 1998. Cement Alternatives in Concrete, *Concrete Science Collection (No. 2) Tehran: Building and Housing Research Center* [in Persian]
- Campbell, A. G. 1990. Recycling and disposing of wood ash. *Tappi Journal*, 73(9), p.p 141-146.
- Negahban, E. 1998. A review of fifty years of Iranian archeology: Tehran: Cultural Heritage, Organization of Iran [in Persian]
- Fahimifar, A. Soroush, H. 2000. *Rock Mechanics Tests, Theoretical Foundations and Standards, Vol. 1, Laboratory Tests of Tehran: AmirKabir University.* [in Persian]
- Faria, P. Henriques. F, Rato. V. 2008. Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation. *Journal of Cultural Heritage*, 9(3), 338-346. [in Persian]
- Fielden, B.M. Yokilto, Y. 2008. *Guide to Management in World Heritage Sites. Translated and added: Pirooz Hanachi. Tehran: Institute of Publishing and Printing, University of Tehran.* (in Persian)
- Hami, A. 2006. *Building Materials, Print.16, Tehran: University of Tehran* [in Persian]
- Unesco .1995. *Recommendation on International Principles Applicable to Archaeological Excavations, Reference code, FR punes ag 8-leg-a-311*
- International Society for Rock Mechanics. 1979. *Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Absorption and related properties and swelling and slake – durability. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 139-153.
- ISRM .1981. *Rock characterization, testing and monitoring. International society for rock mechanics suggested methods. Pergamon, Oxford*
- Jandro, Al. Baldrama. Alva, Mukiari. Biako. 1999. *Restoration and protection of brick buildings obtained from archaeological excavations. In Stanley Price, Nicholas. Preservation and restoration in archaeological excavations, translated by Mir Mohsen Mousavi. Tehran: University of Arts.* [in Persian]
- Kaviani, M.R. Masoudian. S.A. 2009. *Iranian Climatology, Isfahan: University of Isfahan* [in Persian]
- Luque, A. Cultrone. G, Sebastián. E. 2010. *The use of lime mortars in restoration work on architectural heritage. In Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures (pp. 197-207). Springer, Dordrecht.*
- Madandoust, R. Rahimi Pele Shah, P. 2011. *Investigation of concrete containing rice husk, 6th National Congress of Civil Engineering, May 6 and 7, Semnan University, Iran* [in Persian]
- Madandoust. R, Mousavi. S.Y. 2014. *The effect of combined use of rice husk ash and silica fume on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete, 6th Annual National Iranian Concrete Conference, Tehran: Iranian Concrete Association* [in Persian]
- Omoniyi, T. Duna, S. Mohammed, A. 2014. *Compressive strength Characteristic of Cowdung ash blended cement concrete. International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(7), 770-776.

- Oyetola, E.B. Abdullahi. M. 2006. *The Use of Rice Husk Ash in Low - Cost Sandcrete Block Production.*, P.M.B. 63-70, Nigeria, Department of Civil Engineering, Federal University of Technology.
- Rahmani, R. 2006. *Emergency protection of brick remains in archaeological sites*, *Athar Journal*, 25(37-28), 87-91 [in Persian]
- Razani, M, et al. 2017 *Preparation of Thin Sections of Porous Materials for Polarizing Microscope Investigation in Archaeometry*. *JRA*. 3 (2) :45-60 [in Persian]
- Sartipour, M .2009. *Materials in Building and Architecture*, Tehran: Shahid Beheshti University Press. [in Persian]
- Sease, C. 1996. *A short history of archaeological conservation*. *Studies in Conservation*, 41(sup1), 157-161.
- Shen, W. Zhou, M, Zhao, Q .2007. *Study on lime-fly ash-phosphogypsum binder*. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1480-1485.
- Sivakumar, G. Amutha. K. 2012. *Studies on Silica obtained from Cow dung ash*. In *Advanced Materials Research* (Vol. 584, pp. 470-473). Trans Tech Publications.
- Stanley Price, N. 1999. *Preservation and restoration in archeological excavations*. Translation: Mir Hassan Mousavi. Tehran: Art University [in Persian]
- Stubbs, J. 1999. *Preservation and protection of architectural remains from archaeological excavations*. In Stanley Price, Nicholas. *Preservation and restoration in archaeological excavations*, translated by Mir Mohsen Mousavi. Tehran: Art University [in Persian]
- Talaei, H .2010. *Bronze Age of Iran*, Tehran: University of Tehran [in Persian]
- Torraca, G. 2009. *Lectures on materials science for architectural conservation*. Getty Conservation Institute.