دریافت مقاله:۱۳۹۰/۰۴/۰۱
پذیرش مقاله:۱۳۹۲/۰۲/۲۲

پژوهشی در ملات‌های آهکی تاریخی(ساروج)

نمونه موردی: حمام شاهزاده‌ها در اصفهان

داریوش حیدری* حامدیونسی** غلامرضا وطن‌خواه***

چکیده

آثار برجای‌مانده از دوره‌های مختلف معماری ایرانی، افزون‌بر بیان تغییر و تحول آنها بیانگر تکامل و گسترش‌دانش ایستایی، سازه، شناخت و تولید مصالح گوناگون است. در پایداری معماری ایرانی عوامل مختلفی تأثیرگذارهستند که از میان آنها، مصالح یکی از بخش‌های مهم و اساسی بقای آثار معماری است.

ایرانیان درطراحی ملات‌های مختلف و مطابق با شرایط هر بنا، از هوش و استعداد سرشاری برخورداربوده‌اند. آنچنان‌که، بسیاری از این ملات‌ها پس ازگذشت قرن‌ها هم‌چنان، پابرجا باقی‌مانده و ویژگی‌های خود را ازدست نداده‌اند. همین اهمیت ملات‌ها موجب‌گردید که نگارندگان مقاله پیش‌رو برآن شوند تا تحقیق گسترده‌ای را درباره آنها به انجام‌رسانند. چراکه، شناخت و آشنایی با ساختار و ترکیبات مورد استفاده در این ملات‌ها، سبب گزینش روشی مناسب در حفاظت و مرمت می‌شود.

مقاله حاضر، گزیده بخشی از پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه بررسی ملات‌های آهکی به‌کاررفته در حمام تاریخی شاهزاده‌های اصفهان است. همچنین در این مقاله، درباره روش‌های تهیه ملات‌های تاریخی با هدف رسیدن به ترکیبات موجود طرح اختلاط و شیوه اجرای ملات‌های جدید برای مرمت نیز، مطالعه‌شده‌است.

آزمایش‌های گوناگونی روی ملات‌های ساروجی تهیه‌شده از این بنای تاریخی، صورت‌گرفت. پس از بررسی‌های نتایج این آزمایش‌ها و انجام مطالعات میدانی و کتابخانه‌ای، نمونه‌های جدید ملات ساروج با نسبت‌های متفاوت ساخته‌شد. در مرحله نهایی، با انجام آزمایش‌های مکانیکی مختلف روی نمونه‌های ساخته‌شده، ملات بهینه با داشتن ویژگی‌های مشابه با ملات‌های تاریخی مورد مطالعه، برای استفاده در امر مرمت گزینش‌شد.

کلیدواژگان: ملات تاریخی، ملات آهکی، ساروج، آنالیزXRD ، آنالیزTG/DTG.

* عضو هیأت علمی دانشگاه هنر اصفهان، دانشکده مرمت(نویسنده مسئول). d.heydari@aui.ac.ir
** کارشناس‌ارشد، رشته مرمت اشیا و آثار تاریخی، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.
*** استادیار، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.

مقدمه

در طول تاریخ، ملات‌های آهکی در سازه‌های آبی و بخش‌هایی از ساختمان‌ها که در معرض رطوبت‌بوده کاربرد گسترده‌ای داشته‌اند. اگرچه، باوجود کاربرد مشابه آنها در هر منطقه‌ای با ترکیبات متنوعی ساخته‌می‌شده‌اند. اکنون، بنابر وجود بناهای تاریخی فراوانی که در آنها این مجموعه ملات‌ها به‌کاررفته و لزوم حفظ و مرمت علمی و بهینه آنها که بیشتر هم درحال تخریب هستند، ضرورت دارد نسبت به شناخت فناوری ساخت و طرح اختلاط ملات‌های یادشده اقدامی مناسب صورت‌گیرد. این امر افزون‌بر دستیابی به ترکیب و روش‌های عمل‌آوری و ساخت ملات‌ها منجربه مرمت اصولی و تطابق ظاهری و ذاتی بخش‌های جدید با اجزای اصلی بنا نیز می‌گردد.

اگرچه این ملات‌ها انواع گوناگونی دارند لیکن به‌طورکلی به دو دسته ملات‌های هوازی و بی هوازی بخش‌بندی‌می‌شوند. ملات‌های هوازی برای گیرش و به مقاومت‌رسیدن نیاز به حضورهوا و (CO_2) موجود در آن دارند اما ملات‌های بی‌هوازی نیازی به حضور هوا ندارند(حامی، ۸۱:۱۳۷۸).

ملات ماسه آهک، نمونه‌ای از ملات‌های دسته نخست است که از مخلوط‌کردن آهک شکفته، ($Ca(OH)_2$)، ماسه و آب به‌دست‌می‌آید. ملات ماسه آهک نیز، برای گیرش و به مقاومت‌رسیدن نیاز به حضورهوا و جذب (CO_2) هوا دارد که نهایت، سنگ آهک اولیه($CaCO_3$) می‌شود(همان: ۸۲).

دسته دوم خود شامل دو دسته عمده زیر است:

۱- ملات شفته آهک(ملات‌های آهکی معمولی) که از ترکیب‌کردن خاک رس آهک شکفته و آب به‌دست‌می‌آید و نیازی هم به حضور هوا و جذب(CO_2) ندارد. بلکه، آهک شکفته ($Ca(OH)_2$) با آلومینات‌ها و سیلیکات‌های خاک ترکیب‌شده و آلومینات کلسیم ($CaO.Al_2O_3$)و سیلیکات کلسیم ($CaO.SiO_2$) را تشکیل‌می‌دهد(همان: ۱۰۹).

۲- ملات آهک آبی:. این آهک‌ها همانند سیمان کنار آب، قادر به انجام واکنش‌های گیرش بوده و مقاومت کسب‌می‌کنند. آهک‌های آبی به دو روش سرد و گرم تولیدمی‌شوند. در روش گرم، از پختن سنگ‌های آهکی رسی که ۶۵ تا ۷۵ درصد آهک دارند یا پختن خاک رس و سنگ آهک با یکدیگر، حاصل‌می‌شوند(گروه مؤلفان، ۱۳۸۵: ۲۵۲). پس از پختن، آنها را آسیاب می‌کنند و به‌صورت ملات استفاده‌می‌کنند. سرعت شکفته‌شدن و افزایش حجم آنها کم است(حامی، ۱۳۷۸: ۱۱۵). در روش سرد، از مخلوط‌کردن آهک شکفته، خاک رس،خاکستر، ماسه و برخی افزودنی‌های دیگر، آهک آبی ایجادمی‌شود(همان: ۸۲).

ازنظر ترکیب شیمیایی، آهک‌های آبی دامنه گسترده‌ای دارند که بین آهک و سیمان پرتلند متغیر است. این آهک‌ها، پس از پختن درصد زیادی سیلیکات کلسیم دارند لیکن برخلاف سیمان پرتلند داری آهک آزاد (CaO) و یا ($CaO+MgO$) هستند. ازین‌رو، آهک‌های آبی روش گرم، درآب شکفته‌می‌شوند(گروه مؤلفان، ۱۳۸۵: ۲۶۶).

درجه آبی بودن یا هیدرولیسیته[1] این نوع آهک‌ها، به مقدار قابل توجهی متغیر است. این آهک‌ها به سه درجه تقسیم می‌شوند؛ آهک‌های آبی کم‌مایه، آهک‌های آبی متوسط یا نیمه‌آبی و آهک‌های پرمایه که برخی آنها را آهک رومی[2] می‌نامند(همان: ۲۶۷).

آنچه در این مقاله آمده، تحقیق روی ملات آهکی ساروج است که جزء دسته ملات‌های آبی سرد است. ملات ساروج، مهم‌ترین ملات آهکی در ایران است. این ملات در مکان‌هایی که رطوبت بسیار وجودداشته و یا در تماس مستقیم با آب بوده، کاربرد داشته‌است. آهک، ماده اصلی به‌کاررفته در ملات ساروج است.

آنالیز و تحقیق روی ملات ساروج بیشتر براساس روش آنالیز دستگاهی(XRD)[3]، انجام‌شده‌است. درپایان، برای اهمیت ملات ساروج و مزایای استفاده از آن در مرمت بناهای تاریخی به‌سبب رفتار مشابه و همخوان با بقیه مواد و مصالح، شیوه‌های گوناگون ساخت ملات بررسی‌گردیده و چهار روش برای ساخت آن پیشنهاد شده‌است.

روش تحقیق

در پژوهش حاضر، بنابر شکوفایی معماری و تکنولوژی ساخت در دوره صفویه، حمام شاهزاده‌ها در شهر اصفهان برای مطالعه و بررسی انتخاب و از ملات‌های قسمت‌های مختلف آن، نمونه‌برداری‌شد. برای شناسایی روی نمونه‌ها، آزمایش‌های مختلفی همچون تعیین دانه‌بندی، آنالیز(XRD وTG/DTG)[4] صورت‌گرفت. پس از شناسایی ملات ساروج تاریخی حمام، اقدام به ساخت ساروج شد.

آزمایش(XRD)، دانه‌بندی، میزان فرسودگی الیاف و تعیین حدود اتربرگ[5] خاک روی مواد تشکیل‌دهندهٔ ملات صورت‌گرفت. سپس، براساس روش‌های گوناگون ملات ساروج ساخته‌شد و انواع آزمایش‌ها جهت تعیین مشخصات فیزیکی ملات‌های ساخته‌شده انجام‌شد. درپایان، ملات‌های ساخته‌شده با نمونه تاریخی مقایسه‌شده و از بین روش‌های ساخت ملات ساروج دو روش که با نمونه تاریخی مطابقت بیشتری داشتند، برای استفاده در عملیات حفاظت و مرمت پیشنهادشده‌است.

پیشینه تحقیق

حمام شاهزاده‌ها، مربوط به دوران صفویه است که در بافت تاریخی اطراف میدان نقش جهان و بازار اصفهان قرارگرفته‌است. این حمام، نمونه‌ای ارزنده از به‌کارگیری انواع ملات‌های آهکی با کاربردهای ویژه خود است. باتوجه‌به همین آگاهی از اصالت آن، نمونه‌ها به‌عنوان مرجع مطالعات و آنالیزهای کیفی و کمّی انتخاب‌شد. در ایران، تاکنون مطالعات مختصر و ناقصی برای معرفی ملات‌های آهکی در کتاب‌های شناخت مواد و مصالح معماری صورت‌گرفته‌است. از میان این پژوهش‌ها می‌توان به مطالعات استاد فقید *احمد حامی* (۱۳۷۸) اشاره‌نمود. آقای *حسینی‌سیر (۱۳۸۱)* هم در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود به بررسی ملات‌های تاریخی پرداخته لیکن این مطالعه به‌صورت طرح جامعی بوده و ملات آهکی به‌طور ویژه بررسی‌نشده‌است. البته، به‌سبب اهمیت کاربرد این ملات در اروپا، مطالعات مفیدی در شناسایی و مرمت آن انجام‌شده که از آن جمله می‌توان به کتاب‌های زیر اشاره‌نمود:

- Chemistry and technology of lime and Limestone(1966) و Lime an Lime mortas(1998).

ملات ساروج

ملات ساروج، ملات آهکی آبی سنتی ایران است که به دو روش سرد و گرم تولیدمی‌شده‌است. در روش گرم، کلوخه های سنگ آهک رس‌دار را می‌کوبیدند تا نرم‌شود سپس، خاک به‌دست‌آمده را با کاه و پهن و آب مخلوط‌می‌کردند. پس از آن، گل به‌دست‌آمده را روی زمین با ضخامت ۱۰سانتی‌متر پهن‌کرده و بعد از خشک‌شدن، قطعه‌های خشک‌شده را می‌پختند. نهایت، هنگامی‌که قطعه‌ها پخته‌شد آنها را آسیاب‌می‌کردند. محصول به‌دست‌آمده رنگ لیمویی یا قهوه‌ای روشن داشت که ساروج گرم نامیده‌می‌شد(همان: ۲۶۷).

در روش سرد، ساروج از مخلوط‌کردن آهک شکفته، خاکستر، ماسه بادی، خاک رس ولویی یا مغز نی ساخته‌می‌شد(حامی، ۱۳۷۸: ۸۲). بنابر موارد کاربرد مختلف، ممکن‌بود افزودنی‌های دیگری همچون موی بز یا گوساله یا انسان، سفیده تخم‌مرغ، چربی گوساله و.... به آن ترکیب افزوده‌شود(الکرجی، ۶۳:۱۳۴۵).

آهک، ماده‌اصلی این ملات است که ضمن ایجاد چسبندگی بین اجزا و قطعات آجری یا سنگی، موجب سمنته‌شدن ملات هم می‌گردد. مقدارکمی خاک رس در ملات افزون‌بر ایجاد چسبندگی در ملات به‌سبب داشتن سیلیس برای سمنته‌شدن آهک نیز، بسیار مفید است. ماسه هم به‌دلیل دارابودن سیلیس همان کاربرد خاک رس را برای آهک دارد. ضمن اینکه، ماسه خاصیت پرکنندگی هم دارد. خاکستر افزون‌بر داشتن میکروسیلیس، مقدار قابل توجهی هم کربن دارد. کربن خاکستر با آهک شکفته ترکیب‌شده و با دریافت اکسیژن از محیط به کربناتیزاسیون آهک سرعت‌می‌بخشد(Cowper ,1998:56). از مخلوط‌کردن خاکستر با ملات، به میزان کافی کربن در اختیار آهک گذاشته‌می‌شود تا سریع‌تر به مقاومت نهایی برسد. لویی یا لوخ یا گل نی، دارای رشته‌های پنبه‌مانند بسیار نازک و به‌هم فشرده‌ای است که کنار رودخانه‌ها و نواحی باتلاقی می‌روید. این رشته‌های نازک که در برخی موارد جای خود را به موی حیوانات و انسان می‌دهند، همانند آرماتور افت و حرارت در بتن، موجب کاهش جمع‌شدگی ملات و جلوگیری از ترک‌های انقباضی هنگام گیرش می‌شوند(حامی، ۱۳۷۸: ۸۲).

از دیگرسو، لویی به سبب ساختار سلولزی،مقادیر فراوانی کربن و اکسیژن درخود دارد که بسیار مورد نیاز آهک درفرایند کربنیزه‌شدن است. ملات، ساروج سرد رنگ خاکستری یا کبود دارد و علاوه‌بر مقاومت مکانیکی بالا دربرابر نفوذ آب نیز، مقاومت به‌نسبت خوبی نشان‌داده به‌گونه‌ای‌که، از نفوذ و نشت آب جلوگیری‌می‌کند(گروه مؤلفان،۱۳۸۵: ۲۶۸).

گونه‌های دیگری از ساروج‌ها نیز هستند که چون از ساروج‌های فرعی به‌شمارمی‌روند و چندان هم، رایج و متداول نیستند، در این مقاله از سخن و بررسی درباره آنها خودداری‌شده‌است.

در مطالعه و بررسی ساروج سرد، ملات‌های ساروجی حمام شاهزاده‌ها دراصفهان با پیشینه‌ای حدود ۳۵۰ سال انتخاب‌شدند. برای جلوگیری از افزایش حجم مقاله از معرفی بخش‌ها و فضاهای مختلف حمام و معرفی قسمت‌هایی که نمونه‌برداری‌شده جلوگیری شده‌است.

نمونه‌برداری

برای مطالعه و بررسی، از دوازده نمونه از ملات قسمت‌های مختلف حمام نمونه‌برداری‌شد. روش نمونه‌برداری مطابق استاندارد ASTM - C5 - 86 (ASTM 1988) بود که در بخش زیر معرف‌شده‌است.

- A2: ملات اطراف تنبوشه‌ها و لوله‌های سفالی است که برای آب‌بندی اتصالات لوله‌های سفالین انتقال آب استفاده می‌شده‌است. از این ملات انتظار مقاومت دربرابر نفوذ آب می‌رفته به‌گونه‌ای‌که، چسبندگی آن حین کار باید زیاد باشد.

- B1: ملات مربوط به کف‌سازی بوده که درصد آهک کمتری داشته و در آن بیشتر خاک و ماسه کاربردداشته‌است. همچنین، اغلب حالت شفته آهک پیدامی‌کرده‌است.
- B2:کاربردی شبیه B1 داشته‌است.
- C: ملاتی برای بندکشی بین آجرچینی‌ها و اندود حوض‌ها است.
- D: ملات پشت کاشی‌کاری‌ها است.
- E2: ملات اطراف سنگ‌کاری‌ها بوده که به‌نسبت درمعرض رطوبت کمتری قرارداشته و برای اتصالات قطعه‌های سنگی به‌کارمی‌رفته که احتمالاً برای چسبندگی بیشتر به آن گچ هم افزوده‌می‌شده‌است.
- E3: مانند E2 است.
- G: اندود درون حوضچه توالت بوده که جهت آب‌بندی و پرداخت نهایی در سطح جداره داخلی حوضچه به‌کارمی‌رفته‌است.
- H1: اندود پشت کاشی‌کاری‌های حوضچهٔ گرم‌خانه بوده‌است.
- I1: ملات زیر سنگ که برای چسبندگی بیشتر احتمالاً به آن گچ هم افزوده‌می‌شده‌است.
- I3: شبیه I۱ است.
- J : اندود جداره استخر حمام که هم لازم بوده استحکام و هم آب‌بندی خوبی داشته‌باشد .

آنالیز دانه‌بندی ماسه ملات‌های ساروج حمام شاهزاده‌ها

برای آنالیز دانه‌بندی ماسه، سه مورد کلی از نمونه‌ها به‌شرح زیر برگزیده‌شدند:

۱. نمونه‌های G و J ،
۲. نمونه‌های D و A2 ،
۳. نمونه‌های A1 و B1 .

سپس، نمونه‌ها جداگانه در اسید کلریدریک ۱:۳ ، چهارنرمال حل‌شده و با کاغذ صافی ذرات ماسه جداشدند. ماسه‌ها، پس از خشک‌شدن از الک‌های شماره(۸، ۱۸ و ۲۵)، عبورداده‌شدند.

درصد ماسه‌های مانده روی هر الک در زیر آورده‌شده‌است(جدول ۱).

در(جدول۲)، درصد تجمعی عبورکرده از هر الک برای مقایسه با درصد تجمعی عبورکرده از الک‌های شماره‌های (۱۶،۲۰،۵۰ و ۱۰۰) که برای ساخت ملات ماسه آهک استفاده‌می‌شود، آورده‌شده‌است.

آن‌گونه‌که از مقایسه (جدول‌های۳-۱) به‌دست‌می‌آید، ماسه‌های استفاده‌شده در ساروج حمام نسبت‌به آنچه هم‌اکنون برای ملات ماسه آهک به‌کارمی‌رود، دانه‌های درشت‌تر از الک ۱۶ و ریزتر از الک ۱۰۰ دارد. این گستردگی دامنه اندازه دانه‌ها طبیعتاً سبب دست‌یابی به تراکم بیشتر در ملات می‌شود.

آنالیز(XRD)ملات‌ها

برای مطالعه بیشتر و شناسایی فازهای تشکیل‌دهنده ملات‌های ساروج تاریخی، روی ۱۲ نمونه مورد نظر، آنالیز XRDانجام‌گرفت. درصد فازهای مختلف شناسایی‌شده، به‌صورت نمودارهای دایره‌ای نشان‌داده‌شده‌اند(نمودارهای ۲-۱). مشخصات این دستگاه به قرار زیر است:

X-ray Tube Anode : Cu
Wavelenght: 1.5406 A(CuKa)
Filter : Ni

تنها، یک نمونه با نمودار و نتایج آمده و در بقیه نمونه‌ها ارائه نتایج صرفاً به‌صورت درصد وزنی بیان‌شده‌است (Ropp,2004:145). آن‌گونه‌که در نتایج حاصل ازآنالیز(XRD) مشاهده‌می‌شود، بیشترین درصد مواد تشکیل‌دهنده ملات‌ها کربنات کلسیم($CaCO_3$) است. این مطلب، بیانگر روند مناسب کربناتیزاسیون ملات‌ها است که با تشکیل درصد بالایی از($CaCO_3$) ملات، به مقاومت و سختی بالایی دست خواهدیافت. درصد($CaCO_3$) درملات G مربوط به اندود درون حوضچه توالت با ۷۸,۶ درصد است که بیشترین مقدار را دارد.

در ملات‌هایی که کربنات کلسیم آنها نسبت به بقیه ملات‌ها کمتر است، مقاومت و سختی ملات با تشکیل سیلیکات کلسیم(Ca_2SiO_4) و دیگر محصولات حاصل از واکنش‌های گیرش و سخت‌شدگی ملات که در نمودارها دیده‌می‌شود، فراهم شده‌است. همانند ملات E2 که درصد کربنات کلسیم به کمترین مقدار خود ۳۷,۹ درصد می‌رسد، درصد سیلیکات کلسیم هم ۹,۵ درصد است.

درمجموع، این‌گونه می‌توان گفت که در ملات ساروج سرد، هم از تشکیل کربنات کلسیم و هم از تشکیل سیلیکات کلسیم و دیگر محصولات واکنش که موجب سخت‌شدگی و افزایش مقاومت ملات می‌گردند، بهره‌گیری شده‌است.

نکته‌دیگر اینکه، ملات G مربوط به اندود درون حوضچه توالت است و به‌آسانی با CO_2 هوا در ارتباط بوده و مسیر تشکیل($CaCO_3$) را بیشتر سپری‌کرده درحالی‌که، ملات E۲ مربوط به سنگ‌کاری‌ها است و طبیعتاً کمتر می‌توانسته از هوا(CO_2) بگیرد. ازین‌رو، نسبت به ملات‌های دیگر بیشتر مسیر تشکیل سیلیکات کلسیم را سپری‌کرده‌است.

جدول۱. درصد ماسه‌های مانده روی هر الک.

شماره نمونه / شماره الک	۱	۲	۳
درصدمانده روی الک ۸	۰	۴/۴۷	۲۰
درصد مانده روی الک ۱۶	۲۰/۸۵	۱۳/۴۳	۱۰
درصد مانده روی الک ۲۰	۱۲/۸۸	۸/۹۵	۵/۵۵
درصد مانده روی الک ۵۰	۳۹/۸۷	۳۵/۸۲	۳۱/۱۱
درصد مانده روی الک ۱۰۰	۱۶/۵۶	۲۰/۸۹	۲۰
درصد گذشته ازالک ۱۰۰	۹/۸۴	۱۶/۴۴	۱۳/۳۳

(نگارندگان)

جدول۲. درصد تجمعی ماسه‌های عبورکرده از هر الک.

شماره نمونه / شماره الک	۱	۲	۳
درصد تجمعی مانده روی الک۸	۰	۴/۴۷	۲۰
درصد تجمعی مانده روی الک ۱۶	۲۰/۸۵	۱۷/۹	۳۰
درصد تجمعی مانده روی الک ۲۰	۳۳/۷۳	۲۶/۸۵	۳۵/۵۵
درصد تجمعی مانده روی الک ۵۰	۷۳/۶	۶۲/۶۷	۶۶/۶۶
درصدتجمعی مانده روی الک۱۰۰	۹۰/۱۶	۸۳/۵۶	۸۶/۶۶

(نگارندگان)

جدول۳. درصد تجمعی دانه‌های ماسه برای ملات مورداستفاده در نمونه‌سازی.

شماره الک	درصد تجمعی مانده ٪
۱۶	۰
۲۰	۲
۵۰	۷۴
۱۰۰	۱۰۰

(نگارندگان)

آنالیز(TG/DTG)

آزمایش وزن‌سنجی حرارتی در مورد نمونه A2 که احتمال وجود مادهٔ آلی در آن بیشتر بود، انجام‌شد (Ellis,2002:46). این نمونه، مربوط به ملات تنبوشه، لوله سفالی، بوده که برای دستیابی به اتصالات بادوام و مستحکم از موادی همچون سفیده تخم‌مرغ در آن استفاده می‌شده‌است(حامی، ۱۳۷۸: ۸۱). براساس نمودارهای ترسیم‌شده با دستگاه(نمودار۳) این‌چنین دریافت‌شد که تغییرات اصلی باتوجه‌به پیک اصلی، حدود ۷۵۰ درجه است که این دما مربوط به تجزیه کربنات‌ها است.

این‌چنین می‌توان نتیجه‌گرفت که مواد آلی که در این نمونه ملات تاریخی کاربرد داشته، تقریباً به‌طورکامل ازبین‌رفته و استفاده ازآنها بیشتر جنبه موقتی تارسیدن به گیرش نهایی ملات را داشته‌است.

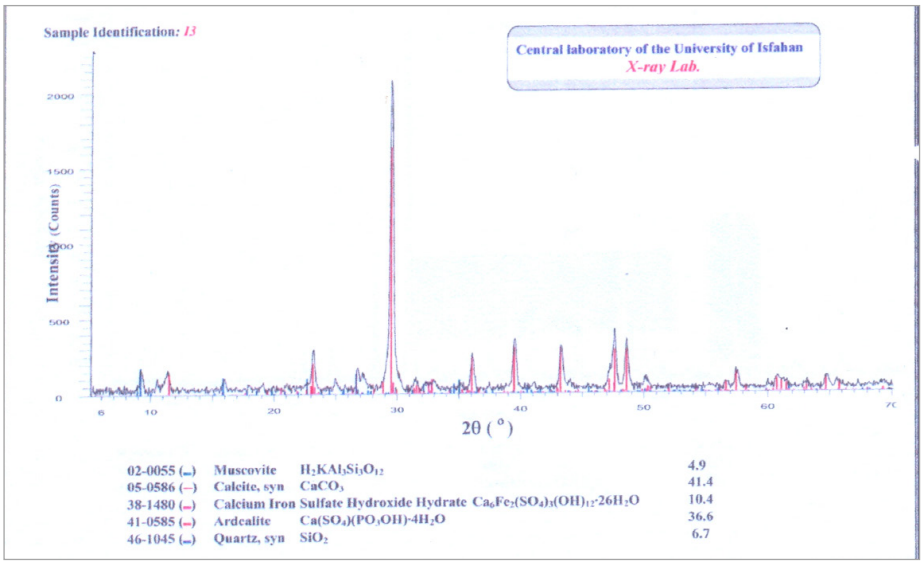
تهیه ساروج سرد

درتهیه ساروج سرد، برای شناسایی کیفیت مواد و مصالح مورد استفاده و تاحدودی تطبیق ویژگی‌های آنها با مواد تشکیل‌دهنده ساروج سنتی، برخی آزمایش‌های شناسایی روی آنها انجام‌شد که ضرورت‌دارد نخست، به آنها اشاره‌نمود.

۱. انجام آنالیز(XRD)روی نمونه آهک

برای بررسی دقیق نمونه آهک مصرفی در نمونه‌سازی ملات ساروج، آهک مورد نظر تحت آنالیز(XRD)، قرارگرفت(جدول۴).

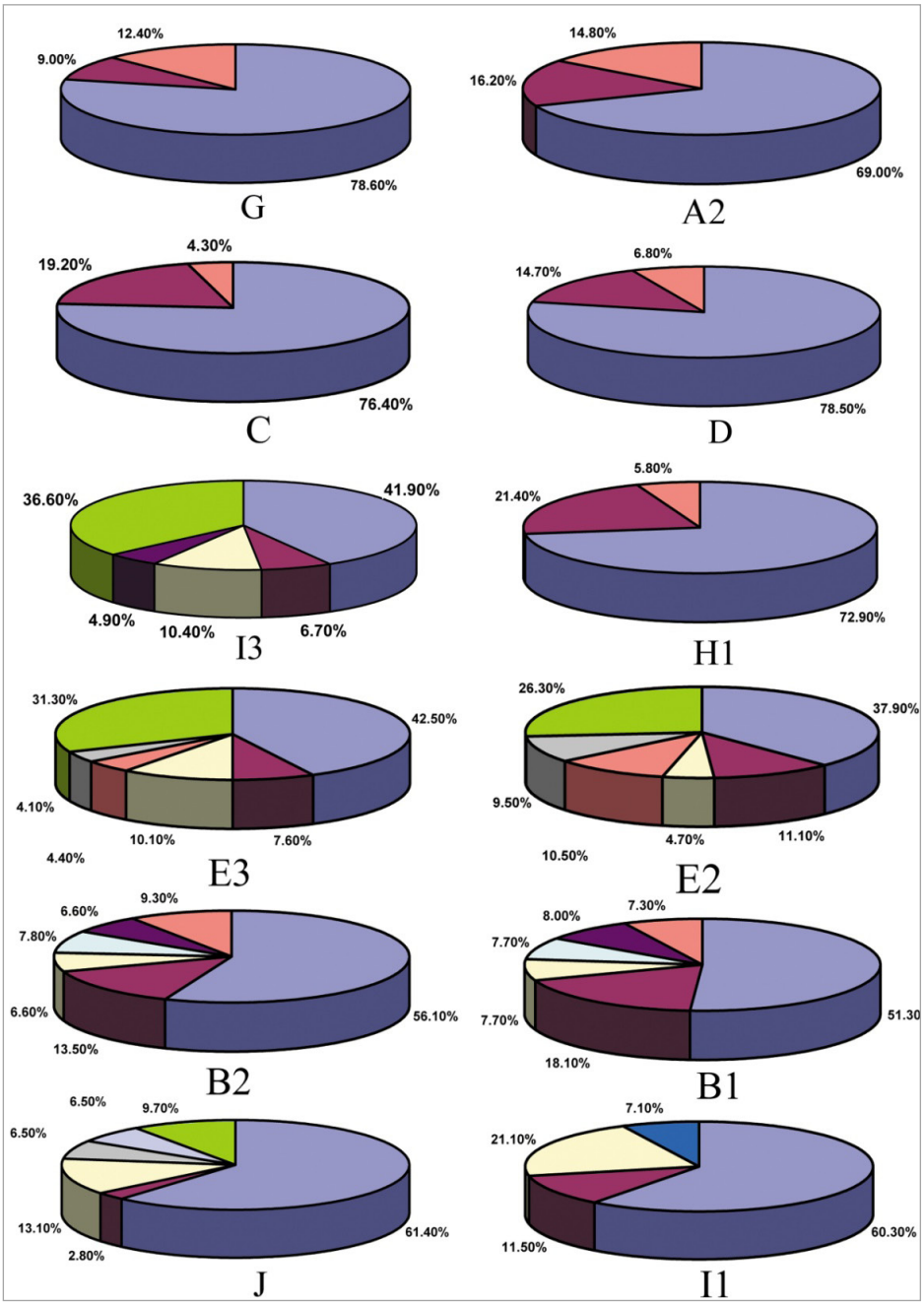
نمودار۱. آنالیز XRD نمونه ملات‌های آهکی تاریخی



(نگارندگان)

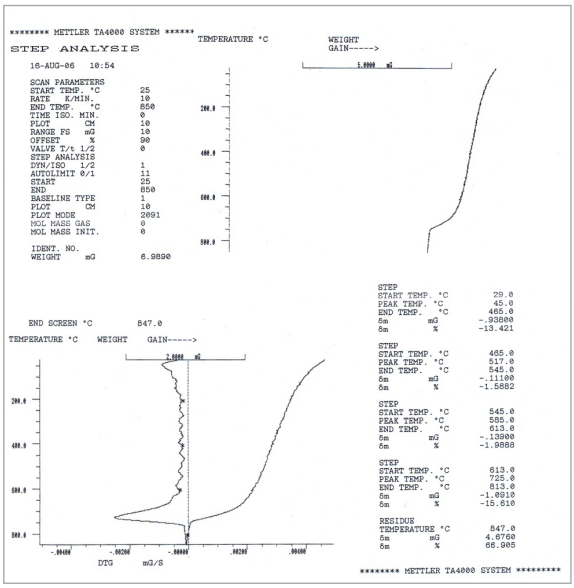
نمودار۲. درصد وزنی نمونه‌های تاریخی.

Calcit, Syn	$CaCO_3$	
Quartz, Syn	SiO_2	
Calcium Iron Sulfate hydroxide hydrate	$Ca_6Fe_2(SO_4)_3(OH)_{12}.26H_2O$	
Clinchlore…, ferroan	$Mg, Fe)_6 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_8)$	
Muscovite	$KAl_2Si_3Al_{10} (OH)_2$	
Albite, Calcian, Ordered	$Na, Ca) Al(Si,Al)_3 OH)$	
Calcium Silicate	$Gamma – Ca_2Sio_4$	
Ardealite	$Ca(So_4) (Po_3OH)_4 H_2O$	
Gypsum	$CaSO_4. 2H_2O$	



(نگارندگان)

نمودار۳. آنالیز TG/DTG



(نگارندگان)

باتوجه‌به داده‌های آنالیز، این آهک را به واسطه داشتن میزان قابل توجهی(MgO)، می‌توان حاوی ناخالصی‌هایی از نوع سنگ آهک دولومیتی دانست. این نمونه، با داشتن فازهای مرتبط با کلسیم(کلسیت CaCO3 ، آهک CaO، آهک شکفته Ca(OH)2) از درجه خلوص بالایی برخورداراست. ضمن‌اینکه، مقداری از آهک پخته‌شده(CaO) نزدیک رطوبت هوا به Ca(OH)2 یا آهک شکفته تبدیل‌شده‌است(شرایط قبل از انجام XRD). نکته دیگر اینکه، میزان ناچیزی از آهک شکفته هم تبدیل به کلسیت شده‌است. نهایت، باید توجه‌داشت که پس از پختن سنگ آهک پیش از شکفته‌کردن، از قرارگیری آن درمعرض رطوبت هوا باید خودداری‌کرد.

۲. ماسه

آنچنان‌که گفته‌شد، دامنه اندازه دانه‌های ماسه در ساروج تاریخی، نسبت به‌اندازه دانه‌های مورد استفاده در ساخت ملات ماسه آهک که فعلاً رایج است، گستردگی بیشتری دارد. لیکن، چونکه این اختلاف بسیار آشکار نیست برای ساخت نمونه ساروج از دانه‌بندی ملات ماسه آهک مطابق، آن استفاده‌شد.

همچنین در ترکیب ماسه مورد استفاده، ۳۰٪ ماسه سیلیسی استفاده‌شد. به‌گونه‌ای‌که از ماسه بادی معمولی جهت ذرات درشت و از ماسه سیلیسی برای ذرات ریز استفاده‌گردید. ماسه سیلیسی، گذشته از الک ۵۰ و مانده روی الک ۱۰۰ می‌باشد. دانه‌بندی هم براساس جدول بالا بدین‌گونه است که هم تغییر اندازه دانه‌های ماسه پیوسته و بدون گسستگی است و هم اینکه، دانه‌های درشت‌تر از ۱/۲ میلی‌متر در آن وجودندارد چراکه، دانه‌های درشت‌تر موجب خشن‌شدن ملات‌می‌شود.

۱-۲.آنالیز(XRD) روی نمونه ماسه

برای مطالعه و شناخت بیشتر نمونه ماسه مورد استفاده، ماسه تحت آنالیز(XRD)، قرارگرفت(جدول۵). براساس نتایج آنالیز، ماسه مورد استفاده را می‌توان با درصد سیلیس بالا قلمدادکرد. گرچه، حضور کلسیت در آن نشانگر داشتن ماسه آهکی در ترکیب دانه‌بندی است. حضور آلبیت کلینوکلر[۶] به‌عنوان دوفاز مرتبط با کانی‌های رسی نیز به‌دلیل ناخالصی‌های همراه با ذرات ماسه و یا ترکیب آلبیت همراه با کلسیت به‌شمارمی‌رود.

جدول۴. نتایج XRD مربوط به نمونه آهک

Compound Name	Formula	Concentration(%W/W)
Portlandite,syn	Ca (OH)2	49.5
Periclase,syn	MgO	31.8
Lime,syn	CaO	17.3
Calcite,syn	CaCO3	1.4

(نگارندگان)

جدول۵. آنالیزXRD نمونه ماسه

Compound Name	Formula	Concentration(%W/W)
Quartz,syn	SiO2	52.3
Albit, calcian,ordered	Na,Ca)Al(Si,Al)3O8)	15.3
Clinochlore	MgFe,Al)6(Si,Cr)4O10(OH)8)	4
Calcite,syn	CaCO3	28.4

(نگارندگان)

۳. لویی

لوییِ مورد مصرف در ساخت نمونه‌ها، نخست به قطعه‌های حداکثر ۳ سانتی‌متری خردشد و ذرات درشت و چوبی آن جداشدند. سپس، مدت ۴۸ ساعت در آب خیسانده‌شد و بعد استفاده‌شدند(وزن هر پیمانه لویی ۱۰۰ گرم محاسبه‌گردید).

۱-۳. آزمایش میزان فرسودگی الیاف

مطالعه بیشتر برای نوع رفتار و واکنش موادآلی به‌کاررفته در ساخت ملات آهکی، به انتخاب درست و نحوه به‌کارگیری بهتر این مواد کمک‌می‌کند. بنابر استفاده لویی به‌عنوان عاملی مهم در جلوگیری از ترک‌خوردن ملات به‌سبب انقباض حین گیرش، دوام آن با دیگر مواد مشابه که در ملات‌های تاریخی استفاده‌می‌شدند، مقایسه‌گردید. این بررسی بین نمونه‌های لویی، موی بز، ساقه گندم، ساقه برنج و سبوس برنج صورت‌گرفت. این آزمایش و کنترل کیفیت الیاف برای بررسی فرسودگی آنها، در محیط کاملاً قلیایی جهت مطابقت با شرایط ملات آهکی صورت‌پذیرفت.

بدین‌منظور، در پنج ظرف شیره آهک دوغاب آهک شکفته ریخته‌شد. سپس، الیاف یادشده در هریک از ظرف‌ها قرارداده‌شدند. نهایت، پس ازگذشت ۸۰ روز، میزان فرسودگی الیاف بررسی‌شدند. در نگاه اول، تجزیه تقریباً کامل الیاف غیرگیاهی(موی بز)، قابل توجه بود. بین الیاف گیاهی نیز، میزان فرسودگی ساقه گندم بیشتر از همه، سپس ساقه برنج ، لویی و درآخر سبوس برنج بود.

بنابراین، می‌توان بیان‌کرد که سبوس برنج دارای مقاومت بسیار خوبی دربرابر آهک است. در موارد دیگری، سبوس برنج در ملات‌های آهکی تاریخی دیده‌شده‌است. بااین‌همه، در ملات‌های تاریخی لویی بسیار به‌کاررفته‌است. دلیل استفاده از آن را می‌توان باتوجه به شکل، فرم و ساختار فیزیکی آن توجیه‌کرد. همان‌گونه‌که گفته‌شد، عملکرد الیاف در ملات جلوگیری از ترک‌خوردگی ملات براثر انقباض حاصل از گیرش ملات است. لویی، به‌دلیل سطح زبر و پرزدار خود، در مقایسه با ساختار دوکی‌شکل سبوس برنج، قدرت درگیرشدن بیشتری را با ملات اطراف خود دارد. همچنین، حالت صیقلی بافت ساقه گندم و برنج از حرکت جزئی ملات حین گیرش جلوگیری‌نمی‌کند(باتوجه‌به اینکه، گیرش ملات‌های آهکی نسبت به گل وگچ بسیار کندتر است و حرکت‌های آن بسیارآرام و جزئی است). از دیگرسو، به‌دلیل نداشتن قابلیت ارتجاعی این الیاف، در سطح‌های صاف بیشتر از آنها استفاده‌می‌شد چونکه، انعطاف مورد نیاز برای سطح‌های منحنی را ندارند. درحالی‌که، لویی از انعطاف کافی برخورداراست.

در بررسی رفتارفرسودگی الیاف در محیط قلیایی، فرسودگی سریع و شدید موی بز دیده‌شد. بنابر استفاده از موی بز و دیگر الیاف حیوانی، احتمالاً علت استفاده از آنها به دلایل زیر بوده‌است:

- امکان دسترسی بیشتر به این الیاف در برخی مناطق،
- الیاف حیوانی بیشتر در مواردی استفاده‌می‌شد که حضور این مواد در مدت زمان ساخت تا گیرش نسبی ملات مورد نیاز بوده‌است. سپس، با تجزیه‌شدن الیاف، موجب به‌وجودآمدن لوله‌های موئینه در ملات می‌شده که از طریق این منافذ و لوله‌ها، رطوبت و(CO_2) هوا به درون جسم ملات نفوذکرده و واکنش‌های ملات تکمیل می‌شده‌است.
- به‌سبب ظرافت الیاف حیوانی، از آنها در مواردی استفاده‌می‌شده که ظرافت و پرداخت ملات مدنظر بوده‌است.

۴. خاک رس

انتخاب خاک رس، براساس دامنه خمیری[۷] و حد مایع[۸] صورت‌گرفت. خاک انتخاب‌شده، از الک شماره ۱۰۰ گذرداده‌شد که حد مایع آن ۴۱ و دامنه خمیری آن ۱۵ بود .

PI=15 LL=41

۱-۴. آنالیز(XRD) روی خاک رس

برای بررسی دقیق‌ترخاک رس مورد استفاده در نمونه‌سازی ساروج، آنالیز(XRD)، روی آن انجام‌شد(جدول۶). همان‌گونه‌که در نمودار نیز دیده‌می‌شود، علاوه‌بر فازهای مشخص و اختصاصی خاک رس، کلسیت هم در خاک مورد آزمایش مشاهده‌می‌گردد.

۵. خاکستر

برای گزینش خاکستر مناسب نخست ساقه گندم، ساقه برنج و چوب درون کوره با دمای ۸۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد سوزانده‌شدند. چراکه، تمام موادآلی در دمای بالاتر از ۸۵۰ درجه از بین‌رفته و موادمعدنی آنها ازجمله، سیلیس برجای‌می‌ماند. بین سه خاکستر تولیدشده، آنکه بیش از همه حاوی سیلیس باشد برای نمونه‌سازی مناسب‌تر است. ازین‌رو، از هر سه مورد آنالیز(XRD) تهیه‌شد.

۱-۵. آنالیز(XRD) خاکستر

برای شناسایی بهتر خاکستر مناسب جهت نمونه‌سازی، سه گونه خاکستر تهیه‌شده تحت آنالیز(XRD)، قرارگرفتند. باتوجه‌به آنالیزهای انجام‌شده، خاکستر ساقه برنج از بقیه مناسب‌تر بوده و حاوی درصد بیشتری سیلیس بود(جدول۷).

جدول۶. آنالیز XRD نمونه خاک رس

Compound Name	Formula	Concentration(%W/W)
Quartz,syn	SiO2	13.5
Calcite,syn	CaCO3	18.2
Pyrophyllite-2ITM RG		
Clinochlore-1ITMIIb RG,ferroan	MgFe,Al)6(Si,Cr)4O10(OH)8)	11.5
Albit, calcian,ordered	Na,Ca)Al(Si,Al)3O8)	12.7
Muscovite-2ITM RG ,ammonian	K,NH4,Na)Al2(Si.) Al)4O10(OH)2	19.2

(نگارندگان)

جدول۷. آنالیز XRD خاکستر ساقه برنج

Compound Name	Formula	Concentration(%W/W)
Sylvite,syn	KCl	59.9
Silicon chloride	SiCl4	20
Calcite,syn	CaCO3	11.8
Quartz,syn	SiO2	3.7
Aphthitalite,syn	K3Na(SO4)2	4.7

(نگارندگان)

بنابر نتایج این آنالیز، حضور سیلیس را به‌صورت فاز کوارتز[۹] در ترکیب با کلر می‌توان‌دید. براساس منشاء آلی این ماده، حضور قابل توجه پتاسیم، کلر و کلسیم در آن توجیه‌پذیر است.

۶. نمونه‌سازی

نمونه‌سازی باتوجه‌به مصاحبه با استادکاران معماری سنتی، مطالعه تاریخی روی ملات ساروج و مطالعه‌های کتابخانه‌ای با ۱۰ طرح اختلاط گوناگون، انجام‌شد(جدول۸).

۷. آزمایش‌های فیزیکی روی نمونه‌ها

۷-۱. توزین نمونه‌ها

نمونه‌ها به‌شکل مکعب در ابعاد(۵×۵×۵) سانتی‌متر، ساخته‌شدند. بعد از ساخت نمونه‌های هرگروه، کلیه نمونه‌ها در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری‌شده و در فاصله‌های زمانی ۵ روزه تا روز بیستم وزن‌شدند(جدول۹).

جدول۸. میزان درصد حجمی ترکیبات نمونه‌های مختلف ملات ساروج ساخته‌شده

شماره نمونه	تاریخ ساخت	درصد آهک	درصد خاکستر	درصد لویی	درصد ماسه	درصد خاک رس
۱	۸۵/۷/۱۹	۳۳,۷۹	۹,۶۲	۷,۲۳	۳۸,۵۶	۱۰,۸۵
۲	۸۵/۷/۲۲	۴۴,۴۴	۳۱,۱۱	۸,۸۸	۸,۸۸	۶,۶۶
۳	۸۵/۷/۲۴	۳۱	۲۱,۵	۸,۶۲	۳۸,۷۹	-
۴	۸۵/۷/۲۵	۳۱,۷	۲۰,۳۲	۸,۱۳	۳۴,۱۵	۴,۸۷
۵	۷۵/۷/۲۶	۵۱,۴۲	۸,۵۷	۶	-	۳۴
۶	۸۵/۷/۲۹	۳۶	-	۸,۵	۳۰	۲۵
۷	۸۵/۷/۳۰	۳۲	۴۰	۸	۲۰	-
۸	۸۵/۸/۱	۳۲	۲۰	۸	۲۰	۲۰
۹	۸۵/۸/۶	۲۷,۹۲	۲۲,۵۲	۹	۲۷,۰۲	۱۳,۵۱
۱۰	۸۵/۸/۷	۲۸,۵۷	۲۸,۵۷	۹,۵۲	۲۸,۵۷	۴,۷۶

(نگارندگان)

جدول۹. توزین نمونه‌ها

نمونه	کد نمونه	وزن نمونه پس از ۵روز(برحسب گرم)	وزن نمونه پس از ۱۰روز(برحسب گرم)	وزن نمونه پس از ۱۵روز(برحسب گرم)	وزن نمونه پس از ۲۰روز(برحسب گرم)
۱	۱	۲۱۳,۵	۲۰۱,۳	۱۹۲,۵	۱۸۱,۶
۱	۲	۲۱۱,۸	۲۰۰,۲	۱۸۹,۳	۱۷۹,۸
۱	۳	۲۰۶,۵	۱۹۵,۵	۱۸۴,۷	۱۶۲,۳
۱	۴	۲۱۴,۲	۲۰۵,۲	۱۹۴,۴	۱۸۴,۴
۱	۵	۱۹۷,۶	۱۸۶,۲	۱۷۵,۳	۱۶۴,۴
۱	۶	۲۰۰,۸	۱۹۰,۱	۱۷۸,۲	۱۶۸,۷
۲	۱	۱۴۵,۶	۱۴۳	۱۴۰,۱	۱۳۵,۹
۲	۲	۱۴۸,۴	۱۴۶,۵	۱۴۳,۳	۱۳۹,۸
۲	۳	۱۵۵,۵	۱۵۳,۲	۱۵۱,۱	۱۴۹,۱
۲	۴	۱۵۰,۷	۱۴۸,۳	۱۴۶,۴	۱۴۲,۳
۲	۵	۱۵۳,۵	۱۵۱,۲	۱۴۹,۶	۱۴۵,۵
۲	۶	۱۴۱,۱	۱۳۷,۴	۱۳۶,۲	۱۳۱,۷
۳	۱	۱۸۳,۴	۱۷۶,۴	۱۶۹,۳	۱۶۲,۳
۳	۲	۱۸۲,۳	۱۷۵,۲	۱۶۸,۹	۱۶۰
۳	۳	۱۸۶,۳	۱۹۲,۵	۱۸۷,۳	۱۸۳,۲
۳	۴	۱۹۰	۱۸۶,۲	۱۸۱,۱	۱۷۶
۳	۵	۱۸۶,۵	۱۹۱,۳	۱۸۶,۲	۱۸۳,۵
۳	۶	۱۸۵	۱۷۸,۶	۱۷۱,۲	۱۶۴,۵
۴	۱	۲۰۲,۳	۱۹۲,۳	۱۸۴,۱	۱۷۶,۳
۴	۲	۱۹۸,۲	۱۸۷,۳	۱۷۷,۹	۱۶۷
۴	۳	۱۷۸,۹	۱۶۶,۳	۱۵۴,۳	۱۴۲,۶
۴	۴	۱۹۵,۵	۱۸۴,۷	۱۷۴,۶	۱۶۴,۲
۴	۵	۱۷۷,۲	۱۶۵,۲	۱۵۲,۱	۱۴۰,۲
۴	۶	۱۸۸,۹	۱۷۵,۳	۱۶۴,۱	۱۵۵,۳
۵	۱	۱۷۶,۶	۱۶۶,۵	۱۵۵,۳	۱۴۴,۷
۵	۲	۱۷۲,۴	۱۶۲,۳	۱۵۱,۲	۱۴۰
۵	۳	۱۷۴,۷	۱۶۵,۱	۱۵۴,۲	۱۴۳,۵
۵	۴	۱۷۹,۳	۱۷۰,۲	۱۶۲,۳	۱۵۰,۲
۵	۵	۱۸۲,۵	۱۷۳,۴	۱۶۰,۹	۱۵۱,۶
۵	۶	۱۷۸	۱۶۸,۸	۱۵۸,۱	۱۴۶,۲
۶	۱	۲۰۷,۶	۱۹۶,۵	۱۸۷,۳	۱۷۶,۴
۶	۲	۲۰۹,۷	۱۹۸,۹	۱۹۱,۲	۱۷۹,۱
۶	۳	۲۰۸,۸	۱۹۷,۱	۱۸۹,۱	۱۷۸,۳
۶	۴	۲۱۴	۲۰۴,۷	۱۹۲,۳	۱۸۱,۶
۶	۵	۲۱۱,۶	۲۰۱,۴	۱۹۳,۱	۱۸۰,۷
۶	۶	۲۰۶,۷	۱۹۴,۳	۱۸۶,۱	۱۷۵,۳
۷	۱	۲۱۹,۷	۲۱۱,۳	۲۰۶,۳	۱۹۶,۶
۷	۲	۲۱۱,۳	۲۰۵,۳	۱۹۶,۴	۱۹۰,۵
۷	۳	۲۱۶,۴	۲۰۸,۸	۲۰۱,۲	۱۹۵,۳
۷	۴	۲۱۷,۷	۲۰۹,۴	۲۰۳,۳	۱۹۷,۴
۷	۵	۲۱۸,۴	۲۱۱,۵	۲۰۴,۴	۱۹۷,۱
۷	۶	۲۱۸	۲۱۰,۴	۲۰۴,۵	۱۹۶,۶
۸	۱	۲۰۷,۶	۲۰۲,۴	۲۰۶,۶	۱۸۹,۴

ادامه جدول۹. توزین نمونه‌ها

نمونه	کد نمونه	وزن نمونه پس از ۵روز(برحسب گرم)	وزن نمونه پس از ۱۰روز(برحسب گرم)	وزن نمونه پس از ۱۵روز(برحسب گرم)	وزن نمونه پس از ۲۰روز(برحسب گرم)
۸	۲	۲۰۰,۷	۱۹۵,۴	۱۹۱,۲	۱۸۳,۲
۸	۳	۲۱۱	۲۰۶,۳	۲۰۰,۳	۱۹۴,۸
۸	۴	۱۹۳,۱	۱۸۸,۴	۱۸۵,۴	۱۷۶,۴
۸	۵	۲۱۲,۹	۲۰۷,۴	۲۰۱,۳	۱۹۵,۵
۸	۶	۱۹۷,۶	۱۹۲,۵	۱۸۹,۷	۱۸۰,۵
۹	۱	۲۰۲,۲	۱۹۶	۱۹۱,۳	۱۸۵,۵
۹	۲	۲۱۷,۱	۲۱۲,۷	۲۰۵,۲	۲۰۱,۸
۹	۳	۲۰۶,۳	۲۰۱,۴	۱۹۶,۵	۱۹۰,۶
۹	۴	۲۰۸	۲۰۳,۴	۱۹۸,۴	۱۹۲,۳
۹	۵	۲۱۴	۲۰۹,۹	۲۰۶,۵	۲۰۲,۴
۹	۶	۲۱۱,۳	۲۰۶,۷	۲۰۱,۲	۱۹۵,۴
۱۰	۱	۲۱۲,۶	۲۰۴,۵	۱۹۶,۳	۱۸۹,۹
۱۰	۲	۲۰۶,۶	۱۹۹,۴	۱۹۰,۲	۱۸۲,۳
۱۰	۳	۲۰۵,۲	۱۹۸,۳	۱۸۸,۳	۱۸۱,۲
۱۰	۴	۲۰۷,۴	۲۰۱,۴	۱۹۰,۳	۱۸۲,۳
۱۰	۵	۲۱۳,۵	۱۹۱,۷	۱۸۴,۵	۱۷۶,۲
۱۰	۶	۲۰۶,۱	۱۹۸,۸	۱۹۱,۳	۱۸۳

(نگارندگان)

۷-۲. محاسبه جرم حجمی، تخلخل و جذب آب

مقادیر وزن خشک، جرم حجمی، وزن نمونه اشباع از آب، حجم ظاهری و تخلخل درصد جذب آب در مورد ۲۰، نمونه تصادفی از ۱۰ گروه ساروج ساخته‌شده که مطابق با(جدول ۱۰) است.

۷-۳. اندازه‌گیری ارتفاع موئینگی

مصالح متخلخل از طریق عامل موئینگی، می‌توانند منافذ خود را با مایع مرطوب‌کننده پرکنند. خیزش رطوبت آب و یا هر مایع دیگری در این‌گونه مصالح با نیروهای کشش سطحی که در فصل مشترک دو فازها جامد و مایع عمل‌می‌کنند، صورت‌می‌پذیرد(گروه مؤلفان، ۱۳۸۵: ۳۴). از هر گروه، دو نمونه مکعبی گزینش‌شد و روی اسفنج مرطوب قرارگرفت و میزان صعود آب طی ۲ ساعت، ثبت‌گردید(جدول ۱۱).

۷-۴. مقاومت فشاری

برای تعیین مقاومت فشاری گروه‌های ساروج، ابتدا نمونه‌های هرگروه به دودسته تقسیم شدند. نمونه‌های دسته‌اول برای تعیین مقاومت فشاری درحالت خشک ۸۰ روز درمحفظه هایی دردمای ۲۰درجه سانتی گراد قرارگرفتند تا به‌تدریج خشک شوند.

نمونه‌های دسته‌دوم برای آگاهی ازشرایط گیرش درآب وتعیین مقاومت فشاری دراین حالت، از روزدوم به مدت ۷۹ روز داخل آب مقطر قرارگرفتند و نهایت، برای انجام آزمایش خشک‌شدند. درهرگروه آزمایش روی سه نمونه‌ها انجام شده، سپس، میانگین مقاومت فشاری سه نمونه به‌عنوان مقاومت فشاری آن گروه محاسبه‌گردید. شرایط آزمایش نمونه‌ها به صورت کنترل‌شده طبق استاندارد (ASTM C270-64T) و نیز دستورالعمل شماره ۷۰۶ چاپ ۶ مؤسسه استاندارد وتحقیقات صنعتی ایران صورت گرفت . سرعت بارگذاری روی نمونه‌ها با ابعاد مکعبی (۵×۵×۵)سانتی متر ۵۰ kg/s درنظر گرفته‌شد. (۵۰ کیلوگرم درثانیه). واحد مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز kg/cm2 (کیلوگرم برسانتی مترمربع) است. با توجه‌به نتایج این آزمایش می‌توان گفت که نمونه‌های (۵ و۶ و۷) ازمقاومت فشاری درحالت خشک بهتر و نمونه‌های (۷ و۸ و۱۰) ازمقاومت فشاری درحالت گیرش درآب بهتربرخورداربودند(جدول ۱۲).

۷-۵. مقاومت درمقابل یخبندان

مقاومت دربرابر یخبندان، خاصیتی از مصالح است که موجب‌می‌شود مصالحِ اشباع از آب و یا مرطوب، ضمن تحمل چرخه‌های متوالی یخ‌زدن- ذوب‌شدن، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، به‌ویژه مقاومت خود را ازدست‌ندهند. مقاومت دربرابر یخبندان به چگالی، نم‌پذیری(جذب رطوبت)، تخلخل و به‌ویژه کیفیت و نحوه خلل و فرج مصالح بستگی‌دارد.

جدول۱۰. جرم حجمی، تخلخل و جذب آب نمونه‌ها

نمونه	A وزن خشک(gr)	B پس از ۲۴ ساعت وزن نمونه‌اشباع(gr)	C ظاهری حجم نمونه (mlit)	تخلخل درصد $\frac{B-A}{C}\times100$	درصد جذ آب $\frac{B-A}{A}$	جرم حجمی $\frac{B}{C}$
۱	۱۸۱/۶	۲۱۲/۳	۱۲۷	۲۴/۱۷	۱۶/۹۰	۱/۶۷
۱ x	۱۸۴/۴	۲۱۳/۴	۱۲۵	۲۳/۲	۱۵/۷۲	۱/۷۰
۲	۱۴۲/۳	۱۵۱/۵	۱۱۰	۸/۳۶	۶/۴۶	۱/۳۷
۲ x	۱۴۹/۱	۱۵۵/۴	۱۱۴	۵/۵۲	۴/۲۲	۱/۳۶
۳	۱۶۴/۵	۱۸۹/۶	۱۱۵	۲۱/۸۲	۱۵/۲۵	۱/۶۴
۳ x	۱۷۶	۱۹۱/۲	۱۳۵	۱۱/۲۵	۸/۶۳	۱/۴۱
۴	۱۶۷/۷	۲۰۵	۱۱۵	۳۲/۴۳	۲۲/۲۴	۱/۷۸
۴ x	۱۷۶/۳	۲۰۴/۷	۱۲۶	۲۲/۵۳	۱۶/۱۰	۱/۶۲
۵	۱۵۰/۲	۱۷۳	۱۱۶	۱۹/۶۵	۱۵/۱۷	۱/۴۹
۵ x	۱۵۱/۶	۱۷۲/۸	۱۰۰	۲۱/۲	۱۳/۹۸	۱/۷۲
۶	۱۸۱/۶	۱۹۹/۴	۱۲۰	۱۴/۸۳	۹/۸۰	۱/۶۶
۶ x	۱۸۰/۷	۱۹۹/۵	۱۲۵	۱۵/۰۴	۱۰/۴۰	۱/۵۹
۷	۱۹۷/۱	۲۱۶/۷	۱۳۱	۱۴/۹۶	۹/۹۴	۱/۶۵
۷ x	۲۰۰/۴	۲۲۳/۴	۱۳۵	۱۷/۰۳	۱۱/۴۷	۱/۶۵
۸	۱۹۵/۵	۲۱۰/۷	۱۲۶	۱۲/۰۶	۷/۷۷	۱/۶۷
۸ x	۱۹۴/۸	۲۱۲/۹	۱۲۵	۱۴/۴۸	۹/۲۹	۱/۷۰
۹	۱۹۹/۴	۲۰۸/۹	۱۲۸	۷/۴۲	۴/۷۶	۱/۶۳
۹ x	۲۰۲/۴	۲۱۲/۳	۱۲۸	۷/۷۳	۴/۸۹	۱/۶۵
۱۰	۱۸۹/۹	۲۰۷/۳	۱۲۸	۱۳/۵۹	۹/۱۶	۱/۶۱
۱۰ x	۱۸۳	۲۰۵/۳	۱۳۳	۱۶/۷۶	۱۲/۱۸	۱/۵۴

(نگارندگان)

جدول۱۱. موئینگی آب در نمونه‌ها (حرکت آب روبه بالا در واحد زمان برحسب سانتی‌متر)

زمان/ کدنمونه	۱x	۱	۲x	۲	۳x	۳	۴x	۴	۵x	۵	۶x	۶	۷x	۷	۸x	۸	۹x	۹	۱۰x	۱۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳min	۱,۲	۱,۵	۰,۵	۰,۵	۱	۱	۱,۲	۱,۱	۰.۷۵	۰,۵	۱	۰.۷۵	۱,۵	۱,۵	۱,۲	۱,۵	۱,۵	۱,۵	۲	۱,۵
۱۰	۱,۵	۱,۵	۰.۷۵	۰.۷۵	۱,۲	۱,۲	۱,۷	۱,۵	۰.۷۵	۱	۱,۲	۱	۲	۲	۱,۷	۱,۸	۱,۶	۱,۷	۳	۲,۷
۱۶	۱,۷	۱,۸	۱,۱	۱,۲	۱,۵	۱,۸	۲	۱,۷	۰.۷۵	۱	۱,۵	۱,۲	۲,۵	۲,۷	۲	۲,۷	۲	۲,۳	۴	۳,۵
۲۱	۲,۱	۲,۳	۱,۷	۱,۷	۲	۲,۵	۲,۲	۲	۱	۱	۱,۷	۱,۳	۳	۳	۲,۱	۲,۸	۲,۲	۲,۵	۴,۲	۴
۲۷	۲,۲	۲,۵	۲	۲	۲,۱	۲,۶	۲,۵	۲,۲	۱,۱	۱,۱	۲	۱,۵	۳,۲	۳,۲	۲,۱	۲,۸	۲,۷	۳	۴,۳	۴,۲
۳۴	۲,۵	۲,۷	۲,۲	۲,۴	۲,۳	۳	۳	۲,۵	۱,۵	۱,۲	۲,۲	۲	۴	۴	۲,۷	۲,۸	۳,۲	۳,۳	۴,۵	۴,۵
۴۰	۳	۳,۱	۲,۵	۲,۶	۳,۱	۳,۲	۳,۱	۳,۶	۲	۱,۵	۲,۵	۲,۲	۴,۱	۴,۱	۳,۲	۳	۳,۸	۳,۷	۴,۷	۴,۸
۴۶	۳,۱	۳,۲	۲,۷	۲,۸	۳,۲	۳,۵	۳,۲	۳,۶	۲,۲	۱,۶	۲,۷	۲,۵	۴,۳	۴,۲	۳,۳	۳,۱	۳,۹	۴	۵	۵
۵۳	۳,۵	۴	۲,۹	۳	۳,۷	۴	۳,۷	۴	۲,۵	۲	۳	۲,۸	۴,۷	۴,۵	۳,۵	۳,۴	۴,۲	۴,۵		
۶۰	۴	۴,۲	۳,۲	۳,۳	۴	۴,۵	۴	۴,۱	۲,۷	۲,۲	۳,۵	۳,۲	۵	۵	۴	۳,۷	۴,۳	۴,۷		
۷۰	۴,۲	۴,۵	۳,۶	۳,۵	۴,۱	۴,۵	۴,۲	۴,۵	۲,۸	۲,۴	۳,۷	۳,۴			۴,۲	۴	۴,۵	۴,۸		
۷۷	۴,۵	۴,۸	۳,۸	۳,۷	۴,۵	۴,۹	۴,۴	۴,۶	۳,۱	۲,۷	۴	۳,۶			۴,۵	۴,۶	۵	۵		
۸۳	۵	۵	۴,۲	۴,۳	۵	۵	۴,۶	۴,۸	۳,۵	۳,۴	۴,۱	۳,۸			۴,۵	۴,۶				
۸۹			۴,۶	۴,۸			۵	۵	۴,۱	۳,۷	۴,۱	۴			۴,۶	۴,۷				
۹۵			۵	۵					۴,۳	۴,۱	۴,۲	۴,۱			۴,۷	۴,۷				
۱۰۵									۴,۵	۴,۴	۴,۵	۴,۳			۴,۸	۴,۸				
۱۱۲									۴,۸	۴,۶	۵	۵			۵	۵				
۱۲۰									۵	۵										
۱۳۰																				

(نگارندگان)

جدول۱۲. میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها در حالت خشک و اشباع

شماره نمونه	مقاومت فشاری درنمونه های خشک(KGR/CM۲)			مقاومت فشاری نمونه ی آبی (۸۰روز درآب)			میانگین مقاومت نمونه خشک	میانگین مقاومت نمونه خیس
۱	۷	۶	۶	۴	۵	۴	۶,۳	۴,۳
۲	۷	۶	۷	-	-	-	۶,۶	مقاومت بسیارکم
۳	۱۳	۱۰	۱۲	۶	۶	۵	۱۱,۶	۵,۶
۴	۱۰	۸	۱۲	-	-	-	۱۰	-
۵	۱۵	۱۶	۱۷	۷	۸	۷	۱۶	۷,۳
۶	۱۲	۱۱	۱۴	۹	۱۰	۸	۱۲,۳	۹
۷	۱۶	۱۲	۱۲	۱۸	۱۸	۱۶	۱۳,۳	۱۷,۳
۸	۷	۱۰	۸	۱۶	۱۴	۱۵	۸,۳	۱۵
۹	۱۰	۹	۱۲	۱۰	۱۲	۱۲	۱۰,۳	۱۱,۳
۱۰	۹	۸	۱۰	۱۴	۱۴	۱۳	۹	۱۳,۷

(نگارندگان)

مصالح متراکم و دارای حفره‌های ریزبسته، مقاومت خوبی دربرابر یخبندان دارند. درحالی‌که، مقاومت مصالح متخلخل دربرابر یخبندان کمتر است. البته، این مقاومت بستگی به آن دارد که آب، بیش از ۸۵ درصد نفوذ آنها را پرنکرده‌باشد که این تاحدودی، می‌تواند(ممکن است) قابل قبول باشد. به‌طور کمّی مقاومت به یخبندان مصالح، در آزمایشگاه با تعداد سیکل‌های ذوب- انجماد که نمونه‌ای از مصالح در شرایط اشباع از آب را می‌تواند تحمل‌کند، مشخص‌می‌شود. البته به‌شرط اینکه، افت مقاومت فشاری و وزن نمونه به‌ترتیب از۲۵ درصد و۵ درصد بیشتر نباشد. دمای یخبندان برای ملات معمولاً پایین‌تر از۱۷ درجه سانتی‌گراد درنظر گرفته‌نمی‌شود. اگرچه، آزمایش‌هایی نیز گزارش‌شده که دمای یخزدگی مصالح را در آنها تا ۶۴ درجه سانتی‌گراد رسانیده‌اند.

ازنظر تعداد سیکل‌های ذوب انجماد،معمولاً برای آزمایش مصالح تشکیل‌دهنده دیوارهای پیرامونی ساختمان‌ها ۱۵ تا ۳۵ سیکل درنظر گرفته‌می‌شود که در این آزمایش، ۲۵ سیکل ذوب ـ انجماد انجام‌شد. آزمایش‌های یخزدگی مصالح درنهایت، منجر به محاسبه ضریبی موسوم به ضریب مقاومت به یخبندان می‌شود.

$Kf= Rfr/ Rws$

Rfr= مقاومت فشاری نمونه پس از تحمل سیکل‌های ذوب ـ انجماد.

Rws= مقاومت فشاری نمونه در حالت اشباع از آب و قبل از یخزدن.

جدول۱۳. ضریب یخبندان

شماره نمونه	R_{ws}	R_{fr}	K_f
۱	۶	۵	۰,۸۳
۲	۳	۲	۰,۶۶
۳	۶,۵	۳	۰,۴۶
۴	۴	۳,۱	۰,۷۷
۵	۸	۱,۶	۰,۲
۶	۱۰	۲,۵	۰,۲۵
۷	۱۷	۱۴,۴۵	۰,۸۵
۸	۱۷	۱۵,۴	۰,۹۰
۹	۱۳	۶	۰,۴۶
۱۰	۱۵	۵	۰,۳۳

(نگارندگان)

مصالحی که Kf آنها بیشتر از ۰/۷۵ باشد، دربرابر یخبندان پایدار، شناخته‌می‌شوند(همان: ۳۸)،(جدول۱۳). براساس نتایج مندرج در(جدول۹)، نمونه‌های(۴،۱،۷و۸) نسبت به یخبندان مقاومت خوبی داشته‌اند.

نتیجه‌گیری

با مقایسه تمامی نمونه‌ها(جدول۱۴) و نتایج آزمایش‌های مختلف روی آنها، می‌توان کاربردهای متفاوتی برای این ملات‌ها درنظرگرفت. برای نمونه، ملات‌هایی با میزان خاکستر بالا برای کاربرد در شرایط مرطوب، مناسب هستند(نمونه۷). ملات‌هایی با میزان خاک رس بالا برای استفاده در شرایط خشک مفید هستند(نمونه۵). نمونه‌هایی با مقاومت فشاری بالا در حالت اشباع و مقاوم دربرابر یخبندان برای استفاده در محیط‌های سرد و مرطوب مناسب هستند(نمونه‌های ۷ و ۸).

درمجموع، این‌چنین می‌توان بیان‌داشت که ازلحاظ مقاومت فشاری، (نمونه‌های ۵، ۶ و ۷) از بهترین نمونه‌ها برای محیط‌های خشک و (نمونه‌های۷، ۸ و ۰۱) از بهترین نمونه‌ها برای محیط‌های مرطوب هستند. از میان آنها، (نمونه‌های۷ و ۸) برای محیط‌های سرد و مرطوب از همه بهتر هستند. باید یادآورشد که نحوه و کیفیت ساخت ملات، عمل‌آوری و نگهداری آن تا پایان واکنش‌های شیمیایی، تأثیر بسیار مهمی روی کیفیت ملات خواهدداشت. برای بررسی جزئیات نمونه‌ها ازنظر خصوصیات فازهای تشکیل‌دهنده و مقایسه آنها با نمونه‌های تاریخی روی (نمونه‌های ۲و ۶)، آنالیز(XRD) صورت‌گرفت.

(نمونه۲)، جزء ضعیف‌ترین نمونه‌ها و (نمونه۶)، جزء نمونه‌های خوب برای محیط‌های خشک است. مقاومت (نمونه۶) برای محیط‌های مرطوب نیز به‌نسبت خوب است. مقاومت نمونه خیس آن ۹ ۲kg/cm است.

از مقایسه نتایج آنالیز(XRD) دو نمونه بالا نیز نتایج جالبی به‌دست‌آمد؛ وجود میزان قابل توجهی از Ca(OH)2یا همان آهک شکفته به‌دلیل کامل‌نشدن واکنش‌های آهک با(CO2) برای تشکیل کربنات کلسیم (CaCO3و واکنش‌های آهک با(SiO2) برای تشکیل سیلیکات کلسیم(Ca2SiO4) است که آن هم به‌علت عمر کوتاه نمونه است.

(نمونه۲)، با میزان کربنات کلسیم بیشتر مقاومت کمتری دارد حال‌آنکه، در (نمونه۶)، میزان سیلیس و ترکیبات آن بیشتر است. ازین‌رو، مقاومت بهتری دارد. مقدارکوارتز در (نمونه ۶)، به‌دلیل استفاده بیشتر از ماسه، بالاتر است. در این نمونه به‌سبب استفاده ازخاک رس بیشتر، درصد آلبیت نیز بالاتر است. حضور موسکویت در این دو نمونه هم، بیانگر به‌کارگیری خاک رس در ساخت آنها است که همراه آلبیت آشکارمی‌شود.

در مقایسه با ملات‌های مشابه تاریخی در این دو نمونه، میزان کلینوکلر ناچیز است که دلیل آن، عمر کوتاه نمونه‌ها است چراکه، ایجاد این فاز به زمان بیشتری نیازدارد(جدول۱۵).

جدول۱۴. مقایسه تمامی نمونه‌های ساخته‌شده

شماره نمونه	میانگین درصد تخلخل	میانگین درصد جذب آب	میانگین جرم حجمی	میانگین مقاومت فشاری نمونه خشک	میانگین مقاومت فشاری نمونه تر	ضریب مقاومت یخبندان	درصد آهک	درصد خاکستر	درصد لویی	درصد ماسه	درصد خاک رس	درصد انقباض درحین گیرش
۱	۲۳,۶۸	۱۶,۳۱	۱,۶۸	۶,۴	۵,۵	۰,۸۳	۳۳,۷۹	۹,۶۲	۷,۲۳	۳۸,۵۶	۱۰,۸۵	۱,۸
۲	۶,۹۴	۵,۳۴	۱,۳۶	۶,۲	بسیارکم	۰,۶۶	۴۴,۴۴	۳۱,۱۱	۸,۸۸	۸,۸۸	۶,۶۶	۲,۵
۳	۱۶,۵۳	۱۱,۹۴	۱,۵۲	۱۱,۶	۶,۱	۰,۴۶	۳۱	۲۱,۵	۸,۶۲	۳۸,۷۹	-	۰,۸
۴	۲۷,۴۸	۱۹,۱۷	۱,۷	۱۰	-	۰,۷۷	۳۱,۷	۲۰,۳۲	۸,۱۳	۳۴,۱۵	۴,۸۷	۱
۵	۲۰,۴۲	۱۴,۵۷	۱,۶	۱۶,۲	۷,۸	۰,۲۰	۵۱,۴۲	۸,۵۷	۶	-	۳۴	۲,۸
۶	۱۵,۱۱	۱۰,۱	۱,۶۲	۱۲,۴	۹,۸	۰,۲۵	۳۶	-	۸,۵	۳۰	۲۵	۲,۱
۷	۱۵,۹۹	۱۰,۷۰	۱,۶۵	۱۳,۶	۱۷,۳	۰,۸۵	۳۲	۴۰	۸	۲۰	-	۱,۵
۸	۱۳,۲۷	۸,۵۳	۱,۶۸	۸,۲	۱۶,۱	۰,۹۰	۳۲	۲۰	۸	۲۰	۲۰	۱,۳
۹	۷,۵۷	۴,۸۲	۱,۶۴	۱۰,۴	۱۲,۵	۰,۴۶	۲۷,۹۲	۲۲,۵۲	۹	۲۷,۰۲	۱۳,۵۱	۰,۳
۱۰	۱۵,۱۷	۱۰,۶۷	۱,۵۷	۸,۴	۱۴,۳	۰,۳۳	۲۸,۵۷	۲۸,۵۷	۹,۵۲	۲۸,۵۷	۴,۷۶	۰,۵

(نگارندگان)

جدول۱۵. مقایسه XRD نمونه‌های ۲ و ۶

Compound Name	Formula	Concentration **2** (%W/W)	Concentration **6** (%W/W)
Portlandite,syn	Ca (OH)2	39.3	29.8
Quartz,syn	SiO2	16.1	31
Calcite,syn	CaCO3	34.7	26.4
Muscovite	H2KAl3(SiO4)3	4.3	4.4
Clinochlore	Mg-Fe-Fe-,Al-Si-O-OH	1.4	2.2
Albit, calcian,ordered	Na,Ca)Al(Si,Al)3O8)	4.1	6.2

(نگارندگان)

سپاس‌گزاری

درپایان، برخود لازم‌می‌دانیم که از کارمندان دانشگاه هنر اصفهان به‌ویژه دانشکده مرمت که امکان این مطالعه را با در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی برای ما فراهم‌آوردند، مراتب تشکر و امتنان خود را بیان‌کنیم.

پی نوشت

1- Hydraulicity

2- Roman lime

۳- **آنالیز** (XRD (X-ray Diffraction: از آنالیزهای دستگاهی است که برای شناسایی کیفی انواع کانی‌ها(دارای ساختاربلوری) و فازهای موجود در مواد، استفاده‌می‌شود. ازجمله مواد قابل شناسایی با این دستگاه انواع سنگ‌ها، سرامیک‌ها(سفال وآجر و.....)،ملات‌ها، خاک‌ها و محصولات خوردگی آثار فلزی است (هادیان، ۱۳۸۶ :۱۸۴).

۴- **آنالیز** (TG/DTG (Thrmal Methods: این نوع آنالیز، جزء آزمایش‌های حرارتی به‌شمارمی‌رود. آنالیز TG/DTG درمورد نمونه‌هایی قابل اجراست که امکان وجود مواد آلی به‌صورت قابل توجه در آن نمونه موجود باشد(همان:۱۷۵).

۵- حدود آتربرگ atterberg به‌عنوان درصد رطوبت متناظر با شرایط رفتاری متفاوت سیلیت‌ها و رس‌ها تعریف‌شده‌است. اگرچه در اصل، آلبرت آتربرگ(۱۹۱۱) شش محدوده را تعریف‌کرده‌است لیکن در مهندسی ژئوتکنیک اصطلاح حدود آتربرگ تنها به حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و حد انقباض (SL)، اطلاق‌می‌گردد.

6- Clinocholore

7- (Plastic Index) PI

8- (Liquid Limit) LL

9- Quartz

منابع

- الکرجی، ابوبکر محمدبن‌الحاسب(۱۳۴۵). **استخراج آبهای پنهانی**، ترجمه حسین خدیوجم، تهران: بنیاد فرهنگ ایران.
- حامی، احمد (۱۳۷۸). **مصالح ساختمان**،تهران: مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.
- حسینی‌سیر، حسین(۱۳۸۱). (**بررسی ملات‌های به‌کاربرده‌شده در ذیقورات چغازنبیل، بهینه‌سازی و ساخت ملات حفاظتی**)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.
- رحیمی ،حسن (۱۳۸۵). **مصالح ساختمانی**، تهران، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران .
- گروه مؤلفان(۱۳۸۵). **مصالح ساختمانی، یادنامه احمد حامی**، ویراستار جواد فرید، تهران: مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.
- هادیان، منیژه(۱۳۸۶) .**کاربری پژوهش‌های آزمایشگاهی درحفاظت و مرمت بناهای تاریخی**، تهران: مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.

- ASTM. Annual Book of ASTM Standard. Standard specification for building. (1988).
- Bognton, R.S. (1966). **Chemistry and Technology of Lime and Limestone**. New York: Interscience.
- Cowper, A.D. (1998). **Lime and Lime Mortars**. London: Donhead.
- Ellis, P. (2002). The analysis of mortars: The past 20years. *www.building conservation.com* (accessed 13 September 2006).
- Ropp (Rip), D. (2004). Characterization of Mortars and Pozzolanic Materials from Umm al-Jimal. **Studies in Conservation,** Vol 49.N 3: 145.

Received:2011/06/22
Accepted:2013/05/12

An Investigation of Historical Lime Mortars (Saruj)

Case study: Shahzadeha public bath in Isfahan

Dariush Heidari* **Hamed Younesi**** **Gholamreza Vatankhah*****

Abstract

Having an old civilization, Persia is among important countries in the world with rich architecture. The remains of different historical priods show not only the evolution and transformation of Persian architecture but also the evolution and development of knowledge of static, structure and production of different kinds of building materials.

Sustainability of Persian architecture is due to different parameters among which building materials is one of the main principles of monuments' survival.

Persians have used their talents to devise a variety of mortars suitable for the conditions of each building. Due to the smart considerations in mortar production, these mortars are still very well preserved and have not lost their qualities after centuries. This paper investigtes the structure and composition of a special kind of mortar which is very important in choosing the suitable method of coservation and restoration. This mortar is a kind of historical lime one – Saruj – which has been identified and accordingly a method for its preparation has been proposed which is suitable for conservation and restoration purposes.

Keywords: historical mortar, lime mortar, Saruj, XRD, TG/DTG

Lecturer, Faculty of Restoration, Art University of Isfahan, Iran.
M.Sc, Faculty of Restoration, Art University of Isfahan, Iran.
Assistant Professor, Faculty of Restoration, Art University of Isfahan, Iran.