آسیب‌شناسی آجرنمای گنبد خواجه نظام‌الملک در مسجد جامع اصفهان

حمید فدایی
عضو هیئت علمی پژوهشکدهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی ـ فرهنگی
hfadaii@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۶

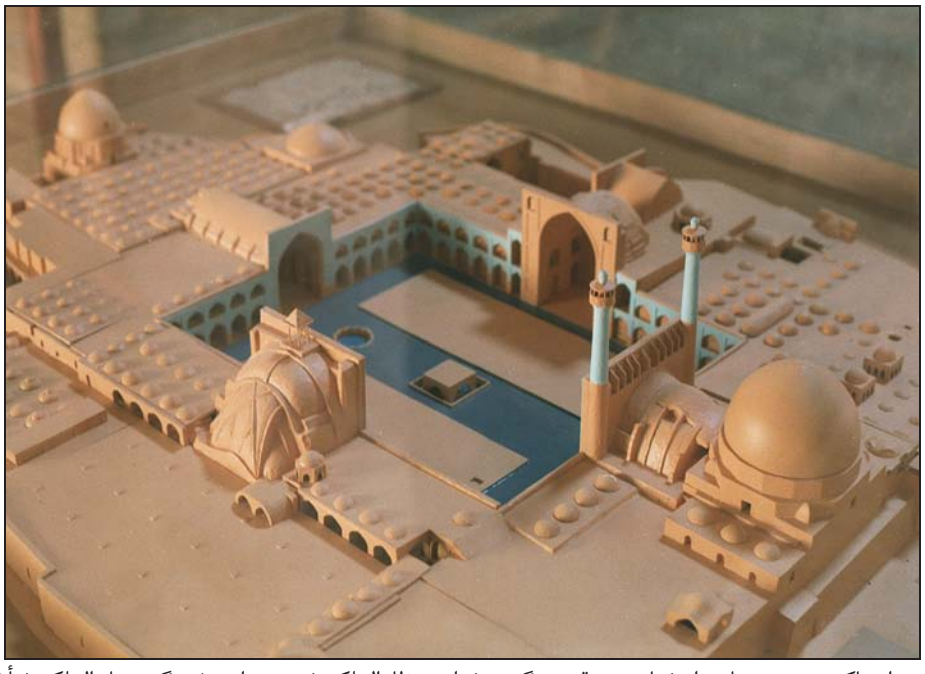
چکیده
گنبد خواجه نظام‌الملک در مسجد جامع اصفهان گنبدی است هزارساله که امروزه به علت آسیب‌دیدگی شدید آجرنمای داخلی آن، بخشی از هماهنگی و توازن بصری در سیمای تاریخی آن مخدوش شده است. علاوه بر این احتمال می‌رود این خدشه استحکام ساختاری بنا را نیز با مشکل روبه‌رو سازد. با توجه به اهمیت این مسئله ضروری به نظر می‌رسید مشکل آجرها ریشه‌ای مطالعه و آسیب‌شناسی شود.

به منظور درک درست یک چنین فرآیند تخریبی، روی نمونه‌های آجر و همچنین دیگر مصالح مورد استفاده در گنبدخانه همچون ملات و اندودها، آزمایش‌های متعدد فیزیکی و شیمیایی همچون اندازه‌گیری تخلخل، آزمایش یخزدگی، آنالیز XRD و FT-IR و بررسی‌های میکروسکوپی شامل پولاریزان نوری و میکروسکوپ الکترونی (SEM-EDX) انجام شد و مصالح مذکور به لحاظ کمی و کیفی بررسی شدند[1]. انجام این مطالعات دورنمایی از مشکلات اساسی‌ای که آجرهای گنبدخانه دستخوش آن هستند ارایه داده است که مقالهٔ حاضر بدان می‌پردازد.

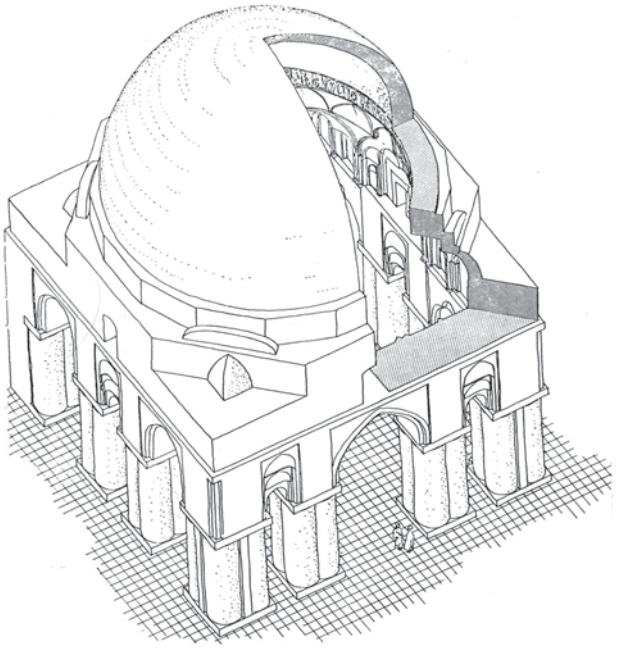
واژه‌های کلیدی
آجرنما، آسیب‌شناسی، گنبد خواجه نظام‌الملک

مقدمه

مسجد جامع اصفهان، گنجینهٔ هنر ایران، اثری است ماندگار با کوله‌باری از خاطره و یادگار که نشانه‌هایی از سیزده قرن تحول فرهنگ و معماری اسلامی ایـران را در خـود جمـع دارد. گنبـد نظـام‌الملـک واقـع در ایـن مسـجد در دورهٔ سلجوقیان ساخته شده که به سبب ایجاد تحول اساسـی در ساختار معماری مساجد این دوره و خاستگاه تبدیل آنها از طرح شبستانی به طرح گنبدخانـه‌ای و سـپس چهـارایوانی، نقطـهٔ عطفـی اسـت در شـیوهٔ مسجدسـازی و از جایگـاه ویژه‌ای برخوردار است (تصاویر ۱ و ۲).



تصویر ۱. نمایی از ماکت مسجد جامع اصفهان و موقعیت گنبد خواجه نظام‌الملک (سمت راست) و گنبد تاج‌الملک (مأخذ: نگارنده).



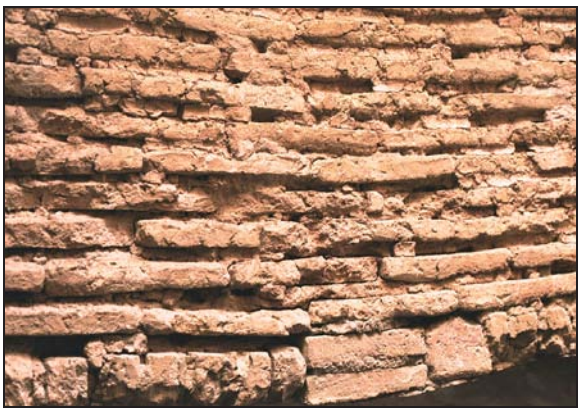
تصویر ۲. طرحی از گنبد خواجه نظام‌الملک در مسجد جامع اصفهان قبل از انجام الحاقات بعدی (مأخذ: Galdiery، 1972).

با وجود آنکه با اتکا بر محاسبات دقیق و مکانیک بی‌نقص، این گنبد هزارساله تا به امروز پا برجاست، ولی در گذر زمان سیمای درونی آن با دگرگونی‌های فراوانی روبه‌رو بوده است. عمده‌ترین این دگرگونی‌ها فرسودگی شدید سطوح آجری است به گونه‌ای که علاوه بر برهم خوردن و مخدوش شدن هماهنگی و یکپارچگی سیمای داخلی گنبدخانه، بیم آن می‌رود استحکام ساختاری بنا نیز با مشکل روبرو شود.

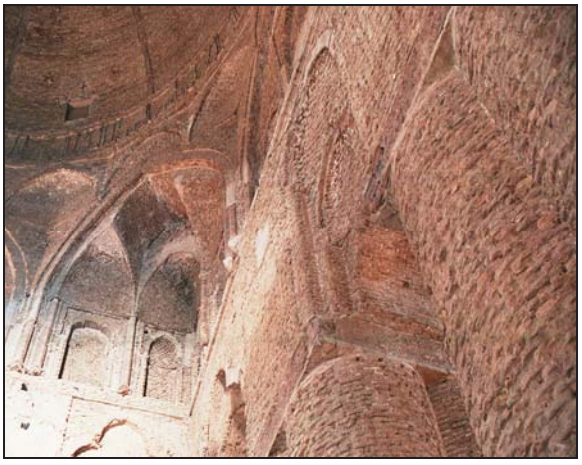
بررسی‌ها نشان می‌دهند که گنبد نظام‌الملک تنها بخش شاخص در مسجد جامع است که با این مشکل مواجه است. حتی بنای تاج‌الملک واقع در بخش شمالی مسجد هم که با فاصلهٔ زمانی کم، با این گنبد هم‌دوره ساخته شده است با چنین مشکلی روبه‌رو نیست.

آسیب‌دیدگی نمای آجری و خردشدگی سطحی آجرها در این گنبدخانه اساسی‌ترین مشکل آن است که همه جا روی پیکرهٔ بنا مشاهده شده است؛ از جمله در آجرنمای داخلی و بیرونی گنبدخانه، آجرهای پایهٔ ستون‌ها، و آجرهای مورد استفاده در زیرِ گنبد و زیرطاقی‌ها (تصاویر ۳ تا ۵). حتی بخشی از این آجرها (آجرهای واقع بر نمای بیرونی و رو به صحن گنبدخانه) که در همان دورهٔ سلجوقی، همزمان با الحاق ایوان جنوبی، پشت این گنبد پنهان مانده بودند، با مشکلی مشابه روبه‌رو هستند.

تصویر ۳. آسیب‌های وارده به آجرنما بر روی نمونه‌ای از ستون‌های گنبدخانه (مأخذ: نگارنده).



تصویر ۴. آسیب‌های وارده به آجرنمای یکی از زیر طاقی‌های گنبدخانه (جبههٔ شمالی) (مأخذ: نگارنده).



تصویر ۵. فضای زیر گنبد نظام‌الملک و یکی از گوشوارهای تزیینی آن (مأخذ: نگارنده).

روش مطالعه

این بررسی با مشاهده و مستندنگاری اولیهٔ آسیب‌ها آغاز شد و ضمن نمونه‌برداری از مصالح، آزمایش‌های زیادی بر روی آنها انجام شد. برخی از این آزمایش‌ها روی نمونه‌هایی از آجرهای گنبد تاج‌الملک نیز انجام شده است. این موضوع بدان خاطر بود که در بیش‌تر موارد، لازم بود تا معیاری ثابت برای تحلیل آسیب‌های بنا وجود داشته باشد تا بتوان با مقایسه به نتیجهٔ کامل‌تری دست یافت . گنبد «تاج‌الملک» دیگر گنبد مسجد جامع است که ساخت آن تقریباً در یک دوره و با فاصلهٔ زمانی اندک با گنبد نظام‌الملک اتفاق افتاده است. به هنگام نمونه‌برداری از

مصالح گنبد خواجه نظام‌الملک موارد و نکات زیر مورد توجه قرار گرفت:

۱. از نقاط مختلف گنبدخانه و در ارتفاعات مختلف آن نمونه‌برداری شد تا بتوان به لحاظ ساختاری اختلاف‌های احتمالی آنها را بررسی و مقایسه کرد. لذا مکان‌های نمونه‌گیری در آجرنمای داخلی و بیرونی گنبدخانه پراکنده بود. همچنین کمینه و بیشینهٔ ارتفاع محل‌های نمونه‌گیری بین ۳۰ سانتی‌متری کف تا ارتفاع ۱۷ متری متغیر بود.

۲. نمونه‌ها از سطح و یا عمق تهیه شدند در برخی موارد عمق محل نمونه‌گیری بالغ بر ۳۰ سانتی‌متر بود .عمق فرسایش آجرنما در این مکان‌ها به آسانی امکان نمونه‌گیری را فراهم می‌ساخت.

۳. نمونه‌گیری از میان آجرهای مختلف به عمل آمد. این تنوع در خصوصیات ساختاری آجرها همچون ابعاد و اندازه و یا رنگ آنها و یا در ویژگی‌های فرسایشی آنها به چشم می‌خورد. لذا نمونه‌های آزمایشی عمدتاً از بین آجرهای فرسایش‌یافته یا نمونه‌های با ظاهر نسبتاً سالم انتخاب شدند.

میزان تخلخل آجرها

بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری تخلخل آجرها، میانگین آن را برای آجرهای گنبد نظام‌الملک، ۵۱/۱۵ درصد نشان می‌دهد. میزان این تخلخل بین آجرهای آسیب‌دیده و آجرهای به ظاهر سالم‌تر نیز اختلاف معناداری را نشان نمی‌دهد. وزن مخصوص آجرها ۱/۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب برآورد شده است. میزان تخلخل و دانسیته آجر فوق با روش استاندارد فن DIN 51056 اندازه‌گیری شده است. با در نظرگرفتن روش سنتی تهیهٔ آجر در ادوار پیشین، مقادیر تخلخل و دانسیتهٔ اندازه‌گیری‌شده نشانگر حدود و مقادیر استانداردی است، کما اینکه میزان تخلخل آجرهای گنبد تاج‌الملک نیز همین حدود را نشان داده است.

آزمون یخ‌زدگی

گنبد نظام‌الملک با توجه به قرار گرفتن در جبههٔ جنوبی مسجد جامع و سایه‌گیر بودن، وضع مستعدی برای یخ‌بر شدن مصالح در ماه‌های سرد سال داشته و به نظر می‌رسد این موضوع در یک دورهٔ زمانی بلند، حتماً آجرهای نظام‌الملک را آسیب‌پذیرتر کرده است. به منظور بررسی مقاومت آجرهای آسیب‌دیده در برابر شرایط یخبندان، به انجام آزمون یخ‌زدگی بر روی نمونه‌های آجر مبادرت شد . این آزمون بر روی تمامی نمونه‌هایی که قبلاً تخلخل آنها اندازه‌گیری شده بود، انجام پذیرفت. در آزمون یخ‌زدگی از استاندارد پیشنهادی ASTM[۲] بهره گرفته شد.

انتظار می‌رفت با انجام این آزمون در مورد آجرهای آسیب‌دیدهٔ گنبد نظام‌الملک بتوان بخش عمده‌یی از فرآیند تخریبی آجرها را در این گنبد به مسئله یخ بُر شدن آنها نسبت داد. در این‌باره چند نمونه آجر نیز از گنبد تاج‌الملک انتخاب شد تا بتوان شدت آسیب‌های وارده را مقایسه کرد. اما بر خلاف انتظار در این آزمون آجرهای آسیب‌دیدهٔ گنبد نظام‌الملک از خود مقاومت نسبتاً خوب و هم‌پایه با نمونه‌های گنبد تاج‌الملک نشان دادند. به گونه‌ای که نخستین آثار فرسایش و جداشدگی قطعات آجر پس از طی ۱۵ الی ۲۰ دوره یخ‌زدگی بروز کرد.

تأثیر شرایط محیطی در روند فرسایش آجرهای گنبدخانه

بررسی وضعیت هوا و اقلیم اصفهان نشان می‌دهد که این شهر دارای آب و هوای خشک، زمستان سرد و تابستان گرم است معمولاً پس از گذشت اسفند و تا اردیبهشت امکان افزایش حرارت بسیار سریع است و فصل گرمای شدید از اوایل خردادماه شروع می‌شود و تا شهریور ماه

ادامه دارد. در این مدت حداکثر حرارت ممکن است به ۴۰ درجهٔ بالای صفر هم برسد. در پاییز از دمای هوا به‌تدریج کاسته می‌شود و تغییرات دمای روزانه بسیار کم است. اولین یخبندان در اواخر آبان ماه ظاهر می‌شود. در ماه‌های دی و بهمن حدود ۴۵ روز احتمال یخبندان وجود دارد . همچنین در طول سال به طور متوسط ۱۶ روز با دمای ۴ درجهٔ زیر صفر و چهار روز با دمای ۱۲ درجهٔ زیر صفر وجود دارد (کسمایی، ۱۳۷۲).

بررسی آمار نشان می‌دهد شرایط یخبندان در بسیاری از روزهای زمستان حتی در شرایط با کم‌ترین رطوبت نسبی، امکان‌پذیر است. این‌چنین فرایندی اگر چه دارای آهنگ کندی هم باشد، در یک دورهٔ هزارساله و در کنار سایر عوامل تاثیرگذار، می‌توانسته باعث آسیب‌های جدی به آجرنما شود. این موضوع به‌ویژه در مورد بخش‌هایی از بنا که در تماس مستقیم با رطوبت بوده، کاملاً مصداق داشته و به همین علت به پایهٔ ستون‌های گنبدخانه که در تماس مستقیم با رطوبت‌های تصاعدی بوده است، به مراتب صدمات بیش‌تری وارد آمده است. شدت آسیب‌ها در این بخش‌ها گاه تا حدی است که آجرنمای آن کاملاً متلاشی شده و هستهٔ مرکزی ستون‌ها نمایان شده است.

نقش نمک‌های محلول

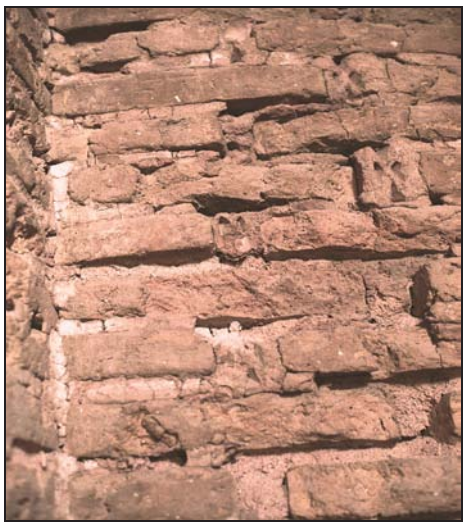
در حال حاضر تنها جای گنبد که دچارا شوره‌زنی فعال است، بخشی از دیوارهٔ جنوبی گنبدخانه در بالای ازاره‌های سنگ مرمر آن است. آثار رطوبت تصاعدی نیز در این بخش دیده می‌شود و (تصویر ۶) نتایج XRD شوره‌های موجود در این بخش را NaCl نشان داده است (جدول ۱).

همچنین نتایج آنالیزهای FT-IR روی سایر دیواره‌ها نشان‌دهندهٔ حضور مقادیری کربنات و نیترات در نمونه‌های آجر است (جدول ۲). به منظور شناخت بهتر دیگر مصالح همجوار با آجرها (همچون ملات مورد استفاده بین آجرها و اندود به‌کاررفته بر روی برخی از دیواره‌های گنبدخانه) و ارزیابی دقیق‌تر منشأ نمک‌ها، بررسی‌هایی به عمل آمده است که در ادامه به نتایج آن پرداخته می‌شود.

تصویر ۶. شوره‌زنی فعال بر روی آجرهای دیوارهٔ جنوبی گنبدخانه (مأخذ: نگارنده).

بررسی ترکیب ملات بین آجرها

آنالیزهای XRD ترکیب نمونه ملات‌های مورد استفاده در گنبد نظام‌الملک مواد تشکیل‌دهندهٔ آنها را عمدتاً از نوع گچ با مقادیری آهک نشان می‌دهد (جدول ۳). برای بندکشی و اجرای تزیینات گچبری (نقوش مهری) بینابین آجرها نیز از ملات گچ استفاده شده است (تصویر ۷). طبق آنالیزهای FT-IR ترکیبات سولفات، کربنات و گاه نیترات در نمونه‌های ملات شده است (جدول ۳). با توجه به این نتایج، وجود مقادیر کمی از ترکیبات کربنات و گاه نیترات در آجرهای گنبدخانه را می‌توان به حضور این ترکیبات در ملات‌ها نسبت داد که با گذشت سالیان دراز و در مجاورت منابع رطوبت به درون ساختار آجرها راه یافته است.



تصویر ۷. نمونه‌ای از بندکشی‌های گچی همراه نقوش مهری (مأخذ: نگارنده).

بررسی ترکیب اندود دیوارها

برخی از دیواره‌های گنبدخانه دارای اندود گچ (جدول ٤) به ضخامت حدود یک سانتی‌متر است که در دوره‌های متأخرتر (احتمالاً دوره صفویه) به عنوان سفیدکاری روی سطوح آجرنما کشیده شده است.[۳] به نظر می‌رسد اجرای این اندود به منظور پوشش‌دهی سطوح آجری تخریب شده بوده است، زیرا آجرنمای موجود در زیر این اندود ساختاری بسیار سست دارد. اندود گچ، سطوح آجری را تا ارتفاع گوشواره‌ها می‌پوشانده است (تصویر ۸).

تصویر۸: تصویری از دیواره‌های غربی و شمالی گنبدخانه قبل از کندن اندود گچ از روی دیواره‌ها (Galdieri ، 1972)

در آنالیزهای FT-IR انجام‌شده بر روی اندود الحاقی علاوه بر ترکیبات سولفات و سیلیکات، مقادیر کمی کربنات و نیترات نیز شناسایی شده است (جدول ٤). در آزمایش‌ها امکان نفوذ نمک‌های مضری همچون سولفات‌ها از لایهٔ گچ به درون ساختار آجرها مورد بررسی قرار گرفته است. در این باره طیف‌های XRD که از دو بخش سطحی و عمقی یک نمونه آجر گنبد نظام‌الملک تهیه شده، نشان‌دهندهٔ حضور مقادیری سولفات در ساختار لایهٔ سطحی است، در حالی که لایهٔ عمقی‌تر را (در عمق ۲ سانتی‌متری) فاقد سولفات نشان داده است. لذا به نظر می‌رسد که مقادیر سولفات شناسایی‌شده مربوط به لایهٔ گچِ الحاقی باشد. به طور کلی نتایج بررسی‌ها بر روی آجرهای گنبدخانه، حضور شوره‌های سولفات، کربنات، و نیترات را در ساختار آجرها تا اندازه‌ای اندک نشان می‌دهد و این مقدار اندک نمی‌تواند عامل اصلی تخریب سطوح آجرنما محسوب شود.

تأثیر آلایندهای هوایی بر آجرنمای گنبدخانه

امروزه در شهر صنعتی اصفهان آلودگی هوایی به عنوان یک مشکل مهم زیست‌محیطی تلقی می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش‌ها وجود مقادیری نیترات شناسایی‌شده در ساختار آجرها را می‌توان به حضور آلاینده‌ها نسبت داد (ذبیحی، ۱۳۷٦). مقایسهٔ طیف‌های FT-IR مربوط به آجرهای گنبد نظام‌الملک نشان می‌دهند که نمونه‌های عمقی‌تر بر خلاف نمونه‌های سطحی فاقد ترکیبات نیترات هستند.

نمونهٔ آجر با کد N-b-11 که از عمق ۳۰ سانتی‌متری دیوارهٔ آجری برداشته شده است، هیچ‌گونه ترکیب نیتراتی را نشان نمی‌دهد (جدول۲، نمودار ۱ در حالی که طیف FT-IR سایر نمونه‌های برداشت‌شده از سطح همچون N-b-1 و N-b-2 مقادیری نیترات را نشان می‌دهند

(جدول۲، نمودار ۲) که خود می‌تواند نشانگر محفوظ ماندن آجرهای عمقی‌تر از تأثیر آلودگی‌های هوا باشد. همچنین نمونهٔ آجرهای انتخاب‌شده از نمای بیرونی گنبدخانه در ارتفاع بخش شمالی که بعدها با احداث ایوان پشت آن و در محیطی کاملاً بسته محفوظ مانده بود، فاقد ترکیبات نیترات بوده است.

بررسی کانی‌شناسی آجرها

یکی از فرضیات در آسیب‌دیدگی آجرنمای گنبدخانه نظام‌الملک، نواقص و مشکلات مربوط به پخت آجرها بود. در آنالیزهای XRD فازهای کوارتز، پیروکسن، و فلدسپات معمول‌ترین ترکیباتی بودند که در آجرها شناسایی شده اند (جدول ۵). در این میان حضور پیروکسن که از جمله فازهای دمای بالا به شمار می‌رود، در بیش‌تر نمونه‌ها گزارش شده است.

فاز پیروکسن در آجر معمولاً به عنوان یک کانی ثانویه محسوب می‌شود که حاصل ترکیب اکسید کلسیم با محصولات تجزیهٔ کانی‌های رسی در دماهای بالاست. این فاز غالباً در دمای پخت بالای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد پدید می‌آید. لذا عملاً انتظار می‌رود در محصولاتی یافت شود که کاملاً پخته باشند. لازم به اشاره است که به سبب سنتی بودن کوره‌های پخت آجر در ادوار گذشته و نیز با توجه به محدودیت‌ها و مشکلات سوختی این کوره‌ها، دما در این کوره‌ها اغلب پایین‌تر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است، لذا تشکیل کانی‌های دمای بالا، همچون فازهای پیروکسن و مولیت به‌ندرت اتفاق می‌افتاده است.

لازم به ذکر است که نتایج آزمایش‌های XRD همیشه نمی‌تواند مبنایی برای شناخت دقیق محدوده‌های حرارتی قرار گیرد. کما اینکه حضور گدازآورها دامنه‌های حرارتی و تشکیل فازها را از حد معمول پایین‌تر می‌آورد.[۴] معمولاً با وجود مقادیری گدازآور و در دماهای پایین‌تر از ۸۰۰ درجه، نوعی شبه‌فاز نزدیک به ولاستونیت که از خود خصوصیاتی مشابه شبکهٔ سیلیکات کلسیم را نشان می‌دهد و حالتی نیمه‌آمورف دارد، شروع به تشکیل می‌کند. ممکن است این شبکه در طیف‌های XRD خواصی نزدیک به کانی‌های دمای بالا را بروز دهد.

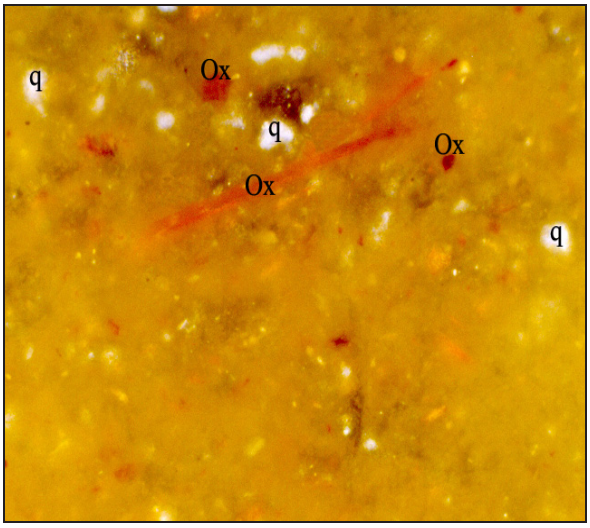
همچنین کانی‌هایی همچون دیوپسید (Diopside) و اوژیت (Augite) از جمله پیروکسن‌هایی هستند که برخلاف معمول در دمای پایین‌تر پخت نیز پدید می‌آیند. با توجه به این موارد، دیده شدن فاز پیروکسن در آنالیزهای XRD نمی‌توانست کامل بودن پخت آجرها را توجیه کند. لذا در ادامه بررسی‌های کانی‌شناسی آجرها به مطالعات میکروسکوپی اقدام شد. مطالعات بخش میکروسکوپی، مکمل آنالیزهای XRD است و در شناسایی فاز آمورف یا بدون شکل کمک عمده‌ای می‌کند (پایدار، ۱۳۷۷).

مطالعهٔ آجرها با میکروسکوپ پولاریزان نوری (Polorizan Microscope)

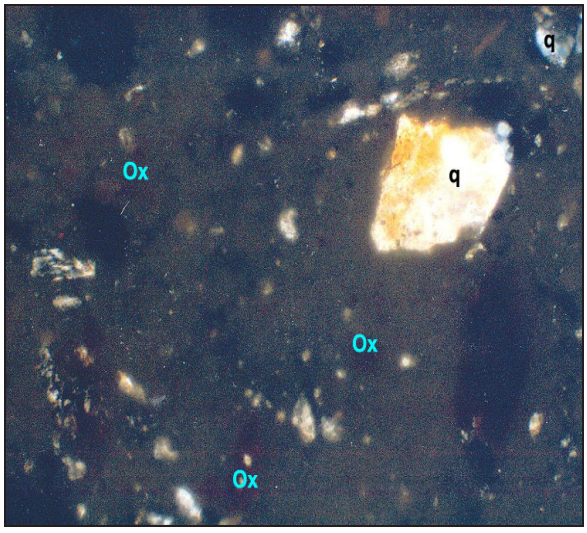
در بررسی‌ها با میکروسکوپ نوری اجزای قابل تشخیص در مقاطع نازک آجرها عبارت بودند از: دانه‌های ریز میکا (Mica)، دانه‌های اکسیدآهن[۵]، کوارتز (Quartz)، و فلدسپات‌ها (Feldspar) که این اجزا همه به صورت ذراتی پراکنده در زمینه‌ای از شیشه دیده می‌شوند. در ایجاد این فاز شیشه‌ای حضور کانی‌هایی با نقطهٔ ذوب پایین در خاک رس و همچنین نقش ناخالصی‌هایی همچون ذرات اکسید آهن در مادهٔ اولیه را نباید از نظر دور داشت.

میکاها که در اثر دمای پخت، آب از دست داده و اکسیده شده‌اند همه جا با اکسید آهن آغشته اند (تصویر ۹). ذرات فلدسپات نیز به مقادیر بسیار اندک در بافت نمونه‌ها شناسایی شده است. در بررسی میکروسکوپ نوری، بافت آجرهای گنبد نظام‌الملک به لحاظ دانه‌بندی، ناهمگن تشخیص داده شد که می‌تواند ناشی از عدم

اختلاط کامل و یکنواخت مادهٔ اولیه‌ای باشد که آجر با آن ساخته شده است (تصویر ۱۰). این پدیده می‌توانسته در پایین آوردن کیفیت آجرها مؤثر بوده و از جمله عوامل تسریع‌کنندهٔ روند فرسایش آجرها باشد.



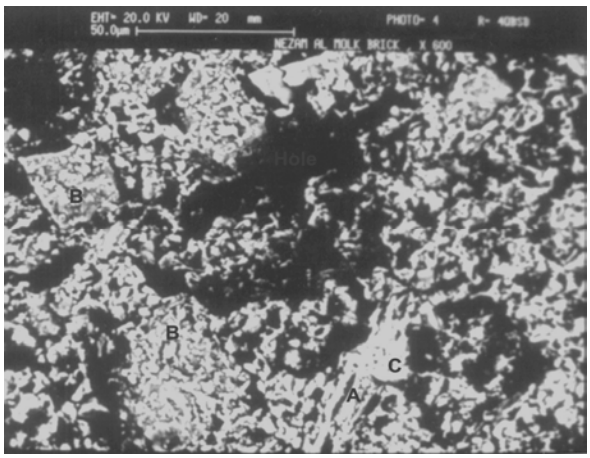
تصویر ۹. مقطع نازک آجر گنبد نظام‌الملک، فازهای مختلف میگا با آغشتگی اکسید آهن (Ox) و کوارتز (q) در زمینه‌ای از فاز شیشه به رنگ زرد، میکروسکوپ پولاریزان نوری (288× , XPL)
(مأخذ: نگارنده).



تصویر ۱۰. مقطع نازک آجر گنبد نظام‌الملک، فازهای مختلف میکا با آغشتگی اکسید آهن (Ox) و کوارتز (q) در زمینه‌ای از فاز شیشه به رنگ زرد، میکروسکوپ پولاریزان نوری (288× , XPL)
(مأخذ: نگارنده).

بررسی آجرها با میکروسکوپ الکترونی (Scanning Electron Microscope)

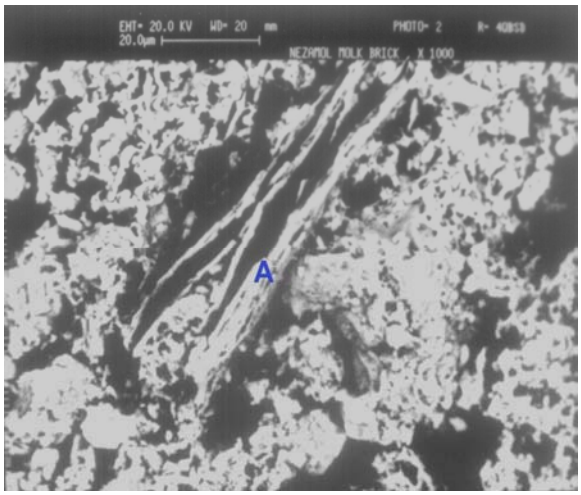
ضمن بررسی با میکروسکوپ الکترونی SEM و انجام آنالیزهای نقطه‌ای(EDX)[۶] امکان شناسایی کانی‌هایی از قبیل میکا، ولاستونیت، و کوارتز همراه برخی از ناخالصی‌ها در ساختار آجرها، میسر شد. ویژگی هر یک از این کانی‌ها به شرح زیر است (تصویر ۱۱):



تصویر ۱۱. تصویر میکروسکوپی SEM از آجر گنبد نظام‌الملک (بزرگ‌نمایی ۶۰۰ برابر) **فاز A**: میکا، **فازB**: ولاستونیت(CaSiO3)، **فاز C**: اکسید آهن با ناخالصی‌هایKCL و CaCl2
(مأخذ: نگارنده).

میکا

این فاز که در مطالعات پتروگرافی نیز قابل رویت بود پراکندگی زیادی در زمینهٔ آجر دارد است (تصویر ۱۲). بر اساس آنالیزهای نقطه‌ای SEM میکای مزبور می‌تواند از نوع سیدروفیلیت $KFe[(OH)_2 AlSi_3O_{10}]$ باشد (نمودار ۳). کانی مورد بحث که از گروه بیوتیت به شمار می‌رود در اثر پخت، آب خود را از دست داده و به اکسی بیوتیت تبدیل می‌شود. همچنین مقادیر جزیی Ti به عنوان ناخالصی در میکا وجود دارد.



تصویر ۱۲: تصویر میکروسکوپی SEM از آجر گنبد نظام‌الملک، بخشی از تصویر ۱۰ (بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابر) **فازA** : فاز میکا (مأخذ: نگارنده).

ولاستونیت: (Wollastonite) ولاستونیت با فرمول ساختمانی $CaSiO_3$ از خانوادهٔ سیلیکات‌های زنجیره‌ای (Inosilicates) است که در گروه شبه پیروکسن‌ها (Pyroxenoides) دسته‌بندی می‌شود (فرقانی، ۱۳۷۸). این فاز نیز همچون میکا بخش عمده‌ای از زمینهٔ آجر را تشکیل داده است (تصویر ۱۱، نمودار ٤). ذرات ولاستونیت موجود در بافت آجر اغلب با دانه‌بندی‌های مختلف، ذرات کوچک و بزرگی را تشکیل داده است که در اغلب بافت آجر دارای مرز جدایش هستند.

کوارتز: فاز سیلیسی از جمله فازهای شناسایی‌شده در بافت آجرهای نظام‌الملک است که اغلب در آنالیزهای نقطه‌ای ردیابی شده است (نمودار ۵).

ناخالصی‌ها: در آنالیزهای نقطه‌ای که از تصاویر میکروسکوپ الکترونی به عمل آمده است پاره‌ای از ناخالصی‌ها در کنار فازهای اصلی شناسایی شده اند. عمدهٔ این ناخالصی‌ها عبارت اند از ذرات اکسید آهن که با ناخالصی‌های دیگری همچون KCl و $CaCl_2$ همراه شده اند (نمودار ٦) .

نتایج آنالیز کمی

نتایج آنالیزهای کمی آجرهای گنبدخانه، عمدهٔ عناصر ساختار آجرها را CaO و SiO_2 نشان می‌دهند که خود از جملهٔ عناصر اصلی و سازندهٔ ولاستونیت هستند (جدول ٦). همچنین حضور مقادیری آلومینیوم در نمونه را می‌توان به حضور میکا در آجرها نسبت داد. همان‌طور که اشاره شد بررسی‌های SEM نشانگر حضور مقادیر زیادی فاز میکا و ولاستونیت در نمونهٔ آجر است. حضور میکاها در مقاطع میکروسکوپی که آنالیزهای SEM نیز به نحوی مؤید آن است، نشان می‌دهد که دمای پخت نمی‌بایست تا حد تشکیل فازهای دمای بالا رسیده باشد.

شاید بتوان پیروکسن شناسایی‌شده در طیف‌های XRD را به پیروکسن‌های دمای پایین همچون اوژیت و دیوپسید نسبت داد و در این صورت حضور توأم آن در کنار میکاها توجیه‌پذیر خواهد بود. حضور رخ‌های فراوانی که در کانی‌های گروه میکا و همچنین ولاستونیت وجود دارد و در تصاویرSEM نیز به وضوح مشاهده شده است، می‌تواند ورقه‌ای شدن سطوح آجرنما و ریزش سطحی آنها را توجیه کند.

ولاستونیت در بیشتر موارد به صورت اجتماعات رشته‌ای و یا ستونی دیده می‌شود. مقاطع عرضی آن تقریباً مستطیل‌شکل است و رخ‌های آن قابل تشخیص است . رخ‌های ولاستونیت به صورت موازی است و این رخ‌ها باعث می‌شود کانی به آسانی متورق شده و به صورت رشته‌هایی درآید.

نتیجه‌گیری

در خصوص مسئله خرد شدن و ریزش سطوح آجرنما، یکی از فرضیاتی که در شروع تحقیق مطرح شد و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت، مشکلات و نواقص مرحله پخت آجرها بود. در این باره نتیجه آنالیزهای XRD که بر

روی آجرهای گنبد نظام‌الملک و سپس گنبد تاج‌الملک (به عنوان معیاری برای مقایسه) انجام پذیرفت، تفاوتی را که ناشی از نواقص پخت باشد نشان نداد.

همچنین طیف‌های FT-IR و مقایسهٔ آنها با استانداردهای مربوطه حضور ناخالصی‌ها و نمک‌هایی همچون کربنات و نیترات را ناچیز نشان می‌داد به گونه‌ای که این مقادیر کم نمی‌تواند عامل اصلی خرد شدن سطوح آجرنما قلمداد شود. با استناد به نتایج آنالیز ملات‌ها و اندودِ استفاده شده در گنبدخانه، وجود بخشی از ناخالصی‌های کربناتی را می‌توان به این مصالح نسبت داد . وجود اندکِ نیترات‌ها نیز با توجه به وجود زیاد آلاینده‌های هوایی می‌تواند توجیه‌پذیر باشد.

از سویی مشاهدات میکروسکوپی انجام‌شده بر روی آجرهای نظام‌الملک تصویر دقیق‌تری از کانی‌های موجود در ساختار آجرها ارائه داد. حضور این کانی‌ها که پیش از این در آنالیزهای XRD به آنها برخورد نشده بود، رهنمون ما به پاره‌ای از مشکلات پخت بود. با این وجود همهٔ مشکلات آجرها فقط به نواقص مرحلهٔ پخت مربوط نمی‌شد. در واقع با توجه به گستردگی آسیب بر روی تمام آجرهای نما به نظر می‌رسید که یک عامل درون ساختاری و مهم‌تر از فرآیند پخت، باید در این فرایند تخریبی نقش داشته باشد.

در این باره مطالعات میکروسکوپی نشانگر حضور مقادیر زیادی فاز میکا و ولاستونیت در ساختار آجرهای گنبدخانه بودند. فراوانی حضور این کانی‌ها در ساختار آجرها به گونه‌ای است که احتمال می‌رود در خاکی که آجرهای این گنبدخانه از آن ساخته شده است به مقدار زیاد وجود داشته اند. از سویی دمای پخت آجرها نیز تا حدی نبوده که تجزیه و تبدیل آنها را باعث شود. کانی‌های مذکور با توجه به رَخ‌های فراوان و ساختار متورق خود بسیار مستعد بوده و هستند تا در معرض عوامل محیطی و بیرونی، دچار تلاشی و فروپاشی شوند. در این باره وجود نیروهای فشاری در گنبدخانه می‌توانسته تأثیر بسزایی در افزایش روند فرسایشیِ آجرهای فوق داشته باشد. عوامل محیطی دیگری همچون میزان رطوبت در کنار دماهای پایین یخ‌زدگی ـ که بروز آن در روزهایی از سال حتمی است ـ زمینه را برای فرسودگی هر چه بیشتر آجرها مستعد کرده است. از همین روست که بخش‌های پایین‌تر گنبدخانه و به‌ویژه پایهٔستون‌ها با آسیب جدی‌تری مواجه بوده است که خود ناشی از عملکرد توأم عوامل یادشده است.

با توجه به ویژگی‌های فیزیکی ولاستونیت و دارا بودن رخ‌های فراوان، می‌توان عمدهٔ آسیب‌های وارده به گنبدخانه را به حضور این کانی در ساختار آجرهای آن نسبت داد. فراوانی حضور این کانی در آجرها که تصاویر SEM نیز نشانگر آن است، نوعی مشکل درون‌ساختاری برای آجرها قلمداد می‌شود. از سویی حضور میکاها نیز در ساختار آجرها به این مشکل دامن زده است. پیامد این مشکلات که عوامل زیادی آن را تسریع کرده است، تورق آجرها بوده است که از سطوح بیرونی آجرنما که در مجاورت عوامل فرساینده محیطی بوده، آغاز شده است.

همچنین بررسی انجام‌شده بر روی ملات بین آجرهای گنبدخانه، آنها را از نوع ملات‌های آهکی با مقادیری گچ نشان می‌دهد. این ملات‌ها به‌ویژه در سطوح پایین‌تر دیواره‌ها که در تماس مستقیم با رطوبت قرار دارند بسیار سست است، به گونه‌ای که بندکشی‌های این بخش‌ها به صورت عمقی خالی شده است. این موضوع خود عاملی بوده بر تقسیم نامتناسب نیروهای فشاری بر روی سطوح آجری این قسمت‌ها. لذا تخریب بیش‌تر آجرها را باعث شده است.

آنالیزها ملات‌هایِ بندکشی را عمدتاً از نوع گچ نشان می‌دهد. این بندکشی‌ها که با نقوش مهری همراه است در

بیش‌تر محل‌ها کاملاً از میان رفته است. فرسایش آجرنما خود در تخریب این بندکشی‌ها مؤثر بوده است. خالی شدن مصالح بندکشی خود مشکلات عمده‌تری را برای ملات‌های عریان شدهٔ آجرها فراهم آورده و زمینه را برای هوازدگی و فرسایش‌های محیطی آنها فراهم آورده است.

مجموع مشکلات فوق در کنار مسایل ساختاری و اصلی‌تر آجرها، سیمای گنبد نظام‌الملک را مخدوش ساخته است. بر این اساس بررسی‌های به عمل آمده می‌تواند مقدمه‌ای باشد برای تعامل شایسته و علمی با آجرنمای آسیب‌دیده و ارائهٔ طرح‌های حفاظتی بهتر که خود مبحثی جداگانه می‌طلبد. امید است در گام‌های بعدی پژوهش بتوان در مورد نحوهٔ حفاظت و مرمت این سطوح آجری اندیشید.

پانوشت‌ها:

* در انجام این تحقیق همکاران پژوهشکدهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی: خانم‌ها سودابه دورعلی (در آنالیزهای XRD) و منیژه هادیان دهکردی (در آنالیزهای با دستگاه FT-IR) و همچنین دوستان شاغل در مرکز تحقیقات شرکت فرآورده‌های نسوز آذر اصفهان: خانم مهندس فریبا داودی و آقای مهندس دروشی (در مطالعات بخش میکروسکوپی) همکاری و هم‌فکری کردند که از ایشان صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

۱- آزمایش XRD و FT-IR و آنالیز عنصری در پژوهشکدهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی ـ فرهنگی و مطالعات میکروسکوپی با میکروسکوپ پولاریزان نوری و میکروسکوپ الکترونی در مرکز تحقیقات شرکت فرآورده‌های نسوز آذر اصفهان انجام شده است.

۲- استاندارد آمریکاA.S.T.M – C 1026: در این استاندارد نمونهٔ آجر پس از اشباع شدن از آب در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد یخ بسته و آنگاه در آبی با دمای ۱۰ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود. با تکرار این فرآیند می‌توان به‌تدریج شاهد فرسودگی و متلاشی شدن آجر بود.

۳- احتمالاً زمان اجرای این اندود به دورهٔ صفویه برمی‌گردد که با اجرای محراب کاشیکاری بر روی دیوارهٔ جنوبی همزمان بوده است. این اندود سطوح آجری سست را در چند صد سال اخیر از خطر ریزش مداوم محفوظ نگاه داشته است. عملیات آزادسازی و حذف بخشی از اندود الحاقی، توسط گروه ایتالیایی موسسهٔ ایزمئو در تمام دیوارهٔ غربیِ گنبدخانه و در بخشی از دیواره‌های شمالی و جنوبی انجام گرفته است. فعالیت‌های تعمیراتی و مطالعاتی در مسجد جامع اصفهان توسط گروه مرمتگر ایتالیایی موسسهٔ ایزمئو (IsMEO) در خلال سال‌های ۱۳۴۹ تا ۱۳۵۷ خورشیدی دنبال شده است. این فعالیت‌ها مشتمل بر مطالعهٔ شرایط ایستایی بنا، تشخیص آسیب‌ها، استحکام‌بخشی سازه‌ها و اسکلت اصلی بنا بوده است.

٤- معمولاً در حضور مقادیری گدازآور و در دماهای پایین‌تر از ۸۰۰ درجه، نوعی شبه‌فاز نزدیک به ولاستونیت که از خود خصوصیاتی مشابه شبکه سیلیکات کلسیم را نشان می‌دهد و حالتی نیمه‌آمورف دارد، شروع به تشکیل می‌شود. ممکن است این شبکه در طیف‌های XRD خواصی نزدیک به کانی‌های دمای بالارا بروز دهد.

٥- در این نوشتار منظور از اکسید آهن مجموع اکسید و هیدروکسید آهن است که به شکل‌های هماتیت (Fe2O3)، مگنتیت (Fe3O4)، لیمونیت و گوتیت (Fe2O3.nH2O) است.

٦- EDX : Energy Dispersive X-Ray Analysis

منابع:

- آیت ا... زاده شیرازی، باقر ۱۳۷۵؛ مشخصه‌های بارز معماری دوره سلجوقی ؛ مجموعه مقالات کنگره تاریخ معماری و شهرسازی ایران در ارگ بم ؛ سازمان میراث فرهنگی کشور.
- پایدار، حسین ۱۳۷۷؛ نگرشی بر مواد اولیه مصرفی در صنعت نسوز ؛ مرکز تحقیقات و آزمایشگاه شرکت فرآورده‌های نسوز.
- حاتم، غلامعلی ۱۳۷۹؛ معماری اسلامی ایران در دوره سلجوقیان ؛ انتشارات جهاد دانشگاهی ؛ چاپ اول چاپ اول.
- فدایی، حمید ۱۳۸۰؛ آسیب‌شناسی آجرهای گنبد خواجه

نظام‌الملک در مسجدجامع اصفهان و بنای ذیقورات چغازنبیل ؛ استاد راهنما: دکتر عبدالرسول وطن دوست، مهندس عابد اصفهانی ؛ استاد مشاور: دکتر حسین پایدار، مهندس شهلا ذبیحی ؛ پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مرمت آثار تاریخی، دانشگاه هنر اصفهان..

- ذبیحی شهلا ۱۳۷٦؛ تاثیر آلودگی هوا بر آجرنمای بناهای تاریخی (مدرسه امام جعفر صادق ع) ؛ دانشکده پردیس اصفهان ؛ پایان نامه کارشناسی ارشد مرمت آثار فرهنگی و تاریخی.
- فرقانی، عبدالحسین ۱۳٦۷؛ کانی شناسی ؛ جلد اول (نزوسیلیکات‌ها تا اینوسیلیکات‌ها) ؛ انتشارات دانشگاه تهران.
- صحی زاده، مهشید ۱۳۷۸؛ فرآیند شکل‌گیری مساجد سلجوقی ؛ مجموعه مقالات کنگره تاریخ معماری و شهرسازی ایران، ارگ بم ؛ سازمان میراث فرهنگی کشور ؛ جلد نخست .
- کسمایی، مرتضی ۱۳۷۲؛ پهنه‌بندی اقلیمی ایران، مسکن و محیط‌های مسکونی ؛ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ؛ چاپ اول.
- گالدیری، اوژینو ۱۳۷۰؛ جبل عاملی ، عبدالله ؛ مسجد جامع اصفهان ؛سازمان میراث فرهنگی
- گالدیری، اوژینو ؛ مسجد جمعه اصفهان در دوران آل بویه ؛ ترجمه حسین سلطان زاده ؛ سازمان ملی حفاظت آثار باستانی ایران
- گالدیری ، اوژینو ۱۳۵۵؛ اطلاعاتی راجع به گنبد نظام الملک ؛ فرهنگ معماری ایران ؛ شماره ۲ و ۳ ؛ انتشارات سازمان ملی حفاظت آثار باستانی.
- ویسه، سهراب ۱۳۷۳؛ آجر رسی، خواص و تولید ؛ مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ؛ چاپ اول.
- گزارش فعالیت‌های دفتر فنی از فروردین لغایت آذرماه سال ۱۳۵۵ ؛ سازمان ملی حفاظت آثار باستانی ایران، دفتر فنی اصفهان ؛ سال ۱۳۵۵
- مسجد جامع اصفهان (نقشه‌های تهیه شده از مسجد جامع به طریقه فتوگرامتری توسط شرکت سهامی نقشه برداری رصد ـ تهران) ؛ وزارت فرهنگ و هنر، سازمان ملی حفاظت آثار باستانی.

- Caner-Saltik ،E.N. ،J. Schumann ،& L. Franke. 1998. Stage of Damage in the Structure of Brick Due to Salt Crystalization ،Conservation of Historic Brick Structures ،Donhead Publishing Ltd 1998. 6:47 – 58
- Deer ،R. A. Howie & Zussman J. 1991. An introduction to the Rock Forming Minerals ، Longman Scientitic & Technical ،London ، Seventeenth impression.
- Franke ،L. ،& J. Grabau. 1998. Transport of Salt Solutions in Brickwork ،Conservation of Historic Brick Structures ،Donhead Publishing Ltd 1998. 15:167 -172
- Galdieri ،Engenio ،Isfahan : Masgid-I Guma Culome 1. Ismeo ،Roma 1972
- Pope ،Arthurupham ،Asurvey of persian Art colume 3 and 8.

جدول ۱ آنالیز نمونه شوره در گنبد نظام‌الملک

ردیف	کد نمونه	مکان نمونه‌برداری	نتایج XRD	نتایج FT-IR
۱	N-S-15	جبهۀ جنوبی گنبدخانه ارتفاع بالای ازاره	NaCl	مقادیر بسیار کم سولفات

جدول ۲ نتایج آنالیز آجرهای گنبد نظام‌الملک به روش FT-IR

ردیف	کد آجر	مکان نمونه‌برداری	نتایج FT-IR
۱	*N-b-01*	گوشۀ شمال غربی گنبد نظام‌الملک، آجرنمای آسیب‌دیده روی ستون‌ها	سیلیکات ، مقادیر خیلی کم کربنات ، نیترات
۲	*N-b-02*	دیوارۀ غربی گنبد نظام‌الملک، آجرنمای آسیب‌دیده روی ستون‌ها	سیلیکات ، کربنات، مقادیر کم نیترات
۳	*N-b-05*	دیوارۀ جنوبی گنبد نظام‌الملک، آجرنمای بالای دیواره (با ظاهر سالم ولی سست)	سیلیکات، مقادیر کمی کربنات و نیترات
٤	*N-b-06*	گوشۀ شمال شرقی گنبد نظام الملک، آجرنمای روی ستون‌ها (با ظاهر سالم ولی سست)	سیلیکات، مقادیر بسیار کم نیترات
٥	*N-b-08*	گوشۀ جنوب غربی گنبد نظام‌الملک، آجرنمای آسیب‌دیده در ارتفاع سر ستون	سیلیکات/ مقادیر بسیار کم کربنات و نیترات
٦	*N-b-11*	دیوارۀ شمالی گنبد نظام‌الملک، نمونۀ آجر در عمق ۳۰ سانتی‌متری سرستون	سیلیکات ، مقادیر کم کربنات
۷	*N-b-13*	جبهۀ شمالی گنبد نظام‌الملک، آجرنمای ارتفاع نورگیر گنبد	سیلیکات، مقادیر بسیار کم نیترات
۸	*N-b-14*	جبهۀ شمالی گنبد نظام‌الملک، نمای بیرونی، آجرنمای بین ستون‌های چهار بخشی	سیلیکات، مقادیر بسیار کمی کربنات و نیترات

جدول ۳ نتایج آنالیز ملات‌های گنبد نظام‌الملک به روش XRD و FT-IR

ردیف	کد نمونه	مکان نمونه‌برداری	نتایج XRD	نتایج FT-IR
۱	*N-M-04*	گوشۀ جنوب غربی گنبد خواجه نظام‌الملک، نمونه ملات بین آجرهای ستون‌های چهاربخشی	Calcite ،Anhydrite Quartz	سولفات، کربنات، سیلیکات، نیترات
۲	*N-M-09*	گوشۀ جنوب غربی گنبد نظام‌الملک، ارتفاع سرستون، نمونۀ ملات بندکشی	Gypsum ،Anhydrite Quartz ،	سولفات ، کربنات ، سیلیکات
۳	*N-M-10*	گوشۀ جنوب‌غربی گنبد نظام‌الملک، ارتفاع سرستون، نمونۀ ملات بین آجرها	Gypsum ،Anhydrite Quartz ،	سولفات، کربنات، سیلیکات
٤	*N-M-12*	جبهۀ شمالی گنبد نظام‌الملک، ارتفاع سرستون، نمونۀ ملات بین آجرها (عمق ۳۰ سانتی‌متر)	*Plaster of Paris، Quartz ،Calcite*	سولفات، کربنات، سیلیکات

Gypsum: CaSO4. 2H2O
Anhydrite: ssCaSO4
Plaster of Paris: CaSO4. 05H2O: مجموعه‌ای از نمک‌های سولفات‌کلسیم با کم‌تر از ۲ مولکول آب متبلور
Calcite: CaCO3
Quartz: SiO2
(شرایط انجام آزمایش : دستگاه پراش‌سنج پرتو ایکس، مدل 3000T2T از کمپانی SEIFERT با تیوب مس ـ 30mA,40Kv)

جدول ٤: نتایج آنالیز اندود الحاقی روی سطوح آجری در گنبد نظام‌الملک

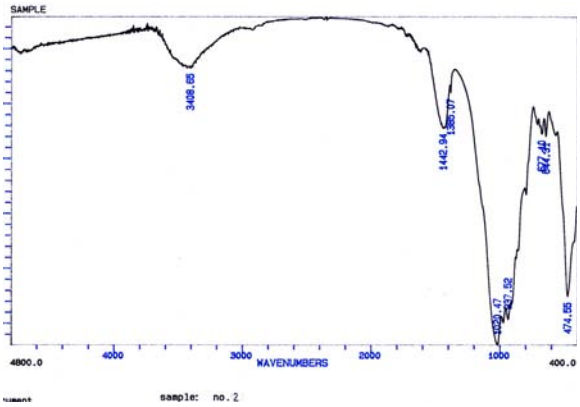
ردیف	کد نمونه	مکان نمونه‌برداری	نتایج XRD	نتایج FT-IR
١	N-M-17	دیوارهٔ شمالی گنبد نظام‌الملک، نمونهٔ اندود الحاقی و پوشش‌دهندهٔ سطوح آجرنما	Quartz ،Gypsum	سولفات، سیلیکات، مقادیر کم کربنات و نیترات

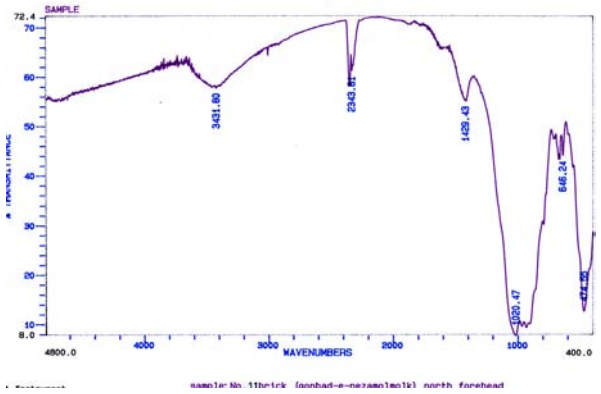
جدول ٥ نتایج آنالیز آجرهای گنبد نظام‌الملک به روش XRD

ردیف	کد آجر	مکان نمونه برداری	نتایج XRD
١	N-b-01	گوشهٔ شمال غربی گنبد نظام‌الملک، آجرنمای آسیب‌دیدهٔ ستون	*Pyroxene ،Quartz*
٢	*N-b-02*	دیوارهٔ غربی گنبد نظام‌الملک، آجرنمای آسیب‌دیدهٔ ستون	*Feldspar ،Pyroxene ،Quartz*
٣	*N-b-05*	دیوارهٔ جنوبی گنبد نظام‌الملک، آجرنمای بالای دیواره، (با ظاهر سالم ولی سست)	*Pyroxene ،Quartz*
٤	*N-b-06*	گوشهٔ شمال شرقی گنبد نظام‌الملک، آجرنمای روی ستون (با ظاهر سالم ولی سست)	*Pyroxene ،Quartz*
٥	*N-b-08*	گوشهٔ جنوب غربی گنبد نظام‌الملک، آجرنمای آسیب‌دیده در ارتفاع سرستون	*Pyroxene ،Quartz (Feldspar (مقدار کم*
٦	*N-b-11*	دیوارهٔ شمالی گنبد نظام‌الملک، نمونهٔ آجر عمق ٣٠ سانتی‌متری سرستون	*Feldspar ،Pyroxene ،Quartz*
٧	*N-b-13*	جبههٔ شمالی گنبد نظام‌الملک، آجرنمای ارتفاع نورگیر گنبد	*Feldspar ،Pyroxene ،Quartz*
٨	*N-b-14*	جبههٔ شمالی گنبد نظام‌الملک، نمای بیرونی، آجرنمای بین ستون‌های چهار بخشی	*Feldspar ،Pyroxene ،Quartz*

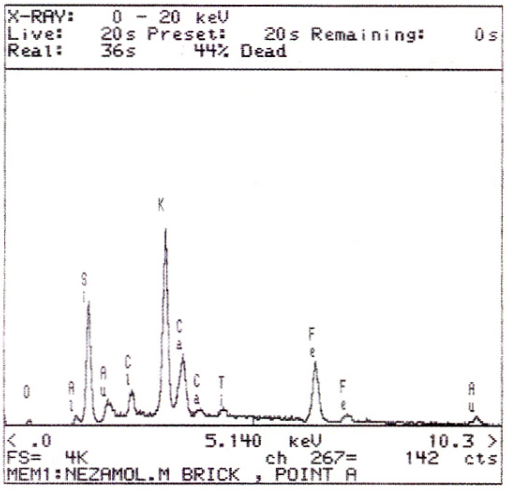
جدول ٦ آنالیز شیمیایی نمونهٔ آجر گنبد نظام‌الملک

%NaCl	%Cl	%L.O.I	K_2O-Na_2O	$\%SO_4$	%MgO	%CaO	$\%Al_2O_3$	$\%Fe_2O_3$	$\%SiO_2$
0.57	0.35	1.91	0.29	1.31	3.54	23.39	14.12	4.9	50.54

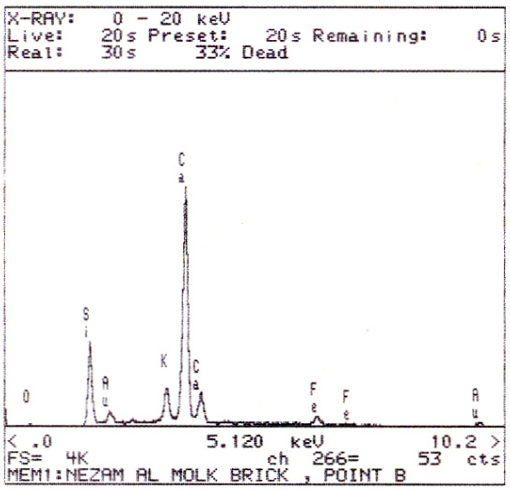




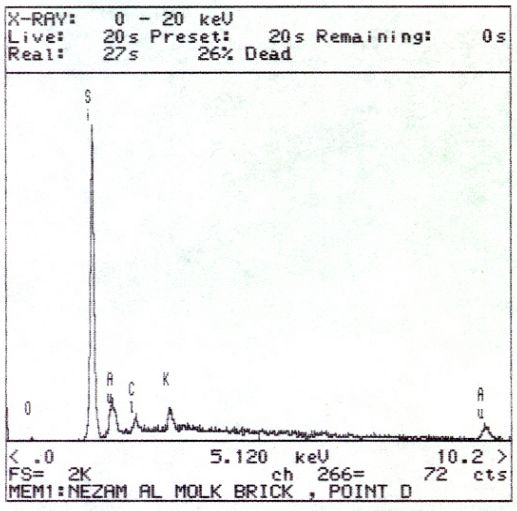
نمودارهای ۱ و ۲: مقایسهٔ طیف‌های FT-IR مربوط به دو نمونه آجر گنبد نظام‌الملک
چپ: نمونهٔ آجر با کد: N-b-11 ، راست: نمونهٔ آجر با کد: N-b- 02 (مأخذ: نگارنده).



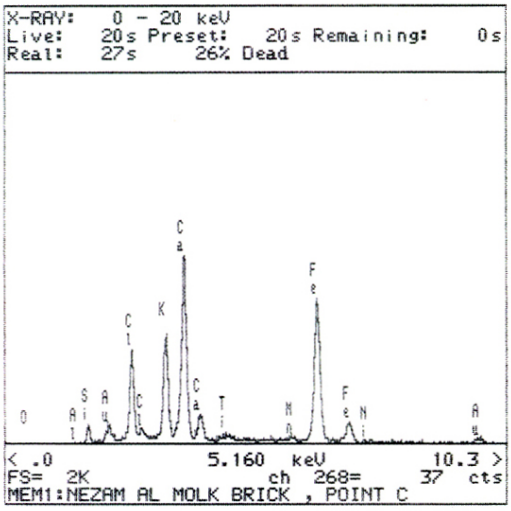
نمودار ۳: طیف EDX از فاز A (میکا) در تصویر
میکروسکوپ الکترونی (مأخذ: نگارنده).



نمودار ۴: طیف EDX از فاز B (ولاستونیت) در تصویر
میکروسکوپ الکترونی (مأخذ: نگارنده).



نمودار ۵: طیف EDX از فاز D (فاز کوارتز) در تصویر میکروسکوپ
الکترونی (مأخذ: نگارنده).



نمودار ۶: طیف EDX از فازC در تصویر میکروسکوپ الکترونی
(اکسید آهن با ناخالصی‌های KCl و $CaCl_2$) (مأخذ: نگارنده).