
The Application of Crystallographic Interpretation on Technical Study of Gypsum-Based Historical Materials (Case studies of stucco decoration of Kuh-e Khwaja and Gypsum Mortars from Shadiakh and Alamut)

M. MISHMASTNEHI *

*PhD Candidate in Archaeology, Institut für Vorderasiatische, Department of History and Cultural Studies
Freie Universität Berlin, GERMANY*

Abstract

Investigation of gypsum-based historical materials has two main problems: philological problems and technical issues. Technical issues, the main topic of this article, are normally consequences of physicochemical complexity of gypsum crystals in different conditions and variety of additives or mixed materials. Neglecting this technical problem, leads researchers to misunderstand or misinterpret these materials. Moreover, exclusively use of one analytical method, such as scanning electron microscope or X-ray fluorescence, provides an incomplete picture of samples that regularly produces further misunderstanding of specimen or its history. The methodology of this study is a multi-analytical approach via XRD, SEM and using image analysis software on electron photomicrographs to estimate amount of free spaces in microstructure of samples. A group of three experimental samples were made from traditional recipes of craftsmen in Iran, in order to make a connection between philological problems came from tradition, and technical problems came from mineralogical property of gypsum. Gach-e Tiz, or quick setting mortar shows a very dense microstructure in SEM micrographs. Variety sizes of monoclinic crystals of gypsum are present in it, and moreover some shapeless and bulky regions are also visible. Gach-e Kam-Mayeh, or low setting mortar reveals a much more open microstructure than the former one, filled with needle like crystals and a lot of micro porosity between crystals. There is no evidence of bulky forms area in Gach-e Kam-Mayeh. Gach-e Koshteh, or mechanical low-setting mortar which is a traditional Iranian recipe, shows a parallel layers of laminar gypsum crystals setting upon each other. This form also demonstrates no evidence of bulky regions. Historical samples were collected from a stucco decoration belong to Kuh-e Khwaja of Sistan; a gypsum mortar fragment from Shadyakh, Neyshabur and a piece of gypsum mortar from Alamut castle of Qazvin. The results of XRD show that both layers of Kuh-e Khwaja stucco contain anhydrite as the major phase and the sample of Shadiyakh mostly composed of Gypsum. Organic materials extractions represent no evidence of organic additive to this historical materials. Therefore the images of their microstructure are comparable with experimental samples that made without any additive. Lower layer of Kuh-e Khwaja's stucco shows a lot of tiny crystals that are not very look like gypsum, but precipitated on the surface of bigger and deformed crystals. The microstructure of it is very open and include big amount of micro porosity in compare with other samples. Upper layer of this stucco shows not any form of gypsum crystals but very disturbed flaked shapes, supposedly gypsum crystals transformed to anhydrate. The micrographs of Shadiyakh's mortar also reveal not any clear form of gypsum crystals but base on XRD result it still as gypsum materials. This sample contains mostly from that bulky and dense structure which shows the usage of low amount of water for its paste. The results of image analysis on electron micrographs at magnification of $\times 250$ and $\times 500$ provide a good and comparable estimation for free space evaluation in the micro structure of gypsum based materials. The combination of these techniques and methods lead to better understanding of gypsum based historical materials.

Keywords: Gypsum-Based Historical Materials, Crystallography, Technical study, pathology, SEM, XRD.

* - Corresponding author: mmishmast@zedat.fu-berlin.de

کاربرد تحلیل‌های بلورشناسی در مطالعات فنی آثار تاریخی گچی (مطالعه‌ی موردی گچ‌بری کوه خواجه‌ی سیستان، ملات گچ شادیاخ نیشابور و ملات گچ قلعه الموت قزوین)

مسلم میثم مست نهی*

دانشجوی دکتری باستان‌شناسی، انیستیتیوی باستان‌شناسی شرق نزدیک، دانشگاه آزاد برلین، آلمان.

چکیده

پژوهش و شناخت آثار تاریخی گچی در ایران دو مشکل فنی و واژه‌شناسی دارد. مشکل فنی، موضوع این مقاله، عموماً ناشی از شناخت ناقص خصوصیات بلور گچ همچون تغییرات حالیت یا شکل بلوری در اثر حضور مواد افزودنی یا تغییرات محیطی است. در این مقاله ۳ نمونه‌ی تاریخی جمع‌آوری شده از کوه خواجه‌ی سیستان، قلعه الموت قزوین و شادیاخ نیشابور، و ۳ نمونه‌ی مدل‌سازی شده‌ی جدید با توجه به ریزساختار بلوری آن‌ها بررسی می‌شوند. آزمایش XRD حضور فاز غالب انیدریت (CaSO_4) را برای هر دو لایه‌ی گچ‌بری کوه خواجه نشان می‌دهد؛ درحالی‌که ملات مربوط به شادیاخ دارای فاز غالب ژیبس ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) است. پس از تشخیص عدم حضور ماده‌ی افزودنی آلی در نمونه‌های تاریخی با روش سوختن تر، از هر نمونه تصاویر SEM تهیه شد. این تصاویر در تشخیص کیفی شکل بلورهای گچ، کنارهم‌نشینی آن‌ها در ریزساختار نمونه‌های مختلف و سنجش فشردگی ریزساختار بلوری آن‌ها به کمک نرم‌افزار پردازش تصویر به صورت کمی، کمک می‌کنند. در تصاویر SEM تهیه شده از دو لایه‌ی گچ‌بری کوه خواجه، بلورهای منوکلنیک ژیبس دیده نمی‌شوند و ملات‌های گچ شادیاخ و قلعه الموت نیز فقط ریزساختاری فشرده را نشان می‌دهند؛ درحالی‌که در نمونه‌های مدل‌سازی شده، بلورهای گچ به وضوح قابل شناسایی هستند. نتیجه‌ی این مشاهدات بیان می‌کند که هرچند استفاده از تصاویر SEM و تحلیل بصری یا پردازش تصویری آن‌ها، نتایج ارزشمندی در بررسی و شناسایی ریزساختار مواد تاریخی گچی دارند، اما نتایج آن‌ها باید در کنار آزمایش XRD و پس از تشخیص حضور یا عدم حضور ماده‌ی افزودنی آلی، تفسیر و بررسی شوند.

واژگان کلیدی: مواد تاریخی بر پایه‌ی گچ، بلورشناسی، فن‌شناسی، آسیب‌شناسی، SEM، XRD.

۱- مقدمه

تاریخ کاربرد گچ همچون ملات گچی حداقل به آغاز هزاره سوم ق.م در مصر باستان بازمی‌گردد (Torraca, 1982, p. 65). استفاده از گچ در فلات ایران نیز پیشینه‌ای طولانی دارد و کاربرد آن به‌عنوان ماده‌ی مورد استفاده در آرایه‌های معماری در دوره‌ی ساسانی معروف است (Kröger, 1982). آفرینش و ترکیب شیوه‌های مختلف در ساخت تزئینات گچی در دوره‌ی اسلامی سبب شده است که بیش از ۱۲ شیوه‌ی مختلف گچ‌بری در ایران شناسایی و دسته‌بندی شوند که در ساخت برخی از این آثار به استفاده از افزودنی‌های مختلف آلی همچون چسب‌ها و بست‌ها یا افزودنی‌های معدنی همچون رنگدانه‌ها اشاره می‌شود (صالحی کاخکی و اصلانی، ۱۳۹۰، ص. ۹۷). در برخی تزئینات گچی نیز کاربرد فرآیندهای مکانیکی همچون فتیله کردن گچ و سپس الحاق آن به سطح دیوار یا گچ‌بری ذکر شده است (همان، ۱۳۹۰، ص. ۱۰۲). ناخالصی‌های خواسته یا ناخواسته همچون رس و ماسه نیز تقریباً همیشه به مقدار کم یا زیاد حضور دارند.

یکی از مشکلات مهم در بررسی آثار گچی تاریخی، وجود این حجم انبوه فنون و ترکیب مواد در سنت گچ‌بری و اصطلاحات تخصصی مربوط به آن‌ها است. از سوی دیگر ترجمه‌ی متون علمی جدید مرتبط با زمین‌شناسی یا علم مواد از زبان‌های اروپایی نیز بر حجم این گنجینه‌ی واژگانی افزوده و سبب سردرگمی «زبانی» در برخورد با آثار گچی شده است. به‌عنوان مثال می‌توان به اصطلاحاتی همچون «تیزون»، «خوش مایه»، «زنده»، «کشته»، «نیم‌کشته»، «نیم‌پخته‌ی نیم‌کوب»، «عسلی» و غیره در گفتمان سنتی اساتید گچ‌بر اشاره کرد که در توصیف ملات‌های مختلف گچی استفاده می‌شود (مطیفی‌فرد، ۱۳۸۲، ص. ۲۴؛ پرنای، ۱۳۸۶، ص. ۲۵؛ اصلانی و دیگران، ۱۳۹۲، ص. ۱۰). همه‌ی این اصطلاحات در نگاه اول، برای یک متخصص کانی‌شناس یا کارشناس علم مواد بی‌معنی می‌نماید، اما تداوم این سنت‌ها و حضور فیزیکی آثار متنوع و متفاوت از گچ‌بری‌های تاریخی نشان‌دهنده‌ی معنی‌دار بودن این اصطلاحات و نتایج مادی آن‌ها است. مشکل مهم دیگر در این زمینه (بررسی آثار تاریخی گچی) پیچیدگی

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بلورهای گچ و حساسیت فوق‌العاده‌ی آن‌ها به تغییر شرایط فیزیکی و شیمیایی محیط اطرافشان است. به این معنی که در اثر حضور مواد مختلف آلی یا معدنی در زمان ساخت اثر یا پس از آن، و یا وقوع تغییرات رطوبتی و دمایی، ممکن است فرم و حتی ماهیت بلور گچ تغییر کند؛ هرچند که شکل خارجی اثر تغییر چندانی را نشان ندهد. با توجه به این‌که احتمالاً بسیاری از آثار تاریخی بر اساس دستورالعمل‌های سنتی ساخته شده‌اند و سپس عامل زمان روی آن‌ها تأثیر گذاشته است، شناخت اولیه‌ی این ریزساختار به کمک روش‌های دستگاهی و علمی جدید ضروری است. به‌عنوان مثال دستورالعمل ذکر شده برای ساخت گچ تیز، گچ تیزون، گچ زنده و گچ پرمایه بیانگر نسبت آب اختلاط ۱:۳ تا ۱:۲ (W/P=0.3-0.5) است (مطیفی‌فرد، ۱۳۸۲، ص. ۲۴). وقتی به کمک روش‌های دستگاهی شباهت محصول همه‌ی این دستورالعمل‌ها ثابت و مشخص شد که همه‌ی این‌ها به یک محصول مشابه اشاره دارند، می‌توان از سردرگمی زبانی ناشی از حضور چهار اصطلاح سنتی مختلف رها شد. شناسایی و طبقه‌بندی یک اثر در زیرشاخه‌های مختلف مصالح سنتی یا آرایه‌های معماری، شناخت و بازخوانی متون تاریخی یا تجربه‌های میراث شفاهی باقی‌مانده از گذشتگان و غیره، همه و همه مجموعه‌ی درهم‌تنیده‌ای از فن‌شناسی اثر را تشکیل می‌دهند. بررسی فن‌شناسی بدون توجه به آسیب‌های محیطی و گذشت زمان گمراه‌کننده است. شناسایی ریزساختار بلوری تنها بخشی از این مجموعه‌ی وسیع است که این مقاله تلاش می‌کند با تحلیل برخی از نشانه‌های مادی باقی‌مانده در ریزساختار بلوری آثار گچی، در راه ساختارشناسی این مواد، در نتیجه فن‌شناسی بهتر آن‌ها قدم بردارد. برای این منظور ابتدا برخی از خصوصیات بلور گچ و فرآیند گیرش آن ذکر شده و سپس با کمک روش‌های دستگاهی به‌ویژه آزمایش پراش پرتو ایکس XRD، میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM، و استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر، ریزساختار نمونه‌های تاریخی و نمونه‌های مدل‌سازی شده با هم مقایسه و تحلیل می‌شوند. مهم‌ترین محدودیت‌های پژوهش در این زمینه، کمبود مطالعات علمی و هدفمند روی نمونه‌های

سنجش فضای خالی بین بلورها در ریزساختار نمونه‌های مورد بررسی استفاده شد. در این روش فضای سیاه‌رنگ بین بلورها در تصاویر الکترون برگشتی^۲ به‌عنوان فضای خالی در نظر گرفته شد و درصد این سطح سیاه‌رنگ نسبت به کل تصویر توسط نرم‌افزار مورد بحث محاسبه شد. برای هر یک از نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق حداقل چهار تصویر در هر یک از بزرگنمایی‌های ۲۵۰ و ۵۰۰ برابر، مورد تحلیل عددی قرار گرفت. شایان ذکر است که نتایج این بررسی متغیری بصری را معرفی می‌کند که با تعاریف متداول تخلخل و روش‌های مرسوم محاسبه‌ای آن همچون استفاده از جیوه متفاوت است. هر چند که نتایج این روش می‌تواند تا حدی قابل تعمیم به نتایج اندازه‌گیری شده در روش‌های مرسوم تخلخل‌سنجی نیز باشد.

نمونه‌های مدل‌سازی شده عبارت‌اند از: گچ تیز (زودگیر)، گچ کم‌مایه (دیرگیر) و گچ کشته. پودر گچ مورد استفاده در این نمونه‌ها، پودر گچ الک شده با ابعاد مش ۱۰۰ از کارخانه‌ی «سپید گچ ساوه» است. برای ساخت خمیر گچ تیز مقدار ۱۵۰ گرم پودر گچ درون ۵۰ میلی‌لیتر آب ($W/P=0.3$) ریخته شد و بدون هیچ‌گونه هم‌زدن یا تغییر مکانیکی وانهاده شد تا گیرش آن کامل شود. نمونه‌ی دیرگیر عبارت از ۱۰۰ گرم پودر گچ در ۵۰ میلی‌لیتر آب ($W/P=0.5$) بدون هم‌زدن بود. هم‌زدن مخلوط، متغیر دیگری به مجموعه اضافه می‌کرد که از ورود آن به نمونه‌ی گچ تیز و گچ کم‌مایه پرهیز شد. برای ساخت گچ کشته نیز ۱۰۰ گرم پودر گچ در ۵۰ میلی‌لیتر آب ریخته شد و فرآیند ساخت آن طبق روش‌های سنتی انجام گرفت (میش مست نهی، ۱۳۸۵، ص. ۴۵؛ اصلانی و دیگران، ۱۳۹۲، ص. ۱۳).

میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips, XL300 در دانشکده‌ی علوم پایه‌ی دانشگاه تربیت مدرس تهران برای نمونه‌های کوه خواجه، گچ کشته و گچ کم‌مایه استفاده شد. بررسی بقیه‌ی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Leo 1450VP در دانشکده‌ی علوم پایه دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. سطح تازه شکسته‌ی نمونه‌ها با لایه‌ای از طلا به قطر متوسط ۳۰ نانومتر پوشش داده شدند. تصاویر SEM از نمونه‌ها در

مدل‌سازی شده بر اساس روش‌های سنتی و پیچیدگی ساختار بلوری گچ در شرایط محیطی مختلف و در کنار مواد گوناگون است. مسئله‌ی اصلی این تحقیق پیدا کردن شباهت‌ها و تفاوت‌های ریزساختاری در نمونه‌های مدل‌سازی شده و نمونه‌های تاریخی، به کمک روش‌های آزمایشگاهی است. پرسش اصلی این است که نمونه‌های تاریخی مورد بررسی چه خصوصیات بلوری و ریزساختاری دارند و کوتاه‌ترین راه ممکن برای شناسایی این خصوصیات چیست؟ با پاسخ دادن به این پرسش و انجام این روند می‌توان رابطه‌ی چند سویه‌ای بین ساختارشناسی، فن‌شناسی، آسیب‌شناسی و واژگان‌شناسی آثار گچی تاریخی ایجاد کرد.

۲- روش تحقیق

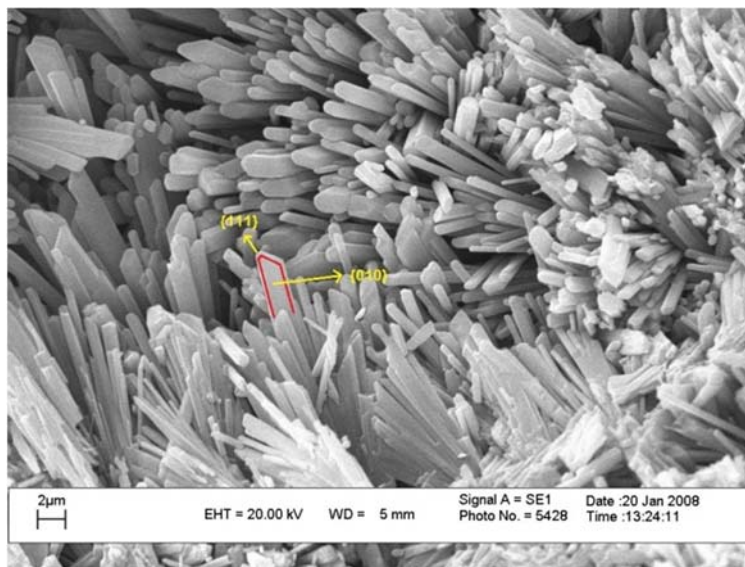
پژوهش حاضر ابتدا به انجام مطالعات فنی در زمینه‌ی فرآیند تبلور و ساختار بلوری گچ می‌پردازد و سپس با بررسی نمونه‌های تاریخی گردآوری شده در بررسی‌های میدانی و مدل‌سازی نمونه‌های جدید بر اساس دستورالعمل‌های سنتی، به انجام مطالعات آزمایشگاهی روی این نمونه‌ها، با استفاده از روش‌های دستگاهی شامل تهیه‌ی تصاویر SEM و آزمایش XRD می‌پردازد. جامعه‌ی آماری مورد بررسی شامل ۳ نمونه‌ی تاریخی و ۳ نمونه‌ی مدل‌سازی شده است. نمونه‌های تاریخی مربوط به آرایه‌های گچ‌بری در حیاط مرکزی مجموعه‌ی کوه خواجه‌ی سیستان متعلق به دوره‌ی اشکانی-ساسانی، ملات گچ نمونه‌برداری شده از دیوار برج شرقی قلعه‌ی الموت قزوین متعلق به دوره‌ی سلجوقی؛ و در نهایت ملات گچ مربوط به دیوار تالار عام از مجموعه‌ی تاریخی شادیاخ نیشابور از دوره طاهری-سلجوقی است. دستورالعمل‌های سنتی مورد استفاده در این تحقیق حاصل گفتگوی شخصی نویسنده با برخی اساتید گچ‌بر یا معمار سنتی در منطقه‌ی یزد و اصفهان (مرحوم استاد مهدی پاک‌نژاد، استاد رضا اعظمی و ...)، برخی منابع مکتوب همچون کتاب تکنولوژی گچ‌بری و گچ‌کاری تألیف مرتضی مطیعی فرد (۱۳۸۲) و یا پایان‌نامه‌های موجود در کتابخانه‌ی دانشگاه هنر اصفهان است. نرم‌افزار پردازش تصویر (JMicro Vision) نسخه‌ی (V1.27)^۱ در

اجرای «پیدا کرد (صالحی کاخکی و اصلانی، ۱۳۹۰). با توجه به این که رویکرد این پژوهش فن‌شناسی آثار گچی تاریخی بر اساس بررسی ریزساختار بلوری آن‌ها است، در اینجا پیشینه‌ی تحقیق از منظر بلورشناسی گچ، فرآیند گیرش آن و ریزساختار آثار گچی بررسی می‌شود. در بررسی ساختارهای خانواده‌ی سولفات‌های کلسیم سه ماده وجود دارند که قابل تبدیل به یکدیگر هستند. این سه ماده عبارت‌اند از انیدریت یا همان گچ سوخته $(CaSO_4)$ ، باسانیت یا همی هیدرات $(CaSO_4 \cdot 0.5H_2O)$ که همان پودر گچ قبل از اختلاط با آب است؛ و ژپس، گچ یا سولفات کلسیم دوآبه $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ ، که همان سنگ گچ قبل از پخت یا ملات گچ بعد از گیرش است (عباسیان، ۱۳۷۱، ص. ۲۲؛ Hudson-Lamb et al., 1996, p. 283). بلور ژپس یا همان گچ در گروه بلورهای منوکلینیک طبقه‌بندی می‌شود (کلاین و هارلبوتف، ۱۳۸۰، ص. ۴۶۲). شکل سه‌بعدی تک‌بلور ژپس در حالت ایده‌آل به صورت زیر است (شکل ۱). شناخت سطح صفحه‌ی $\{010\}$ ، که به صورت شش‌گوش در شکل دیده می‌شود، از این نظر مهم است که محل اتصال مولکول‌های آب به بلور است (Deer et al., 1965, p. 204) و هم‌چنین شاخص مناسبی برای تشخیص اولیه‌ی بلور گچ در تصاویر میکروسکوپ الکترونی است. سطح صفحه‌ی

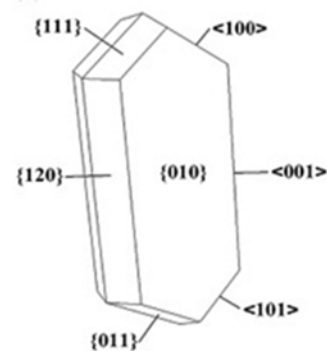
بزرگنمایی‌های ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ برابر تهیه شدند. در فرآیند تهیه‌ی تصاویر SEM از گچ-بری کوه خواجه ضرورت تهیه‌ی تصویر با بزرگنمایی ۱۵۰۰۰ برابر مشخص شد که نتایج آن در ادامه ذکر خواهد شد. آزمایش پراش پرتو ایکس روی نمونه‌های تاریخی کوه خواجه و گچ شادیاخ توسط دستگاه XRD مدل D8-Advance ساخت شرکت Bruker AXS، در دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران انجام شد. تیوپ تولیدکننده‌ی پرتو ایکس از جنس مس (K alpha Cu) بوده که با اختلاف پتانسیل ۴۰ کیلوولت و جریان ۳۰ میلی‌آمپر، پرتو ایکس مورد نیاز را تولید می‌کرد. آزمایش XRD روی نمونه از زاویه ۵ تا ۷۵ درجه (2θ) انجام شد که نتایج آن در ادامه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۳- پیشینه‌ی تحقیق

آثار گچی تاریخی به گستردگی و با رویکردهای مختلف فنی، باستان‌شناسی و تاریخ هنری مورد بررسی قرار گرفته‌اند که می‌توان مجموعه‌ی قابل توجهی از کتاب-شناسی این پژوهش‌ها در مورد آثار گچی ایران را در مقاله‌ی صالحی کاخکی و اصلانی با عنوان «معرفی دوازده گونه از آرایه‌های گچی در تزئینات معماری دوران اسلامی ایران بر اساس شگردهای فنی و جزئیات



شکل ۲: تصویر SEM از گچ تیز، صفحات بلوری $\{010\}$ و $\{111\}$ روی یک بلور نشان داده شده است. بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر



شکل ۱: بلور کامل گچ و صفحات بلوری آن (Wen-Yi Shih et al., 2005, p. 257)

۴- نتایج و یافته‌ها

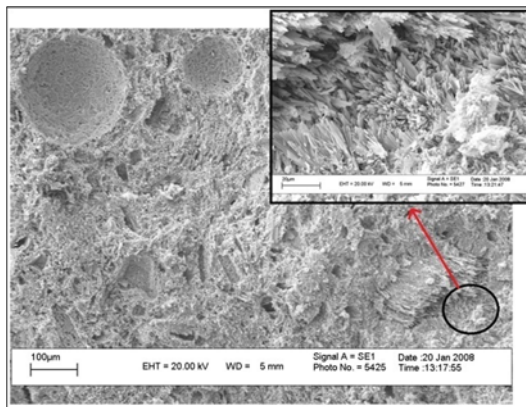
هدف از تهیه و بررسی نمونه‌های ساخته شده بر اساس دستورالعمل‌های سنتی، تهیه ملات‌های متفاوت گچ با خلوص تقریباً بالا به‌عنوان نمونه‌های شاهد، و سپس مقایسه‌ی ریزساختار آن‌ها با نمونه‌های تاریخی است. در ساخت این نمونه‌ها از هیچ‌کدام از افزودنی‌های آلی یا معدنی استفاده نشد و در نتیجه با توجه به این شرایط، نمونه‌های مدل‌سازی شده تنها با میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند.

گچ نیز که در آن، مقدار آب اختلاط برای ساخت خمیر گچ کم است بیشتر برای ساخت تاق و تویزه یا نقاطی که نیاز به ملاتی تندگیر و محکم دارند، استفاده می‌شود. شناخت ریزساختار گچ تیز و تعیین شاخص‌هایی برای شناسایی آن، می‌تواند به شناخت فنون سنتی و شیوه‌ی ساخت آثار تاریخی گچی کمک کند. تصاویر SEM از این نمونه‌های گچ تیز، ابتدا با بزرگنمایی‌های ۱۰۰ و ۲۵۰ برابر تهیه شدند تا محل مناسب برای بررسی‌های دقیق‌تر در بزرگنمایی‌هایی بالاتر انتخاب شوند. در تصاویر با بزرگنمایی‌های ۲۵۰ و ۵۰۰ برابر می‌توان فضاهای خالی سیاه‌رنگ بین بلورها را مشاهده و مقدار آن‌ها را به کمک نرم‌افزار پردازش تصویر محاسبه کرد. تصاویر بررسی شده از گچ تیز با این روش مقدار تقریبی ۴،۹٪ فضای خالی را نشان می‌دهد. البته باید توجه کرد که این اندازه‌گیری در واقع روی تصویر دوبعدی انجام شده است. یکی دیگر از شاخصه‌های گچ تیز مراکز تبلوری است که به‌صورت توده‌های در هم فشرده و گاه فاقد شکل بلوری مشخص دیده می‌شوند که به مرکزیت آن‌ها بلورهای سوزنی و متوازی‌الاضلاع زیادی به‌صورت هم‌جهت و رو به سمت خارج رشد کرده‌اند (شکل ۳). البته نباید این مناطق را با ناخالصی‌هایی همچون ذرات ماسه اشتباه گرفت. برای این منظور در هنگام بررسی نمونه با میکروسکوپ الکترونی روبشی از طیف‌های (EDS: Energy Dispersive Spectroscopy) استفاده شد تا ترکیب این قسمت‌ها به‌صورت دقیق مشخص شود. به‌علاوه لازم به ذکر است وجود بلورهایی با ابعاد بسیار متنوع، کوچک و بزرگ، در کنار یکدیگر از دیگر مشخصات قابل ذکر در

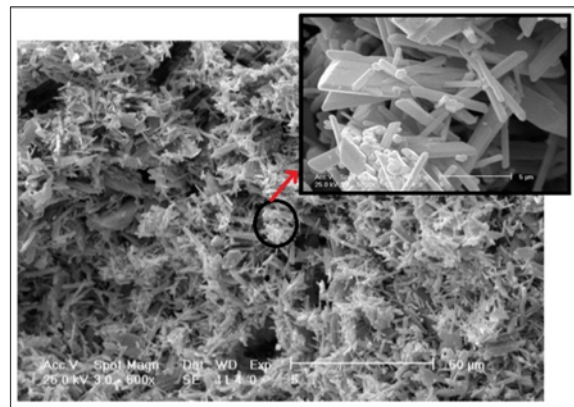
{۰۱۰} این بلور شش‌ضلعی است، اما در تصاویر میکروسکوپ الکترونی تقریباً به‌صورت متوازی‌الاضلاع دیده می‌شود؛ چراکه یکی از صفحه‌های بلوری آن، صفحه‌ی {۱۱۱}، سریع‌تر از بقیه‌ی صفحات رشد کرده است (شکل ۲). در شرایط عادی و بدون وجود مقادیر زیاد یون‌های مزاحم در محلول آبی، یا افزودنی‌های آلی یا معدنی، بلورهای سوزنی و تقریباً بلند گچ تشکیل می‌شوند (Gourdin and Kingery, 1975, p. 135) که سرانتهایی آن‌ها فرم متوازی‌الاضلاع مورد بحث را نشان می‌دهد (شکل ۲).

فرآیند تبلور حاصل سه مرحله‌ی پیوسته است: تشکیل محلول فوق اشباع، تشکیل جوانه و رشد بلور (Abdel-Aal et al., 2004, p. 314). افزودنی‌های آلی یا معدنی با تغییر حلالیت یون‌های سولفات یا کلسیم در محلول، تعداد جوانه‌های تشکیل شده و رشد آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Abdel-Aal et al., 2004, p. 314). مواد آلی نیز به‌طور ویژه بر رشد انتخابی برخی صفحات بلوری اثر می‌گذارند (Middendorf, 2002, p. 17). با افزایش مقدار افزودنی‌های آلی، بلورهای گچ به‌وضوح از شکل بلورهای سوزنی به فرم بلورهایی با قطر بیش‌تر (ستون‌های قطور) درمی‌آیند که در نهایت می‌توانند در غلظت‌های بالاتری از افزودنی‌های آلی به‌صورت مکعب‌های ناقص تبلور پیدا کنند (Jianquan et al., 2007, p. 875).

ریزساختار بسیاری از مواد گچی تاریخی به‌صورت ترکیبی از بلورهای درشت که لبه‌های گرد شده دارند، توصیف شده است. برخی از پژوهشگران وجود بلورهای درشت گچ در مواد تاریخی را ناشی از دگرگونی و تغییر شکل بلور در اثر عامل زمان (David Kingery et al., 1988, p. 231)، یا چرخه‌های مداوم‌تر و خشک و باز تبلور بلورهای گچ در بازه‌ی زمانی طولانی می‌دانند (Middendorf, 2002, p. 169). این شکل بلوری در برخی از ملات‌های گچ دوره‌ی ساسانی معروف به نیم-پخت-نیم‌کوب نیز دیده می‌شود (کرماجانی، ۱۳۸۹)؛ اما تاکنون چنین تحلیل یا پژوهشی بر روی این نمونه‌ها صورت نگرفته و ساختار مستحکم آن‌ها عموماً ناشی از تکنیک فرآوری آن‌ها انگاشته شده است.



شکل ۴: گچ کم مایه، بزرگنمایی تصویر اصلی ۵۰۰ برابر و تصویر بالا سمت راست ۵۰۰۰ برابر است.



شکل ۳: گچ تیز، بزرگنمایی تصویر اصلی ۲۵۰ برابر و تصویر بالا سمت راست ۲۰۰۰ برابر است.

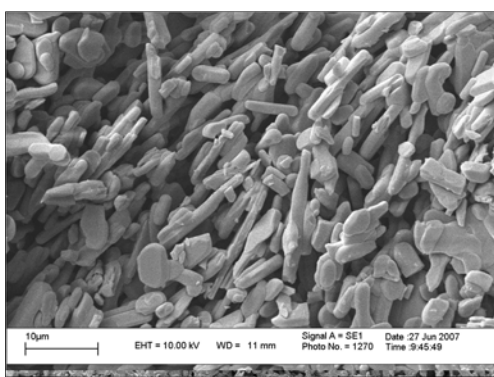
(تشکیل بلورهای ژپس) سخت می‌شود (در این مرحله گچ مقدار محسوسی حرارت نیز آزاد می‌کند)، مقدار کمی آب به ترکیب اضافه کرده و روند هم‌زدن و ورز دادن ملات را آنقدر ادامه می‌دهند که گچ آب می‌اندازد؛ یعنی لایه‌ی نازکی از آب روی سطح آن دیده می‌شود و کمی هم سرد می‌شود (حرارت مرحله قبل را از دست می‌دهد) (میش مست نهی، ۱۳۸۵، ص. ۴۵؛ اصلانی و دیگران، ۱۳۹۲، ص. ۱۳).

تصاویر SEM از گچ کشته مقدار زیادی از بلورهای گچ را نشان می‌دهد که از سطح صفحه {۰۱۰} دیده می‌شوند (شکل ۵). در این ساختار اندازه و فرم بلورها شبیه هم بوده و ساختارهای نامنظم و غیر بلوری در تصاویر SEM دیده نمی‌شود. مقدار تقریبی فضاهای خالی محاسبه شده در این نمونه‌ها ۶۵٪ است. دیده شدن بلورهای گچ از سطح صفحه‌ی {۰۱۰}، نشان‌دهنده‌ی این است که بلورهای گچ در این ترکیب به صورت لایه‌های موازی بازآرایی شده‌اند و صفحات {۰۱۰} آن‌ها روی همدیگر قرار گرفته است. از طرفی چون این صفحات پیوند شیمیایی محکمی با آب ایجاد می‌کنند، آب به راحتی می‌تواند بین این لایه‌ها نفوذ کرده و باعث جدا شدن آن‌ها از یکدیگر شود. به بیان دیگر مقاومت رطوبتی پایین این ترکیب و دیر خشک شدن گچ کشته ناشی از این آرایش بلوری ویژه است.

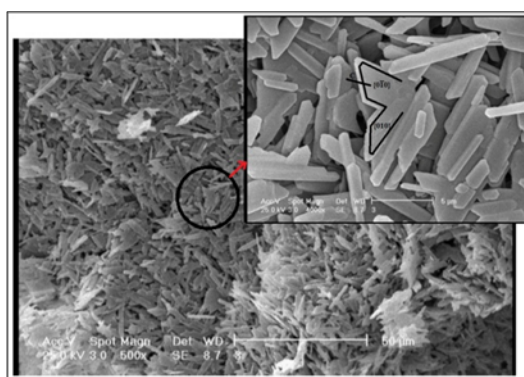
سطح فضای خالی محاسبه شده توسط نرم‌افزار پردازش تصویر کمتر از مقدار واقعی به نظر می‌رسد

مشاهده‌ی ریزساختار گچ تیز است. گچ کم‌مایه یا پرآب، ملاتی است که با مقدار زیاد آب ساخته می‌شود مقدار (W/P=0.5-0.8). زمان گیرش طولانی‌تر و بافت نرم‌تر که اجازه‌ی کار با ابزار را برای مدت طولانی‌تری می‌دهد، از خصوصیات این ملات است. گچ کم‌مایه بیش‌تر در محل‌هایی که نیاز به ساختاری فشرده و تندگیر نداشته باشد، استفاده می‌شده است. البته می‌توان صرفه‌جویی اقتصادی، برای استفاده‌ی کمتر از پودر گچ را هم در کاربرد آن مؤثر دانست. به‌علاوه وقتی - که نیاز به شکل‌دهی حجمی تقریباً بزرگ بدون استفاده از ماده‌ی افزودنی باشد هم می‌توان از گچ کم‌مایه استفاده کرد. میزان تقریبی فضای خالی در ریزساختار این ملات ۱۵٫۹٪ اندازه‌گیری انجام شده در مورد گچ تیز است. در ملات گچ کم‌مایه، برخلاف گچ تیز، مناطقی فاقد شکل مشخص که تعداد زیادی بلور از آن‌ها به سمت خارج رشد کرده باشند، دیده نمی‌شود. بلورها بیشتر سوزنی و بلند بوده که در امتداد محور c و افزوده شدن به صفحه‌ی {۱۱۱} رشد کرده‌اند. در این ترکیب هم می‌توان بلورهایی با اندازه‌های مختلف و متنوع مشاهده کرد (شکل ۴).

گچ کشته نوعی از خمیر گچ است که دیرگیر کردن آن به روش مکانیکی انجام می‌شود. فرآیند سنتی ساخت این گچ مختصراً به این شرح است که مقداری ملات گچ کم‌مایه را با ورز دادن مداوم عمل‌آوری می‌کنند و در مرحله‌ای که ورز دادن مخلوط به دلیل گیرش تقریبی گچ



شکل ۶: تصویر گچ کشته در امتداد لایه‌های بلوری موازی، تزئینات گنبد شیخ جام، بزرگنمایی ۴۰۰۰ برابر: (صیاد شهری، ۱۳۸۸)



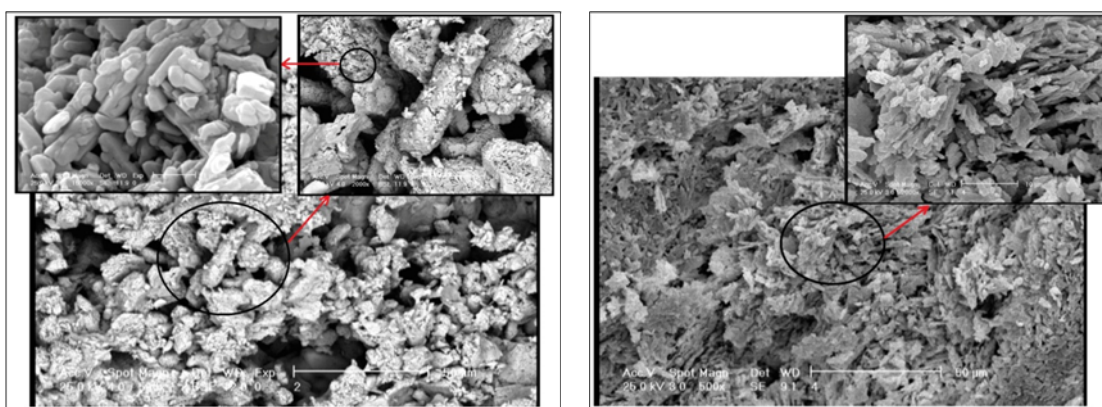
شکل ۵: گچ کشته، بزرگنمایی تصویر اصلی ۵۰۰ برابر و تصویر بالا سمت راست ۵۰۰۰ برابر است.

می‌دهند که سطح آن‌ها با مقداری بسیار زیاد از بلورهای ریزتر پوشیده شده است. این بلورها در بزرگنمایی‌های بالاتر (۱۵۰۰۰ برابر) قابل مشاهده هستند (شکل ۷ بالا سمت چپ). اندازه‌گیری فضاهای خالی در این نمونه میزانی نزدیک به ۲۰٫۵٪ تخلخل در ریزساختار را نشان می‌دهند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی در لایه‌ی رویی، ریزساختاری را نشان می‌دهند که هیچ‌کدام از شاخصه‌های بلوری ذکر شده برای ژئیس را ندارند (شکل ۸). این مسأله (عدم شناسایی بلورهای ژئیس)، با توجه به فاز غالب انیدریت در این لایه، حضور بلورهای تغییر شکل یافته و عدم شناسایی بلورهای ژئیس منطقی است. میانگین مقدار فضاهای خالی اندازه‌گیری شده ریزساختار در لایه‌ی رویی تقریباً ۹٫۴۳٪ است. پیک‌های حاصل از آزمایش پراش پرتو ایکس حضور فاز غالب انیدریت را در هر دو لایه‌ی زیری و رویی گچ‌بری کوه خواجه نشان می‌دهد (شکل ۹).

نمونه‌ی تاریخی دیگر، ملات گچ مربوط به سایت تاریخی شادیاخ، در شهر کهن نیشابور است. استخراج مواد آلی از این نمونه هم نتیجه‌ی منفی داشت و هیچ‌گونه ماده‌ی افزودنی آلی در آن شناسایی نشد. آزمایش پراش پرتو ایکس در این نمونه فاز غالب ژئیس را شناسایی کرد (شکل ۹). تصاویر SEM تهیه شده از این نمونه هم، هیچ‌کدام از مشخصات بلور ژئیس را نشان نمی‌دهد (شکل ۱۰). سنجش فضاهای خالی در ریزساختار در این نمونه هم به کمک نرم‌افزار پردازش تصویر انجام شد که نتیجه‌ی آن حدود ۲٫۵٪ فضای خالی بود. آخرین نمونه‌ی

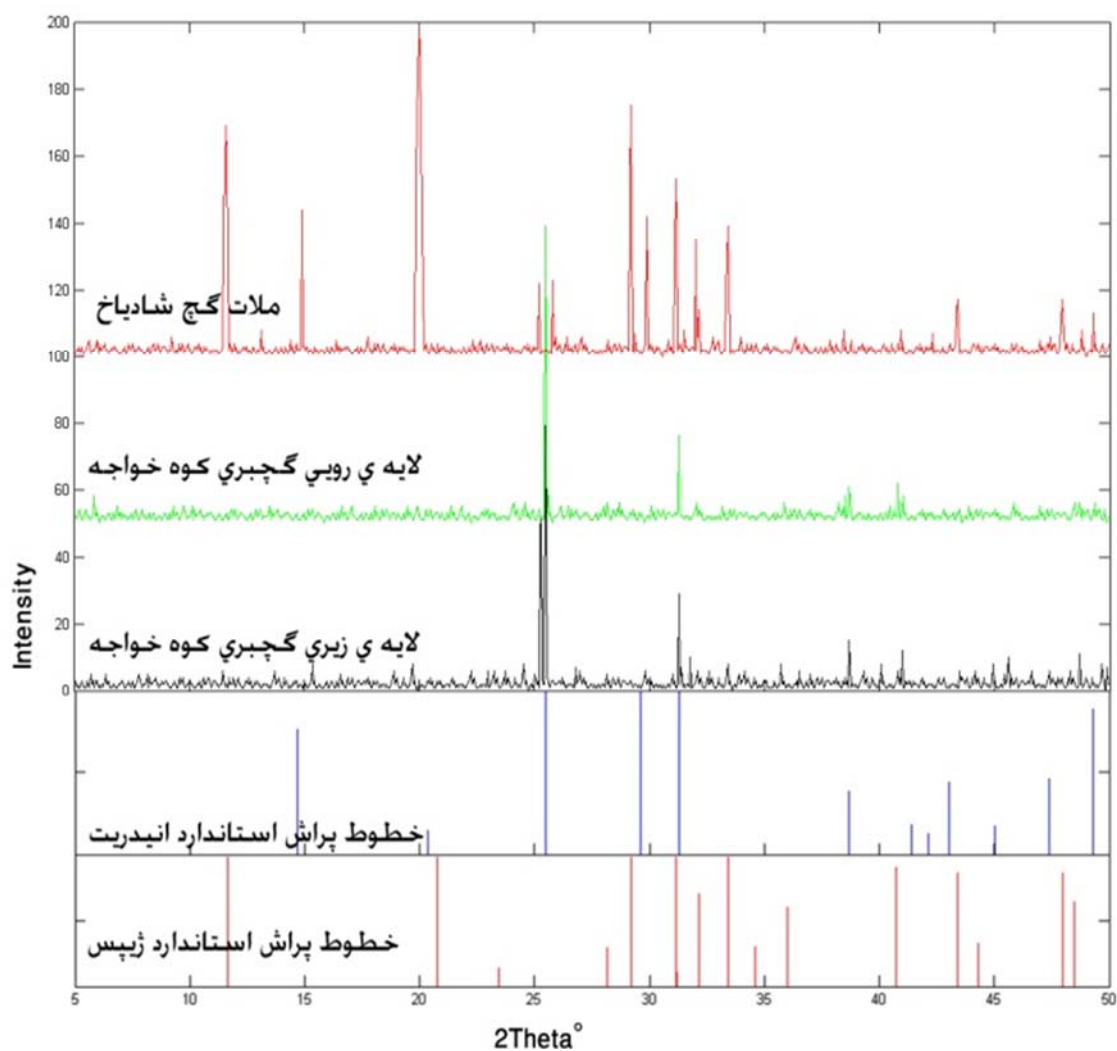
چراکه در تصویرهای تهیه شده فقط سطح لایه‌های بلوری دیده می‌شود و اگر تصویری موازی بر جهت قرار گرفتن صفحات {۰۱۰} مورد تحلیل قرار بگیرد نتیجه‌ی متفاوتی خواهد داشت (شکل ۶). اصطلاح گچ نیم‌کشته نیز میان برخی اساتید سنتی رایج است که بر اساس پژوهش‌های انجام شده و مصاحبه با اساتید سنتی عبارت از ترکیب گچ کشته همراه با افزودن ثانویه‌ی پودر گچ است (اصالانی و دیگران، ۱۳۹۲، ص. ۱۳). استفاده از XRD برای تشخیص کانی‌های موجود در گچ‌بری کوه خواجه و ملات گچ شادیاخ انجام شد. شناسایی به کمک تست سوختن تر و استخراج مواد آلی^۴ با هدف تعیین حضور یا عدم حضور افزودنی آلی به ملات روی بخشی از هر یک از این نمونه‌ها صورت گرفت. بخش سالم مواد مورد بحث که مورد تخریب ناشی از سوختن تر یا فرآیند استخراج با محلول‌های قطبی و غیر قطبی قرار نگرفته بود، با میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد.

گچ‌بری کوه خواجه از دو لایه‌ی گچ تشکیل شده که لایه‌ی رویی آن بافت بسیار ظریفی دارد، درحالی‌که لایه‌ی زیری دانه‌بندی درشت‌تری را نشان می‌دهد. پوشش آلی شناسایی شده روی سطح بیرونی احتمالاً لایه‌ی محافظت‌کننده‌ای بوده که توسط باستان‌شناسان در زمان کشف اثر روی آن زده شده است (میش مست نهی، ۱۳۸۵، ص. ۶۱). پس از حذف مکانیکی این لایه‌ی آلی هیچ‌گونه افزودنی آلی دیگری در بافت لایه‌های گچ-بری شناسایی نشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از لایه‌ی زیری، بلورهای تغییر شکل یافته و درشتی را نشان



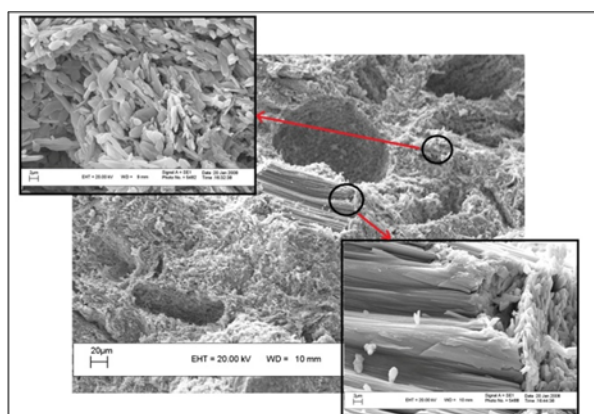
شکل ۸ (چپ): لایه‌ی رویی گچ‌بری کوه خواجه، بزرگنمایی تصویر اصلی ۵۰۰ برابر و بالا سمت راست ۲۰۰۰ برابر

شکل ۷ (راست): لایه‌ی زیری گچ‌بری کوه خواجه، تصویر اصلی ۵۰۰ برابر، بالا سمت راست ۲۰۰۰ برابر و بالا سمت چپ ۱۵۰۰۰ برابر

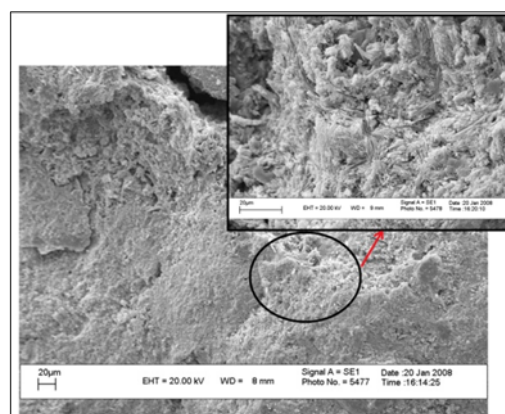


شکل ۹: نتایج پراش پرتو ایکس از نمونه‌های تاریخی

استاندارد انیدریت از (Bezou C. et al., 1995, p. 165-176) و استاندارد ژپس از (Comodi P. et al., 2008, p. 1530-1537)



شکل ۱۱: ریز ساختار ملات گچی قلعه الموت، بزرگنمایی تصویر اصلی ۵۰۰ برابر و جزئیات ۵۰۰۰ برابر است.



شکل ۱۰: ملات گچ شادیاخ، بزرگنمایی تصویر اصلی ۵۰۰ برابر و تصویر بالا سمت راست ۲۰۰۰ برابر است.

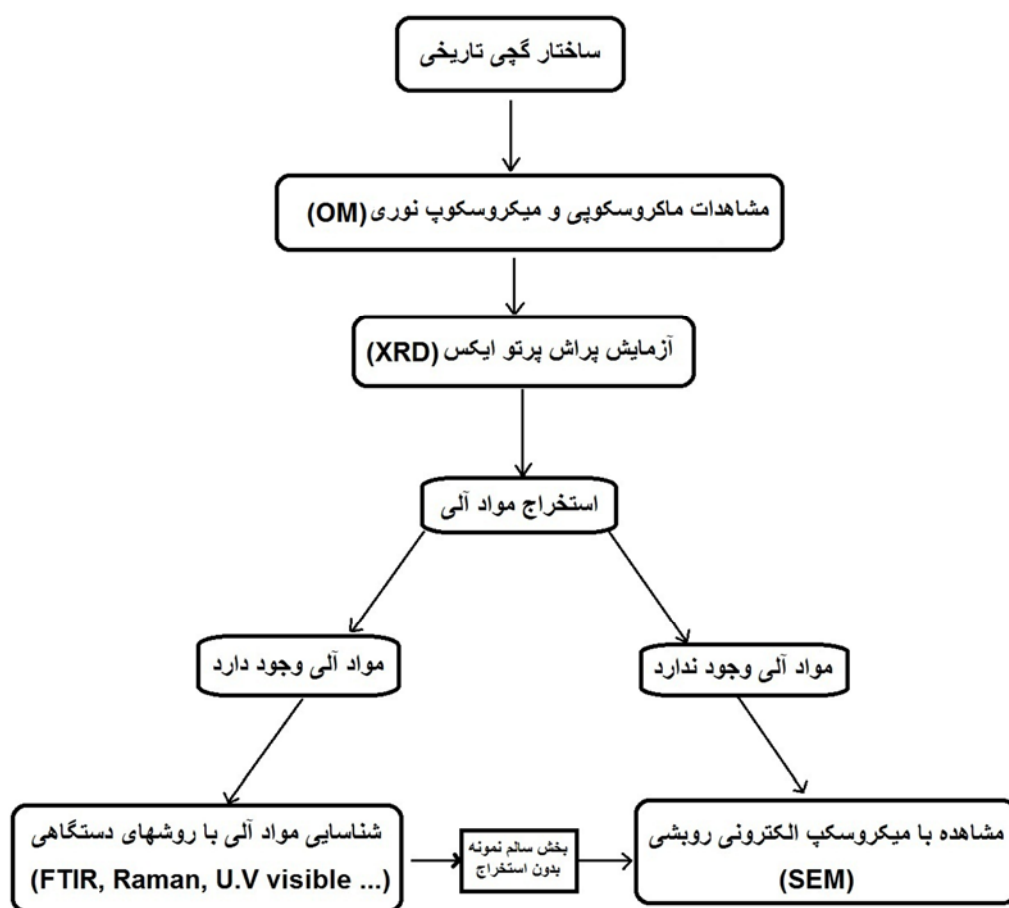
بگیرند. رویکرد استفاده‌ی هم‌زمان از روش‌های مختلف دستگاہی در کنار یکدیگر می‌تواند به این شناخت کمک کند. با توجه به مطالب بیان شده و اختلاف‌های موجود در ریزساختار آثار گچی تاریخی، که ناشی از تفاوت در تکنیک ساخت، عمل‌آوری متفاوت و یا آسیب‌های گوناگون آن‌ها است، چارچوب اصولی روش برخورد با این‌گونه آثار جهت مطالعه و شناسایی آن‌ها در شکل ۱۲ ارائه شده است. همان‌طور که در این نمودار آمده است، اولین قدم در این بررسی مشاهدات میکروسکوپی و میکروسکوپ نوری است. در این مرحله می‌توان آثار خطوط و بقایای زیادی از مراحل ساخت اثر یا عوامل آسیب‌رسان به آن را به کمک چشم مسلح یا غیرمسلح مشاهده و مستندنگاری کرد.

در مرحله‌ی بعد آزمایش پراش پرتو ایکس حضور یا عدم حضور سولفات‌های کلسیم در اثر تاریخی را نشان می‌دهد. نتایج پراش پرتو ایکس می‌تواند فرض اولیه‌ی ساخته شدن اثر توسط ملات گچ را اثبات یا رد کند. به علاوه حضور یا عدم حضور شاخص افزودنی‌های معدنی همچون رس، ماسه، آهک، نمک‌ها و غیره نیز، در مقادیر بالاتر از ۲٪ توسط آزمایش دقیق پراش پرتو ایکس مشخص قابل شناسایی است. سپس باید شناسایی حضور یا عدم حضور و استخراج مواد آلی، روی قسمت کوچکی از ماده‌ی تاریخی صورت گیرد. به دلیل حساسیت و پیچیدگی مواد آلی، به نظر نویسنده نمی‌توان به راحتی مواد آلی موجود در ساختار را بدون استخراج از ریزساختار

تاریخی بررسی شده در این مقاله مربوط به ملات گچ ریزدانه، نمونه‌برداری شده از قلعه الموت قزوین است. هیچ ماده‌ی افزودنی آلی در این ملات نیز شناسایی نشد. کمبود امکانات مناسب در زمان بررسی این نمونه سبب شد که آنالیز آن فقط به تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی محدود بماند (شکل ۱۱). مقدار فضای خالی محاسبه شده در این ریزساختار حدود ۳۸٪ بود. دو نکته قابل ذکر در این نمونه عبارت‌اند از شکل بلورها که از حالت سوزنی خارج شده‌اند و ساختاری تقریباً درشت را نشان می‌دهند که بدون حضور هیچ‌گونه ماده‌ی افزودنی آلی جالب توجه بوده و همان‌طور که در بخش پیشینه‌ی تحقیق اشاره شد، می‌تواند دلیلی برای تغییرات تدریجی شکل بلور در اثر گذشت زمان باشد. نکته‌ی دیگر بخشی از تصویر است که جزئیات آن به صورت شکلی مجزا در پایین سمت راست تصویر دیده می‌شود. لبه‌ی متوازی-الاضلاع‌های بلور گچ در امتداد خطوط موازی نشان-دهنده‌ی ماهیت بلوری ژئیس برای ساختار این خطوط موازی است؛ اما از طرف دیگر هیچ‌گونه تحلیلی برای چگونگی شکل‌گیری این خطوط موازی، اگر در اثر گیرش ملات تشکیل شده‌اند، پیشنهاد نمی‌شود.

۵- بحث

فن‌شناسی و آسیب‌شناسی آثار گچی فرآیندهایی هم‌بافته هستند که به دلیل حساسیت فیزیکی و شیمیایی بلور گچ به شرایط محیطی باید با هم مورد توجه و بررسی قرار

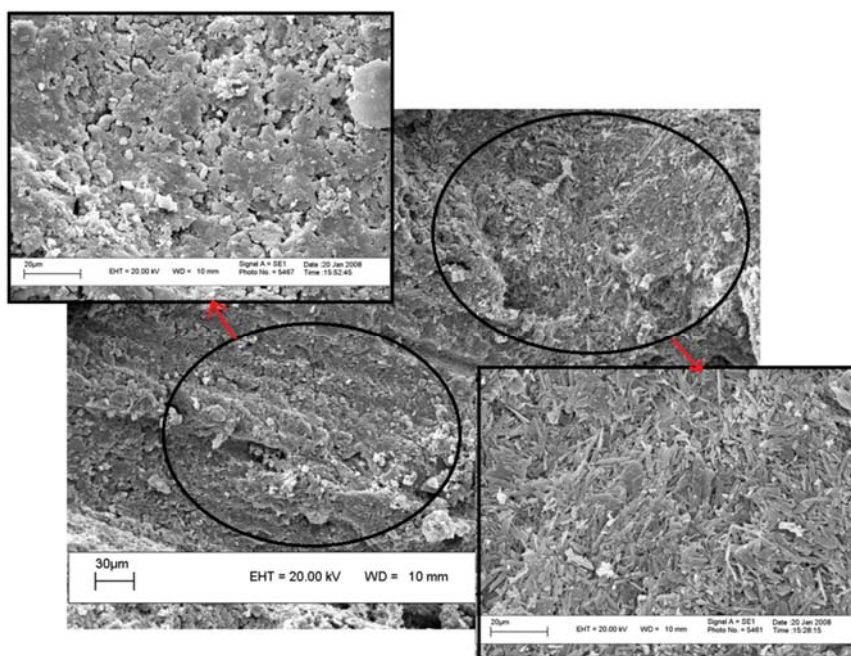


شکل ۱۲: نمودار پیشنهادی بررسی ساختارشناسی آثار گچی تاریخی

عدم انجام قدم به قدم مراحل ذکر شده مانع از درک مناسب تصاویر SEM می‌شود. به بیان دیگر، پس از بررسی‌های اولیه با چشم مسلح و غیرمسلح، آزمایش XRD است که تعیین می‌کند امکان وجود ماده‌ای از خانواده‌ی سولفات کلسیم در نمونه وجود دارد یا خیر؛ و پس از آن اگر بلور منوکلنیک در تصویر SEM دیده شد، احتمالاً ژئپس هست یا نه.

نکته‌ی مهم و قابل توجه دیگر انتخاب نقطه‌ی مناسب در تصاویر میکروسکوپ الکترونی، برای بررسی دقیق‌تر است. امکان دارد در یک نمونه‌ی واحد اختلاف چند میکرونی نتایج کاملاً متفاوتی به بار بیاورد و عکس‌های گرفته شده کاملاً غیرقابل استفاده باشند (شکل ۱۳). به عنوان مثال اگر در شکل ۱۳، بررسی فقط به نقطه سمت چپ محدود می‌ماند و تنها این نقطه با بزرگنمایی‌های بالاتر بررسی می‌شود؛ هیچ ساختار بلوری قابل تفسیری دیده نمی‌شود. بر اساس این مشاهدات

بلوری اثر گچی شناسایی کرد. این شناسایی فرآیندی کاملاً تخریبی است و باید برای ادامه‌ی روند آزمایشی از دیگر قسمت‌های سالم نمونه استفاده کرد. شایان ذکر است که منظور از مواد آلی در اینجا افزودنی‌های آلی همچون بست‌ها، چسب‌ها، روغن‌ها و موادی از این قبیل است و نه بقایای ماکروسکوپی ذراتی همچون زغال، خرده چوب، کاه، مو و غیره. اگر شناسایی یا استخراج ماده‌ی آلی موفقیت‌آمیز بود، می‌توان آن را به صورت تقریبی یا دقیق به کمک روش‌های دستگاهی و حتی شیمی کلاسیک شناسایی کرد. تنها پس از تأیید حضور یا عدم حضور افزودنی آلی است که می‌توان به سراغ مشاهده‌ی سطح تازه شکسته شده‌ی نمونه به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی رفت. از یک‌سو، با توجه به اینکه بلورهای مختلف زیادی با شبکه منوکلنیک متبلور می‌شوند و از سوی دیگر تأثیر مواد آلی یا فرآیند انیدریت شدن تغییرات زیادی در فرم بلورها ایجاد می‌کند؛



شکل ۱۳: بخشی از تزئینات گچی بقعه‌ی سید رکن‌الدین یزد، بزرگنمایی تصویر اصلی ۵۰۰ برابر و تصاویر پایین سمت راست و بالا سمت چپ ۲۰۰۰ برابر است.

مناسبی است که به کمک آن بتوان برخی خصوصیات ملات‌های تاریخی یا نمونه‌های مدل‌سازی شده‌ی جدید را اندازه گرفت. جدول ۱ نتایج این اندازه‌گیری‌ها از نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس این داده‌ها می‌توان مشاهده کرد که اولاً ساختار گچ تیز به‌وضوح شامل فضای خالی کمتری در ریزساختار است و به‌راحتی نسبت به بقیه‌ی ساختارها قابل شناسایی است. گچ کم‌مایه از همان مرحله‌ی ساخت دارای فضای خالی بیش‌تری نسبت به گچ زنده است. گچ پودری شده که در آن فرآیند باز تبلور به‌صورت ریز بلورهای تشکیل شده روی بلورهای اصلی دیده می‌شوند، دارای بیش‌ترین مقدار فضای خالی است؛ که همین موضوع مقاومت کمتر و به

پیشنهاد می‌شود که ابتدا تصاویری با بزرگنمایی‌های کم (۱۰۰ تا ۵۰۰ برابر) تهیه شود و مناطق حاوی فرم‌های بلوری مشخص شده و سپس آن بخش‌ها در بزرگنمایی‌های بالاتر (۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ برابر) مشاهده شوند. هرچند در برخی موارد همچون نمونه‌ی شادیاخ (شکل ۱۰) ممکن است تصاویر SEM هیچ ساختار بلوری را نشان ندهند. بهتر است در چنین مواردی از هرگونه تفسیر پرهیز کرد و تنها به محاسبه‌ی مقدار فضای خالی موجود در ریزساختار با نرم‌افزار پردازش تصویر بسنده کرد. نتایج پردازش تصاویر میکروسکوپ الکترونی با هدف تعیین مقدار فضای خالی بین بلورها که به‌عنوان شاخص تقریبی مقدار آب اختلاط گچ در نظر گرفته شد، گزینه‌ی

جدول ۱: محاسبه‌ی درصد فضاهای خالی در ریزساختار نمونه‌های گچی بررسی شده توسط نرم‌افزار پردازش تصویر

انحراف معیار	درصد فضای خالی در ریزساختار	نمونه
٪۱,۴۹	٪۴,۹	گچ تیز
٪۰,۶۹	٪۱۵,۹	گچ کم‌مایه
٪۰,۹۵	٪۶,۵۱	گچ کشته
٪۴,۵	٪۲۰,۵	گچ پودری و انیدریت شده (کوه خواجه، لایه‌ی زیری)
٪۰,۹۵	٪۹,۴۳	گچ انیدریت شده (کوه خواجه، لایه‌ی رویی)

اصطلاح پودری بودن آن را نیز تبیین می‌کند. گچ کشته نسبت به گچ کم‌مایه ریزساختار فشرده‌تری دارد اما در حقیقت این اندازه‌گیری به شدت متأثر از زاویه‌ی تهیه تصویر SEM از گچ کشته است. بر خلاف بقیه‌ی نمونه‌ها که جهت‌گیری بلورها در تمام جهات کاملاً تصادفی است در نمونه‌ی گچ کشته، فرآیند مکانیکی سبب جهت‌گیری موازی لایه‌ها می‌شوند و در نتیجه بر پردازش تصویرهای SEM در یک راستای خاص اثر می‌گذارد. چگالی استاندارد انیدریت ۲,۹ تا ۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب است درحالی‌که چگالی ژپیس ۲,۳ تا ۲,۳۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شده است (Deer et al., 1965, vol.5, p. 203-219). این موضوع به معنای کاهش حجم اندازه‌ی بلور است. به بیان دیگر در اثر فرآیند انیدریت شدن و از نگاه ماکروسکوپی اندازه‌ی کلی اثر کوچک‌تر شده است و احتمالاً ریزترک‌های بسیار ریزی در سرتاسر اثر پراکنده شده است. پدیده‌ی وجود ریزترک در آثار گچی بدون حضور فشارهای مکانیکی خارجی معمول نیست و حضور آن‌ها را می‌توان به‌عنوان اولین نشانه‌ی احتمالی فرآیند انیدریت شدن ساختار در نظر گرفت؛ که البته صحت این حدس باید به‌وسیله‌ی آزمایش پراش پرتو ایکس بررسی شود. اشاره‌ی کوتاهی به این مسئله نیز ضروری به نظر می‌رسد که مشاهده‌ی دست کم ۲۰٪ مواد فرار (L.O.I) به دلیل آب موجود در ساختار بلوری گچ، در آزمایش طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس XRF، پدیده‌ای معمولی است اما باید توجه شود که تمام مقدار مواد کربناته و آلی موجود در ساختار نیز به این حجم مواد فرار افزوده می‌شوند. به عبارت دیگر آزمایش XRF، نسبت به بقیه‌ی روش‌های ذکر شده به‌جز پژوهش‌های ویژه، آنالیز چندان مفیدی برای شناسایی ساختار آثار گچی تاریخی نیست.

۶- نتیجه‌گیری

بررسی نمونه‌های مدل‌سازی شده و تاریخی در کنار مطالعات کتابخانه‌ای نشان می‌دهد که بررسی ریزساختار مواد تاریخی گچی نیاز به رویکردی آزمایشگاهی و روشمند دارد. حساسیت فیزیکی و شیمیایی بلور گچ نسبت به شرایط محیطی ضرورت بررسی و توجه هم‌زمان به

پدیده‌ی فن‌شناسی و آسیب‌شناسی اثر گچی را نشان می‌دهد. بررسی اثر با چشم مسلح و غیرمسلح، آزمایش پراش پرتو ایکس و تعیین حضور یا عدم حضور ماده‌ی افزودنی آلی، قدم‌های مهم و اجتناب‌ناپذیر هستند که تنها پس از طی آن‌ها می‌توان به بررسی اثر به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی رفت. تصاویر تهیه شده باید از بزرگنمایی‌های کم شروع شده و پس از تشخیص و انتخاب محل مناسب تا بزرگنمایی ۴۰۰۰ یا ۵۰۰۰ ادامه یابد (البته موارد خاص از این قاعده مستثنا هستند). از سوی دیگر این واقعیت را نیز باید در نظر گرفت که تمام تصاویر گرفته شده هم قابل تفسیر نیستند. در نهایت استفاده از نرم‌افزارهای پردازش تصویر امکان مناسبی را برای بررسی و مقایسه عددی نمونه‌ها، مثلاً سنجش فضای خالی بین بلورها در ریزساختار مهیا می‌کنند. با توجه به نتایج این آنالیزها نمونه‌های مربوط به کوه خواجه دو آسیب مختلف یا تغییر متفاوت را در ریزساختار نشان می‌دهند. انیدریت شدن که در هر دو لایه شناسایی شد و پودری شدن که فقط در لایه‌ی زیرین و به‌صورت تشکیل بلورهای فوق‌العاده ریز روی سطح بلورهای بزرگ‌تر دیده شد. استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر ساختاری برای لایه‌ی رویی گچ‌بری کوه خواجه نشان می‌دهد که با وجود انیدریت شدن و طبیعتاً افزایش فضای خالی در ریزساختار، مقدار عددی محاسبه شده فشرده‌گی بیش‌تری را نسبت به گچ کم‌مایه‌ی مدل‌سازی شده نشان می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان استفاده از گچ تیز برای ساخت لایه‌ی رویی گچ‌بری کوه خواجه تعبیر شود. این مقدار عددی در هر دو نمونه‌ی شادیاخ و الموت نیز بیانگر استفاده از خمیر گچ تیز است. مثال‌های گچ کشته را در ریزساختار آثار تاریخی هم می‌توان در لایه‌ی زیر تزئینات نقاشی گنبد شیخ جام یا نمونه‌ی مشکوک به کشته یا نیم‌کشته بودن مربوط به بقعه‌ی سید رکن‌الدین یزد مشاهده و شناسایی کرد.

سپاسگزاری

بخشی از این مقاله شامل: آنالیزهای مربوط به نمونه‌ی تاریخی کوه خواجه و نمونه‌های مدل‌سازی شده‌ی گچ کشته و گچ کم‌مایه (پر آب) مستخرج از پایان‌نامه‌ی

بررسی گوناگونی شیوه‌های اجرایی آرایه‌های گچی قالبی بناهای تاریخی در دوره قاجار شهر یزد، با تکیه بر مطالعه موردی تزئینات محراب شبستان شاهزاده در مسجد جامع کبیر. دو فصلنامه مرمت و معماری ایران، بهار و تابستان، سال ۳۰، شماره ۵: ۱-۱۴.

پرنا، مهدی. (۱۳۸۶). کنکور کارشناسی ارشد مرمت و احیای بناهای تاریخی (کتاب چهارم: آسیب‌شناسی و فن‌شناسی بناهای سنتی). تهران: آزاده.

صالحی کاخکی، احمد، و اصلانی، حسام. (۱۳۹۰). معرفی دوازده گونه از آرایه‌های گچی در تزئینات معماری دوران اسلامی ایران بر اساس شگردهای فنی و جزئیات اجرایی. مطالعات باستان‌شناسی، تابستان و پاییز، دوره ۳، شماره ۱: ۸۹-۱۰۶.

صیاد شهری، حامد. (۱۳۸۸). مطالعه‌ی فنی و مستندسازی نقاشی‌های گنبدخانه‌ی مزار شیخ احمد جامی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی. دانشکده تحصیلات تکمیلی. دانشگاه هنر.

عباسیان، میر محمد. (۱۳۷۱). مبانی شیمی فیزیک گچ. تهران: شرکت ایران گچ.

کرم‌جان، مریم. (۱۳۸۹). مطالعه‌ی ملات چسباننده منسوب به دوره ساسانی در بنای معبد آناهیتا کنگاور. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی. دانشکده مرمت. دانشگاه هنر اصفهان.

مطیعی فرد، مرتضی. (۱۳۸۲). تکنولوژی گچ‌بری و گچ‌کاری. جلد اول. تهران: مؤسسه‌ی فرهنگی تکوک زرین.

میش مست نهی، مسلم. (۱۳۸۵). تحلیل فن‌شناسی، وضعیت حفاظتی و مدل‌سازی آسیب‌شناسی گچ‌بری-های کوه خواجه سیستان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی. دانشکده مرمت. دانشگاه هنر اصفهان.

منابع لاتین

Abdel-Aal, E. A., Rashad, M. M., & El-Shall, H. (2004). Crystallization of calcium sulfate dihydrate at different supersaturation ratios and different free sulfate concentrations. *Crystal Research and Technology*, 39(4), 313-321.

کارشناسی ارشد نویسنده در دانشکده‌ی مرمت دانشگاه هنر اصفهان با عنوان «تحلیل فن‌شناسی، وضعیت حفاظتی و مدل‌سازی آسیب‌شناسی گچ‌بری‌های کوه خواجه سیستان» است. که در همین راستا از آن مجموعه سیاست‌گذاری می‌گردد. لازم به ذکر است پژوهش روی نتایج آن در این مقاله پیگیری شده است. بقیه‌ی بخش‌های مقاله حاصل فرآیند تحقیقی و نمونه‌برداری چندین ساله پس از پایان دوره‌ی کارشناسی ارشد است. در پایان شایسته است از یاری، بحث و تبادل نظر تمام دوستان و همکاران عزیز، در مراحل مختلف این پژوهش تشکر و قدردانی شود. آقایان: پرویز هلاکویی، حامد صیاد شهری، میر محمد عباسیان، حسام اصلانی، عبدالرحیم رضایی و خانم‌ها: نگار افتخاری و عاطفه شکفته.

پی‌نوشت‌ها

1. <http://www.jmicrovision.com>

2. BSE: Back Scattered Electron

۳. تا به حال هیچ پژوهش سنیتیکی یا ترمودینامیکی در زمینه‌ی فرآیند ساخت گچ کشته انجام نشده است که بتوان در مورد تغییرات حرارتی آن در فرآیند ساخت نظر داد. از طرف دیگر همین مسئله ارزش واژه‌شناسی و شناخت علمی روش‌های سنتی به کمک علوم جدید را نشان می‌دهد و بیان می‌کند که یک اصطلاح در گفتمان سنتی اساتید گچ‌بر می‌تواند اشاره به ریزساختار بلوری ویژه‌ای داشته باشد که تاکنون مورد شناسایی دقیق قرار نگرفته است.

۴. منظور از شناسایی افزودنی‌های آلی در مرحله‌ی اول تعیین وجود یا عدم وجود آن‌ها در ساختار با روش‌هایی همچون سوختن «تر» یا استخراج با حلال‌های مختلف است. مرحله‌ی بعد می‌تواند تلاش برای دستیابی به ترکیب آن‌ها باشد که برای این منظور باید ابتدا ماده مورد نظر به کمک روش‌های مختلف از جمله قرار گرفتن در حلال‌های قطبی یا غیر قطبی از ساختار گچ جدا شود و سپس مورد تجزیه‌ی دستگاهی و شناسایی ترکیب شیمیایی قرار بگیرد.

منابع فارسی

اصلانی، حسام، میرنیام، آصفه، و علومی، مجید. (۱۳۹۲).

- Bezou, C., Nonat, A., Mutin, J.C., Christensen, A.N., & Lehmann, M. S. (1995). Of the crystal structure of gamma-CaSO₄, CaSO₄·0.5(H₂O), and CaSO₄·0.6(H₂O) by powder diffraction methods Locality: Maurienne, France. *Journal of Solid State Chemistry*, 117:165-176.
- Comodi, P., Nazzareni, S., Zanazzi, P. F., & Speziale, S. (2008). High-pressure behavior of gypsum: A single-crystal X-ray study Locality: Valle di Caramanico, Abruzzo, Italy *American Mineralogist*, 93: 1530-1537.
- David Kingery, W., Vandiver, P. B., & Prickett, M. (1988). The beginnings of pyrotechnology, part II: Production and use of lime and gypsum plaster in the Pre-Pottery Neolithic Near East. *Journal of Field archaeology*, 15(2), 219-243.
- Deer, W.A., Howie, R.A., & Zussman, J. (1965). *Rock-Forming Minerals*. Vol. 5, New York: John Wiley and Sons.
- Gourdin, W. H., & Kingery, W. D. (1975). The beginnings of pyrotechnology: Neolithic and Egyptian lime plaster. *Journal of Field Archaeology*, 2(1-2), 133-150.
- Hudson-Lamb, D. L., Strydom, C. A., & Potgieter, J. H. (1996). The thermal dehydration of natural gypsum and pure calcium sulphate dihydrate (gypsum). *Thermochimica acta*, 282, 483-492.
- Jianquan, Li, Guozhong, Li, Yanzhen, Yu. (2007). The influences of gypsum water-proofing additive on gypsum crystal growth. *Materials letters*, 61(3), 872-876.
- Kröger, J. (1982). *Sasanidischer Stuckdekor: Ein Beitrag zum Reliefdekor aus Stuck in sasanidischer und frühislamischer Zeit nach den Ausgrabungen von 1928/9 und 1931/2*. Mainz: Philipp Von Zabern.
- Middendorf, B. (2002). Physico-mechanical and microstructural characteristics of historic and restoration mortars based on gypsum: current knowledge and perspective. *Geological Society, London, Special Publications*, 205(1), 165-176.
- Shih, W. Y., Rahardianto, A., Lee, R. W., & Cohen, Y. (2005). Morphometric characterization of calcium sulfate dihydrate (gypsum) scale on reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*, 252(1), 253-263.
- Torraca, G. (1982). *Porous Building Materials-Materials Science for Architectural Conservation*. Rome: ICCROM.