Journal of Research on
ARCHAEOMETRY
A Peer-Reviewed Academic Journal of Archaeological and Conservation Science Studies

Tabriz Islamic Art University

*Research Paper*

# Microstructural and Compositional Analysis of Gypsum Mortars from the Mihrabs of Malik Mosque in Kerman with an Approach to Application in Conservation Processes

**Vahideh Rahimimehr**[1,*]

1. Assistant professor, Department of Architecture, Ke.C., Islamic Azad University, Kerman, Iran
* Correspondence: rahimimehr@iau.ac.ir

## Abstract

Plasterwork, as an inseparable part of traditional architecture, holds a special status. One of the masterpieces of Islamic-era plaster art is the mihrab adorned with plaster decorations featuring arabesque motifs and Kufic inscriptions. The historical mihrabs of Malek Mosque (also known as Imam Khomeini Mosque) in Kerman, recognized as the oldest mosque in Kerman, are exemplary cases. The delicacy of execution and the complexity of the motifs of these mihrabs have distinguished them as unique works in the history of Islamic art. This research aims to investigate the technological characteristics of the plaster mortar used in the historical mihrabs of Malek Mosque. Studying these mihrabs is significant because understanding the composition and structure of historical mortars can greatly contribute to improved conservation, methodological restoration, and precise reconstruction of these Islamic architectural elements. In this study, three samples from three different rooftop mihrabs of the mosque were analyzed using advanced laboratory techniques, including X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS). The results indicated that the predominant phase in all samples is gypsum. Furthermore, one of the samples, in comparison to the others, exhibits the most homogeneous particle size distribution and the densest microstructure. Additionally, XRD analysis confirmed that this sample contains the highest amount of quartz and calcite, which is likely the reason for its greater strength and durability compared to the other samples. This sample, identified as the optimal structure, serves as a benchmark for producing stable mortars for conservation projects. These findings not only enhance the understanding of plaster manufacturing technology during the historical period but also provide an essential reference for formulating compatible mortars in the restoration of plaster artworks.

**Keywords:** Plaster mortar, Mihrab, Malek Mosque, Kerman, XRD, SEM-EDS.

Received: 2025/5/17
Revised: 2025/6/6
Accepted: 2025/6/14
Published: 2025/6/30

**Copyright:** ©2025 by the Authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

## Introduction

Gypsum plaster, as one of the most widely used decorative materials in construction, has played a significant role in architecture. With its unique capabilities, it has served as the medium for creating masterpieces such as mihrabs adorned with intricate patterns and Kufic inscriptions. Among these, the mihrabs of Malek Mosque in Kerman (the largest and oldest mosque in the city) stand as a prominent example of plasterwork art in Iranian Islamic architecture.

The mosque follows a four-Iwan design and features multiple prayer halls. The Imam Hasan Prayer Hall, the oldest section, contains four plaster mihrabs decorated with arabesque motifs and Kufic inscriptions, which are considered masterpieces of Islamic

art. One mihrab is located indoors, while the other three are situated on the rooftop of the prayer hall inside a protective chamber constructed by the Cultural Heritage Organization.

Unfortunately, no laboratory or technical studies have been conducted so far on the plaster decorations of these mihrabs. Therefore, this study represents the first effort to technically and structurally analyze the plaster used in this historic artifact and to propose comprehensive conservation and restoration strategies.

Comparative analyses can help identify construction processes, technical and cultural developments, and the influence of geographical conditions in each period, thereby contributing to the revival of historic plasterwork art and the preservation of Iranian Islamic architectural identity. Additionally, identifying these differences can assist in accurately reconstructing the stages of the mihrabs' construction and decoration.

Thus, this research not only aids in the conservation and restoration of Malek Mosque's cultural heritage but also serves as a reference for future studies in the fields of art history and traditional construction technologies.

## Materials and Methods

This research, using an experimental-analytical method, attempts to study the technology of gypsum mortar used in the gypsum Mihrabs of the Malek Mosque. In this laboratory and applied study, after obtaining permission from the Kerman Cultural Heritage and visiting the Mihrabs behind the roof of the Malek Mosque, a powder sample was prepared from each of the three historical Mihrabs and sent to the Razi Laboratory. In this regard, in order to identify and detect the crystalline phases present in the samples, X-ray diffraction (XRD) analysis was performed using a powder method on three gypsum mortar samples to determine the crystalline compositions, and the analysis method of a scanning electron microscope equipped with an X-ray energy dispersive spectrometer belonging to the Razi Applied Sciences Foundation was used. The device of this foundation is the MIRA3 model manufactured by TESCAN Company and equipped with a BSE detector to detect phase changes based on the atomic number in the sample. The EDS analyzer used in this device has a resolution of >126 eV and a resolution limit of more than 5000ppm for identifying elements from boron (B) onwards in the periodic table.

## Results

XRD (X-ray Diffraction) test on sample A shows that it is non-crystalline, which is probably due to the presence of organic materials or fine-grained minerals that are not well crystallized. Also, phase analysis showed that Gypsum - $CaSO_4.2H_2O$: The dominant and main phase of this gypsum mortar and the other phases are Quartz - $SiO_2$, Calcite - $CaCO_3$ respectively. EDX results show that the main elements present in the sample include Ca (calcium) and S (sulfur), which indicates the presence of gypsum ($CaSO_4.2H_2O$). Also, the presence of Si (silicon) in EDX confirms the presence of quartz ($SiO_2$) in XRD.

In the phase analysis of samples C and B, the dominant phase is gypsum, and the other phases include quartz, calcite, anhydrite, and dolomite, respectively. The planar and elongated crystals observed in the SEM images are consistent with the crystalline structure of gypsum ($CaSO_4•2H_2O$). These crystals constitute the majority of the structure, which is consistent with the XRD result that the gypsum phase is dominant. It is possible that some of the smaller and more angular particles seen in the image could be quartz crystals ($SiO_2$). The presence of carbonate compounds (calcite and dolomite) indicates the possibility of using raw materials containing lime. The calcite and dolomite phases may be part of the finer particles or denser areas in the SEM images. In the elemental analysis, the high percentage of calcium (Ca) and sulfur (S) is consistent with the dominant phase of gypsum. Silicon (Si) corresponds to the presence of quartz in XRD and the presence of calcium (Ca) and magnesium (Mg) together with the fact that oxygen (O) is higher than that attributed to $CaSO_4$ alone can explain the presence of calcite and dolomite. Morphological examination of the samples shows that the overall structure of sample A has particles with sharp edges and a relatively irregular distribution, and its particle size is a mixture of coarse and fine particles, with a tendency to agglomerate. A moderate number of pores is observed in this sample, which can affect the mechanical properties and reactivity of the material. The overall structure of sample B has denser and more uniform phases than A, with better dispersion, and its particle size is relatively more uniform than A, with a lower tendency to agglomerate. A lower number of pores is observed in this sample, which may indicate a higher density. Sample C also has particles with relatively more uniform shapes and is the most homogeneous sample among the three.

## Discussion

The results of XRD and EDX experiments as well as microscopic observations (SEM) show that samples A, B and C are mainly composed of gypsum ($CaSO_4•2H_2O$) as the dominant phase. The presence of impurities such as quartz ($SiO_2$) and calcite ($CaCO_3$) in the samples indicates the presence of siliceous and carbonate materials in the gypsum mortar. These impurities probably

entered the mortar from sources such as clay, sand or limestone. The presence of calcite and dolomite ($CaMg(CO_3)_2$) also indicates the possibility of using raw materials containing lime in the mortar composition. Anhydrite and dolomite phases were not found in sample A, and sample C had the highest amount of calcite, dolomite, quartz and anhydrite compared to the other samples. Also, comparison of the results of the scanning electron microscope test shows that sample C had the most homogeneous particle size distribution, the densest structure, and the least porosity.

## Conclusion

The dominant phase of the samples confirms that these samples are essentially made of gypsum and that the curing and mixing process with water was carried out appropriately. The presence of impurities such as quartz and calcite has caused the gypsum to set slowly and also strengthened and increased its resistance level. It seems that the structure of the gypsum mortars of this mosque has a composition of gypsum and limestone, which is seen in the primary gypsum stone in the form of gypsum along with calcium or magnesite. The results also showed that sample C with uniform grain size has the lowest porosity among the samples, which can lead to higher strength of this sample. On the other hand, comparing the XRD test results also shows that sample C has the highest quartz and calcite among the samples, which in addition to delaying setting, strengthens and increases the resistance level of the mortar. Perhaps this is the reason why this Mihrab remains healthier than the others, and the structure of sample C can be a criterion for producing sustainable mortars in conservation projects.

**Author Contributions:** This article has a single author, who performed all roles, including conceptualization, research and review, methodology, project management, sourcing, writing the main draft, and reviewing and editing.

**Funding:** This research received no external funding.

**Data Availability Statement:** The datasets described and/or analyzed during this study are accessible and traceable in the Resources and References section.

**Acknowledgments:** The author gratefully acknowledge the generous cooperation of the Director General of the General Department of Cultural Heritage, Handicrafts, and Tourism of Kerman Province for facilitating access to the monument and authorizing sample collection. We also extend our sincere appreciation to the esteemed supervisors, Dr. Enayatollah Sheikh Hosseini and Dr. Yahyazadeh, for their invaluable guidance.

**Conflicts of Interest:** The author declares no conflicts of interest.

پژوهه باستان سنجی

دانشگاه هنر اسلامی تبریز

مقاله پژوهشی

# تحلیل ریزساختار و ترکیب‌شناسی ملات‌های گچی محراب‌های مسجد ملک کرمان با رویکرد کاربرد در فرایندهای حفاظتی

**وحیده رحیمی مهر**[۱*]

۱. استادیار، گروه معماری، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

* مسئول مکاتبات: rahimimehr@iau.ac.ir

## چکیده

گچ‌بری به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از معماری سنتی، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. یکی شاهکارهای هنر گچبری دوران اسلامی، محراب گچبری شده با نقوش اسلیمی و کتیبه‌های کوفی است و محراب‌های تاریخی مسجد ملک یا امام خمینی کرمان به عنوان قدیمی‌ترین مسجد کرمان، یکی از این نمونه‌ها است که ظرافت اجرا و پیچیدگی نقوش این محراب‌ها، آنها را به آثاری منحصر به فرد در تاریخ هنر اسلامی تبدیل کرده است. این پژوهش با هدف بررسی فن‌شناسی ملات گچی محراب‌های تاریخی مسجد ملک کرمان انجام شده است. مطالعه این محراب‌ها از آن جهت حائز اهمیت است که شناخت ترکیبات و ساختار ملات‌های تاریخی می‌تواند به حفاظت بهتر، مرمت اصولی و بازسازی دقیق این آثار معماری اسلامی کمک کند. در این تحقیق، سه نمونه از سه محراب روی پشت بام مسجد با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی پیشرفته شامل پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج پراکندگی انرژی پرتو ایکس (SEM-EDS) مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که فاز غالب همه نمونه‌ها ژیپس است و یکی از نمونه‌ها در مقایسه با سایر نمونه‌ها، همگن‌ترین توزیع اندازه ذرات و متراکم‌ترین ساختار را دارد. همچنین، آنالیز XRD تأیید کرد که این نمونه حاوی بالاترین میزان کوارتز و کلسیت است که احتمالاً دلیل استحکام و دوام بیشتر آن نسبت به نمونه‌های دیگر می‌باشد. این نمونه به‌عنوان ساختار بهینه، معیاری برای تولید ملات‌های پایدار در پروژه‌های حفاظتی است. این یافته‌ها نه‌تنها به درک بهتر فناوری ساخت گچ در دوران تاریخی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به‌عنوان معیاری برای تهیه ملات‌های سازگار در مرمت آثار گچی مورد استفاده قرار گیرد.

**واژگان کلیدی:** ملات گچ، محراب، مسجد ملک کرمان، XRD، SEM-EDS

دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۷

آخرین اصلاح: ۱۴۰۴/۳/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۲۴

انتشار: ۱۴۰۴/۴/۹

**Copyright:** ©2025 by the Authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

## ۱. مقدمه

گچ به عنوان یکی از قدیمی‌ترین و پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی، نقش بسزایی در تاریخ معماری ایران ایفا کرده است. این ماده به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی همچون قابلیت شکل‌پذیری بالا، سرعت گیرش مناسب و مقاومت مطلوب، در تزئینات داخلی و خارجی بناهای تاریخی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته و به معماران و طراحان این امکان را داده است تا با هنر گچبری جلوه‌های بصری خاصی را ایجاد کنند و ظاهر ساختمان را بهبود بخشند. گچبری‌ها بازتاب ذوق هنری، باورها و مهارت‌های فنی هنرمندان هر دوره هستند و تنوع آنها می‌تولند اطلاعات فراوانی درباره‌ی تحولات معماری، ذائقه زیبایی‌شناسی و فرهنگ هر عصر ارائه دهد. نوع ساختار گچ و تکنیک‌های به کار رفته در گچبری نیز می‌تواند با توجه به دوره‌های مختلف متفاوت باشد و اطلاعاتی درباره مصالح و فنون ساختمانی آن دوره ارائه دهد. یکی شاهکارهای هنر گچبری دوران اسلامی، محراب گچبری شده با نقوش اسلیمی و کتیبه‌های کوفی است و محراب‌های تاریخی مسجد ملک کرمان، یکی از این نمونه‌ها است.

مسجد ملک کرمان یا مسجد امام خمینی(ره) بزرگترین و قدیمی‌ترین مسجد کرمان واقع در محله شاه عادل است که به عنوان یکی از

شـــاهکارهای معماری اســـلامی در ایران، نمونه بارزی از کاربرد گچبری اسـلامی اسـت. برخی منابع سـاخت این مسـجد را به ملک قاورد، شـاهزاده سلجوقی (اعتمادالسلطنه ،۱۳۶۷؛ وزیری، ۱۳۷۵) و برخی منابع دیگر آن را به توران شـاه از حکام سـلاجقه کرمان، نسـبت داده‌اند (منشـی کرمانی، ۱۳۶۲، مرسـلپور، ۱۳۸۷، ابوحامد کرمانی،۱۳۲۶، همتی کرمانی، ۱۳۶۴). زلزله سـال ۶۰ کرمان باعث شـد که زیرلایه‌هایی از گچ پنهان شـده هویدا گردد و در مرمت سـال ۶۱ این بنا، کتیبه های آجری بدنه‌ی شـمالی و جنوبی ایوان مقصـوره یافت شـد که در کتیبه شـمالی نام ملک توران در عبارت "...المبا...دالدین و الدوله تورانشـاه" وجود داشـت و شـبهات را تاحدودی برطرف شـد. با توجه به این موارد می‌توان گفت که بنای مسـجد در دوران سـلطنت ملک تورانشـاه سـلجوقی سـاخته شـده و یا در این دوران به اتمام رسیده است (بیت الهی ، ۱۳۹۴؛ اسلام پناه، ۱۳۶۷) و مکرر مرمت و تغییراتی در آن داده شده است. چنانچه سرپرسی سایکس اوضاع بنای مسجد در قرن ۱۶ را بسیار خراب توصیف کرده است که از قرن شانزدهم ( دهم هجری) تعمیر و مرمت فراوان شده است (سایکس، ۱۳۳۶)

این مسجد از نوع مساجد چهار ایوانی است که به عنوان اولین مسجد جامع کرمان و هسـته مرکزی اجتماعات کرمان تا پیش از احداث مسـجد جامع مظفری، شـناخته می‌شـده اسـت ( دانشـور، ۱۳۸۸). مسـجد شـامل شـبستان‌های متعدد، یک صـحن وسـیع و سـنگ تراش می‌باشـد (باسـتانی پاریزی، ۱۳۳۵). قدیمی‌ترین بخش مسـجد، شـبسـتان امام حسـن به عنوان معروف‌ترین شبستان مسجد است و براساس یافته‌های حاصل از زلزله سال ۶۰ ، قدمت شـبسـتان و محراب به دوره آل بویه برمی‌گردد و سلجوقیان آثار یک بنای مذهبی مربوط به سـده‌های اولیه را توسـعه داده‌اند (اسـلام پناه، ۱۳۶۴؛ اسـداللهی ، ۱۳۷۴). این شـبسـتان چهار محراب گچبری در دل خود دارد که یکی در داخل، و سه محراب دیگر بر پشت‌بام شبستان و داخل اتاق محافظی که میراث فرهنگی برایشـان تعبیه کرده واقع شـده‌اند و توسـط راه پله‌ای که در جنب شبستان وجود دارد می‌توان به محرابها دسترسی داشت.

محراب‌های تاریخی این مسجد یکی از برجسته‌ترین نمونه‌های محراب گچبری شده با نقوش اسلیمی و کتیبه‌های کوفی است و از شاهکارهای هنر گچبری دوران اسـلامی به شـمار می‌رود که به عنوان عناصـری نمادین، نه تنها کاربرد مذهبی داشـته‌اند، بلکه گواهی بر شـکوفایی هنر گچبری در دوره‌های مختلف تاریخی ایران هسـتند. این آثار نمونه‌ای بارز از مهارت اسـتادکاران ایرانی در ترکیب هنر معماری با تزئینات گچی ظریف اسـت که در آن‌ها نقوش گیاهی، هندسـی و خوشـنویسـی با دقتی بی‌نظیر در هم آمیخته‌اند. با توجه به آسـیب‌های ناشـی از عوامل محیطی و گذشـت زمان، تحلیل دقیق ساختار گچ و شـناسایی مواد تشـکیل‌دهنده آن نه تنها به درک بهتر فناوری‌های سـنتی سـاخت و تزئین کمک می‌کند، بلکه می‌تولند در حفاظت و مرمت این اثر تاریخی نیز راهگشا باشد.

متأسـفانه تاکنون هیچگونه مطالعات آزمایشـگاهی بر روی تزئینات گچبری محراب‌های مسجد ملک صورت نگرفته است و این پژوهش برای نخسـتین بار به چنین مهمی پرداخته اسـت چرا که مطالعه فنی آنها می‌تواند فناوری سنتی گچبری ایرانی را آشکار سازد.

بنابراین در این مقاله با اسـتفاده از روش‌های تحلیلی پیشـرفته، سـاختار گچ و تکنیک‌های به کار رفته در تزئینات این مسـجد مورد مطالعه قرار می‌گیرد. هدف از این پژوهش، شـناسـایی ویژگی‌های منحصـر به فرد گچ به کـار رفتـه در این بنـا و ارائـه راهکـارهـایی برای حفظ و احیـای این میراث ارزشمند معماری است. علاوه بر این، بررسی تطبیقی ملات گچ به کار رفته در سـه محراب تاریخی مسـجد ملک کرمان این امکان را فراهم می‌سـازد تا تغییرات و تحولات فنی و هنری در دوره‌های مختلف تاریخی را بهتر درک کنیم. این تحلیل‌ها می‌توانند نشـان‌دهنده تفاوت‌های احتمالی در ترکیبات مواد، تکنیک‌های اجرا و حتی منابع تأمین مواد اولیه باشـند که تحت تأثیر شـرایط جغرافیایی، اقتصـادی و فرهنگی هر دوره قرار داشـته‌اند. همچنین، شـناسـایی این تفاوت‌ها می‌تواند به بازسازی دقیق‌تر مراحل ساخت و تزئین این محراب‌ها و درک بهتر سـیر تکامل هنر گچبری در معماری اسـلامی ایران کمک کند. از این رو، این پژوهش نه تنها به حفظ میراث فرهنگی مسـجد ملک کرمان یاری می‌رسـاند، بلکه به عنوان مرجعی ارزشـمند برای مطالعات آینده در حوزه تاریخ هنر و فناوری‌های سـنتی سـاختمانی نیز مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

## ۲. پیشینه پژوهش

پیشـینه پژوهش در دو جهت قابل بررسـی اسـت یکی مطالعات کیفی پیرامون بنای مسـجد امام و محراب های گچی دوره سـاخت آن اسـت و دیگری مطالعات فن شـناسـی تزئینات گچی ایران. بخش اول مطالعات موردی اسـت که دو گروه پایان‌نامه و پژوهش‌های علمی را در برمی‌گیرد و محققین در این پژوهش‌ها که با ساختار کیفی به انجام رسیده‌اند، برخی به معرفی مسجد ملک (Anisi, 2004، سجادی، ۱۳۷۴ و ویلبر، ۱۳۶۵) و برخی مانند زمانی بابگهری و یوزباشی، (۱۳۹۸) به گونه‌شناسی آرایه‌های معماری و تزئنیات گچی محراب پرداخته اند. چنانچه شـهریاری (۱۳۹۲) در پایان‌نامه خود با اسـتناد به شـواهد باسـتان‌شـناسـی به معرفی ویژگی‌های معماری و تزئینات بخش‌های مختلف این مسـجد پرداخته اسـت. حیدری بابا کمال و همکاران(۱۳۹۳) در مطالعه‌ای گچبری‌های محراب‌های مسـجد را از دیدگاه هنر اسـلامی مورد بررسـی قرار داده و به این نتیجه رسـیده‌اند که هر چند تزئنیات محراب‌ها از نظر شـیوه به هم شـباهت دارند اما از نظر نقوش با هم اختلافاتی جزئی دارند. بیت الهی (۱۳۹۴) نیز با مطالعه‌ای تطبیقی نگاره

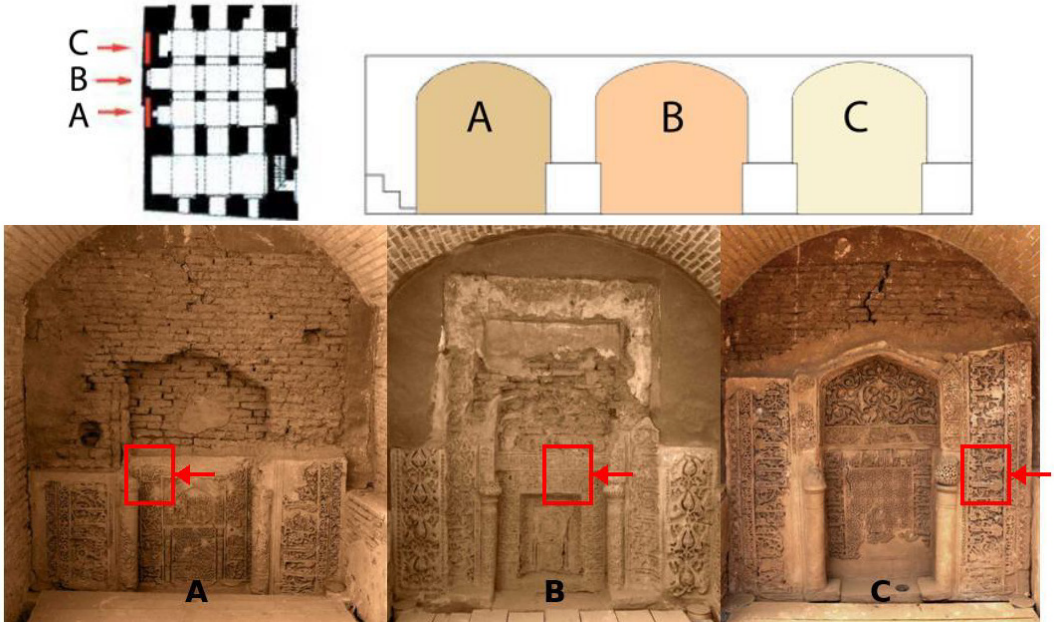
وخط نگاره چهار محراب گچی شبستان امام حسن این مسجد را بررسی کرده است و به این نتیجه رسیده که روابط ساختاری و صوری بین محراب‌ها وجود دارد و خط نگاره‌ها در سه محراب پشت بام بر نگاره ها غالب است.

در راستای بررسی پیشینه مطالعات آزمایشگاهی مرتبط با گچبری‌های تاریخی، پژوهش‌های متعددی انجام شده است. فیروزمندی و همکاران (۱۳۹۳) با مطالعه ملات‌های گچی دوره ساسانی در بناهای شاخصی چون قلعه دختر فیروزآباد، کاخ اردشیر، آتشکده بیشابور، آتشکده تخت رستم، چهارتاقی گهواره دید، آتشکده تخت سلیمان و کاخ سروستان و آنالیز عنصری آنها، علاوه بر شناسایی ملات دوره ساسانی که ترکیبی از گچ و سنگ آهک بوده به تاریخ نگاری آن‌ها نیز پرداختند و دریافتند که فاز غالب این ملات‌ها ژیپس بوده و در تمامی نمونه‌ها کوارتز نیز مشاهده می‌شود. محتشم و همکاران (۱۳۹۳) نیز با بررسی تزئینات گچبری خانه شهشهان اصفهان، وجود ژیپس را به عنوان فاز اصلی تأیید کردند. میش مست نهی (۱۳۹۴) در تحقیقی جامع‌تر به بررسی نمونه‌های گچبری کوه خواجه سیستان، شادیاخ نیشابور و قلعه الموت پرداخت و با استفاده از روشهای SEM و XRD نشان داد که در گچبری‌های کوه خواجه، فاز غالب انیدریت بوده و تأکید کرد که تحلیل‌های بصری به تنهایی کافی نیست و باید نتایج XRD را در تفسیرها مد نظر قرار داد. حاجیان و همکاران(۱۳۹۹) در مطالعه ملات گچ مسجد صیمره به وجود کانی‌های ژیپس، کوارتز و کلسیت در ترکیب ملات پی بردند. همچنین حزوی (۱۴۰۰) در مطالعه ملات گچی کتیبه ایوان بقعه سید شمس الدین دریافت که ساختار گچ در عمق و سطح متفاوت بوده و فاز غالب در لایه سطحی ترکیبی از انیدریت و ژیپس است. حمزوی و همکاران (۱۴۰۲) در ادامه تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که تفاوت‌های اقلیمی و دورهای تأثیر چندانی بر ویژگی ملات‌های گچی نداشته و در نمونه‌های مسجد گز و کاخ اردشیر نیز ژیپس فاز غالب بوده است. در نهایت، این مطالعات به صورت جمعی نشان می‌دهند که اگرچه ژیپس فاز اصلی در بیشتر ملات‌های تاریخی است، اما در برخی موارد خاص مانند کوه خواجه و سطح کتیبه بقعه سید شمس الدین، انیدریت نیز به عنوان فاز غالب شناسایی شده است. این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که ملات‌های گچی تاریخی نه‌تنها از نظر ترکیب، بلکه از نظر فنون ساخت و عمل‌آوری، دانش پیچیده‌ای داشته‌اند که نیازمند مطالعه چندرشته‌ای است.

**جدول ۱.** مقایسه روش‌ها و رویکردهای مطالعات ملات‌های گچی در بناهای تاریخی ایران

**Table 1.** Comparison of Methods and Approaches in Studies of Gypsum Mortars in Iranian Historical Buildings

| Studies | Objectives | Analytical Methods | Approaches |
|---|---|---|---|
| Firozmandi shirejin and Mahyar | Focus on identifying chemical compositions of gypsum mortars to understand historical technical knowledge | XRD | Historical-comparative |
| Hajian et al | Focus on identifying chemical compositions of gypsum mortars to understand historical technical knowledge | XRD, XRF | Provenance & compositional analysis |
| Hamzavi | Focus on identifying chemical compositions of gypsum mortars to understand historical technical knowledge | XRD, XRF, SEM-EDS | Conservation-oriented: Technological study |
| Hamzavi et al | Focus on identifying chemical compositions of gypsum mortars to understand historical technical knowledge | XRD, XRF, SEM-EDS | Historical-comparative |
| Mohtasham et al | Investigation of gypsum mortar processing techniques in Qajar period decorations with emphasis on traditional methods | XRD, SEM-EDS | Conservation-oriented |
| Mishmastnehi | Addressing technical and terminological challenges in studying gypsum artifacts through microstructural analysis and additive effects | XRD, SEM-EDS, Image Processing & Modeling | Provenance & compositional analysis - Restoration |




**شکل ۱.** محل نمونه‌برداری ازمحراب‌های گچی مورد مطالعه واقع در پشت بام مسجد

**Figure 1.** Sampling location of the studied plaster Mihrabs located on the roof of the mosque

## ۳. مواد و روش ها

این پژوهش آزمایشگاهی به روش تجربی- تحلیلی سعی دارد به فن‌شناسی ملات گچی به کار رفته در محراب‌های گچی مسجد ملک بپردازد. در این مطالعه آزمایشگاهی و کاربردی پس از کسب مجوز از میراث فرهنگی کرمان و بازدید از محراب های پشت بام مسجد ملک، از هر سه محراب تاریخی (شکل ۱) یک نمونه پودری تهیه و به آزمایشگاه رازی ارسال شد. در این راستا جهت شناسایی و تشخیص فازهای کریستالی موجود در نمونه‌ها، از آنالیز XRD به روش پودری بر روی سه نمونه ملات گچی با کدهای A, B, C انجام شد. این آزمایش با استفاده از دستگاه پراش سنج اشعه ایکس(XRD) مجهز به لامپ مسی (Cu) تحت شرایط ولتاژ ۴۰ کیلوولت و جریان ۳۰ میلی‌آمپر، در محدوده زاویه‌ای ۵ تا ۹۰ درجه (2 θ) با گام اندازه‌گیری ۰.۰۱ درجه و ۲۰۰ گام انجام گرفت. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی شامل فرآیند خردایش مورد بررسی قرار گرفتند. جهت تعیین ترکیبات کریستالی و از روش تجزیه دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج پراکنش انرژی پرتوی ایکس متعلق به بنیاد علوم کاربردی رازی در شرایط ولتاژ شتابدهنده ۱۵ کیلوولت، جریان پرتوی الکترون ۱۰ نانوآمپر، بزرگنمایی ۷۵۰۰ برابر، زمان آنالیز ۶۰ ثانیه و در موقعیت نقطه آنالیز با زاویه شیب صفر درجه و زاویه دید آشکارساز ۴۰ درجه استفاده شد. دستگاه این بنیاد مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN مجهز به آشکار ساز BSE جهت تشخیص تغییرات فازی بر اساس عدد اتمی در نمونه است. آنالایزر (EDS) به کار رفته در این دستگاه دارای قدرت تفکیک ۱۲۶ ev> و حد تفکیک بیشتر از ppm۵۰۰۰ برای شناسایی عناصر موجود از عنصر بور (B) به بعد در جدول تناوبی می‌باشد.

## ٤. یافته ها و بحث

### ٤-۱. یافته‌های حاصل از آنالیزها

آزمایش XRD (X-ray Diffraction) روی نمونه A نشان می‌دهد (شکل۲) که بخشی از نمونه ساختار کریستالی مشخصی ندارد و به صورت غیر کریستالی است که احتمالا به دلیل وجود مواد آلی یا مواد معدنی ریزدانه‌ای است که به خوبی تبلور نیافته‌اند. همچنین آنالیز فازی نشان داده که ژیپس: (Gypsum - $CaSO_4.2H_2O$) با کد مرجع JCPDS No. 00-006-0047 فاز غالب و اصلی این ملات گچی است و وجود آن تأیید می‌کند که نمونه اساساً از گچ تشکیل شده است. این فاز در شرایط نرمال یعنی درجه حرارت، فشار و رطوبت معمولی پایدار است. فازهای دیگر به ترتیب کوارتز ($SiO_2$ - (Quartz) با کد مرجع JCPDS No. 00-005-0497 و کلسیت (Calcite - $CaCO_3$) با کد مرجع JCPDS No. 00-005-0566 می‌باشند. وجود کوارتز نشان‌دهنده وجود ناخالصی‌های سیلیسی در ملات گچ است. این ناخالصی‌ها می‌توانند از منابع مختلفی مانند خاک رس یا ماسه وارد ملات شده باشند و وجود کلسیت به صورت ناخالصی نشان‌دهنده حضور کربنات کلسیم در ملات گچ است. این ترکیب می‌تواند از سنگ آهک یا سایر منابع کربناتی وارد ملات شده باشد. الگوی XRD گچ که ساختار مونوکلینیک دارد، به وضوح نشان‌دهنده آرایش اتم‌ها در سه بعد است که موجب ویژگی‌های فیزیکی خاص گچ مانند نرمی و قابلیت شکل‌دهی می‌شود. پیک‌های پراش در زاویه‌های مختلف (°۱۰.۵, °۱۵.۰ و غیره) به ترتیب مشخص‌کننده نحوه و نحوه قرارگیری بلورهای گچ هستند. با وجود عدم مشاهده پیک‌های مشخصه فازهای هالیت و کانی های رسی در این

نمونه، با توجه به محدودیت آزمون XRD در تشـخیص فازهایی با درصـد وزنی کمتر از ۵٪، این فازها ممکن است در نمونه مورد بررسی وجود داشته باشـند که در این صـورت اثرات قابل توجهی بر خواص و ویژگی‌های این نمونه خواهد داشت. برای بررسی وجود این ترکیبات به آزمون‌های دقیق‌تر و پیشرفته‌تری همچون آزمون طیف سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس (XPS) نیاز است.

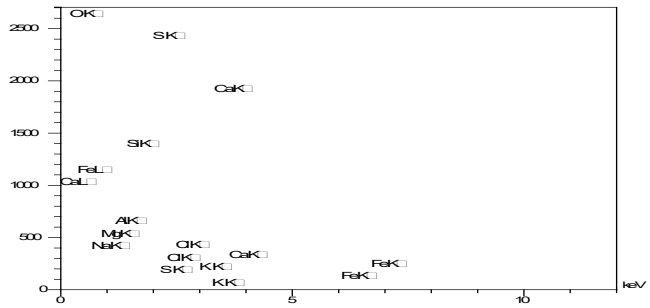
نتایجEDX ، نشان می‌دهد که عناصر اصلی موجود در نمونه شامل Ca (کلسیم) و S (گوگرد) هستند که نشان‌دهنده وجود ژیپس ($CaSO_4.2H_2O$) است. همچنین، وجود Si (سیلیسیوم) در EDX حضور کوارتز ($SiO_2$) را در XRDتأیید می‌کند.(شـکل ۳ و جدول۲) در تصـویر با بزرگنمایی kx ۵، بلورهای گچ به صورت صفحه‌ای و لایه‌ای دیده می‌شوند. این بلورها دارای لبه‌های تیز و سطوح صاف هستند که نشان‌دهنده ساختار کریستالی خوب آن‌ها است و آرایش بلورها به صورت متراکم و درهم‌رفته است، که نشان می‌دهد در هنگام تشکیل ملات، بلورها به خوبی در کنار هم قرار گرفته‌اند.

در آنالیز فازی نمونه‌های C و B نیز فاز غالب ژیپس و فاز های دیگر به ترتیب شامل کوارتز، کلسیت و انیدریت و دولومیت می‌باشد (شکل۴ و ۵). بلورهای صفحه‌ای و کشیده که در تصاویر SEM مشاهده می‌شوند و ممکن است به صورت موازی یا متقاطع چیده شده باشند، مطابق با ساختار بلوری ژیپس ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) هسـتند این بلورها اکثریت سـاختار را تشـکیل می‌دهند که با نتیجه XRD مبنی بر غالب بودن فاز ژیپس همخوانی دارد .احتمالاً برخی از ذرات کوچک‌تر و زاویه‌دارتر که در تصـویر دیده می‌شـوند، می‌توانند بلورهای کوارتز ($SiO_2$) باشـند. کوارتز دارای سـاختار بلوری هگزاگونال است و معمولاً به صورت دانه‌های کوچک و نامنظم دیده می‌شود کلسیت ($CaCO_3$) دارای ساختار بلوری تریگونال است و معمولاً به صورت بلورهای لوزی‌شکل یا دانه‌های کوچک دیده می شود. وجود ترکیبات کربناته (کلسـیت و دولومیت) نشـان‌دهنده امکان اسـتفاده از مواد اولیه حاوی آهک است.




شکل ۲. الگوی XRD نمونه A

**Figure 2.** XRD pattern of sample A



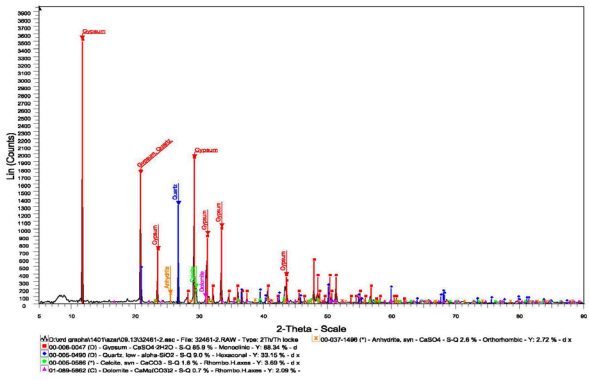

شکل ۳. طیف تجزیه عنصری نمونه A

**Figure 3.** Elemental analysis spectrum of sample A

جدول۲. نتایج تجزیه عنصری نمونهA

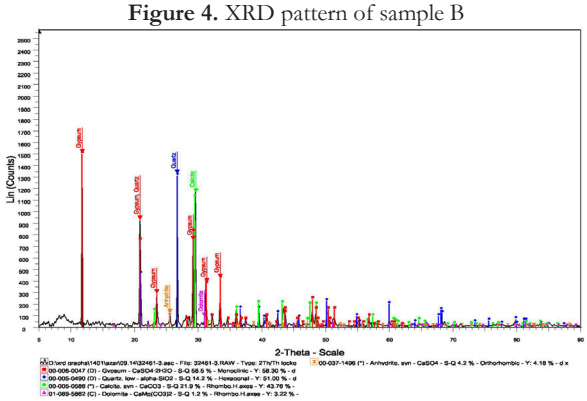
**Table 2.** Elemental analysis results of sample A

| Elt | W% | Molar ratio |
|---|---|---|
| **O** | 57.15 ± 0.5 | 3.36 ± 0.03 |
| **Na** | 0.32 ± 0.01 | 0.013 ± 0.0001 |
| **Mg** | 1.24 ± 0.01 | 0.048 ± 0.0005 |
| **Al** | 2.02 ± 0.02 | 0.07 ± 0.001 |
| **Si** | 5.23 ± 0.05 | 0.175 ± 0.002 |
| **S** | 13.12 ± 0.12 | 0.384 ± 0.004 |
| **Cl** | 0.22 ± 0.002 | 0.0058 ± 0.00005 |
| **K** | 0.92 ± 0.01 | 0.022 ± 0.0002 |
| **Ca** | 18.39 ± 0.18 | 0.431 ± 0.004 |
| **Fe** | 1.39 ± 0.01 | 0.0234 ± 0.0002 |




شکل۴. الگوی XRD نمونه B

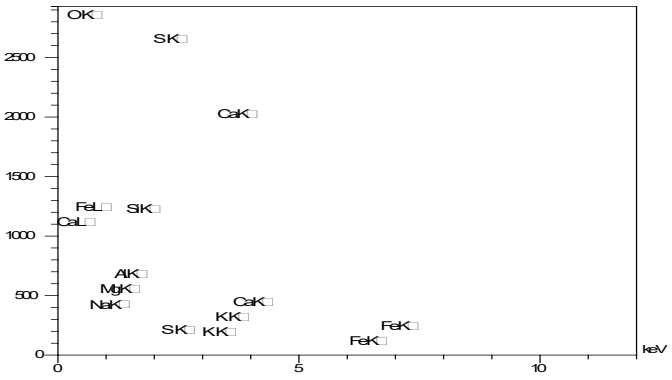
**Figure 4.** XRD pattern of sample B




شکل ۵. الگوی XRD نمونه C

**Figure 5.** XRD pattern of sample C

فاز کلسیت و دولومیت ممکن است بخشی از ذرات ریزتر یا مناطق متراکم‌تر در تصاویر SEM باشند درآنالیز عنصری نیز درصد بالای کلسیم (Ca) و گوگرد (S) با فاز غالب ژیپس مطابقت دارد (شکل ۶و۷، جدول۳ و۴). مطابق نسبت مولی عناصر گزارش شده در جدول، نسبت مولی Ca به Sدر این آنالیز تقریباً ۱.۱ است که نزدیک به نسبت استوکیومتری ژیپس است. سیلیسیم (Si) با حضور کوارتز در XRD مطابقت دارد و حضور کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg) همراه با این حقیقت که اکسیژن (O) بیشتر از مقداری است که فقط به $CaSO_4$ نسبت داده شود، می‌تواند وجود کلسیت و دولومیت را توجیه کند. لازم به ذکر است که حضور درصد کمی از آهن در نتایج آزمون آنالیز عنصری می تواند ناشی از آلودگی در این نمونه ها باشد چرا که اثری از فاز کریستالی حاوی آهن در نتایج آزمون XRD مشاهده نشده بود.




شکل ۶. طیف تجزیه عنصری نمونه B

**Figure 6.** Elemental analysis spectrum of sample B

جدول۳. نتایج تجزیه عنصری نمونهB

**Table 3.** Elemental analysis results of sample B

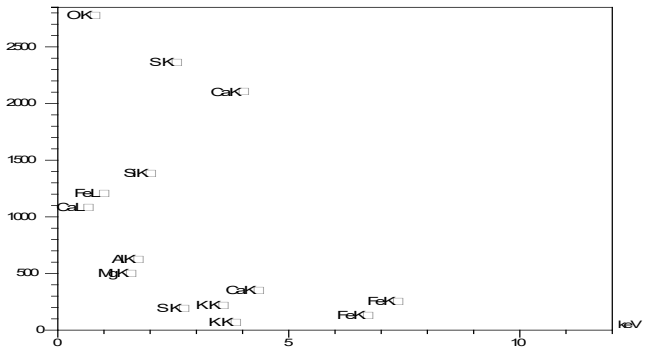
| Elt | W% | Molar ratio |
|---|---|---|
| **O** | 58.15 ± 0.58 | 167.2 ± 1.7 |
| **Mg** | 1.41 ± 0.01 | 2.67 ± 0.03 |
| **Al** | 1.52 ± 0.01 | 2.59 ± 0.03 |
| **Si** | 5.05 ± 0.05 | 8.27 ± 0.08 |
| **S** | 12.23 ± 0.12 | 17.54 ± 0.18 |
| **K** | 0.85 ± 0.01 | 1.00 ± 0.01 |
| **Ca** | 19.48 ± 0.19 | 22.36 ± 0.23 |
| **Fe** | 1.30 ± 0.01 | 1.07 ± 0.01 |

در این پژوهش برای بررسی ماده مورد بررسی به دلیل دقت بالا و توانایی تشخیص میکروساختارها از آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM (Scanning Electron Microscopy) به عنوان یک تکنیک میکروسکوپی برای تصویربرداری دقیق و با بزرگنمایی بالا از سطح یک ماده، استفاده شده است (شکل ۸ تا ۱۰). تمام تصاویر میکروسکوپی با استفاده از نرم افزار Image J نسخه ۱.۵۴ پردازش شدند. ابتدا تصاویر به حالت ۸-بیتی خاکستری تبدیل و سپس با اعمال فیلتر مدیان با شعاع ۲ پیکسل نویزهای سطحی حذف شدند تا لبه‌های منافذ حفظ شود. برای آستانه‌گذاری، الگوریتم Otsu انتخاب شد که یکی از روش‌های متداول برای تصاویر دارای هیستوگرام دومدالی است و در این مطالعه بهترین تطابق را با نواحی حفره‌ای قابل تشخیص به‌صورت چشمی نشان داد. سطح آستانه پیشنهادی توسط نرم‌افزار به‌صورت خودکار بررسی شد و در صورت نیاز، اصلاحات جزئی به‌صورت دستی (در حد ۵ سطح خاکستری) اعمال شد تا تمام خلل و فرج قابل مشاهده در تصویر به‌درستی انتخاب شده و نواحی جامد اشتباهاً شناسایی نشوند. سایر روش‌های آستانه‌گذاری مانند Huang، Triangle و Li نیز بررسی شدند اما به دلیل دقت پایین‌تر کنار گذاشته شدند. پس از دودویی‌سازی تصویر، نقاط نویزی تک‌پیکسلی با ابزار حذف نویز و نواحی بسته داخلی با دستور پر کردن حفره‌ها اصلاح شدند. ناحیه مورد تحلیل (ROI) شامل تمام بخش‌های تصویر به‌جز ناحیه حاشیه‌ای و مقیاس‌نما بود و برای تمام تصاویر مشابه اعمال شد تا شرایط مقایسه یکسان باشد. در نهایت، درصد تخلخل با استفاده از ابزار اندازه‌گیری بر روی تصویر دودویی شده استخراج شد و به‌صورت میانگین سه تصویر تکرارشده برای هر نمونه گزارش گردید. این فرآیند، با انتخاب دقیق روش آستانه‌گذاری و تعریف یکنواخت ناحیه مورد بررسی، دقت و تکرارپذیری نتایج را تضمین می‌کند و با توصیه‌های استاندارد ASTM E1245 برای اندازه‌گیری درصد سطحی خلل و فرج همخوانی دارد. همچنین آنالیز عنصری از سه نقطه مختلف در هر نمونه به منظور بررسی عناصر موجود در نمونه ها اندازه گیری گردید.

جدول۴. نتایج تجزیه عنصری نمونهC

**Table 4.** Elemental analysis results of sample C

| Elt | W% | Molar ratio |
|---|---|---|
| **O** | 58.71 ± 0.59 | 312.5 ± 3.1 |
| **Na** | 0.27 ± 0.003 | 1.00 ± 0.01 |
| **Mg** | 1.27 ± 0.01 | 4.45 ± 0.04 |
| **Al** | 1.30 ± 0.01 | 4.10 ± 0.04 |
| **Si** | 4.15 ± 0.04 | 12.58 ± 0.13 |
| **S** | 13.57 ± 0.14 | 36.02 ± 0.36 |
| **K** | 0.61 ± 0.006 | 1.33 ± 0.01 |
| **Ca** | 19.14 ± 0.19 | 40.68 ± 0.41 |
| **Fe** | 0.99 ± 0.01 | 1.51 ± 0.02 |

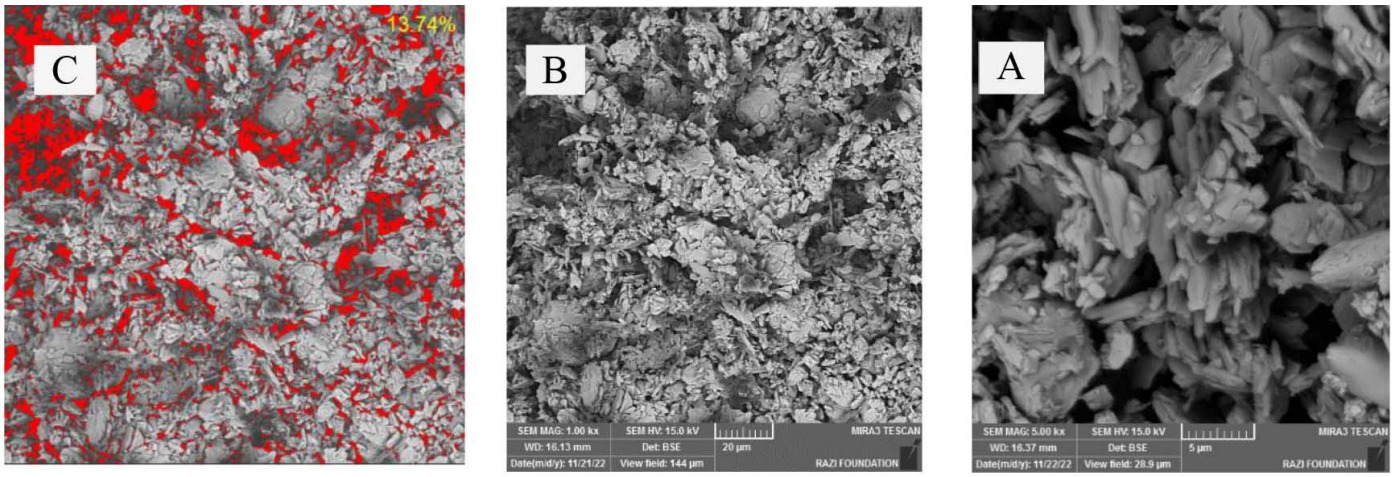



شکل ۷. طیف تجزیه عنصری نمونه C

**Figure 7.** Elemental analysis spectrum of sample C

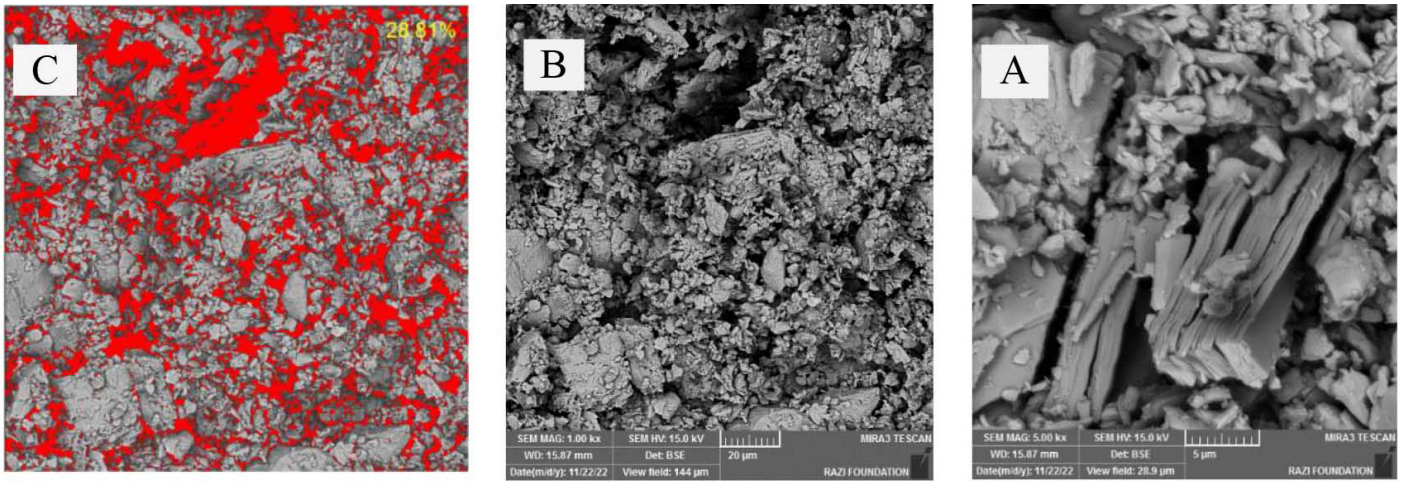
ترکیبی از ذرات درشت و ریز، با تمایل به آگلومره شدن است در این نمونه مقدار متوسطی از حفرات مشاهده می‌شود که می‌تواند بر خواص مکانیکی و واکنش‌پذیری ماده تأثیر بگذارد. ساختار کلی نمونه B دارای فازهای متراکم‌تر و یکنواخت‌تر نسبت به A، با پراکندگی بهتر می‌باشد و اندازه ذرات آن نسبتاً یکنواخت‌تر ازA، با تمایل کمتر به آگلومراسیون است در این نمونه میزان کمتری از حفرات دیده می‌شود، که ممکن است نشان‌دهنده چگالی بالاتر باشد. نمونه C نیز دارای ذرات با شکل‌های نسبتاً یکنواخت‌تر و همگن‌ترین نمونه در بین سه مورد است. در نتایج آنالیز عنصری نمونه های B و C نیز نسبت Ca/S به ترتیب برابر با ۱/۲ و ۱/۱ بدست آمد که بسیار نزدیک به نسبت استوکیومتری این عناصر در ساختار کریستالی ژیپس است.

بررسی مورفولوژی نمونه‌ها نشان می‌دهد که ساختار کلی نمونه A دارای ذرات با لبه‌های تیز و پراکندگی نسبتاً نامنظم است و اندازه ذرات آن



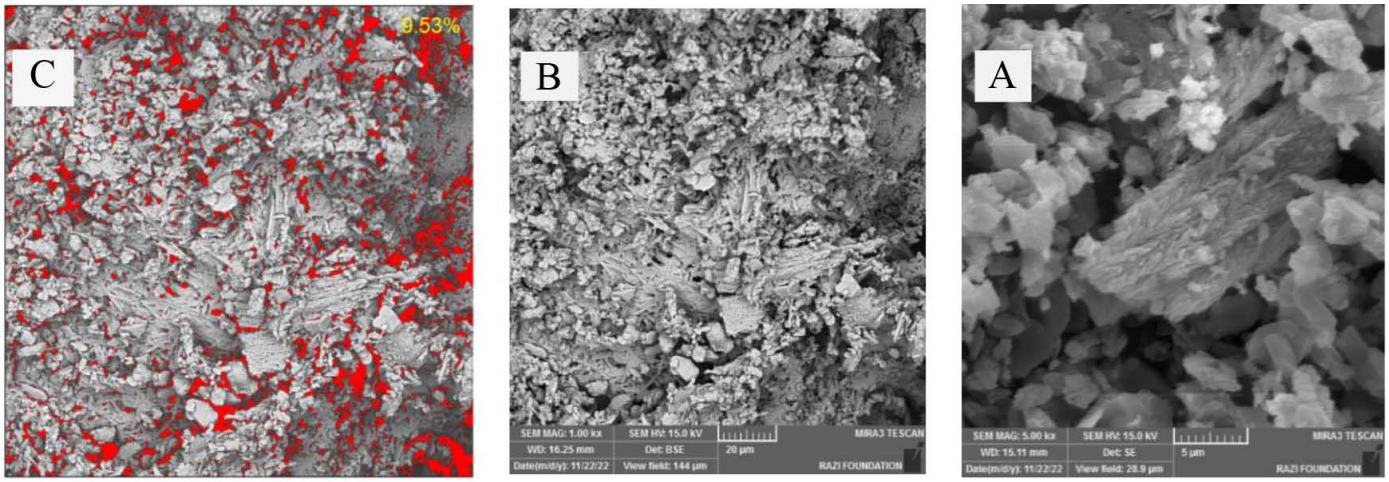

شکل ۸. میکروگراف‌های SEM مربوط به نمونه A در دو بزرگنمایی (A) ۱۰۰۰، (B) ۵۰۰۰ برابر و (C) تصویر پردازش شده جهت اندازه گیری درصد تخلخل

**Figure 8.** SEM micrographs of sample A at two magnifications (A) 1000, (B) 5000 times and (C) processed image to measure the porosity percentage




شکل ۹. میکروگراف‌های SEM مربوط به نمونه B در دو بزرگنمایی (A) ۱۰۰۰، (B) ۵۰۰۰ برابر و (C) تصویر پردازش شده جهت اندازه گیری درصد تخلخل

**Figure 9.** SEM micrographs of sample B at two magnifications (A) 1000, (B) 5000 times and (C) processed image to measure the porosity percentage




شکل ۱۰. میکروگراف های SEM مربوط به نمونه C در دو بزرگنمایی (A) ۱۰۰۰، (B) ۵۰۰۰ برابر و (C) تصویر پردازش شده جهت اندازه گیری درصد تخلخل

**Figure 10.** SEM micrographs of sample C at two magnifications (A) 1000, (B) 5000 times and (C) processed image to measure the porosity percentage

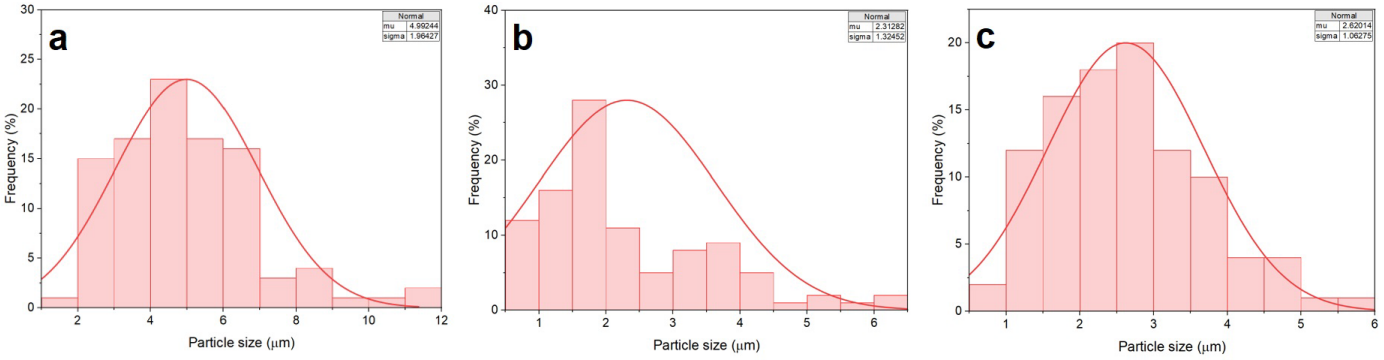
مطابق شکل ۸، در میکروگراف‌های مربوط به نمونه مورد بررسی، ذراتی با مورفولوژی نامنظم و بعضا صفحه ای شکل قابل مشاهده است. مطابق شکل ۹ و ۱۰ بر خلاف نمونه A (شکل ۸)، در نمونه‌های B و C ذرات بزرگی در ساختار ماده مشاهده می‌شود که اطراف آنها را مناطق خالی تشکیل داده است. جهت بررسی توزیع اندازه ذرات در این نمونه، چند ذره از تصاویر SEM توسط نرم افزار پردازش تصویر Image J اندازه‌گیری شده و هیستوگرام توزیع اندازه آنها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همچنین توسط این نرم افزار درصد تخلخل نمونه‌های مختلف اندازه‌گیری شده و تصاویر پردازش شده در شکل های ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است. در این هیستوگرام‌ها محور افقی اندازه ذرات قابل مشاهده در میکروگراف SEM و محور عمودی تعداد ذراتی است که در آن محدوده اندازه توسط نرم افزار اندازه‌گیری شده است. همچنین در جدول ۵ پارامترهای آماری مربوط به این اندازه گیری گزارش شده است.

مطابق هیستوگرام نشان داده شده در شکل ۱۱ (الف)، در نمونه A همه ذرات دارای قطری بین ۱ تا ۱۲ میکرومتر بوده و بیشترین تعداد ذرات در محدوده ۴ تا ۵ میکرومتر بوده اند. همچنین مشخص است که ۸۵ درصد ذرات دارای اندازه ای بین ۲ تا ۷ میکرومتر بوده اند و تنها ۱۵ درصد ذرات اندازه ای خارج از این محدوده داشته اند. مطابق جدول ۵ مقدار متوسط اندازه قطر ذرات مطابق این اندازه گیری برای این نمونه برابر با ۴/۹۹ میکرومتر و مقدار انحراف معیار آن برابر با ۱/۹۶ میکرومتر بدست آمده است. همچنین مقادیر کوچکترین و بزرگترین ذره اندازه گیری شده به ترتیب برابر با ۱/۸۰ و ۱۱/۶۹ میکرومتر بوده است. به علاوه نزدیک بودن مقدار وسط با مقدار میانگین اندازه ذرات بیانگر توزیع نسبتاً نرمال ذرات می‌باشد که این توزیع به صورت نمودار زنگوله ای در شکل ۱ نیز قابل مشاهده است. مقدار تخلخل در این نمونه نیز ۱۳/۷۴٪ بوده است. این در حالی است که مطابق شکل ۱۰ و شکل ۱۱ (پ) برای نمونه C اندازه متوسط و توزیع اندازه ذرات به مراتب کوچکتر و باریکتر شده و متوسط اندازه ذرات و انحراف معیار به ترتیب به ۲/۶۲ و ۱/۰۶ میکرومتر رسیده است که کاهش حدود ۱۰۰ درصدی نسبت به نمونه A را نشان می دهد. به علاوه در این نمونه درصد تخلخل نیز به ۹/۵۳ درصد کاهش یافته است که بیانگر افزایش تراکم و همگن‌تر شدن ساختار در این نمونه است. کوچکترین و بزرگترین اندازه ذرات در این نمونه نیز به ترتیب ۰/۷۶ و ۵/۷۵ میکرومتر بوده و ۹۰ درصد ذرات قطری بین ۱ تا ۴ میکرومتر داشته است.

جدول ۵. پارامترهای آماری مربوط به اندازه گیری توزیع اندازه ذرات بر حسب میکرومتر

**Table 5.** Statistical parameters related to particle size distribution measurements in micrometers

| Sample | Mean size | Standard deviation | Smallest particle size | Medium size | Largest particle size | Porosity percentage |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 4.99 | 1.96 | 1.80 | 4.78 | 11.69 | 13.74 |
| B | 2.31 | 1.32 | 0.51 | 1.84 | 6.42 | 28.81 |
| C | 2.62 | 1.06 | 0.76 | 2.61 | 5.75 | 9.53 |




شکل ۱۱. هیستوگرام توزیع اندازه ذرات مربوط به نمونه های (a) A، (b) B و (c) C

**Figure 11.** Histogram of particle size distribution for samples (a) A, (b) B and (c) C.

مطابق شکل ۹ و شکل ۱۱ (ب) برای نمونه B اندازه متوسط و توزیع اندازه ذرات به مراتب نزدیک به نمونه C بوده و متوسط اندازه ذرات و انحراف معیار به ترتیب به ۲/۳۱ و ۱/۳۲ میکرومتر بوده است که کمتر بودن قابل توجه نسبت به نمونه A را نشان می دهد. همچنین مشخص است که توزیع اندازه ذرات نسبت به نمونه C نسبتا پهن تر بوده و بنابراین نمونه C توزیع همگن تری نسبت به نمونه B هم داشته است. به علاوه در این نمونه درصد تخلخل نیز به ۲۸/۸۱ درصد رسیده است که نسبت به دو نمونه قبل به مراتب بیشتر بوده است که اثبات دیگری بر تراکم کمتر این نمونه است. کوچکترین و بزرگترین اندازه ذرات در این نمونه نیز به ترتیب ۰/۵۱ و ۶/۴۲ میکرومتر بوده و حدود ۹۵ درصد ذرات قطری بین ۰/۵ تا ۴/۵ میکرومتر داشته است.

## ٤-۲. بحث

نتایج آزمایش‌های XRD و EDX و همچنین مشاهدات میکروسکوپی (SEM)نشان می‌دهند که نمونه‌های A ، B و C عمدتاً از ژیپس ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)به عنوان فاز غالب تشکیل شده‌اند. ساختار کریستالی ژیپس که به‌وضوح در الگوی XRD مشاهده می‌شود، نشان‌دهنده آرایش اتمی منظم و سه‌بعدی است که ویژگی‌های فیزیکی گچ مانند نرمی و قابلیت شکل‌پذیری را توضیح می‌دهد. بلورهای صفحه‌ای و لایه‌ای ژیپس در تصاویر SEM نیز این ساختار کریستالی را تأیید می‌کنند.

وجود ناخالصی‌هایی مانند کوارتز ($SiO_2$) و کلسیت ($CaCO_3$) در همه نمونه‌ها نشان‌دهنده حضور مواد سیلیسی و کربناتی در ملات گچ است. این ناخالصی‌ها احتمالاً از منابعی مانند خاک رس، ماسه یا سنگ آهک یا سنگ های اتشفشانی و دگرگونی وارد ملات شده‌اند. کوارتز ($SiO_2$) عمدتاً از مواد سیلیسی طبیعی موجود در منطقه، مانند خاک رس، ماسه‌های بستر و رسوبات آبرفتی تامین می‌شود. در ملات‌های تاریخی گچی، حضور کوارتز معمولاً به عنوان جزء معدنی ناخواسته یا تقویتی شناخته می‌شود که طی فرآیند ساخت ملات بدون حذف کامل این مواد و با بهره‌گیری از آن‌ها تولید شده است. اگر مصالح محلی حاوی کوارتز باشند (مثل سنگ‌های کوارتزیت)، این ماده می‌تواند در حین آسیاب شدن گچ وارد ملات شده باشد.

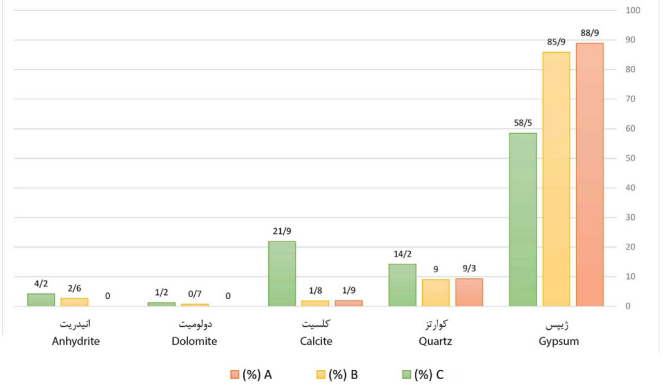
حضور کلسیت و دولومیت ($CaMg(CO_3)_2$) نیز نشان‌دهنده امکان استفاده از مواد اولیه حاوی آهک در ترکیب ملات است. کلسیت ($CaCO_3$) و دولومیت ($CaMg(CO_3)_2$) احتمالاً از آهک‌های طبیعی موجود در سنگ آهک منطقه یا خاک‌های کربناتی وارد ملات شده‌اند. در ساخت ملات‌های دوره تاریخی، استفاده از آهک به عنوان ماده متداول برای بهبود خواص مکانیکی و دوام شناخته می‌شود. این ناخالصی‌ها به‌عنوان فازهای معدنی ثانویه در ملات‌های گچی طبیعی تلقی شده و بخشی از فناوری محلی ساخت ملات به حساب می‌آیند.

وجود کوارتز به دلیل سختی و مقاومت بالا، می‌تواند به پایداری مکانیکی ملات کمک کند و نقش تقویتی در ملات گچی ایفا نماید و از ترک‌خوردگی جلوگیری کند. کلسیت و دولومیت در ملات ممکن است باعث افزایش مقاومت در برابر تغییرات رطوبتی و محیطی شوند، اما حضور بیش از حد آنها ممکن است باعث ایجاد حساسیت به حملات شیمیایی یا فرسایش شود.

کلسیت و دولومیت ممکن است باعث افزایش چسبندگی و پیوستگی بین ذرات شده و به بهبود ساختار کلی ملات کمک کنند. از طرفی، وجود انیدریت ($CaSO_4$) بدون آب در نمونه‌ها می‌تواند نشانه فرآیندهای تغییر فاز در طول زمان و شرایط محیطی خاص باشد که به تحلیل میزان فرسایش و آسیب‌های سطحی کمک می‌کند.همچنین، ناخالصی‌ها می‌توانند تأثیر مهمی بر ساختار تخلخل، نفوذپذیری و در نهایت دوام کلی ملات داشته باشند، که نمونهC با کمترین تخلخل و بیشترین یکنواختی توزیع ذرات، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد.

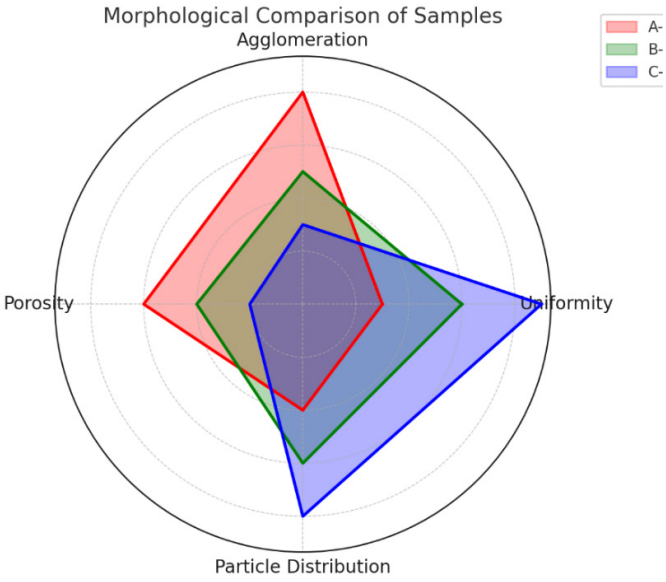
البته مقایسه ساختار سه نمونه مورد بررسی نشان داد که فازهای انیدریت ودولومیت درنمونه A یافت نشد ودر نمونه C بیشترین میزان کلسیت، دولومیت، کوارتز و انیدریت نسبت به سایر نمونه‌ها وجود داشت (شکل ۱۲). همچنین مقایسه نتایج حاصل از آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل۱۳) مشخص می‌نماید که نمونه C دارای همگن‌ترین توزیع

اندازه ذرات، متراکم‌ترین ساختار و کم‌تخلخل ترین بوده است. تخلخل کمتر به معنای فضای خالی کمتر در ملات است. این باعث می‌شود آب کمتری به داخل آن نفوذ کند، که می‌تواند باعث ترک خوردگی و تخریب در طول زمان شـــود. توزیع ذرات یکنواخت‌تر، ملاتی متراکم‌تر و قوی‌تر ایجاد می‌کند و یکنواختی در اندازه ذرات به این معنی اســـت که ملات به طور یکنواخت تر سفت می‌شود و در برابر تنش مقاوم‌تر است.




شکل ۱۲. مقایسه فازهای شناخته شده در سه نمونه مور بررسی

**Figure 12.** Comparison of known phases in three samples studied.




شکل۱۳: نمودار راداری مورفولوژی سه نمونه شامل یکنواختی، تجمع ذرات، تخلخل و توزیع ذرات

**Figure 13.** Radar diagram of the morphology of three samples including uniformity, agglomeration, porosity, and particle distribution

مطالعه ترکیب معدنی ملات‌ها نشـــان می‌دهد که فناوری ســـاخت ملات‌های گچی دوره ســـلجوقی در کرمان مبتنی بر اســـتفاده از مواد اولیه محلی با ترکیبات مشـــخص و پایدار بوده اســـت. وجود ترکیب‌های معدنی مشابه در نمونه‌ها نشانگر تداوم تکنولوژیک در استفاده از روش‌های سنتی تهیه ملات اســـت و هیچ نشـــانه روشـــنی از تغییرات تکنولوژیکی ناگهانی یا گسسـت در این زمینه دیده نمی‌شود. این موضوع با توجه به ساختار بلوری منظم ژیپس و ناخالصی‌های شناسایی‌شده تأیید می‌شود.

نتایج حاصـــل از آزمایش های صـــورت گرفته روی نمونه‌های گچی از محراب، با نتایج حاصل از بررسی آزمایشگاهی در سایر بناهای ایران قابل مقایسه است (جدول۶).

جدول ۶. مقایسه نتایج حاصل از آنالیز ملات گچ محراب مسجد ملک با نتایج محققان در شناسایی ساختار سایر ملات‌های گچی

**Table 6.** Comparison of the results of the analysis of the plaster mortar of the Mihrab of Malek Mosque with the results of researchers in identifying the structure of other plaster mortars

| Index phase in biscuits | Description | Studies |
|---|---|---|
| Anhydrite | Gypsum Mortar of Seyed Shams-din Monument in Yazd | Hamzavi |
| Anhydrite | Gypsum Mortar of Kuh-e Khwaja | Mishmastnehi |
| Gypsum | Gypsum Mortar of Gaz Grand Mosque and Ardashir Palace | Hamzavi et al |
| Gypsum as the dominant phase and the presence of quartz in all samples | Sasanian gypsum mortars | Firozmandi shirejin and Mahyar |
| Gypsum | Gypsum Mortar of House of the Shahshahan of Isfahan | Mohtasham et al |
| Gypsum as the dominant phase and the presence of quartz and calcite in all samples | Gypsum Mortar Seymareh mosque | Hajian et al |
| Gypsum as the dominant phase and the presence of quartz and calcite in all samples | Plaster mortar for the Mihrabs of the Imam Mosque of Kerman | This research |

## ۵. نتیجه‌گیری

فاز غالب نمونه‌ها این موضوع را تأیید می‌کند که این نمونه‌ها اساساً از گچ ساخته شده‌اند و فرآیند عمل‌آوری و ترکیب با آب به‌طور مناسب انجام شده است. مواد ناخالصی چون کوارتز و کلسیت جهت فرصت برای شکل دهی در گچ بری به آن افزوده شده‌است و همچنین بر استحکام بخشی و بالا بردن ســـطح مقاومت آن نقش دارد. یعنی کلســـیت ($CaCO_3$) به دلیل ماهیت کربناتی، در فرآیند هیدرلتاســـیون گچ یا ژیپس ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) تأثیر منفی دارد. این تأثیر به این دلیل اســـت که کلســـیت در واکنش‌های

هیدراتاسیون گچ دخالت نمی‌کند و در نتیجه از سرعت واکنش‌های مورد نیاز برای گیرش و سخت شدن گچ می‌کاهد. به نظر می رسد ساختار ملات های گچی این مسجد دارای ترکیب گچ و سنگ آهک بوده که در سنگ اولیه گچ به صورت ژیپس به همراه کلسیم یا منیزیت دیده می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که نمونه c با دانه‌بندی یکنواخت کمترین میزان تخلخل در بین نمونه‌ها را دارد که می‌تولند به استحکام بالاتر این نمونه منجر شود از طرفی مقایسه نتایج ازمون XRD نیز نشان می‌دهد که نمونه C در بین نمونه‌ها دارای بیشترین کوارتز و کلسیت است. ترکیب کلسیت با ملات گچ امری آگاهانه و به جهت دیرگیری ملات گچ بوده است این ماده که به صورت طبیعی در سنگ آهک یافت می‌شود و علاوه بر اینکه در ترکیب با گچ سبب دیرگیری آن می‌شود، باعث استحکام‌بخشی و بالابردن سطح مقاومت آن می‌شود. بنابراین، به نظر می‌رسد این نمونه به این دلیل سالم تر از بقیه نمونه‌ها مانده است و نمونه C به‌عنوان ساختار بهینه، معیاری برای تولید ملات‌های پایدار در پروژه‌های حفاظتی است. این یافته‌ها نه‌تنها به درک بهتر فناوری ساخت گچ در دوران تاریخی کمک می‌کند، بلکه می‌تولند به عنوان معیاری برای تهیه ملات‌های سازگار در مرمت آثار گچی مورد استفاده قرار گیرد. الگوی پیشنهادی برای ساخت ملات جدید مرمتی مبتنی بر نمونه c با ویژگی هایی چون تخلخل مناسب (برای امکان تبادل رطوبتی با مصالح قدیمی، ترکیب معدنی مشابه با نمونه قدیمی (غالب بودن ژیپس) و رفتار مکانیکی و ساختاری هماهنگ با زمینه اصلی به شرح جدول شماره ۷ می‌باشد. البته با توجه به شرایط گرم و خشک کرمان، بهتر است سطح ملات پس از اجرا جهت جلوگیری از تبخیر سریع و تثبیت ساختار اولیه ملات در کیسه مرطوب(پارچه کنفی مرطوب) به مدت حدود ۷ روز محافظت شود تا از خشک‌شدن سریع و ترک‌خوردگی جلوگیری شود.

جدول ۷. اجزای پیشنهادی ملات مرمتی

**Table 7.** Proposed Components of the Restoration Mortar

| Raw Material | Weight Ratio | Justification | Estimated Amount per 100 kg Dry Mix |
|---|---|---|---|
| Natural Gypsum | 74% | Main phase in sample C; forms the matrix of the mortar | 74 kg |
| Quartz Powder | 6% | Increases abrasion resistance; simulates angular fine particles | 6 kg |
| Calcite Powder | 9% | Matches carbonate phases found in the original; improves moisture resistance | 9 kg |
| Dolomite | 3% | Enhances thermal and chemical stability | 3 kg |
| Fine Silica Sand | 6% | Improves texture; reduces shrinkage during drying | 6 kg |
| Natural Organic Additive (e.g., gum arabic or starch) | 0.8% | Improves workability and prevents cracking | 0.8 kg |
| Distilled Water | ~45% | Provides consistency without introducing impurities | ~45 kg |

**سپاسگزاری:** لازم می‌دانم از مدیر کل اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان کرمان جهت همکاری در بازدید بنا و نمونه‌برداری آثار، همچنین راهنمایی اساتید بزرگوار جناب دکتر عنایت الله شیخ حسینی و سرکار خانم دکتر یحیی زاده قدردانی نمایم.

**مشارکت نو یسندگان:** نویسنده تمامی بخش‌ها را به تنهایی انجام داده است.

**تأمین مالی:** این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است

**تضاد منافع:** نویسندگان هیچ گونه تضاد منافع را اعلام نمی کنند.

**دسترسی به داده ها و مواد:** مشارکت‌های اصلی ارائه شده در این مطالعه در مقاله گنجانده شده است. سوالات بیشتر را می‌توان به نویسنده مسئول ارسال کرد.

## References

Abu Hamed Kermani, A. al-D. (1947). Badae al-Zaman fi Waqae Kerman (M. Bayani, Ed.). Tehran: University of Tehran. [In Persian]

Asadollahi, M. (1995). Malek Mosque. Farhang va Adab, (5), 63–73. [In Persian]

Anisi, A. (2004). The Masjid-i Malik in Kirman. Journal of the British Institute of Persian Studies, vol. 13. DOI:10.2307/4300669

Bastani Parizi, M E. (1956). A Guide to the Historical Monuments of Kerman (Farhang-e Ostan-e Hashtom), Tehran: Hazr. [In Persian]

Beytollahi, A. (2015). A comparative study of image and calligraphy in the four plaster Mihrabs of Malek Mosque in Kerman (M.A. thesis, Ferdows Mashhad Institute of Higher Education). [In Persian]

Daneshvar, M. (2009). Old Neighborhoods of Kerman, Kerman: Kerman Studies Center

Etemad al-Saltaneh, M. H. ibn A. (1988). Mer'at al-Boldan (Vol. 4). Tehran: University of Tehran.

Eslam Panah, M. H. (1988). Seven topics about Kerman and.... Ayandeh, (1, 2, 3), 155–171.

Firoozmandi Shirehjin, B., & Mahyar, Sh. (2014). Elemental analysis of Sasanian period mortar by XRD method and its application in dating buildings attributed to this period. Journal of Iranian Studies, 13(25), 217–233. https://doi.org/10.22103/jis.2014.955.

Hajian, F., Sanaeinejad, A., & Sharifinia, A. (2020). Elemental analysis of gypsum mortar plasters of Seymareh Mosque using XRD and XRF methods. *Ilam Studies Quarterly, 5*(15), 1-29.

Hamzavi, Y. (2021). A study of the structure of gypsum mortar in the iwan of Seyed Shams al-Din monument in Yazd (Kufic inscription, molded stucco ornament, gypsum substrate

layer). Iranian Journal of Conservation and Architecture, *11*(25), 37–54. Doi: 10.52547/mmi.580.13990415.

Hamzavi, Y., Haji Seyyed Javadi, S. M., & Mosleh, M. (2023). An investigation into the characterization of gypsum mortar of three historical periods and four climates of Iran. *JRA, 9*(1), 87–113. https://doi.org/10.52547/jra.9.1.346.

Hemat Kermani, M., (1999). A Detailed History of Kerman and Events of the Last Hundred Years, 6th Edition, Tehran: Goli. [In Persian]

Heydari Babakamal, Y., et al. (2014). A study of stucco decoration of Seljuk Mihrabs in Malek Mosque of Kerman from the perspective of Islamic art. *Islamic History Studies, 7*(23), 149–177. https://doi.org/10.30501/jamt.2635.70261

Mohtasham, A., Salehiun, L., & Ahmadi, K. (2014). Technical study of stucco ornaments in "Shah-shahan" house using XRD, SEM and wet chemistry. Advanced Materials and Technologies Journal, 3(2), 37–49. doi: 10.30501/jamt.2635.70261

Mishmastnehi, M. (2016). 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). *JRA, 1*(2), 1–14. https://doi.org/10.29252/jra.1.2.1

Morsalpour, M. (2008). *The history of Seljuks in Kerman*. Kerman: Kermanshenasi.

Munshi Kermani, N.-al-D. (2015). *Simt al- ula-li-l- hadrat-i-l-ulya (History of the Qara Khitai of Kerman)*. Tehran: Dr. Mahmoud Afshar Yazdi Publications.

Sajjadi, A. (1993). *The evolution of Mihrabs in Iranian Islamic architecture from the beginning to the Mongol invasion* (M.A. thesis, Tarbiat Modares University).

Shahryazi, M. (2013). *A research on Malek Mosque of Kerman based on historical sources, archaeological evidence and architectural features* (M.A. thesis, University of Sistan and Baluchestan).

Sykes, P. M. (2016). *Travelogue of General Sykes, ten thousand miles in Iran* (H. Saadat Nouri, Trans.). Tehran: Loheh.

Vaziri, A. A. K. (1996). *The history of Kerman* (M. E. Bastani Parizi, Ed.). Tehran: Elmi.

Wilber, D. (1986). *The architecture of Iran in the Ilkhanid period* (A. Faryar, Trans.). Tehran: Elmi Farhangi.

Zamani Babgohari, F., & Youzbashi, A. (2019). Typology and graphic capability of architectural arrays of Imam Mosque in Kerman (Malek Mosque). *Journal of Fine Arts: Visual Arts, 24*(4), 101–
110. https://doi.org/10.22059/jfava.2018.248163.665830

Rahimimehr, V. (2025). Microstructural and Compositional Analysis of Gypsum Mortars from the Mihrabs of Malik Mosque in Kerman with an Approach to Application in Conservation Processes. *Journal of research on Archaeometry, 11*(1), 468. DOI: 10.61882/jra.2025.11.110