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

Tabriz Islamic Art University

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

*Research Paper*

# Analysis of Composition of Historical Plaster and Mortars of Zarnegar House, Evaz (Fars)

**Bardia Hajirasouliha*[1], Najmeh Tavangarrizi[2], MohammadHossein Dehghani[3]**

1. PhD Researcher, Faculty of Conservation and Restoration, Art university of Isfahan, Isfahan, Iran
2. Master 's Degree, Faculty of Conservation and Restoration, University of Art, Tehran, Iran
3. Master 's Degree, Faculty of Conservation and Restoration, University of Art, Tehran, Iran

* Correspondence: Bardia.hajirasouliha@gmail.com

## Abstract

The Zarnegar House, located in Evaz County, Fars Province, is a Qajar-era building that exhibits a remarkable variety in the application of mortars. Various types of mortars have been used in different parts of the structure, including mortars for stone masonry walls, wall plastering, floor finishing, arch construction, false arches, filling wooden ceiling beams, and lattice window frames. This study aims to technically investigate and identify the compositions of historical plasters and mortars using instrumental analysis methods (XRD, XRF) and petrographic studies of polished sections under a polarizing microscope. Additionally, the research seeks to answer the following question: What are the primary (binding materials) and secondary (fillers and additives) components used in the historical mortar and plaster samples of the studied building, and what similarities and differences exist in their compositions and constituent materials? Laboratory results indicate that the studied mortars can be classified into three groups: the first group consists of high-purity gypsum mortar used for wall plastering, flooring, arch construction, and lattice windows; the second group comprises gypsum-soil mortar with silicate additives used for filling wooden beams and false arches; and the third group includes lime-silicate mortar used for stone masonry walls. Furthermore, the results reveal that the primary structure of the gypsum used consists of a combination of anhydrite, gypsum, and dolomite phases, which are common across all gypsum and gypsum-soil samples. These findings align well with geological data and indicate a specific calcination method at varying temperature ranges and the use of a specific source for the production and application of gypsum mortar in this region.

Received: 2025/10/13
Revised: 2025/12/9
Accepted: 2025/12/15
Published: 2025/12/30

**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

**Keywords:** Characterisation, Gypsum plaster and mortar, , Evaz County, Historical buildings, Archeaometry

## Introduction

The southern region of Fars, due to its location within the Gachsaran Formation, has a long history of using gypsum mortar from pre-Islamic times to the present day. Examples of its application can be observed in the historical buildings of the Firuzabad-Kazerun region. The Zarnegar House, located in Evaz County, Fars Province, is a Qajar-era structure that, in continuation of the region's historical tradition, exhibits significant diversity in the application of mortars and plasters. In this building, mortars have been used in various structural components, including stone masonry wall mortar, wall plaster, floor finishing mortar, filler mortar for wooden beams, mortar for constructing arches and vaults, and decorative architectural elements.This article aims to identify and characterize the historical plasters and mortars of the Zarnegar House using instrumental analysis methods. The objective of this research is to determine the structural compositions of historical samples for documentation and to generate practical data for conservation and restoration

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

interventions of a historical building's details. Additionally, the study seeks to answer the following question: What are the primary (binding materials) and secondary (fillers and additives) components used in the historical mortar and plaster samples of the studied building, and what similarities and differences exist in their structural compositions and constituent materials across different parts of the structure? The present research was conducted using a developmental-experimental approach based on field and laboratory studies. Field studies were employed for initial data collection, while library studies were utilized for the analysis and comparison of laboratory data.

## Materials and Methods

The materials studied in this research are classified into two categories: plasters and mortars. The mortar samples have three functions: stone masonry wall mortar, floor leveling mortar, mortar for constructing vault templates, mortar for false arches under the ceiling, filler mortar for wooden ceiling beams, and mortar for constructing gypsum lattice windows. Additionally, the plaster samples include two wall plaster samples from the first layer of the wall at two levels: the ground floor and the first floor of the building. Furthermore, a floor mortar sample was collected from a building known as Mulla Ahmad House in the region to serve as a basis for comparison with the Zarnegar floor mortar. During the sampling stage, to ensure consistent laboratory conditions, efforts were made to remove the surface layers of each sample, as environmental weathering may have affected their surface properties. The required samples were collected from a depth of 1.5 to 2 centimeters within each mortar (Figure 1). To study the composition of the materials constituting the plasters and mortars, two chemical characterization tests, XRD-XRF, along with microscopic imaging, were employed.

## Results

The results of crystalline phase identification of plaster and mortar samples indicate a high prevalence of various calcium sulfate phases in most samples. The primary phases of anhydrite and gypsum (except in sample ZAR.M.1) are present in all samples. The presence of similar calcium sulfate phases with varying $H_2O$ content suggests the use of gypsum-based compositions with different spectra, which are similar in many samples and slightly different in others. This variation may be due to the gypsum mine used, the calcination process, or the additives incorporated.

Elemental composition analysis shows that the primary elements constituting the structure of eight plaster and mortar samples are sulfur trioxide ($SO_3$) and calcium oxide (CaO). The $SO_3$ content in these samples ranges from 33.24% to 52.3%, with an average of 40.19%, while the CaO content ranges from 30% to 38.3%, with an average of 34.16%. The average of 6.13% SiO2, as identified in the XRD analysis, is attributed to impurities such as feldspars, quartz, and illite, while the average of 3.27% magnesium oxide is related to the dolomite mineral. Additionally, aluminum oxide ranging from 0.33% to 2.75% and trivalent iron oxide ranging from 0.14% to 1.04% are associated with impurities in the gypsum rock or the addition of soil materials to the gypsum mortar composition.

**Figure 1.** Introduction of the studied sample, including mortar and plaster

The analysis of elemental composition results indicates that plaster and mortar samples can be divided into three categories based on the ratios of calcium oxide, sulfur oxide, and metallic elements related to soil additives (silicon oxide, aluminum oxide, and iron oxide): 1) high-purity gypsum plasters and mortars (6 samples), 2) gypsum plasters and mortars with soil additives (2 samples), and 3) mortar with lime-sand compositions (1 sample). As observed in the ternary diagram (Figure 2), the first group consists of plasters and mortars with a higher concentration of calcium sulfate and lower concentrations of metallic elements. In the second group, the calcium sulfate concentration slightly decreases,

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

while the concentration of metallic oxides such as aluminum, iron, and silicon increases. In the third group, with one sample, the calcium oxide concentration slightly decreases, the sulfur concentration reaches its lowest level, and the total concentration of metallic elements is the highest compared to the other groups.

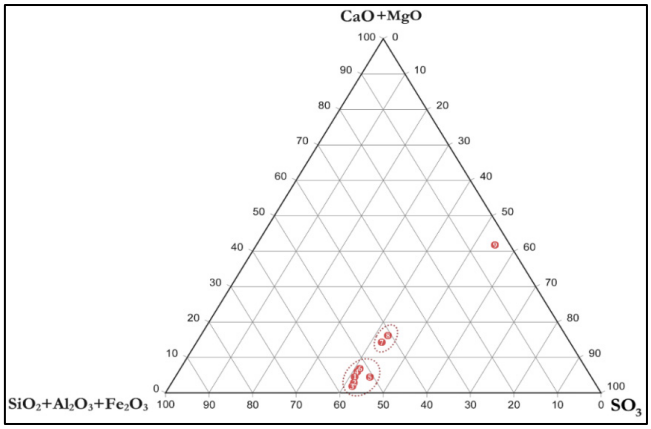



**Figure 2.** Normalized chemical compositions of plaster and mortar samples in the ternary system

$$CaO + MgO - SO_3 - SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$$

## Discussion

Based on the results obtained in this research, the coexistence of various calcium sulfate phases may be attributed to three factors: the geological characteristics of the region, the calcination and processing methods, and phase changes due to environmental weathering. Uncalcined grains, resulting from the kiln firing atmosphere and the lack of reaction of gypsum or anhydrite particles, were observed in many petrographic sections. This is likely because the mortars used in this building were, firstly, produced and applied in large volumes (wall plaster, flooring, and leveling mortar, etc.), and secondly, typically used for rough construction work, which does not justify sieving or using high-quality gypsum. However, in the decorative sample ZAR.MSH, these grains are absent. The mortar used for the gypsum lattice window, constructed through molding, contains gypsum as the primary phase with a significantly reduced anhydrite content. Moreover, its microscopic sections exhibit a highly homogeneous and uniform texture, with no evidence of coarse, uncalcined grains. This could be due to sieving the gypsum powder or the craftsman's expertise in selecting suitable raw materials for creating a finer gypsum lattice. Additionally, the low detection of anhydrite in this sample may be because, during the preparation of the gypsum slurry for molding, coarser and heavier anhydrite particles settled at the bottom of the container, and the upper portion was used for the slurry.

Based on this, it can be hypothesized that the anhydrite present in the Zarnegar samples is likely of the insoluble type (Anhydrite II), as this phase is present in all samples collected from different parts of the building under varying temperature and humidity conditions. If the anhydrite were of the soluble type, over time, in the warm and dry climate of the region, all gypsum phases would likely have transformed into soluble anhydrite or bassanite, and these two phases would not coexist. Therefore, the coexistence of gypsum and anhydrite in most Zarnegar samples likely indicates varying calcination spectra of the gypsum rock.

## Conclusion

The study of nine plaster and mortar samples from the Zarnegar and Mulla Ahmad Houses reveals a fascinating diversity in the application of gypsum mortar for various purposes in a historical building. Laboratory results indicate that some samples have high-purity calcium sulfate, while others contain varying amounts of silica/aluminosilicate additives used in gypsum-soil mortars. Despite minor differences, the similar crystalline structure and the coexistence of primary phases of gypsum, anhydrite, and dolomite in most samples establish a strong connection with the region's geological data. Additionally, the phase similarities across all samples suggest a nearly identical source and calcination conditions for the gypsum rock in the studied samples. The floor mortar samples from the two different buildings show highly similar structures in terms of elemental compositions, identical phases, and soil additives from calcination. Furthermore, the prominence of the gypsum phase and the limited presence of anhydrite in the molded lattice window sample indicate the craftsman's expertise in material selection and proper processing. Ultimately, this research analyzes the dominant anhydrite in the Evaz samples as the insoluble type (Anhydrite II), likely calcined at a temperature range of 90 to 400 degrees Celsius. If soluble anhydrite were present in the historical sample, all gypsum phases would likely have transformed into anhydrite by now. The region's high relative humidity and low concentration of sodium

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

chloride ions, which accelerate phase changes, make this hypothesis unlikely. However, confirming this phenomenon requires further investigation into the gypsum crystals' microstructure and field and laboratory studies of the region's gypsum mines.

**Author Contributions:** Conceptualization, B.H. and M.D.; Methodology, B.H.; Software, B.H.; Validation, N.T.; Formal Analysis, B.H., M.D., and N.T.; Resources, B.H.; Data Curation, B.H.; Writing—Original Draft Preparation, B.H.; Writing—Review and Editing, B.H. and N.T.; Visualization, B.H.; Supervision, N.T.; Project Administration, N.T.

**Funding:** The costs of the laboratory analyses were funded by the Faghihi-Nejad family.

**Data Availability Statement:** The raw data supporting the findings of this study will be made available by the authors upon reasonable request.

**Acknowledgments:** The authors would like to express their sincere appreciation to the Zarnegar family, the staff of the restoration workshop of the Zarnegar Historic House, and Gonbad-e Dovar Company of the Torab House for their cooperation and support in this research.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

پژوهه باستان‌سنجی
دانشگاه هنر اسلامی تبریز

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

*مقاله پژوهشی*

# مطالعهٔ ترکیب ساختاری اندودها و ملاط‌های تاریخی خانهٔ زرنگار اوز (فارس)

**بردیا حاجی‌رسولی‌ها[1*]، نجمه توانگرریزی[2]، محمدحسین دهقانی[3]**

۱. محقق دکتری مرمت بناها و بافت‌های تاریخی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران
۲. کارشناس ارشد مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه هنر تهران، تهران، ایران
۳. کارشناس ارشد مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه هنر تهران، تهران، ایران
* مسئول مکاتبات: Bardia.hajirasouliha@gmail.com

## چکیده

خانهٔ زرنگار واقع در شهرستان اوز در استان فارس، یکی از بناهای ساخته‌شده در دوران قاجار است که تنوع زیادی در کاربرد ملاط دارد. در قسمت‌های مختلف این بنا، ملاط‌هایی با کارکرد ملاط دیوار سنگ‌چین، اندود دیوار، ملاط کف‌سازی رویه، ملاط ساخت تویزه، ملاط ساخت قوس‌های کاذب، ملاط تسطیح تیرهای چوبی سقف و ملاط پنجره‌های مشبک قالبی استفاده شده است. این مقاله به دنبال مطالعهٔ فنی و شناسایی ترکیبات ساختاری اندودها و ملاط‌های تاریخی با استفاده از روش‌های آنالیز دستگاهی طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)، فلورسانس پرتو ایکس (XRF) و مشاهدات میکروسکوپی مقاطع صیقلی، با میکروسکوپ پلاریزان است. همچنین این تحقیق در تلاش برای پاسخ به این سوال است که ترکیبات اصلی (مواد چسباننده) و فرعی (پرکننده و افزودنی‌ها) مورد استفاده در نمونه ملاط‌ها و اندودهای تاریخی بنای موردنظر چیست و این نمونه‌ها از لحاظ ترکیبات ساختاری و مواد تشکیل دهندهٔ آن‌ها چه شباهت‌ها و تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند؟ نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که ملاط‌های مورد مطالعه در سه گروه طبقه‌بندی می‌شوند؛ گروه اول ملاط گچ با خلوص بالا جهت استفاده در اندود دیوار، ملاط کف، ساخت تویزه و پنجره‌های مشبک گچی؛ گروه دوم ملاط گچ و خاک با افزودنی‌های سیلیکاتی جهت پرکننده‌های تیرهای چوبی و قوس‌های کاذب سقف و گروه سوم ملاط آهکی–سیلیکاته جهت ساخت دیوار سنگ‌چین. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ساختار اصلی گچ مورد استفاده ترکیبی از فازهای اصلی انیدریت، ژیپس و دولومیت است که در تمامی نمونه‌های گچ و گچ وخاک مشترک هستند. فراوانی فاز انیدریت پیوند مناسبی با داده‌های زمین‌شناسی سازند گچی گچساران در این منطقه دارد. به علاوه، وجود فازهای مختلف سولفات کلسیم در اغلب نمونه‌ها، نشان‌دهندهٔ طیف درجهٔ حرارت‌های مختلف پخت سنگ گچ و استفاده از یک منبع مشخص برای تولید و استفاده از ملاط گچ در این بنای تاریخی است.

دریافت: ۱۴۰۴/۷/۲۱
آخرین اصلاح: ۱۴۰۴/۹/۱۸
پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۲۴
انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۹

**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

**واژگان کلیدی:** ساختارشناسی، اندود و ملاط گچ، خانهٔ زرنگار، بناهای تاریخی، باستان‌سنجی

## ۱. مقدمه

استفاده از ملاط‌هایی بر پایهٔ موادی چون گچ، آهک و خاک (خمیر گل) کاربردهای متفاوتی در بناهای تاریخی ایران از گذشته تا به امروز داشته است (بزرگمهری، ۱۳۹۶؛ رضازاده اردبیلی، ۱۳۹۵؛ زمرشیدی، ۱۳۸۹). خمیر ملاط معمولاً برای کاربردهای چون ملاط مصالح بنایی، ملاط اندود دیوار و کف و خمیر مورداستفاده برای آرایه‌های معماری به کار رفته است (حمزوی و همکاران، ۱۴۰۲). ملاط‌ها بسته به نوع کاربرد، مواد در دسترس و ویژگی‌های جغرافیایی هر منطقه، ساختارهای متفاوتی دارند (یعقوب‌زاده و حمزوی، ۱۴۰۱). معمولاً در نقاط مختلف ایران، با توجه به ویژگی‌های بومی و ساختار

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

زمین‌شناسی و معادن هر منطقه، ملاط موردنیاز برای کاربرد در قسمت‌های مختلف یک بنای تاریخی انتخاب و ساخته می‌شده است، البته به غیر از ویژگی‌های جغرافیایی و فن تولید ملاط در دوره‌های تاریخی متفاوت، میزان و چگونگی ترکیب مواد برای ساخت ملاط و چگونگی عمل‌آوری آن از عوامل تأثیرگذار بر ویژگی‌های یک ملاط تاریخی است (میش‌مست نهی، ۱۳۹۴؛ حمزوی و همکاران، ۱۴۰۲). با وجود شک و شبهاتی که هنوز در مورد عوامل تأثیرگذار بر ویژگی‌های ساختاری و مسائل فنی ملاط‌های به‌کاررفته در اجزای معماری وجود دارد، تحقیقاتی با هدف بررسی جزئیات فنی و ساختارشناسی اندود و ملاط با استفاده از تکنیک‌های تحلیلی مدرن در ایران بسیار محدود است (میش‌مست نهی، ۱۳۹۴؛ رازانی و حمزوی، ۱۳۹۷؛ حمزوی و همکاران، ۱۳۹۹، ۱۴۰۲،۱۴۰۳). با این حال، همچنان نیاز به تحقیقات بیش‌تری برای نشان‌دادن ارتباط پیچیده بین عوامل تأثیرگذار در ساختار یک ملاط تاریخی موردنیاز است. از این رو مطالعات هر چه بیش‌تر ملاط‌های مناطق مختلف جغرافیایی و دوره‌های تاریخی در ایران، مسیر شناخت دانش فنی و استفاده از آن را برای محققان هموارتر می‌کند. مطالعه و شناخت دانش فنی و ساخت ملاط در وهلهٔ اول، کمک به مستندسازی و ثبت آثار تاریخی و در وهلهٔ دوم کمک به حفاظت و مرمت آن‌ها می‌کند و علاوه بر آن مبنایی را برای مقایسه با دیگر نمونه‌های تاریخی فراهم می‌کند.

منطقهٔ جنوب فارس، به دلیل قرارگیری در محدودهٔ سازند گچساران، سابقه‌ای طولانی در استفاده از ملاط گچ از دوران پیش از اسلام تا به امروز دارد. نمونه‌های استفاده‌شده از آن را می‌توان در بناهای تاریخی منطقهٔ فیروزآباد–کازرون (فیروزمندی شیرجنی و ماهیار، ۱۳۹۴) مشاهده کرد. خانهٔ زرنگار واقع در شهرستان اوز در استان فارس یکی از بناهای ساخته‌شده در دوران قاجار است که در ادامهٔ سنت تاریخی این منطقه، دارای تنوع بسیار گسترده‌ای از کاربرد ملاط، در اجزای مختلف یک بنای تاریخی است. در این بنا ملاط در قسمت‌های مختلف سازه به‌عنوان ملاط دیوار سنگ‌چین، اندودهای دیوار، ملاط کف‌سازی رویه، ملاط پرکنندهٔ تیرهای چوبی سقف، ملاط ساخت قالب تویزه و تزئینات و آرایه‌های معماری استفاده شده است. در حال حاضر، مالکان شخصی این بنا با هدف مرمت و احیای خانهٔ زرنگار، درصدد انجام اقدامات لازم هستند. از این‌رو، مطالعهٔ فنی و علمی ترکیبات ساختاری مواد و مصالح تاریخی علاوه بر این که مبنایی را برای تصمیم‌گیری در مداخلات مرمتی فراهم می‌کند، داده‌هایی را برای بازسازی و احیاء ملاط‌های تاریخی در اختیار حفاظت‌گران می‌گذارد.

این مقاله به دنبال شناخت و معرفی نمونهٔ اندودها و ملاط‌های تاریخی خانهٔ زرنگار با استفاده از روش‌های آنالیز دستگاهی است. هدف از انجام این پژوهش شناسایی ترکیبات ساختاری نمونه‌های تاریخی به جهت ثبت و مستندسازی آن و تولید داده‌های کاربردی برای انجام مداخلات حفاظت و مرمت از جزئیات یک بنای تاریخی است. همچنین این تحقیق در تلاش برای پاسخ به این سؤال است که: ترکیبات اصلی (مواد چسباننده) و فرعی (پرکننده و افزودنی‌ها) مورداستفاده در نمونهٔ ملاط‌ها و اندودهای تاریخی بنای مورد نظر چیستند؟ و این نمونه‌ها از لحاظ ترکیبات ساختاری و مواد تشکیل دهندهٔ آن‌ها چه شباهت‌ها و تفاوت‌هایی در قسمت‌های مختلف این سازه دارند؟ تحقیق پیش رو با روش توسعه‌ای–تجربی و بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی انجام شده و برای جمع‌آوری اطلاعات اولیه از مطالعات میدانی و برای تحلیل و مقایسه داده‌های آزمایشگاهی از مطالعات کتابخانه‌ای بهره گرفته است.

## ۲. پیشینهٔ پژوهش

### ۲-۱. معرفی بستر

اِوَز (Evaz) شهری کوچک از شهرهای جنوبی استان فارس است که در فاصلهٔ ۴۰ کیلومتری غرب شهر لار، مرکز لارستان، و ۳۳۰ کیلومتری شهر شیراز واقع شده است. این شهر بخشی از منطقهٔ تاریخی لارستان کهن است. در پیرامون آن آثار و بقایای محوطه‌های باستانی و بناهای تاریخی نظیر تپه‌های پیشااسلامی مکشوفه بر سر راه اوز، قلعهٔ تنگ‌کوره، قلعهٔ پرویز، چهارطاقی روستای محلچه، تپه‌های روستای بیدشهر و بنای مقبرهٔ معروف به میرمنصور در ابتدای روستای کوره وجود دارد، ولی بر اساس منابع، پیشینهٔ شهر از اواخر دورهٔ صفویه ثبت شده است. ارتباط گستردهٔ اوز در زمینهٔ فرهنگی و تجاری با شهرهایی چون کرمان، یزد، سیرجان، بندر لنگه، بندرعباس در داخل و به‌ویژه بمبئی هند در خارج و تقاضای استقلال اوز از لار و حتی فارس در زمان قاجاریه و فرمان تاریخی ناصرالدین شاه در این خصوص، گواهی بر جایگاه بارز سیاسی، اقتصادی و سرزمینی این شهر در دورهٔ قاجاریان است. جایگاهی که بعدها نیز با توسعهٔ راه‌های ارتباطی و تجارتی و اشتغال اهالی شهر در کشورهای حاشیهٔ خلیج فارس افزایش یافته و شهر اهمیت تاریخی خود را حفظ کرده است (کمال، ۱۳۸۳: ۲۴–۱۷). بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی سازمان هواشناسی ایران، این منطقه جزء اقلیم گرم و خشک محسوب می‌شود و بیشینهٔ دما در ماه‌های تیر و مرداد به حدود ۴۹ درجهٔ سانتی‌گراد می‌رسد و کمینهٔ دما در فصل زمستان برخی مواقع تا صفر درجه کاهش می‌یابد. میانگین بارش سالانه در فصول پاییز و زمستان حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر است و میانگین رطوبت نسبی در این منطقه، به دلیل نزدیکی به سواحل بندرلنگه و خلیج فارس، بین ۴۰ تا ۶۰ درصد در گرم‌ترین فصول سال است (اطلس هوا و اقلیم‌شناسی استان فارس، ۱۳۹۹).

### ۲-۲. ساختار زمین‌شناسی منطقه

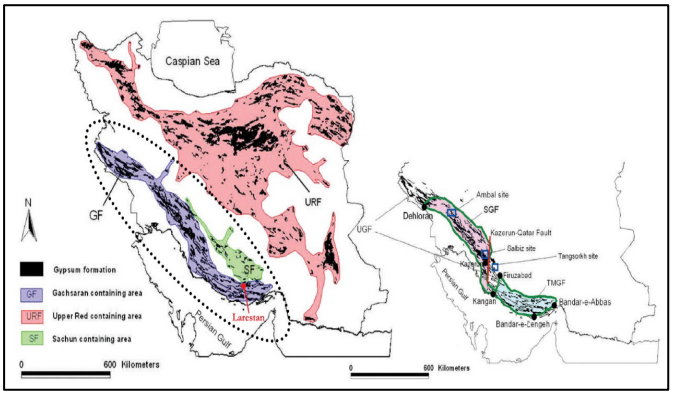
از نظر زمین‌شناسی، منطقهٔ لارستان فارس در مرز شمالی سازند گچساران (اوایل میوسن) و در نزدیکی دو سازند انیدریت هیث (ژوراسیک پسین) ساچون (اواخر مائستریشتین تا اوایل ائوسن) قرار دارد (شکل۱). رخنمون سازندهای گچی در ایران با حدود ۸۰۰۰۰ کیلومتر مربع، ۵٪ از مساحت کل کشور را تشکیل می‌دهند (Raeisi et al, 2013).

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

رخنمون انیدریت هیث در جنوب مرکزی ایران، در نزدیک خلیج فارس و عسلویه، از انیدریت و ژیپس توده‌ای با دولومیت میان‌لایه‌ای تشکیل شده است و سازند ساچون پال با مرکزیت روستای ساچون در شهرستان زرین دشت استان فارس قرار دارد. در میان سازندهای گچی ایران، گچساران، با لایه‌های متناوب مارن، گچ و هالیت، بیش‌ترین رخنمون را در جنوب کشور دارد. سازند گچساران (GF) در جنوب غربی و جنوب مرکزی ایران با رخنمون کلی ۲۰۴۰۰ کیلومتر مربع، ٪۲۵/۳ از کل رخنمون‌های گچ در ایران را تشکیل می‌دهد.

حوضهٔ فورلند زاگرس به زیرحوضه‌هایی تقسیم می‌شود که نمک گچساران و معادل‌های غیرنمکی در آن‌ها رسوب کرده‌اند (Bahroudi and Koyi, 2004). سازند نمکی گچساران (SGF) در منطقه‌ای از گسل‌های کازرون تا دهلران رخنمون دارد. از طرفی سازند غیرنمکی گچساران (NSGF) به سه عضو بدون تمایز طبقه‌بندی می‌شود. سازند سه عضوی گچساران (TMGF) بین بندرعباس و فیروزآباد رخنمون دارد، در حالی که رخنمون‌های NSGF تمایز نیافته در دو منطقهٔ مختلف از فیروزآباد تا گسل کازرون تا دهلران دیده می‌شوند. ضخامت GF معمولاً در فواصل کوتاه تغییر می‌کند (Stocklin, 1968; Dunnington, 1968; O'Brien, 1957)که معمولاً از چند صد متر تا ۲۰۰۰ متر متغیر هستند (Bahroudi and Koyi, 2004; Murris, 1980).

زمین‌شناسان اعضای سازند SGF را به ترتیب صعودی به شرح زیر توصیف کرده‌اند: عضو ۱ شامل ۳۹/۶ متر انیدریت و سنگ آهک به صورت میان‌لایه همراه با شیل است. عضو ۲ با ضخامت ۱۱۵ متر، عمدتاً از نمک تشکیل شده و دارای میان‌لایه‌هایی از انیدریت و سنگ آهک نازک است. ضخامت عضو ۳، ۲۲۹ متر است که نیمهٔ پایینی آن از انیدریت ضخیم با نمک فرعی و نیمهٔ بالایی از انیدریت و سنگ آهک نازک و مارن به صورت میان‌لایه تشکیل شده است. عضو ۴ از ۸۴۸ متر لایه‌های ضخیم نمکی مرتبط با مارن خاکستری، سنگ آهک یا انیدریت تشکیل شده است. عضو ۵ از ۳۲۴ متر مارن به صورت متناوب با انیدریت تشکیل شده است. عضو ۶ به سه بخش تقسیم می‌شود؛ بخش پایینی (۱۰۳ متر) شامل تناوبی از انیدریت، مارن قرمز و سنگ آهک، بخش میانی (۱۲۱ متر) از نمک و انیدریت و بخش بالایی (۶۱ متر) از انیدریت با تناوبی از مارن تشکیل شده است. عضو ۷، با ضخامت ۱۳۹ متر، به‌طور هم‌شیب توسط سازند میشان پوشیده شده و شامل تناوبی از انیدریت، مارن و سنگ آهک رسی است (Bahroudi and Koyi, 2004 ;Motiei, 1993 ;Gill and Ala, 1972; Dunnington, 1968; Kashfi, 1980). NSGF به GF تمایز نیافته و به سه عضو چهل، چمپه و مول، مربوط به اوایل دوره میوسن تقسیم می‌شود (James and Wynd, 1965). پایین‌ترین عضو، با ضخامت ۲۹۶ متر، عمدتاً از انیدریت و ژیپس تشکیل شده و میان‌لایه‌های نازک سنگ آهک و مارن در این واحد رایج هستند. عضو چمپه، با ضخامت ۱۱۰ متر در محل عضو میانی GF شامل سنگ آهک یا دولومیت، مارن گچی و گچ توده‌ای است و عضو مول نیز با ضخامت ۵۲ متر، از مارن‌های گچی تشکیل شده که با سنگ آهک و ژیپس نازک بین‌لایه‌ای قرار گرفته‌اند (Raeisi et al, 2013).




**شکل۱.** موقعیت قرارگیری محدودهٔ سازند گچساران در نقشهٔ پراکندگی سازندهای اصلی گچ در ایران (Raeisi et al, 2013)

**Figure 1.** Location of the Gachsaran Formation in the distribution map of the main gypsum formations in Iran

## ۲-۳. توصیف و معرفی اثر

سرای تاریخی زرنگار یکی از نمونه‌های شاخص معماری مسکونی دورهٔ قاجار، در بافت تاریخی شهر اوز است. این بنا با زیربنایی حدود ۹۹۰ مترمربع، با چهار جبهه و سه طبقه، در اطراف حیاطی مرکزی سازماندهی شده است (شکل۲). این بنا از لحاظ گونه‌شناسی، از الگوی مسکن در مناطق حاشیه‌ی شمالی خلیج فارس و دریای عمان پیروی می‌کند (نیک‌مقدم, ۱۳۹۹). از نگاه صاحب‌نظران، اهداف معماری این مناطق، در راستای تعدیل مهمترین مولفه‌های اقلیمی این منطقه یعنی درجهٔ حرارت و رطوبت بالاست (راپاپورت, ۱۳۹۲). در نتیجه اکثر راهکارهای معماری در جهت حداکثر تهویه، بیش‌ترین سایه‌اندازی و جلوگیری از ورود آفتاب شدید این منطقه است. از این رو تناسبات اغلب فضاها به صورت مستطیل کم عرض و کشیده با دو مسیر تهویه طراحی شده‌اند. همچنین بالابردن سطح بنا از زمین، بازشوهای باریک، استفاده از پنجره‌های مشبک گچی یا چوبی و ایوان‌های مسقف عمیق برای برآوردن این اهداف هستند (طاهباز, ۱۳۹۶). از لحاظ سازه‌ای، دیوارهای این بنا از سنگ و خشت و ساختار سقف‌ها از تیرهای چوبی، با لمبه کوبی‌های منقوش ساخته شده‌اند. نکتهٔ جالب توجه استفاده از ملاط گچ در نمای اکثر بناهای مناطق شمالی خلیج فارس مانند بوشهر، بندرلنگه و استان هرمزگان است. با وجود دگرگونی‌ها و مداخلات سال‌های اخیر، بنای زرنگار در تحولات بافت تاریخی اوز حفظ شده و همچنان یکی از عناصر هویت‌بخش این بافت به شمار می‌رود.

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

**شکل۲.** معرفی تصویری خانهٔ زرنگار اوز

**Figure 2.** Visual introduction of the Zarnegar house

## ۳. مواد و روش‌ها

### ۳-۱. معرفی نمونه‌های مطالعاتی

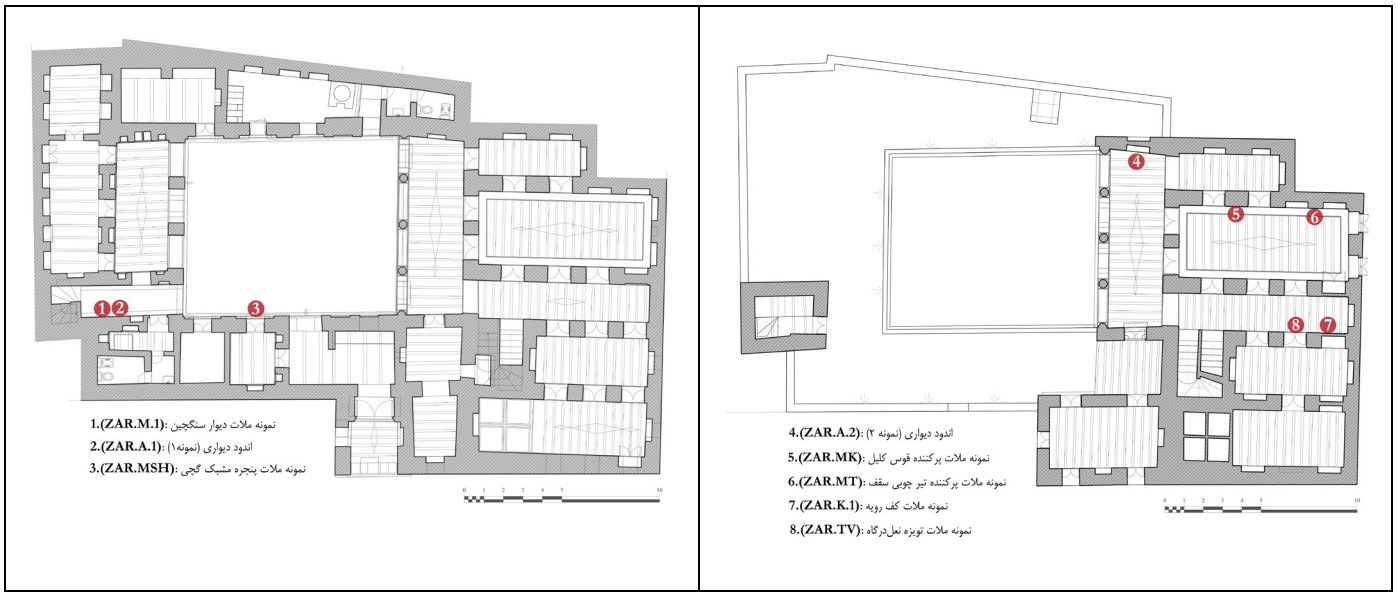
مواد موردمطالعه در این تحقیق در دو دستهٔ اندودها و ملاط‌ها طبقه‌بندی می‌شوند (جدول۱). نمونه‌های ملاط با سه کارکرد ملاط دیوار سنگ‌چین، ملاط رویهٔ کف، ملاط ساخت تویزه‌های قالبی، ملاط قوس‌های کاذب زیر سقف، ملاط تسطیح‌کننده تیرهای چوبی سقف، ملاط ساخت نورگیرهای مشبک و نمونه‌های اندود شامل: دو نمونه اندود دیواری از لایه‌های اول و دوم، در دو تراز طبقه همکف و اول هستند (تصاویر ۳ و ۴). همچنین از بنایی موسوم به خانهٔ ملااحمد در این منطقه، یک نمونه ملاط کف رویه نمونه‌برداری شد تا مبنایی برای مقایسه با نمونهٔ ملاط کف زرنگار باشد.

**جدول ۱.** معرفی نمونه‌های موردمطالعه

**Table 1.** Introduction of the studied samples

| نمونه<br>Sample | محل نمونه<br>Location | کاربرد نمونه<br>Application | بنا<br>Building |
|---|---|---|---|
| ZAR.M.1 | Stone wall- دیوار سنگچین | Mortar- ملاط | Zarnegar- خانه زرنگار |
| ZAR.MT.1 | Wooden ceiling beam filler- پرکنندهٔ تیر چوبی سقف | Mortar- ملاط | Zarnegar- خانه زرنگار |
| ZAR.MK | Half-arch ceiling mortar- ملاط نیم قوس سقف | Mortar- ملاط | Zarnegar- خانه زرنگار |
| ZAR.A.1 | Ground floor wall plaster- اندود دیواری طبقهٔ همکف | Plaster- اندود (۱) | Zarnegar- خانه زرنگار |
| ZAR.A.2 | First floor wall plaster- اندود دیواری طبقهٔ اول | Plaster- اندود (۲) | Zarnegar- خانه زرنگار |
| ZAR.K.1 | Floor- کف | Mortar- ملاط | Zarnegar- خانه زرنگار |
| ZAR.TV | Arch- تویزه درگاه | Mortar- ملاط | Zarnegar- خانه زرنگار |
| ZAR.MSH | Gypsum window mesh- پنجره گچی مشبک | Mortar- ملاط | Zarnegar- خانه زرنگار |
| MLA.K.1 | Floor- کف | Mortar- ملاط | Mola-Ahmad- خانه ملا احمد |

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026




**شکل۳.** موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نقشه طبقه همکف و طبقه اول خانه زرنگار

**Figure 3.** Location sample on the floor plan of Zarnegar house

**شکل ٤.** تصاویر موقعیت قرارگیری برخی از نمونه‌های مورد مطالعه در خانهٔ زرنگار

**Figure 4.** Image of the location of some sample studied in the Zarnagar house

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

نمونه‌برداری ملاط کف از دو بنای متفاوت به این دلیل است که اجرای جزئیات کف در هر دو بنای زرنگار و ملااحمد با دو روش مشابه اجرا شده‌اند. این لایه به ضخامت ۵ تا ۶ سانتی‌متر بر روی زیرسازی بلوکاژ با قلوه سنگ‌هایی درشت‌دانه در ابعاد ۲ تا ۵ سانتی‌متر اجرا شده که در قسمت زیرین ملاط، قابل رویت است (شکل۵: MLA.K1–ZAR.K1). در این نمونه‌ها لایه رویی ملاط به صورت فشرده و متراکم است و رد شیارهای ناشی از ماله‌کشی بر روی آن‌ها دیده می‌شود. ساختار دیوارهای خانه زرنگار، از یک کرسی چینی سنگی و دیوار خشتی ساخته شده است. بر روی دیوار خشتی ۳ لایه اندود بر روی هم انباشته شده، که نخستین لایه به ضخامت ۲ تا ۳ سانتی‌متر، احتمالا مربوط به دوره اولیه بنا است (شکل۵: ZAR.A.1-ZAR.A.2). در طبقهٔ اول، از گونه‌ای ملاط به عنوان پرکننده و تسطیح تیرهای چوبی سقف (در حد فاصل تیرها و لایه‌های تخته‌کوبی) استفاده شده است. در دو طرف نعل‌درگاه‌های این طبقه نیز قالب‌هایی قرار دارد که از ملاط ساخته شده و بین آن‌ها را با خشت (همانند ساز و کار یک تویزه) پر کرده‌اند. همچنین در قسمت نمای حیاط نیز، پنجره‌ها یا نورگیرهای مشبکی در ابعاد ۸۰ در ۸۰ سانتی‌متر وجود دارد که احتمالا می‌رود با استفاده از ملاط و روش قالب‌ریزی اجرا شده باشند. در مرحله نمونه‌برداری سعی شد تا از تمامی قسمت‌هایی از بنا که نمونه‌های ملاط در اجزای آن‌ها به کار رفته نمونه‌برداری شود تا یک طیف فراگیری را بتوان با یکدیگر مقایسه کرد. با توجه به یکسان بودن شرایط آزمایشگاهی، لایه‌های سطحی هر نمونه، به دلیل فرسایش‌های محیطی که ممکن است خواص سطحی ملاط را تحت تأثیر قرار داده باشد، برچیده شد و از عمق یک و نیم تا دو سانتیمتری هر ملاط نمونه‌برداری صورت گرفت (شکل۵). بنابراین عدم فرسایش‌های محیطی، سالم بودن نمونه از آلودگی و هوازدگی و آسیب‌های تخریبی، از دیگر معیارهای نمونه‌برداری این تحقیق بود.

### ۳-۲. روش‌های مطالعات آزمایشگاهی

به جهت مطالعه ساختار مواد تشکیل‌دهنده اندودها و ملاط‌ها، از دو آزمون تعیین مشخصات شیمیایی به روش XRD-XRF به علاوهٔ مشاهدات میکروسکوپی استفاده شد. آزمایش پراش پرتو اشعه ایکس (XRD) به منظور شناسایی و تشخیص فازهای کریستالین، با استاندارد مرجع: BS EN 13925-1:2008 – INSO 21951 توسط یک دستگاه دیفرکتومتر با ولتاژ ۴۰ kV و جریان ۳۰ mA، تحت زاویه 2θ و در محدوده ۲ تا۹۰ درجه و step size: ۰/۰۲ بر روی نمونه پودری آسیاب شده (کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر) در دمای ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ٪۳۰، در آزمایشگاه متالورژی رازی انجام گردید.

آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) به صورت نیمه کمی (Semi Quantitative) و روی نمونه‌های آسیاب شده با استفاده از طیف‌سنج Perform'X ARL 8410 (شرکت Thermo Fisher Scientific)، مجهز به فیلتر برنجی انجام شد تا ترکیب شیمیایی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM E1621-21 تعیین شود. نمونه‌های پودر شده به مدت ۹۰ دقیقه در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد خشک شدند و سپس در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا میزان اتلاف وزن در هنگام احتراق (LOI) تعیین شود.

برای بررسی وضعیت کیفی بافت، تراکم، تخلل، اندازه، شکل و پراکندگی کانی‌ها و همچنین افزودنی‌ها، انکلوزیون‌ها و ماتریکس زمینه، از هر نمونه یک مقطع صیقلی (Polished Section) اشباع در رزین به قطر دو سانتی‌متر برای مشاهدات میکروسکوپی آماده شد و با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان با نور منعکس از مقاطع صیقلی و با بزرگنمایی ۴۰-۱۰۰X در آزمایشگاه میکروسکوپی دانشکده حفاظت و مرمتِ دانشگاه هنر اصفهان بررسی شد.

**شکل۵.** معرفی تصویری نمونه‌های اندود و ملاط

**Figure 5.** Introduction of the studied sample, including mortar and plaster

## ٤. یافته‌ها و نتایج

### ٤-١. نتایج آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD)

نتایج آزمایش فازیابی کریستالین نمونه‌های اندود و ملاط حاکی از فراوانی طیف‌های گوناگونی از سولفات کلسیم در اغلب نمونه‌ها است (شکل6). به طوری که فازهای اصلی انیدریت و ژیپس (به غیر از نمونه ZAR.M.1) در تمامی نمونه‌ها وجود دارد.

در ۶ نمونهٔ ZAR.TV، ZAR.K.1، ZAR.A.1، ZAR.MK، ZAR.MT.1 و ZAR.A.2، فاز اصلی با بالاترین پیک در الگوهای پراش

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

پرتو ایکس، مربوط به انیدریت است. در این میان، نمونه‌های MLA.K.1، ZAR.K.1 و ZAR.A.1 به ترتیب با فازهای اصلی انیدریت، ژیپس و دولومیت، شباهت ساختاری بسیار زیادی با یکدیگر دارند. با این تفاوت که در نمونه MLA.K1 وجود پیک شاخص باسانیت به عنوان یکی از فازهای نیمه پایدار سولفات کلسیم نیمه هیدراته، دیده می‌شود. البته این فاز در دو نمونه ZAT.K1 و ZAR.MT با شدت بسیار کم نیز شناسایی گردید. از طرف دیگر در نمونه‌های ZAR.A.2, ZAR.MK, ZAR.MT, ZAR.TV همراه فازهای اصلی انیدریت و ژیپس و دولومیت، فازهای فرعی کوارتز نیز وجود دارد که در دو نمونه‌ی ZAR.A.2 و ZAR.MK شدت آن‌ها شدیدتر است. در این دو نمونه علاوه بر فاز کوارتز، فاز فرعی ایلیت نیز دیده می‌شود که به احتمال زیاد مربوط به افزودنی مواد خاکی به ترکیب این ملاط است که در دیگر نمونه‌ها شناسایی نشد.

بر خلاف شش نمونه‌ای که فاز انیدریت جزء اصلی آن‌ها بود، در نمونهٔ ZAR.MSH فاز غالب با شدت بسیار زیاد مربوط به ژیپس است و انیدریت در این نمونه جزء فازهای فرعی محسوب می‌شود.

در مجموع وجود فازهای مشابه سولفات کلسیم با مقدار $H_2O$ متفاوت، نشان از ترکیبات گچی با طیف‌های مختلفی دارد که در بین بسیاری از نمونه‌ها مشابه و در برخی دیگر با اختلاف بسیار کمی متفاوت است. این امر ممکن است به دلیل معدن گچ مورد استفاده و یا شیوهٔ پخت آن‌ها و افزودنی‌های مورداستفاده باشد.

از میان ۹ نمونهٔ مطالعه‌شده، نمونهٔ ZAR.M.1 ترکیبی متفاوت از دیگر نمونه‌ها دارد. فازهای اصلی شناسایی‌شده در این ملاط به ترتیب شامل کلسیت، کوارتز و ایلیت و فازهای فرعی شامل دولومیت و آراگونیت و ژیپس است؛ بنابراین، این ملاط ساختاری کلسیتی دارد که احتمالاً مقداری خاک رس‌دار/ ماسه‌دار به آن افزوده شده است.

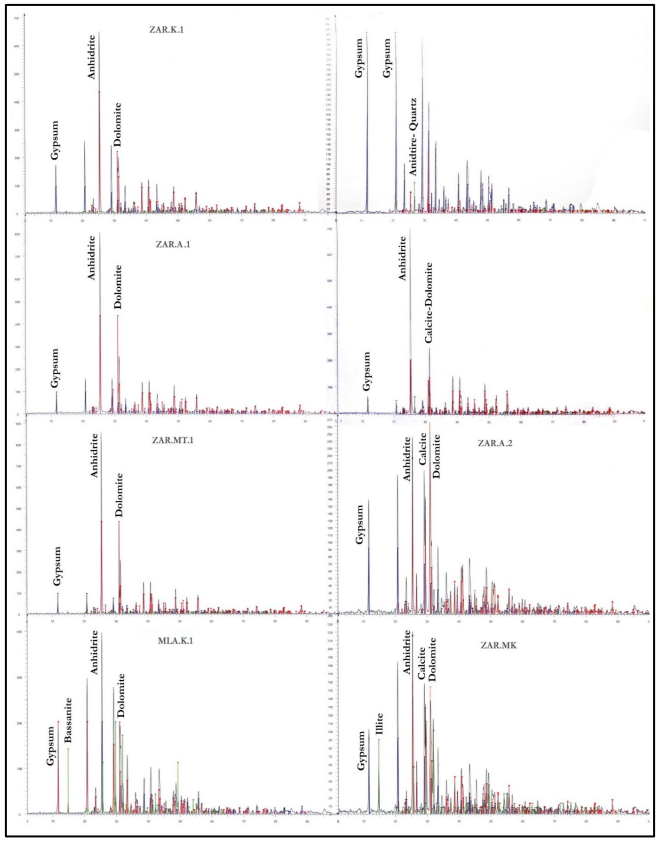
**جدول ۲.** نتایج داده‌های نیمه کمی آزمایش XRD

**Table 2.** Semi-quantitative data results (XRD) mineralogical testing

| Sample | سولفات کلسیم Calcium sulfate | | | کربنات کلسیم Calcium carbonate | | | ماسه و سیلت Sand & silt | رس Clay |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Gyp[1] | Ahd[2] | Bass[3] | Dol[4] | Cal[5] | Arg[6] | Qz[7] | Ilt[8] |
| **ZAR.A.1** | 3 | 1 | _ | 2 | 4 | _ | _ | _ |
| **ZAR.K.1** | 3 | 1 | _ | 2 | _ | _ | _ | _ |
| **MLA.K.1** | 1 | 2 | 3 | 4 | _ | _ | _ | _ |
| **ZAR.TV** | 2 | 1 | _ | _ | 3 | _ | 4 | _ |
| **ZAR.MT.1** | 2 | 1 | _ | 3 | _ | _ | 4 | _ |
| **ZAR.MSH** | 1 | 4 | _ | _ | 2 | _ | 3 | _ |
| **ZAR.MK** | 2 | 1 | _ | 3 | 5 | _ | 6 | 4 |
| **ZAR.A.2** | 2 | 1 | _ | 3 | 5 | _ | 4 | 6 |
| **ZAR.M.1** | _ | _ | _ | 4 | 1 | 5 | 2 | 3 |

شدت پیک‌ها بر اساس بالاترین پیک از ۱ تا ۳ به‌عنوان فازهای اصلی و ۴ تا ۶ به‌عنوان فازهای فرعی مشخص شده است

Peak intensity is determined based on the highest peak from 1 to 3 as the main phases and 4 to 6 as the sub phases




**شکل ٦.** نمودار نتایج آزمایش پراش پرتو ایکس و مشخص‌کردن پیک‌های شاخص در نمونه‌های اندود و ملاط

**Figure 6**. X-ray diffraction diagram and identification of characteristic peaks in samples

## ٤-٢. نتایج آزمایش فلورانس اشعهٔ ایکس (XRF)

بررسی ترکیبات عنصری نشان می‌دهد که بیش‌ترین عناصر تشکیل‌دهندهٔ ساختار ۸ نمونه از اندودها و ملاط‌ها به تری اکسید گوگرد و اکسید کلسیم اختصاص دارد (جدول۲). مقدار $SO_3$ در این نمونه‌ها در بازهٔ ۳۳/۲۴ wt% تا ۵۲/۳wt% با میانگین ۴۰/۱۹wt % و مقدار CaO در بازه ۳۰wt% تا ۳۸/۳wt% با میانگین ۳۴/۱۶ wt% قرار دارد.

میانگین ۶/۱۳ wt% $SiO_2$، همان‌طور که در آزمایش XRD نیز مشخص شد، مربوط به ناخالصی موادی چون فلدسپارها، کوارتز و ایلیت است و میانگین ۳/۲۷wt% اکسید منیزیم نیز مربوط به کانی دولومیت می‌باشد. علاوه بر این، مقدار۰/۳۳ wt% تا ۵/۷۵ wt% اکسید آلومینیوم و ۰/۱۴ wt% تا ۱/۰۴ wt% اکسید آهن سه ظرفیتی مربوط به ناخالصی‌های موجود در سنگ گچ و یا افزودنی مواد خاکی به ترکیب ملاط گچ است. همچنین تری اکسید تیتانیوم نیز تنها در سه نمونه‌ای (ZAR.MK, ZAR.A.2, ZAR.M.1) یافت شد که بیشترین مقدار سیلیس، آهن و آلومینیوم را دارند. در نتیجه وجود $TiO_2$ رابطه مستقیمی با مقدار اکسیدهای فلزیِ مرتبط با خاک دارد. مقدار اندک استرانسیوم

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

در هشت نمونه (به غیر از ZAR.M.1) با غلظت ۰/۱۱ wt% تا ۰/۲۷ wt%، احتمالا مربوط به ویژگی‌های معدن گچ اولیه و یا ساختار زمین شناسی این منطقه است. زیرا در نمونهٔ ZAR.M.1 که مقدار اکسیدِ گوگردِ بسیار اندکی وجود دارد، غلظتی از استرانسیوم دیده نمی‌شود.

همانطور که در نتایج آزمایش فازیابی XRD نیز مشخص شد، نمونهٔ ZAR.M.1 ترکیب کاملا متفاوتی با هشت نمونه‌ی دیگر دارد. در این نمونه، مقدار اکسید گوگرد به کمترین مقدار رسیده (۲/۵۳ wt%) و به جای آن مقدار اکسیدهای فلزی مانند اکسید سیلیسیم (۲۱/۹۱ wt%)، اکسید آلومینیوم (۵/۷۱wt%) و اکسیدآهن (۲/۶۳ wt%) بیشترین مقدار را نسبت به شش نمونهٔ دیگر دارد.

## ٤-۳. مشاهدات میکروسکوپی

بررسی مشاهدات میکروسکوپی نشان می‌دهد که از بین نه نمونهٔ مطالعاتی، هشت نمونه دارای بستر کربناتی هستند. در مقاطع نمونه‌های MLA.K.1, ZAR.A.1, ZAR.K.1 تعدد بلورهای کشیدهٔ ژیپس دیده می‌شود (شکل۷).

بستر این نمونه‌ها از ماتریکس کربناتی بسیار فشرده و متراکم به رنگ خاکستری تا سفید روشن، با طیفی از انکلوزیون‌های کربناتی ریزدانه و درشت‌دانه (۲ تا ۳ میلی‌متر) و افزودنی‌های ذغال و خاکسترهایی ریزدانه، در ابعاد ۰/۰۱ تا ۰/۰۳ میلی‌متر، به صورت ترکیب‌شده با ماتریکس زمینه تشکیل شده است (شکل۸-۹). در این نمونه‌ها، ذرات درشت سفیدرنگی دیده می‌شوند که احتمالاً مربوط به مواد کلسینه نشده‌ی ژیپس و انیدریت هستند (شکل۱۲). این مواد نشان از پخت ناقص و یا روش فرآوری مواد گچی دارند. نمونهٔ ملاط ZAR.MT.1 همانند دو نمونهٔ ملاط کف و اندود زرنگار، دارای ذرات درشت کلسینه‌نشده با مواد افزودنی ذغال خاکستر است (شکل۹). ماتریکس این نمونه رنگی سفید و خاکستریِ متمایل به قهوه‌ای روشن دارد که به دلیل وجود ناخالصی‌های خاکی است. همچنین در دو نمونهٔ ZAR.MK و ZAR.A.2 بر خلاف چهار نمونهٔ قبلی، زمینه از سفید و خاکستری به قهوه‌ای روشن (خاکی) تغییر رنگ داده و مقداری تجمع مواد رسی غیرمتراکم و انکلوزیون‌های کربناتی درشت‌دانه و کلسینه‌نشده در آن‌ها دیده می‌شود (شکل۱۰). به علاوه، در این دو نمونه، مواد کربناتی کلسیت و دولومیت به همراه ذرات درشت‌دانه و تیز گوشه‌ی کوارتز افزایش یافته و نشانی از ذرات ذغال و خاکستر نیز مشاهده نمی‌شود. در نمونهٔ ZAR.M.1 بستر رسی زمینه و کلسیت‌های افزوده‌شده با یکدیگر واکنش داده و یک بستر رسی-کربناتی را به وجود آورده‌اند. در این نمونه انکلوزیون‌ها به صورت کوارتزها و فلدسپارهای پراکنده وجود دارند (شکل۱۱).

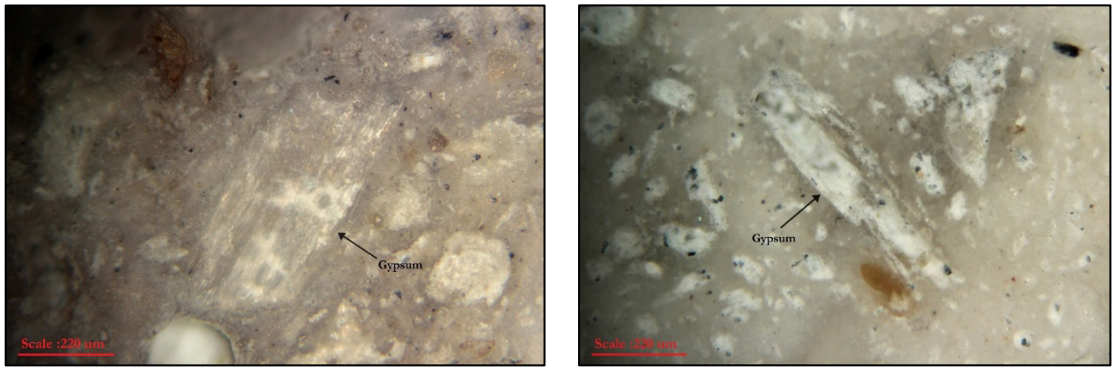
در ملاط تویزه درگاه طبقهٔ فوقانی (ZAR.TV)، نکتهٔ بسیار جالب توجه، شواهد وجود الیاف/ موی جانوری در مقاطع مختلف این نمونه است (شکل۱۳). پراکندگی و مقدار این الیاف به‌طوری است که نمی‌تواند به صورت تصادفی وارد ملاط شده باشد، ولی برای اطمینان از وجود این الیاف به صورت افزودنی و با هدف بهبود خواص ملاط، نیاز به بررسی‌های میدانی و نمونه‌برداری‌های بیش‌تر از قسمت‌های مختلف این تویزه و دیگر تویزه‌های ساخته‌شده به همین روش، در بنای مذکور وجود دارد.

**جدول۳.** نتایج داده‌های نیمه‌کمی در آزمایش عنصری فلورسانس اشعه ایکس(XRF) بر اساس درصد وزنی (wt%)

**Table 3.** Semi-quantitative data results in X-ray fluorescence (XRF) elemental testing (wt%)

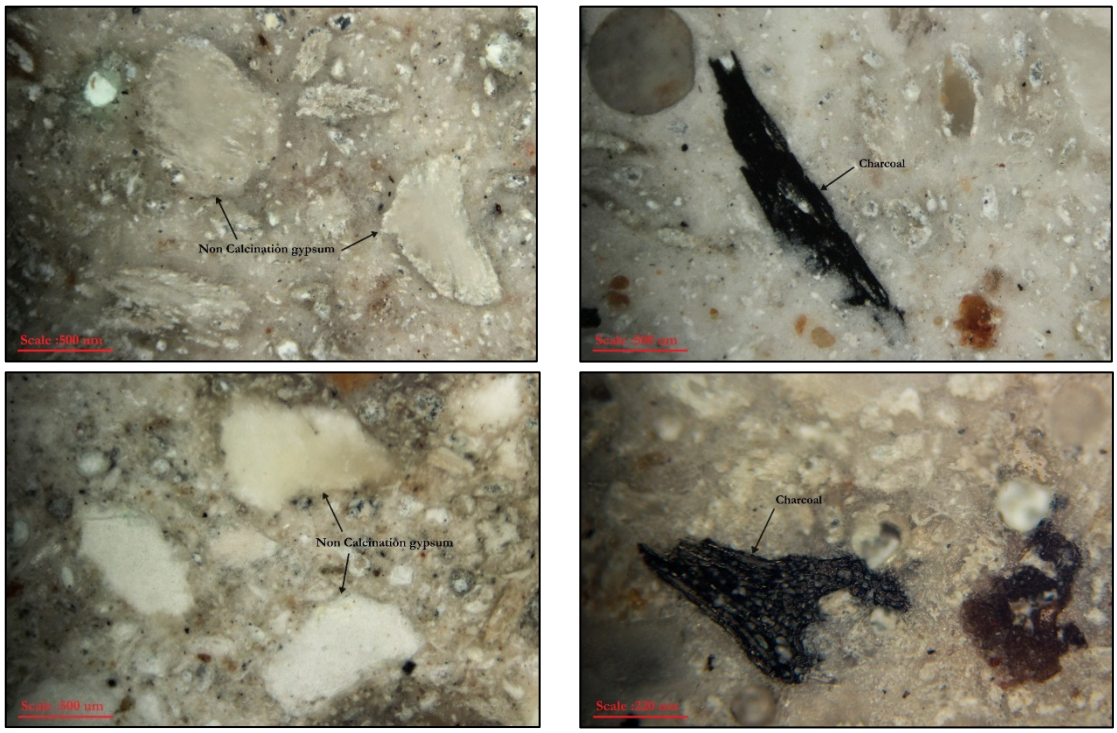
| Sample | $Na_2O$ | $SO_3$ | $Fe_2O_3$ | MgO | Cl | SrO | $Al_2O_3$ | $K_2O$ | L.O.I | $SiO_2$ | CaO | $TiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ZAR.A.1 | _ | 50/73 | 0/23 | 1/24 | _ | 0/14 | 2/07 | 0/17 | 6/1 | 1/92 | 37/2 | _ |
| ZAR.K.1 | 0/39 | 52/3 | 0/26 | 1/24 | _ | 0/13 | 0/59 | 0/16 | 7/4 | 1/86 | 38/3 | _ |
| MLA.K.1 | 0/19 | 49/02 | 0/14 | 0/98 | 0/15 | 0/11 | 0/33 | 0/11 | 10/3 | 1/16 | 35/64 | _ |
| ZAR.TV | _ | 50/83 | 0/6 | 16 | _ | 0/27 | 1/14 | 0/29 | 4/69 | 4 | 37/77 | _ |
| ZAR.MT.1 | 0/38 | 45/5 | 0/44 | 3/42 | 0/26 | 0/2 | 0/84 | 0/28 | 9/74 | 2/71 | 36/57 | _ |
| ZAR.MSH | _ | 41/82 | 0/49 | 1/63 | _ | 0/26 | 1/14 | 0/24 | 18/3 | 3/88 | 31/51 | _ |
| **Average** | 0/16 | 48/37 | 0/36 | 1/69 | 0/07 | 0/19 | 1/02 | 0/21 | 9/42 | 2/59 | 36/17 | _ |
| ZAR.MK | 1/34 | 35/75 | 0/93 | 4/25 | 0/85 | 0/11 | 2/51 | 0/48 | 15/27 | 8/37 | 30/91 | 0/13 |
| ZAR.A.2 | 0/24 | 33/24 | 1/04 | 4/91 | _ | 0/19 | 2/75 | 0/52 | 19/1 | 9/39 | 30/07 | 0/15 |
| **Average** | 0/79 | 34/50 | 0/99 | 4/58 | 0/43 | 0/15 | 2/63 | 0/50 | 17/19 | 8/88 | 30/49 | 0/14 |
| ZAR.M.1 | 0/29 | 2/53 | 2/63 | 10/19 | _ | _ | 5/71 | 1/27 | 25/37 | 21/91 | 29/49 | 0/36 |

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026



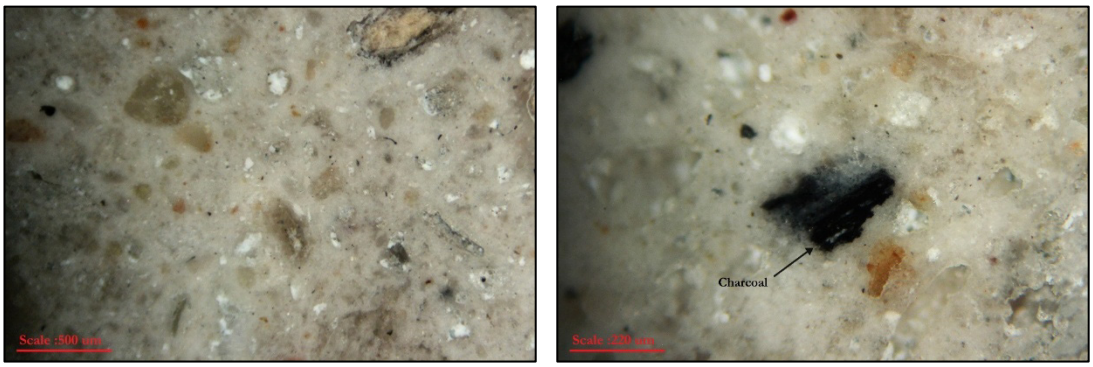

**شکل۷.** بلورهای کشیده و درشت‌دانهٔ ژیپس در ماتریس کربناتی نمونه‌های MLA.K.1 (چپ)، ZAR.A.1(راست)

**Figure 7.** Elongated and coarse-grained gypsum crystals in the carbonate matrix of samples




**شکل۸.** ماتریس کربناتی متراکم به همراه مواد افزودنی ذغال و کربنات‌هایی با کلسیناسیون ناقص در نمونه‌های ZAR.K.1 (بالا) و ZAR.A.1 (پایین)

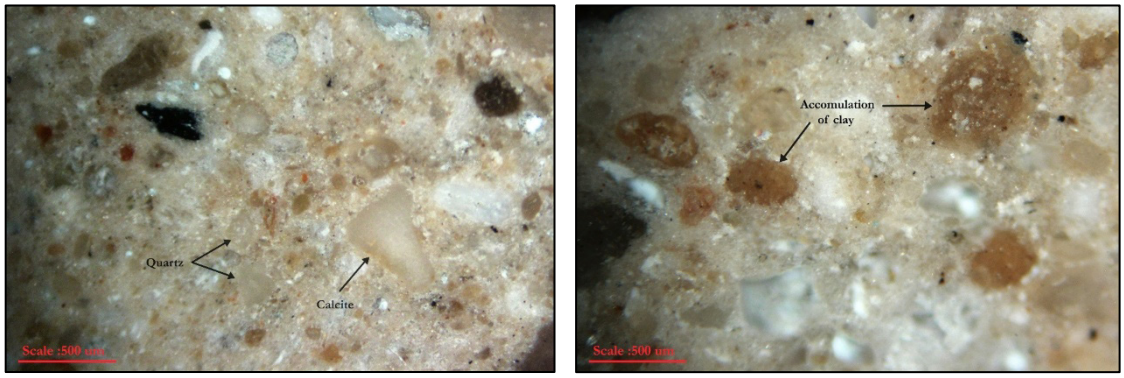
**Figure 8.** Dense carbonate matrix with additive charcoal and incompletely calcined carbonates




**شکل۹.** بستر کربناتی سولفات کلسیم با افزودنی ذغال خاکستر در نمونه ZAR.MT

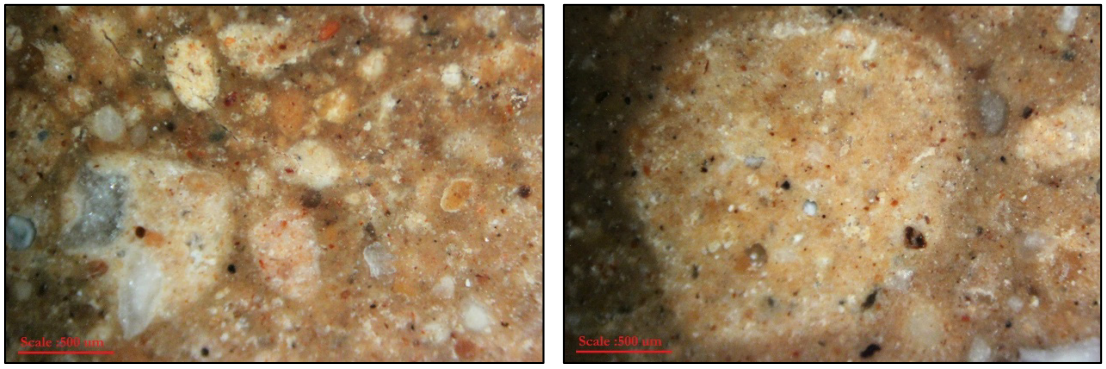
**Figure 9.** Calcium sulfate carbonate matrix with ash charcoal additive in sample ZAR.MT

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026




**شکل ۱۰.** بستر رسی–کربناتی با تجمعی از مواد رسی پراکنده به همراه ذرات ریز و درشت کوارتز و کلسیت در نمونه‌های ZAR.MK (چپ) و ZAR.A.2 (راست)

**Figure 10**. Clay-carbonate matrix with scattered clay material aggregates, along with fine and coarse quartz and calcite



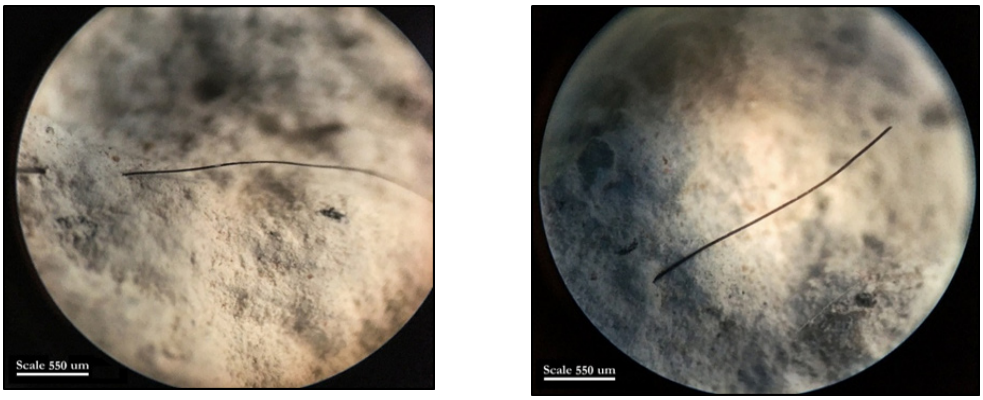

**شکل ۱۱.** فراوانی و تجمع ذرات ریز و درشت کلسیت و ترکیب آن در بستر رسی نمونه ZAR.M.1

**Figure 11.** Abundance and aggregation of fine and coarse calcite particles and their composition in the clay matrix in sample ZAR.M.1

**شکل ۱۲.** ذرات درشت‌دانه و گردگوشه کلسینه نشده به ابعاد ۱/۵ تا ۲ میلی‌متر در نمونه‌های:
ZAR.K.1 (بالاچپ) MLA.K.1 (بالا راست) ZAR.A.2 (پایین راست) ZAR.MT (پایین چپ)

**Figure 12.** Uncalcined coarse-grained and rounded particles with dimensions of 1/5 to 2 millimeters.

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026




**شکل۱۳.** شواهد الیافِ موی جانوری در قسمت‌های مختلف نمونه ملاط تویزه درگاه (ZAR.TV)

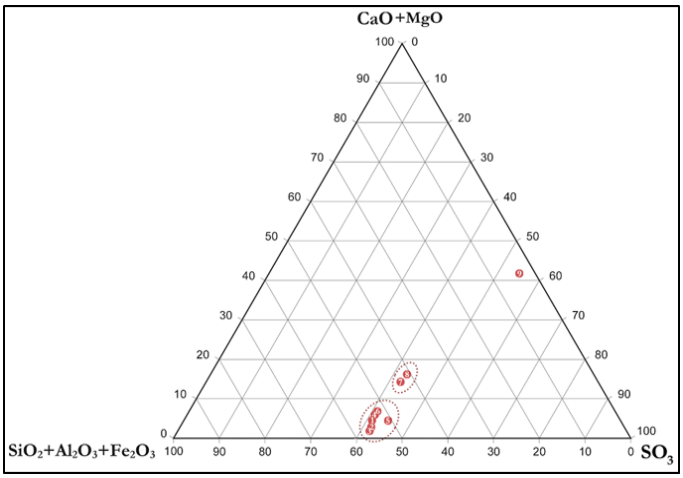
**Figure 13.** Presence of animal fibers/hair in different parts of the mortar sample of ZAR.TV

## ۵. بحث

### ۵-۱. طبقه‌بندی و مقایسه داده‌های شیمیایی

بررسی نتایج آزمایش ترکیبات عنصری نشان می‌دهد که می‌توان نمونه‌های اندود و ملاط را بر اساس نسبت عناصر اکسید کلسیم، اکسید گوگرد و اکسیدهای فلزیِ مربوط به افزودنی‌های خاک (اکسید سیلیسیم، اکسید آلومینیوم و اکسید آهن) می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: ۱. اندودها و ملاط‌های گچی با خلوص بالا (۶ نمونه)، ۲. اندودها و ملاط‌های گچی با افزودنی مواد خاکی (۲ نمونه)، ۳. ملاط با ترکیبات ماسه آهکی (۱نمونه). همانطور که در دیاگرام سه‌گانهٔ ترنری (شکل۱۴) دیده می‌شود، در گروه اول، اندودها و ملاط‌ها با غلظت بیشتر سولفات کلسیم، و غلظت کمتر عناصر فلزی قرار دارند. در گروه دوم غلظت سولفات کلسیم مقداری کاهش یافته و مقدار عناصر فلزی اکسیدی مانند سیلیس، آلومینیوم و آهن افزایش یافته است. در گروه سوم نیز با یک نمونه، غلظت اکسید کلسیم کمی کاهش یافته، غلظت گوگرد به کمترین مقدار رسیده و مجموع عناصر فلزی بیشترین مقدار را نسبت به دیگر نمونه‌ها دارد.

انحراف معیار هر سه گروه نشان می‌دهد که تغییرات $SO_3$ به ترتیب در گروه ۳ (۱۴/۷۸ wt%) و ۲ (۶/۸۰ wt%) بیشتر از نمونه‌های گچی در گروه ۱ (۳/۶۲wt%) است (جدول۴). به علاوه همانطور که گفته شد، تغییرات عناصر فلزی مانند $SiO_2$ (۶/۲۱ wt%–۲/۸۹ wt%–۱/۰۶ wt%) MgO (۲/۸۰ wt%–۱/۴۴ wt%–۰/۸۱wt%) $Al_2O_3$ (۱/۵۷ wt%–۰/۸۵wt% –۰/۵۵ wt%) $Fe_2O_3$ (۰/۷۲wt% –۰/۳۱ wt% – ۰/۱۶ wt%) و $K_2O$ (۰/۳۴ wt% –۰/۱۴ wt% –۰/۰۷ wt%) به ترتیب از گروه ۱ به ۳ افزایش پیدا می‌کند. از طرفی بررسی داده‌های نرمال شده گویای آن است که بین عناصر MgO، $Al_2O_3$، $Fe_2O_3$ و $SiO_2$ همبستگی مثبت (۰/۸۸ تا ۰/۹۹) وجود دارد. ارتباط این عناصر با $SO_3$ همبستگی منفی (۰/۹۱ تا ۰/۹۸) را نشان می‌دهد و بین عناصر $SO_3$ و CaO نیز همبستگی مثبت (۰/۷۱) برقرار است. بر همین اساس زمانی که مقدار $SO_3$ به بیشترین مقدار خود در نمونه‌های گروه اول می‌رسد، مقدار MgO، $Al_2O_3$، $Fe_2O_3$ به کمترین مقدار رسیده و با کاهش $SO_3$ در گروه دوم، مقدار غلظت عناصر فلزی بیشتر می‌شود. همچنین در گروه سوم نیز، زمانی که مقدار سولفات کلسیم به کم‌ترین میزان در تمامی نمونه‌ها رسیده، غلظت اکسیدهای فلزی افزایش یافته است.




**شکل ۱۴.** ترکیبات شیمیایی نرمال شده (بر حسب wt%) در نمونه‌های اندود و ملاط در سیستم $CaO + MgO - SO_3 - SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$

**Figure 14.** Normalized chemical compositions of plaster and mortar samples in the ternary system

#### ۵-۱-۱. اندودها و ملاط‌های گچی

ZAR.A.1 _ ZAR.K.10: نتایج به‌دست آمده از ملاط کف و اندود جدارهٔ دیوار طبقهٔ همکف به طور جالب توجهی ترکیبات یکسانی دارند. مقدار اکسید گوگرد در این دو نمونه در حدود ۲ wt%، اکسید کلسیم در حدود ۱ wt% و اکسید آلومینیوم در حدود ۱/۴۸ wt% با یکدیگر اختلاف دارند.

همچنین اختلاف اکسید آهن ۰/۳ wt%، اکسید پتاسیم ۱ wt%، استرانسیوم ۰/۱ wt% و اکسید منیزیم در هر دو نمونه دقیقاً یکسان است. با

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

توجه به نسبت جرم اتمی عناصر کلسیم و گوگرد در ترکیب گچ ( ۴۶ wt% به ۳۲ wt%) حدود ۸۵ wt% این دو نمونه، از فازهای مختلف سولفات کلسیم (ژیپس، انیدریت) تشکیل شده و مقدار اندکی مربوط به دولومیت (حدود wt% ۳) و حدود wt% ۴ تا ۵ مربوط به عناصری مانند اکسید آلومینیوم، اکسید سیلیسیم و اکسید آهن است؛ که به احتمال بسیار زیاد مربوط به ناخالصی‌های موجود در سنگ گچ اولیه بوده است. نکته جالب توجه، نسبت تقریبا یکسان استرانسیوم در هر دو نمونه است (۰/۱۳wt% – ۰/۱۴). نسبت Ca/Sr به عنوان یک اثر انگشت ژئوشیمیایی برای منشأ گچ است که یک ماده خام را با موقعیت زمین‌شناسی اصلی آن مرتبط می‌کند ( Franceschi Mishmastnehi et al, 2025; Locardi, 2013) زیرا گچ طبیعی حاوی مقدار قابل‌توجهی استرانسیوم در شبکه کریستالی خود به‌عنوان جایگزین کلسیم است (Denison et al, 1989)؛ بنابراین، نسبت بسیار نزدیک کلسیم به استرانسیوم، این دو نمونه را به یک سرمنشأ احتمالی پیوند می‌زند.

•MLA.K.1: نمونه ملاط کف خانهٔ ملا احمد (MLA.K.1) علاوه بر تکنیک ساخت یکسان و افزودنی‌های ذغالی که در مقاطع هر دو نمونه مشاهده شد، از لحاظ ترکیبات کریستالین نیز شباهتی به فازهای تشکیل‌دهنده نمونه ملاط کف و اندود جدارهٔ خانهٔ زرنگار دارد. مقدار اکسید گوگرد در این نمونه ۰/۲wt% و مقدار کلسیم ۱/۷wt% با نمونه ملاط کف خانهٔ زرنگار اختلاف دارد. محاسبهٔ مقدار سوفات کلسیم در این نمونه بر اساس جرم اتمی عناصر نیز نشان می‌دهد که همانند دو نمونه قبلی، مقدار گچ حدوداً برابر ۸۰wt% تا ۸۵، دولومیت و کلسیت در حدود ۴/۵wt% و مقدار ناخالصی خاک برابرwt% ۱/۶۳ است. بر این اساس مقدار گچ موجود در هر دو نمونهٔ کف زرنگار و ملااحمد در حدود wt% ۲ تا ۳ با یکدیگر اختلاف دارند. به علاوه مقدار استرانسیوم تنها wt% ۰/۰۲ از نمونه‌ی کف زرنگار کمتر است و نسبت Ca/Sr در هر دو نمونه، اختلاف کمی دارند. این امر نشان می‌دهد که احتمالا به دلیل خلوص گچ و شباهت نسبت‌های عنصری، ملاط کف هر دو بنا از یک منبع یکسان و با دستورالعمل مشابه عمل‌آوری شده‌اند. به طور کلی وجود ایندریت فراوان با ذرات کلسینه نشده در ترکیب ملاط‌های کف، باعث تاخیر زمان گیرش شده و فرصت مناسبی برای پهن کردن و ماله کشی ملاط در اجرای کف را فراهم کرده است. همچنین یکی از دلایل استفاده از ملاط گچ با خلوص بالا و عدم افزودن خاکی به ترکیب این ملاط، استحکام مورد نیاز برای کاربرد ملاطی به ضخامت ۵ تا ۷ سانتی‌متر در قسمت‌های کف است؛ زیرا افزودن خاک به ملاط گچ با کاهش استحکام فشاری همراه بوده است. این کاهش استحکام عمدتاً به دلیل اختلال در نیروی پیوند میان کریستال‌های گچ و کاهش نقش چسبندگی[۹] فاز گچ رخ می‌دهد؛ هرچند در نسبت‌های پایین خاک، این اثر ممکن است ناچیز باشد. برعکس، هنگامی که گچ به‌عنوان افزودنی به خاک‌های رسی اضافه می‌شود، معمولاً سبب بهبود قابل‌توجه خواص مکانیکی و کاهش تورم می‌گردد (Pinto et al., 2025; Galán-Marín et al., 2016).

•ZAR.MT.1: از گروه اول، نمونه ملاط به کار رفته در تسطیح تیر سقف‌های چوبی سقف، علاوه بر شباهت فازهای اصلی انیدریت و ژیپس با سه نمونهٔ قبلی، در شدت فازهای فرعی کوارتز و دولومیت نیز تفاوت‌هایی وجود دارد. بر اساس نتایج ترکیبات عنصری، مقدار اکسید منیزیم در این نمونه در حدود ۲/۵wt% افزایش یافته و مقدار اکسیدهای فلزی مرتبط با خاک مانند اکسید آلومینیوم، اکسید سیلیسیم و اکسید آهن در حدود ۱/۵wt% افزایش پیدا کرده‌اند. به طور کلی مقدار فازهای سولفات کلسیم (انیدریت، ژیپس و باسانیت) در این نمونه برابر wt% ۷۵، مقدار دولومیت برابر wt% ۵ و مقدار مواد خاکیِ افزوده شده، برابر wt % ۴ محاسبه شد.

•ZAR.MSH_ZAR.TV.1: دو نمونهٔ تویزه درگاه (ZAR.TV) و پنجرهٔ مشبک گچی (ZAR.MSH) ، با وجود این که جزء ملاط‌های گروه اول با خلوص گچ بالا هستند، ولی میزان اکسیدهای فلزی در این دو نمونه، نسبت به دیگر نمونه‌های این گروه افزایش یافته است. در نمونهٔ ZAR.MSH، مقدار اکسید گوگرد به کم‌ترین مقدار خود در این گروه رسیده و از طرفی، به دلیل فاز غالب ژیپس نسبت به انیدریت، درصد L.O.I افزایش قابل‌توجهی (۱۸/۳٪) داشته است. بر حسب جرم اتمی عناصر، مقدار مواد خاکی در این دو نمونه در بازهٔ ۵/۵wt% تا ۵/۷۱ است و مقدار مواد گچی در نمونه ZAR.MSH برابر ۷۱wt% و در نمونه ZAR.MSH همانند دیگر نمونه‌های این گروه برابر ۸۶wt% محاسبه شد. وجود ۵٪ مواد خاکی، احتمال دارد به دلیل برداشت سنگ گچ از رسوبات سطحی باشد که بیش‌تر در معرض جریان‌های محیطی بوده و مقداری ذرات خاک را با خود همراه کرده است. نکتهٔ بسیار مهم در این دو نمونه، استفاده از قالب و دوغاب‌ریزی برای ساخت آن‌هاست؛ یکی برای ایجاد قوس درگاه و دیگری برای ایجاد طرحی ظریف در نورگیر نماهای حیاط.

**جدول٤.** انحراف معیار داده‌های عناصر شیمیایی از هر سه گروهِ اندود و ملاط

**Table 4.** Standard deviation of the three plaster and mortar groups

| Group | $Na_2O$ | $SO_3$ | $Fe_2O_3$ | MgO | Cl | SrO | $Al_2O_3$ | $K_2O$ | L.O.I | $SiO_2$ | CaO | $TiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 0/09 | 3/62 | 0/16 | 0/81 | 0/06 | 0/06 | 0/55 | 0/07 | 4/42 | 1/06 | 2/25 | _ |
| **2** | 0/42 | 6/80 | 0/31 | 1/44 | 0/31 | 0/06 | 0/85 | 0/14 | 5/18 | 2/89 | 3/14 | _ |
| **3** | 0/39 | 14/89 | 0/72 | 2/80 | 0/31 | 0/06 | 1/57 | 0/34 | 6/58 | 6/21 | 3/39 | 0/00 |

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

### ۵-۱-۲. اندودها و ملاط‌های گچ و خاکی

ZAR.A.2 _ ZAR.MK.10: نمونه‌های این گروه محتوی خاک متفاوتی نسبت به گروه اول دارند که با همبستگی مثبت $SiO_2$ در مقابل $Al_2O_3$ خود را نشان می‌دهد. نسبت به گروه اول میانگین مقدار اکسید گوگرد در این دو نمونه (۳۵/۷۵wt% و ۳۳/۲۴wt%) در حدود ۲۰ wt% و مقدار کلسیت در حدود ۶wt% کاهش یافته و جای خود را به اکسیدهای فلزی مربوط به خاک (ماسه‌ای و رسی) داده است. به طوری که مقدار اکسید سیلیسیم در حدود ۱۱۲wt%، اکسید آلومینیوم در حدود ۷۰wt%، اکسید منیزیم در حدود ۱۰۷wt% و اکسید آهن در حدود ۸۷wt% نسبت به شش نمونهٔ قبل افزایش یافته است. همچنین بر حسب جرم اتمی، مقدار سولفات کلسیم در این دو نمونه بین ۶۰wt% تا ۶۵، مقدار کلسیت و دولومیت بین ۱۰wt% تا ۱۳ و مقدار عناصر خاکی بین ۱۰wt% تا ۱۵ است. بر همین اساس این دو نمونه، گونه‌ای از ملاط گچ و خاک هستند که نسبت گچ به پودر خاک، احتمالاً برابر ۳ به ۱ یا ۳ به ۱/۵ بوده است. نکته‌ای که نمونه‌های این گروه را به گروه اول مرتبط می‌کند، ساختار کریستالین مشابه است؛ به طوری که دقیقاً مانند گروه اول، فازهای اصلی انیدریت، ژیپس و دولومیت، در این نمونه‌ها حاضر هستند. این امر می‌تواند گویای منشأ مشترک و یا نحوه پخت و عمل‌آوری آن‌ها باشد. در نمونه‌هایی که افزودنی خاک به ملاط اضافه شده، به دلیل مقادیر اکسید کلسیمی که ممکن است از طریق خاک وارد ملاط شده باشد، نمی‌توان از نسبت Ca/Sr برای مقایسه تعیین منشأ احتمالی گچ استفاده کرد (Mishmastnehi and Stawski, 2025). با مقایسه مکان قرارگیری ملاط‌های گروه اول و دوم، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش چسبندگی اندود اجرا شده بر روی خشت (ZAR.A.2) و ملاطی که در اتصال دیوار خشتی و تیرهای چوبی سقف، به منظور ایجاد یک قوس کاذب به کار رفته (ZAR.MK) هدفِ افزودن خاک به ملاط گچ بوده است.

### ۵-۱-۳. ملاط با ترکیبات ماسهٔ آهکی

همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، نمونه ملاط دیوار سنگچین (ZAR.M.1) از لحاظ ترکیبات ساختاری، گونه‌ای متفاوت از دیگر نمونه‌هاست. بر خلاف نمونه‌های قبلی، در این نمونه سولفاتِ مرتبط با ترکیب گچ، جای خود را به عناصر خاکیِ اکسید سیلیسیم (۲۱/۹۱wt%)، اکسید آلومینیوم (۵/۷۱wt%) و اکسید آهن (۲/۶۳wt%) با بالاترین مقدار در این نمونه داده است. بر اساس نتایج گفته شده، تجمع مواد رسی و ماسه‌ای در این نمونه حدوداً برابر ۳۰wt% تا ۳۵، مقدار فازهای مرتبط با آهک (کلسیت، آراگونیت، دولومیت) حدوداً برابر ۵۰wt% تا ۶۰ و مقدار مواد گچی برابر wt% ۲ تا ۵ است. در این نمونه نسبت مواد آلومینوسیلیکات به موادکربناتِ آهکی تقریبا برابر ۱ به ۱/۵ تا ۱ به ۲ برآورد شد.

در این نمونه مقدار قابل‌توجه $SO_3$ (۲/۵۳wt%)، نشان‌دهندهٔ حضور کانی‌های سولفاتی (عمدتاً گچ و انیدریت به‌عنوان فازهای فرعی) در خاک منطقه است. این یافته کاملاً با ماهیت تبخیری-سولفاتی سازندهای زمین‌شناسی منطقه (مانند سازند گچساران یا سازندهای میوسن-پلیوسن در زاگرس) مطابقت دارد؛ البته محققان معتقدند مقدار $SO_3$ در خاک‌های معمولی/غیرگچی معمولاً زیر ۱wt% و در خاک‌های گچی/تبخیری بالاتر از این مقدار است (FAO,2001).

نکتهٔ جالب توجه دیگر وجود اکسید تیتانیوم در دو نمونهٔ مرتبط با ملاط گچ و خاک از گروه دوم و نمونهٔ ملاط آهکی در این گروه است. مقدار این عنصر در نمونه‌ای که حدودا ۳۰wt% تا ۳۵ خاک دارد، در حدود ۰/۳۶wt % است و در نمونه‌های گچ و خاک که مقدار ۱۲wt% تا ۱۵ مواد خاکی دارند، اکسید تیتانیوم بین ۰/۱۳wt%تا ۰/۱۵ است. این نکته گویای آن است که «اکسید تیتانیوم با اکسید آهن، اکسید سیلیسیم و اکسید آلومینیوم همبستگی کاملاً مستقیمی دارند». این خود نشانه‌ای بر این امر است که به احتمال بسیار قوی خاک مورد استفاده برای ساخت ملاط گچ و خاک، همان خاک استفاده شده در ساخت ملاط ماسه آهک بوده است. به احتمال زیاد درصد بالای افت حرارتی (LOI) در این نمونه به دلیل وجود مواد آلی حیوانی است که البته نیاز به بررسی‌های بیش‌تر دارد؛ زیرا در مشاهدات میدانی، الیافی از مو و همچنین قطعاتی از فضولات حیوانی در این نمونه مشاهده شد که ممکن است مواد افزودنی محلی برای تولید ملاط ماسه آهک باشد.

همانطور که در ابتدا گفته شد، ساختار دیوارهای خانه زرنگار، از یک کرسی چینی سنگی به ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر با ضخامت ۶۰ تا ۷۰ سانتی‌متر ساخته شده که دیوارهای خشتی به همان ضخامت، بر روی آن قرار دارند. یکی از دلایلِ استفاده از ملاطی با ترکیاتِ ماسه آهک در کرسی چینی دیوارها، جلوگیری از رطوبت صعودی به قسمت‌های خشتی دیوار در تراز بالایی است. در حال حاضر تراز آب زیرزمینی منطقه در فصول مختلف بین ۵ تا ۸ متر متغیر است؛ موضوعی که احتمال بروز آسیب‌های ناشی از رطوبت صعودی از بستر خاک را قابل توجه می‌سازد. شواهد معماری، از جمله وجود کرسی‌چینی سنگی و لایه‌های بلوکاژ در زیر کف اتاق‌ها، نشان‌دهندهٔ به‌کارگیری یک روش سنتی کارآمد برای کنترل و تعدیل رطوبت در لایه‌های زیرین بناست. افزون بر این، با توجه به حجم قابل‌توجه ملاط موردنیاز برای دیوارچینی در این بخش‌ها، استفاده از ملاط گچ، بر خلاف آنچه در سایر اجزای بنا مشاهده می‌شود، از منظر منطقی و فنی توجیه‌پذیر به‌نظر نمی‌رسد.

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

## ۵-۲. تعادل یا تغییرات فازی ژیپس، باسانیت و انیدریت (III-II)

محققان معتقداند به دلیل ماهیت ساختار شیمیایی گچ، استخراج اطلاعات از این گونه مواد فرهنگی، برای روشن شدن فناوری‌های تولید، منشأیابی و جنبه‌های حفاظتی آن از طریق تحلیل‌های باستان‌سنجی چالش‌برانگیز بوده است (Mishmastnehi and stawski, 2025 ;Cotrim, 2008). این محدودیت از این واقعیت ناشی می‌شود که ماده اولیهٔ سنگ گچ و محصول نهایی (گچ‌بری یا تزئینات گچی) از نظر شیمیایی، بلورشناسی و کانی‌شناسی بسیار شبیه به یکدیگر هستند؛ در نتیجه، تغییرات قابل ردیابی در مراحل مختلف فرآیند تولید به راحتی قابل مشاهده و تحلیل نیستند (Mishmastnehi and stawski, 2025, Mishmastnehi et al, 2023).

مطابق با نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، همنشینی فازهای گوناگون سولفات کلسیم در کنار هم می‌تواند به سه دلیلِ ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه، نحوهٔ پخت و فرآوری تولید و تغییرات فازی ناشی از فرسایش‌های محیطی باشد که در قسمت زیر هر یک از فرضیه‌ها مورد بحث قرار می‌گیرند.

سولفات کلسیم می‌تواند به صورت سه کانی متمایز ژیپس (دی‌هیدرات)، باسانیت (همی‌هیدرات) و انیدریت (بدون آب) ظاهر شود و در تماس با آب کریستالیزه شوند (Ossorio et al, 2014; Liu, 2021). درصد زیاد انیدریت در ترکیب ملاط، ساختار آن را ضعیف کرده و مستعد آسیب می‌کند (Kamel, 2019). از آن‌جایی که انیدریت خواص گچ را به خطر می‌اندازد، عدم حضور آن را می‌توان نشانه‌ای از سطح تسلط در تولید گچ و انتخاب مواد مناسب توسط استادکاران گذشته دانست، به همین دلیل بررسی وجود انیدریت و منابع آن در گچ‌های تاریخی مهم به‌نظر می‌رسد (Mishtmastnehi et al, 2025).

بررسی‌های انجام شده بر روی کوره‌های سنتیِ مواد معدنی مانند گچ، فقدان دمای همگن و محیط‌های کنترل‌شده را نشان می‌دهد؛ به‌طوری که درصد بالایی از انیدریت می‌تواند پس از عملیات پخت در سنگ گچ وجود داشته باشد. بر این اساس، برخی مطرح کرده‌اند که اکثر انیدریت‌های شناسایی‌شده در آثار تاریخی گچی؛ ناشی از ناخالصی‌های سنگ گچ و کنترل ناکافی بر فرآیند پخت هستند (Bel-Anzue, 2021; Kamel, 2019; Pombo Cardoso, 2018; Artioli, 2010;Mishmastnehi et al, 2025)، همچنین کلسیناسیون ناهمگن و اتمسفر پخت کوره می‌تواند انیدریت را در قسمت‌های بیرونی سنگ‌های گچی تولید کند و قسمت‌های میانی بلوک گچی را به عنوان گچ طبیعی واکنش نداده باقی بگذارد و آن را به طور کامل به باسانیت واکنش‌پذیر تبدیل نکند. برای حل این مشکل، ممکن است لازم باشد دانه‌های گچ یا انیدریت کلسینه نشده از طریق فرآیند الک کردن یا با تخلیه دوغاب گچ، قبل از پایان فرآیند گیرش، حذف شوند و دانه‌های واکنش نداده در ته ظرف باقی بمانند (Mishmastnehi et al, 2025). این تکنیک در بین استادان سنتی ایرانی برای حذف دانه‌های نامطلوب از گچ شناخته شده است (Mishmastnehi and Stawski, 2025). امروزه نیز گچ‌کاران ایرانی، برای ساخت یک دوغاب گچ مطلوب برای قالب‌ریزی، پودر گچ و آب را مخلوط می‌کنند، سپس تا گیرش اولیه کمی صبر می‌کنند تا ذرات ناخالصی و درشت‌دانه در کف ظرف ته‌نشین شوند و بعد لایه‌های رویی را به عنوان دوغاب استفاده می‌کنند. با این حال، اگر گچ با دقت آماده نشده باشد یا قرار نبوده خمیر بسیار نرمی به کار رود، ممکن است برخی از این دانه‌ها در مواد تاریخی، همانند نمونه‌های مطالعاتی این پژوهش، نیز یافت شوند.

در نمونه‌های زرنگار، دانه‌های کلسینه‌نشده ناشی از شرایط اتمسفر پخت کوره و عدم واکنش کامل ذرات ژیپس یا انیدریت در بسیاری از مقاطع میکروسکوپی مشاهده شد. این امر احتمالاً به این دلیل است که ملاط‌های به‌کار رفته در این بنا، اولاً در حجم بسیار زیاد تولید و استفاده شده‌اند (اندود دیوار، کف، ملاط تسطیح‌کننده و غیره) و ثانیاً به طور معمول برای اجرای عملیات سفت‌کاری بوده که به همین سبب، الک کردن یا استفاده از گچ مرغوب را توجیه نمی‌کرده است. این در حالی است که در نمونهٔ تزئینی ZAR.MSH این ذرات دیده نمی‌شوند؛ به طوری که در نمونهٔ ملاط به‌کار رفته برای ساخت پنجرهٔ مشبک گچی، که به روش دوغاب‌ریزی با قالب ساخته شده، برخلاف تمامی نمونه‌های دیگر زرنگار، ژیپس به عنوان فاز اصلی حضور دارد و غلظت انیدریت در آن به شدت کاهش یافته است. به علاوه، مقاطع میکروسکوپی آن نیز بافتی بسیار همگن و یکدست دارند و نشانی از ذرات کلسینه نشده‌ی درشت‌دانه دیده نمی‌شود. این امر می‌تواند ناشی از الک کردن پودر گچ یا تسلط استادکار در انتخاب مناسب مواد اولیه برای ملاطی با کیفیت، جهت دوغاب‌ریزی مشبک گچی قالب‌گیری شده باشد. همچنین کاهش انیدریت در این نمونه می‌تواند به این دلیل باشد که هنگام ساخت دوغاب گچ برای غالب‌ریزی، ذرات درشت‌تر و سنگین‌تر انیدریت در قسمت پایینی ظرف ته‌نشین شده و قسمت رویی برای دوغاب استفاده شده است.

در مورد دمای پخت گچ، برخی از محققان معتقداند، سولفات کلسیم همی‌هیدرات در دمایی بین ۸۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد بدست می‌آید (Wirsching, 2000; Dvořák et al, 2014). اما دهیدراتاسیون گچ به باسانیت ($CaSO_4 \bullet 0.5H_2O$) در دمایی بسیار پایین‌تر آغاز می‌شود. مطالعات دیگر نشان می‌دهند که انتقال از باسانیت به انیدریت III (محلول) در بازه دمایی ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد (Christensen et al, 2008). برخی دیگر از داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهند که بازه دمایی ۹۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای دهیدراتاسیون کامل گچ به باسانیت یا انیدریت III کافی است، به شرطی که زمان قرار گرفتن در معرض حرارت، همانند نمونه‌های تاریخی به اندازه کافی طولانی باشد. انیدریت III متاستابیل است و

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

به راحتی به باسانیت بازهیدراته می‌شود (Seufert et al, 2009). مطالعات نشان می‌دهد که انیدریت II (غیرمحلول) در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل شده و در دماهای بالای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان فاز غالب بوده (Christensen et al, 2008) و در دمای ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه، ایندریت محلول به‌طور کامل به انیدریت غیرمحلول با چگالی و پایداری بیش‌تر تبدیل می‌شود، به علاوه حضور انیدریت I به‌طور کلی در دماهای بالای ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است (Wirsching, 2000). بر همین اساس می‌توان چنین فرض کرد که انیدریت موجود در نمونه‌های زرنگار، احتمالاً از نوع نامحلول (انیدریت II) است؛ زیرا که این فاز در تمامی نمونه‌هایی که از نقاط مختلف بنا، با شرایط دمایی و رطوبتی مختلف برداشت شدند، حضور دارد. این در صورتی است که اگر انیدریت موجود از نوع محلول بود، با گذشت زمان از نمونه‌های تاریخی، آن هم در چنین شرایط آب و هوایی گرم و خشک، احتمالاً تمامی فاز ژیپس تبدیل به انیدریت محلول یا باسانیت می‌شد و این دو فاز در کنار یکدیگر دیده نمی‌شدند. بنابراین، همنشینی ژیپس و انیدریت در اکثر نمونه‌های زرنگار، احتمالاً نشان از طیف‌های مختلف پخت سنگ گچ دارد. این دما احتمالاً از زیر ۹۰ درجه سانتی‌گراد که ژیپس در آن پایدار بوده شروع شده و تا نزدیک ۳۰۰ یا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، یعنی دمای پایدار انیدریت II، رسیده است. بنابراین، اگر فرض را بر این بگیریم که ملاط مورد استفاده طیفی از پخت گچ را در بر می‌گیرد، احتمالاً قسمت عمده انیدریت شناسایی شده مربوط به انیدریت نامحلول (II) و مقدار اندکی مربوط به انیدریت محلول (III) است؛ زیرا که حضور باسانیت در نمونه ملاط کف خانه ملااحمد (MLA.K.1) را می‌توان با تغییرات فازی مرتبط دانست. به‌طوری که برخی معتقداند دهیدراتاسیون همی هیدرات به باسانیت حتی می‌تواند از دمای ۴۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد (طی گرمایش طولانی‌مدت) آغاز شود (Deutsch, 1994) و با وجود کلرید سدیم این فرایند تسریع گردد. تبدیل گچ به انیدریت علاوه بر تأثیرات دما و فعالیت آب (یا رطوبت نسبی) تابعی از غلظت کلرید سدیم نیز می‌تواند باشد. از آن‌جا که فعالیت آب با افزایش غلظت محلول کاهش می‌یابد، انتقال گچ به انیدریت با افزایش حضور سایر نمک‌های محلول به دماهای پایین‌تر منتقل می‌شود؛ بنابراین، حلالیت‌های گچ و انیدریت در محلول‌های حاوی $NaCl$، $NaNO_3$، $KNO_3$ و $Mg(NO_3)_2$، به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (Charolaet al, 2007). این در صورتی است که در نمونه‌های زرنگار و ملااحمد، کلرید سدیم تنها در سه نمونه و با غلظت بسیار کمی (۰/۱۵wt%-۰/۶wt%-۰/۸۵wt%) وجود داشت. همچنین مقدار اکسید سدیم (به غیر از نمونهٔ ZAR.A.1) در نمونه‌های گروه اول با شش نمونه، تنها در سه نمونه شناسایی شد که غلظت آن در بازهٔ ۰/۱۹wt% تا ۰/۳۹ قرار دارد. همچنین در گروه دوم، این مقدار با افزایش اکسیدهای فلزیِ مرتبط با افزودنی‌های خاک، در حدود ۰/۲۴wt% تا ۱/۳۴ افزایش یافته که ممکن است مربوط به شوری خاک بوده باشد. در یک مقایسهٔ تطبیقی مشخص شد که تفاوتی بین شدت فاز انیدریت و ژیپس، در نمونه‌هایی که حاوی کلرید سدیم و یا اکسید سدیم هستند، وجود ندارد؛ زیرا بر اساس مطالعات انجام‌شده و منحنی‌های حلالیت، مقدار لازم کلرید سدیم برای تبدیل فازی ژیپس به ایندریت در یک محیط حاوی نمک، بیش‌تر از مقدار موجود در نمونه‌های زرنگار است (Charola et al, 2007).

برخی محققان مطرح می‌کنند که شناسایی فازهای مختلف از خانواده سولفات کلسیم آبدار ($CaSO_4.2H_2O$) در ارتباط با آب و هوای متنوع ایران، پتانسیل تبدیل حالت جامد از گچ به انیدریت را نشان می‌دهد که احتمالاً به دلیل قرار گرفتن در معرض اشعه ماوراء بنفش و مادون قرمز در غیاب رطوبت است (Mishmastnehi et al, 2025). مطالعهٔ اخیر بر روی نمونه‌هایی از آرایه‌های گچ تاریخی در ایران، فرضیه همبستگی مثبت بین محتوای انیدریت و آب و هوای گرم و بیابانی را ارائه می‌دهد. این تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که نمونه‌هایی با درصد بالای انیدریت عمدتاً در آب و هوای گرم و بیابانی قرار دارند که ممکن است با سطوح بالای تابش UV و IR ناشی از نور خورشید و همچنین سطوح پایین رطوبت مرتبط باشد. تأثیر ماکروسکوپی این گذار به صورت ترک‌های عمیق در تزئینات گچبری ظاهر شده که برای مواد مبتنی بر گچ غیرمعمول است. یکی دیگر از اثرات ماکروسکوپی، تبدیل جزئی گچ به یک ماتریس پودری است. با این حال، همه نمونه‌های مناطق آب و هوایی گرم و بیابانی سطوح بالایی از انیدریت را نشان نمی‌دهند، که این می‌تواند به اثرات سایه در فضاهای داخلی نسبت داده شود. با توجه به این نتایج، تعمیم همه نمونه‌ها به نقشه اقلیمی ایران، این فرضیه را تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که اکثر نمونه‌هایی با درصد غلظت بالای انیدریت در مناطق اقلیمی گرم و بیابانی کشور واقع شده‌اند (Mishmastnehi et al, 2025).

منطقهٔ لارستان فارس، با وجود این که جزوی از اقلیم گرم و خشک محسوب می‌شود، ولی به دلیل نزدیکی به سواحل جنوبی بندرعباس و بندرلنگه، دارای رطوبت نسبی ۴۵ تا ۶۰٪ در گرم‌ترین فصول سال (تیر و مرداد) است. این مقدار از رطوبت تقریباً بیش از دو برابر رطوبت نسبی اشباع در شهرهای مناطق کویری مانند یزد (۱۹٪) اصفهان (۲۵٪) خراسان جنوبی (۲۵٪) است. از طرفی همانطور که در ابتدای مقاله عنوان شد، ساختار زمین‌شناسی این منطقه حاکی از فراوانی مواد انیدریت در رخنمون سازند گچساران دارد که جزوی از ویژگی‌های زمین‌شناختی این منطقه محسوب می‌شود. علاوه بر این، اگرچه تبدیل ژیپس به انیدریت در آب و هوای گرم و بیابانی محتمل به نظر می‌رسد، اما برای تأیید قطعی این پدیده، تحقیقات تجربی و نظری بیشتری لازم است (Mishmastnehi et al, 2025). نکته‌ای که وجود دارد این است که، نتایج بدست آمده در پژوهش حاضر نشان می‌دهد که وجود فراوان انیدریت و ژیپس در تمامی نمونه‌هایی که در قسمت‌های داخلی بنا به کار رفته و از

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

فرسایش‌های محیط بیرونی دور بوده‌اند، نمی‌تواند به دلیل تبدیل فازی ژیپس به انیدریت محلول باشد. از طرفی در این نمونه‌ها آسیب‌هایی مانند ترک‌های عمیق و پودری‌شدن ملاط، که ممکن است در اثر تبدیل فازی به وجود آمده باشد، نه در مقیاس میکروسکوپی و نه در مقیاس ماکروسکوپی مشاهده نشد. نکتهٔ دیگر این که، تقریباً به غیر از نمونه ملاط پنجرهٔ مشبک گچی که در فضای باز محیطی و در معرض تشعشعات نور خورشید و گرمای هوا قرار دارد، تمامی نمونه‌های برداشت‌شده از بنای زرنگار، از فضاهای داخلی بنا بوده که کم‌تر در معرض فرسایش‌های محیطی قرار داشته‌اند. بنابراین، اگر قرار بر تغییرات فازی در ساختار ملاط‌های این بنا باشد، نمونه ملاط پنجرهٔ گچی، مستعد بیش‌ترین آسیب است. از طرفی تنها در این نمونه بود که فاز انیدریت شدت بسیار کمی داشت و پیک‌های شاخص ژیپس فاز غالب بودند. به همین دلیل احتمالاً فراوانی انیدریت در ساختار نمونه‌های موردمطالعه، می‌تواند هم به دلیل انباشت انیدریت در رخنمون‌های سازند گچی گچساران و هم متأثر از شرایط پخت کوره و کلسیناسیون سنگ گچ باشد.

## ٦. نتیجه‌گیری

مطالعهٔ ۹ نمونه از اندودها و ملاط‌های تاریخی خانه‌ی زرنگار در اوز، تنوع بسیار جالب توجهی از کاربرد ملاط گچ برای مقاصد گوناگون در یک بنای تاریخی را آشکار کرد. تحلیل داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که بر اساس نسبت سولفات کلسیم و اکسیدهای فلزی، نمونه‌های اندود و ملاط به سه گروه تقسیم می‌شوند. برخی نمونه‌ها دارای خلوص بالای سولفات کلسیم ( wt% ۷۵ تا ۸۵) هستند و برخی دیگر حاوی مقادیر متفاوتی از مواد افزودنی سیلیکا/ آلومینوسیلیکات (wt% ۵ تا ۱۵) که برای ساخت ملاط گچ و خاک استفاده شده است. قسمت‌هایی که ملاط در ارتباط مستقیم با دیوار خشتی بوده (ملاط اندود دیوار و ملاط قوس زیر سقف) از افزودنی خاک استفاده شده و در قسمت‌هایی که نیازمند استحکام لازم بوده (ملاط کف، ملاط تویزه و ملاط تسطیح تیرهای چوبی) از ملاط گچ با خلوص بالا استفاده شده است. در کنار طیف زیادی از ملاط‌های گچی، استفاده از ملاط آهکی برای ساخت کرسی‌چینی دیوار، نشان‌دهندهٔ روشی سنتی برای جلوگیری از رطوبت صعودی در بناهای تاریخی این منطقه است. علی‌رغم تفاوت‌های کمی در نمونه‌های گچی، ساختار کریستالین مشابه و همنشینی فازهای اصلی ژیپس و انیدریت و دولومیت، پیوند مناسبی با داده‌های زمین شناسیِ سازند گچساران برقرار می‌کند. شباهت‌های فازی، وجود ذرات کلسینه نشده، افزودن موادی چون ذغال و خاکستر و وجود استرانسیوم در نمونه‌های گچ با خلوص بالا، نشان‌دهندهٔ استفاده از یک منبع تقریباً مشابه و شرایط کلسیناسیون سنگ گچ در نمونه‌های مطالعاتی این تحقیق دارد؛ به‌طوری که نمونه‌های برداشت‌شده از ملاط کف دو بنای مختلف، علاوه بر روش اجرای یکسان، ساختار مشابهی را در ترکیبات شیمیایی نشان دادند. حضور غالب فاز ژیپس و محدودیت فاز انیدریت در نمونهٔ پنجرهٔ مشبک قالب‌ریزی‌شده، نشان‌دهندهٔ تسلط بالای استادکار در انتخاب مواد اولیه و کنترل شرایط عمل‌آوری است. این پژوهش، انیدریت غالب در نمونه‌های اوز را از نوع غیرمحلول انیدریت (II) شناسایی می‌کند؛ زیرا در صورت وجود انیدریت محلول در نمونه‌های تاریخی، انتظار می‌رود که تاکنون بخش عمده یا تمام فاز ژیپس به انیدریت تبدیل شده باشد، به‌ویژه در نمونه‌هایی که در معرض محیط بیرونی و در مقابل تشعشعات خورشیدی قرار داشته‌اند. از سوی دیگر، رطوبت نسبی بالای منطقه (۴۰ تا ۶۰٪ در فصل تابستان) و غلظت بسیار پایین یون‌های کلرید سدیم در نمونه‌های مورد مطالعه، احتمال تغییرات فازی را کاهش می‌دهد. البته برای تأیید قطعی این پدیده، بررسی‌های تکمیلی میکروساختار کریستال‌های گچ با بهره‌گیری از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) همراه با تحلیل‌های حرارتی (TGA/DTA) ضروری به نظر می‌رسد. در مجموع، شناسایی ترکیبات ساختاری و طبقه‌بندی اندودها و ملاط‌ها بر پایهٔ نسبت ترکیبات و کارکرد عملکردی آن‌ها در بنای تاریخی زرنگار، اطلاعات ارزشمندی برای انتخاب و تولید ملاط در اختیار مرمت‌گران قرار می‌دهد. این داده‌ها به مرمت‌گران امکان می‌دهد که در هر بخش از بنا، ملاط مورد نیاز را متناسب با کارکرد تاریخی و ساختار اصلی آن تولید کنند. علاوه بر این، بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی معادن سنگ گچ منطقه در ادامهٔ پژوهش حاضر می‌تواند نقش سنت‌های محلی در انتخاب مواد اولیه و شرایط پخت سنگ گچ را روشن‌تر کند.

**سپاسگزاری:** در این‌جا لازم است از خانوادهٔ زرنگار و فقیهی‌نژاد، دست‌اندرکاران کارگاه مرمتی سرای تاریخی زرنگار و شرکت گنبد دوار خانهٔ تراب به علت همراهی در این تحقیق قدردانی و تشکر شود.

**مشارکت نویسندگان:** ایده‌پردازی: ب.ح و م.د؛ روش‌شناسی: ب.ح؛ نرم‌افزار: ب.ح؛ اعتبارسنجی: ن.ت؛ تحلیل رسمی: ب.ح؛ م.د و ن.ت؛ منابع: ب.ح؛ مدیریت و تنظیم داده‌ها: ب.ح؛ نگارش پیش‌نویس اولیه: ب.ح؛ بازبینی و ویرایش متن: ب.ح و ن.ت؛ تصویرسازی داده‌ها: ب.ح، نظارت: ن.ت، مدیریت پروژه: ن.ت.

**تأمین مالی:** هزینه‌های مطالعات آزمایشگاهی توسط خانوادهٔ محترم فقیهی نژاد تأمین شده است.

**تضاد منافع:** نویسندگان هیچ‌گونه تضاد منافعی ندارند.

**دسترسی به داده‌ها و مواد:** داده‌های خام پشتیبانی‌کنندهٔ نتایج این مقاله در صورت درخواست، توسط نویسندگان در دسترس قرار خواهد گرفت.

## پی‌نوشت‌ها

۱. Gypsum ($CaSO_4.2H_2O$)
۲. Anhydrite ($CaSO_4$)
۳. Bassanite ($CaSO_4.0.5H_2O$)
۴. Dolomite ($CaMg(CO_3)_2$)
۵. Calcite ($CaCO_3$)

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

۶. Aragonite ($CaCO_3$)
۷. Quartz ($SiO_2$)
۸. Illite ($K_{0.65-1}Al_2(Al_{0.65-1}Si_{3-3.35}O_{10})(OH)_2$)
۹. Binder

## References

Artioli, G .(2010) .Scientific Methods and Cultural Heritage: an Introduction to the Application of Materials Science to Archaeometry and Conservation Science .Oxford University press. DOI:10.1093/acprof:oso/9780199548262.001.0001

Bahroudi, A., Koyi, H.A(2004) .Tectono-sedimentary framework of the Gachsaran Formation in the Zagros foreland basin .Marine and Petroleum Geology, v. 21, p. 1295–1310. Doi:10.1016/j.marpetgeo.

Bel-Anzué, P., Almagro, A., Sáez Pérez, M. P., & Rodriguez-Navarro, C. (2017). Influence of the calcination process in traditional gypsum with structural behavior. Ge-Conservacion, 11, 79–85. https://doi.org/10.37536/EC.2017.11.111366

Bozorgmehri, Z., Khodadai. (2007). A. Iranian Amood (cognition, pathology and restoration). Tehran: Soroush. [In Persian].

Charola, A.E., Pühringer, J., Steiger, M.(2007). Gypsum: a review of its role in the deterioration of building materials. Environ Geol 52, 339–352. https://doi.org/10.1007/s00254-006-0566-9

Council of Ministers. (2019, October 8). Resolution on the establishment of Ooz County and Bidshahr District in Fars Province [Decree]. Office of the Cabinet, Presidency of the Islamic Republic of Iran Information Portal.https://www.president.ir/ [in Persian].

Cotrim, H., do Ros´ario Veiga, M., de Brito, J. (2008). Freixo palace: rehabilitation of decorative gypsum plasters. Constr. Build. Mater. 22 (1), 41–49.

Denison, R.E., Kirkland, D.W., Evans, R. (1998). Using strontium isotopes to determine the age and origin of gypsum and anhydrite beds. J. Geol. 106 (1), 1–18. https://doi.org/10.1086/515996.

Dunnington, H.V .(۱۹۶۸) .Salt-tectonic features of Northern Iraq, in Mattox, R.B., ed., Saline Deposits: A Symposium Based on Papers from the International Conference on Saline Deposits .Geological Society of America Special Paper 88, p. 183–227. https://doi.org/10.1130/SPE88-p183.

Dvořak K, Hajkova I, Havličkova K. (2014) Monitoring the influence of dehydrating solutions for the production of alpha gypsum. Adv Mater Res. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.1000.51. 51

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2001). *Lecture notes on the major soils of the world* (World Soil Resources Reports No. 94, M. Driessen, R. Dudal, J. Deckers, & F. Nachtergaele, Eds.). Rome: FAO. https://www.fao.org/3/y1899e/y1899e00.htm

Franceschi,E., Locardi. (2014). Strontium, a new marker of the origin of gypsum in cultural heritage?. Journal of Cultural Heritage 15(5), p 522-527. https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.10.01.

Firoozmandi Shirehjin, B., & Mahiar, Sh. (2014). Elemental analysis of Sasanian period mortar using XRD method and its application in dating structures attributed to this period. Iranian Studies Journal, 13(25), 217-233. [In Persian].https://doi.org/10.22103/jis.2014.955

Gill, W. a .(۱۹۷۲) .Sedimentology of Gachsaran Formation (lower Fars series), Southwest Iran .American Association of Petroleum Geologists Bulletin 56, p. 1965–1974 .

Galán-Marín, C., Rivera-Gómez, C., & Petric-Gómez, A. (2016). The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials. Construction and Building Materials, 106, 179–188. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.124

Garg, N., & Castro, N. (2008). Thermal and structural characterization of gypsum in its anhydrous and hemihydrated forms. Chemistry of Materials, 20(5), 2046–2053. https://doi.org/10.1021/cm7027542

Hamzavi Y. (2021). An Investigation into the Characterization of Gypsum mortar of Seyed Shams-dim Monument in Yazd, Iran. 11 (25):37-54. [in Persian].

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. doi:10.52547/jra.9.1.346. [in Persian].

Hamzavi Y, Khaleghi Sani N. (2024). An Investigation into the Characterization of mortar in a historical structure called Soqāya of Rab'-e Rashidi Complex in Tabriz. JRA. 10(1), 101-117. doi:10.61186/jra.10.1.349
URL: http://jra-tabriziau.ir/article-1-349-fa.html [in Persian].

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

Kashfi,M.S. (1980). Stratigraphy and environmental sedimentology of lower Fars Group (Miocene), South–Southwest Iran: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 64, p. 2095–2107. Doi:10.1306/2F919742-16CE-11D7-8645000102C1865D.

Kamel, A .(۲۰۱۹) .Dehydration of gypsum component of plasters and stuccos in some Egyptian archaeological buildings and evaluation of k2so4 activator as a consolidant . https://doi.org/10.5281/ZENODO.2649508.

Kamal, H. (2004). Examination of the historical and artistic works of Evaz (intra-urban and extra-urban). Navid Shiraz Publications [In persian].

Lewry, A. J., & Williamson, J. (1994). The setting of gypsum plaster: Part I The hydration of calcium sulphate hemihydrate. Journal of Materials Science, 29(20), 5279–5284. https://doi.org/10.1007/BF02546998

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. doi:10.29252/jra.1.2.1. [in Persian].

Mishmastnehi, M., Van Driessche, A.E.S., Smales, G.J., Moya, A., Stawski, T.M. (2023). Advanced materials engineering in historical gypsum plaster formulations. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 120 (7), e2208836120. https://doi.org/10.1073/pnas.2208836120.

Mishmastnehi, M., Stawski, T. M., Eftekhari, N., Schneider, K. P., Vaccaro, C., Aghajani, I., Grbanovic, A.-M., & Korn, L. (2025). Unveiling the craftsmanship and knowledge behind Iranian stuccoes (11th–14th centuries): New insights from an archaeometric perspective. Journal of Archaeological Science, 177, Article 106199. https://doi.org/10.1016/j.jas.2025.106199

Mishmastnehi, M., Stawski, T.M. (2025). Crystals of gypsum in the hands of masters: interdisciplinary approach to understanding the chaîne operatoire of Seljuq and Ilkhanid stuccoes. Stucco Decoration in the Architecture of Iran and Neighbouring Lands: New Research – New Horizons. University of Bamberg.

Motiei, H .(۱۹۹۳) .Treatise on the geology of Iran – stratigraphy of Zagros. Editor-in-Chief, A. Hushmandzadeh .Tehran: Geological survay of Iran, (In Persian) p, 536.

Murris, R .(۱۹۸۰) .Middle East, stratigraphic evolution and oil habitat . American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v.64p.597-618.

O'Brien, C .(۱۹۵۷) .Salt diapirism in South Persia: Geologie en Mijnbouw, v. 19, p. 357–376.

Office of Modern Technologies, Fars Province Agricultural Jihad Organization. (2020). *Atlas of weather and climatology of Fars Province*. Shiraz, Iran: Author [in Persian].

Pinto, M., Vieira, B., Nunes, R., & Barreto, V. (2025). Clay-gypsum mortars: The influence of binder and sand ratios. Results in Engineering, 24, 102904. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104702

Pombo Cardoso, I., Pye, E. (۲۰۱۸) .Gessoes in Portuguese baroque gilding grounds: Part 2: analytical study of historical samples and archaeological reconstructions .Stud.Conserv.63(2),72-96. DOI:10.1080/00393630.2016.1266430

Raeisi, E., Zare,M., Aghdam,J.A. (2013). Hydrogeology of gypsum formations in Iran. Journal of Cave and Karst Studies, v. 75, no. 1, p. 68– 80. DOI: 10.4311/2011ES0234.

Razani M, Hamzavi Y. (2018). Characterization of Historic Mortar from the Architectural Decoration and Plaster of Rocky Temple of Verjuy in Maragheh, Iran. JRA. 4(2), 21-33. doi:10.29252/jra.4.2.21. [In Persian].

Reza Zadeh Ardabili, M. (2017). Restoration of architectural works (cognition, pathology, technology)". second edition. University of Tehran. Tehran.[in Persian].

Stocklin, J .(۱۹۶۸) .Salt deposits of the Middle East, in Mattox, R.B., ed., Saline Deposits: A Symposium Based on Papers from the International Conference on Saline Deposits, Geology Society of America, Special Paper 88, p. 157–181. https://doi.org/10.1130/SPE88-p157

Seufert, S., Hesse, C., Goetz-Neunhoeffer, F., & Neubauer, J. (2009). Quantitative determination of anhydrite III from dehydrated gypsum by XRD. Cement and Concrete Research, 39(10), 936–941. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.06.015

Wirsching, F. (2005). Calcium sulfate. In Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.a04_555

[ DOI: 10.66224/jra.2025.11.208 ]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 0:32 +0330 on Sunday November 15th 2026

Zumrashidi, H. Iranian Architecture - Traditional Materials Science. Second edition. Zomorod. Tehran. [in Persian].

حمزوی، یاسر و خالقی ثانی، ندا .(۱۴۰۲). ساختارشناسی ملاط در لایه‌های اندود سازه موسوم به سقایهٔ ربع رشیدی تبریز. پژوهه باستان سنجی، ۱۰ (۱) :۱۱۷-۱۰۱. doi:10.61186/jra.10.1.349

فیروزمندی شیره جینی، بهمن و ماهیار، شاهین. (۱۳۹۳). آنالیز عنصری ملاط دوره ساسانی به روش XRD و استفاده از آن در تاریخگذاری بناهای منتسب به این دوره. مجله مطالعات ایرانی، (۱۳) ۲۵, ۲۱۷-۲۳۳.

کمال، حمیرا (۱۳۸۳). بررسی آثار تاریخی و هنری اوز (درون شهری و برون شهری). شیراز: انتشارات نوید

میش مست نهی، مسلم. (۱۳۹۴). کاربرد تحلیل‌های بلورشناسی در مطالعات فنی آثار تاریخی گچی (مطالعه‌ی موردی گچ بری کوه خواجه‌ی سیستان، ملاط گچ شادیاخ نیشابور و ملاط گچ قلعه الموت قزوین). پژوهه باستان سنجی، ۱ (۲) :۱-۱۴. doi:10.29252/jra.1.2.1

یعقوب زاده، حامد و رازانی، مهدی. (۱۴۰۱). مروری بر ساختار، کاربرد، فرایند تولید و تأثیر افزودنی‌ها در ملاط سنتی گچ، پژوهه باستان سنجی، ۸ (۱) :۲۰۵-۱۸۵. doi:10.52547/jra.8.1.185

Yaghobzadeh H, Razani M. (2022). A Review of the Structure, Application, Production Process and Effect of Additives in Traditional Gypsum Mortar. JRA. 8(1), 185-205. doi:10.52547/jra.8.1.185. [in Persian].

اطلس هوا و اقلیم‌شناسی استان فارس (بهار 1399). دفتر فن‌آوری‌های نوین: سازمان جهاد کشاورزی استان فارس.

بزرگمهری، زهره.(۱۳۹۶). آمودهای ایرانی (شناخت، آسیب‌شناسی و مرمت). چاپ دوم. تهران: سروش.

رازانی، مهدی و حمزوی، یاسر. (۱۳۹۷). ساختارشناسی ملاط‌های تاریخی در آرایه های معماری و اندود داخلی معبد صخره‌ای ورجووی مراغه. ایران پژوهه باستان سنجی، ۴ (۲) :۳۳-۲۱. doi:10.29252/jra.4.2.21

رضازاده اردبیلی، مجتبی (۱۳۹۵). مرمت آثار معماری (شناخت، آسیب‌شناسی، فن‌شناسی). چاپ دوم . تهران : دانشگاه تهران .

زمرشیدی، حسین. (۱۳۸۹). معماری ایران، اجرای ساختمان با مصالح بنایی. چاپ یازدهم. تهران: انتشارات آزاده

حمزوی، یاسر. (۱۴۰۰). مطالعهٔ ساختارشناسی ملاط گچی ایوان بقعهٔ سید شمس‌الدین یزد (کتیبهٔ کوفی، آرایهٔ گچی قالبی، لایهٔ بستر گچی). مرمت و معماری ایران ۱۱ (۲۵): ۵۳-۳۷.

حمزوی، یاسر، حاجی سید جوادی، سید محسن و مصلح، مریم. ( ۱۴۰۲). مطالعهٔ ساختارشناسی نمونه های ملاط گچی از سه دورهٔ تاریخی و چهار اقلیم ایران پژوهه باستان سنجی ۹ (۱) :۱۱۳-۸۷. doi:10.52547/jra.9.1.346

Hajirasouliha, Bardia., Tavangarrizi, N., & Dehaghani, M.H., (2025). Analysis of Composition of Historical Plaster and Mortars of Zarnegar House, Evaz (Fars). *Journal of research on Archaeometry*, 11(2)11208, DOI: 10.66224/jra.2025.11.208