Journal of Research on Archaeometry 2024; 10 (1); 101-117

Journal of Reserarch on Archaeometry

DOI: http://dx.doi.org/10.61186/jra.10.1.349

Original Paper Open Access

An Investigation into the Characterization of Mortar in a Historical Structure Called Soqāya of Rab'-e Rashidi Complex in Tabriz

Yaser Hamzavi[1*], Neda Khaleghi Sani[2]

1 Associate Professor, Research Institute of Cultural Heritage and Tourism (RICHT), Tehran, Iran

2 PhD Candidate in Archaeology, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.

Received: 2022/11/26 Accepted: 2024/01/27

Abstract

The Rab'-e Rashidi Complex in Tabriz, which was built in 1300 AD, it has been used in various military and residential forms until the 17th century AD. One of the architectural structures of Rab'-e Rashidi is a Hydraulic structure hypohesized as the Soqāya, which is located on the southeastern front. Archaeological excavation of Rab'-e Rashidi Soqāya site was began in 2007 by the cultural heritage deputy of Tabriz. But during this period, technical study on mortar (wall-mounted mortar and plastered mortar) in this part of Rab'-e Rashidi Complex has not been done. Technical studies on the materials of this Hydraulic structure (the present study is part of these studies), can lead to the recognition of the identity and use of the building in the future. Therefore, the mortar technology used in this Hydraulic structure requires recognition by scientific methods including field and laboratory studies and analytical and experimental. In this regard, samples were taken from three coated layers as well as brick mortar and XRD, XRF and SEM-EDS studies were performed. As a result of studies, it was found that the brick mortar and mortar of the coated layers are Lime Mortars. In the processing stage, some sand and soil are added to all mortars, with the difference that the amount of soil and sand in the brick mortar is much higher and therefore, its quality is lower than the coated mortar. Also, a small amount of charcoal powder was detected in the mortar of the coated layers.

Keywords:

Characterization, Lime Mortar, Rab'-e Rashidi, Soqāya, Tabriz, Ilkhanid hydraulic structures

* Corresponding Author: yaserhamzavi99@gmail.com

©2024 by the Authours.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

پژوهه باستان‌سنجی ۱۴۰۳؛ ۱۰(۱): ۱۱۷-۱۰۱

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: http://dx.doi.org/10.61186/jra.10.1.349

دانشگاه هنر اسلامی تبریز ۱۳۷۸

مقاله پژوهشی

ساختارشناسی ملات در لایه‌های اندود سازه موسوم به سقایهٔ ربع رشیدی تبریز

یاسر حمزوی[۱*]، ندا خالقی ثانی[۲]

۱. دانشیار پژوهشکدهٔ بناها و بافت‌های تاریخی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی‌ارشد مرمت اشیای تاریخی و فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷

چکیده

محوطه تاریخی ربع رشیدی تبریز که در سال ۷۰۰ ه.ق. ساخته شده است تا سده دهم ه.ق. به صورت‌های مختلف نظامی و مسکونی مورد استفاده قرارگرفته است. یکی از سازه‌های معماری ربع رشیدی، سازهٔ آبی موسوم به سُقایه است که در جبهه جنوب شرقی قرار دارد. کاوش باستان شناختی محل موسوم به سُقایه ربع رشیدی از سال ۱۳۸۶ توسط معاونت میراث فرهنگی تبریز شروع شده است. ولی در این مدت، مطالعهٔ فنی بر روی ملات (ملات دیوارچینی و ملات اندود) در این بخش از مجموعهٔ ربع رشیدی انجام نپذیرفته است. مطالعات فنی بر روی مواد و مصالح این سازهٔ آبی (پژوهش پیش رو بخشی از این مطالعات است)، می‌تواند در آینده به شناخت هویت و کاربری بنا منجر شود. از طرفی برای حفاظت صحیح اثر و همچنین مداخلات مرمتی، نیازمند شناخت فنی ملات در این مجموعه هستیم؛ بنابراین فنّاوری ملات به‌کار رفته در این سازهٔ آبی، نیازمند بازشناسی با روش‌های علمی اعم از مطالعات میدانی و آزمایشگاهی و تحلیلی و تجربی است. در این راستا، از سه لایهٔ اندود و همچنین ملات آجرچینی، نمونه‌برداری شد و مطالعات XRD, XRF, SEM-EDS انجام شد. درنتیجهٔ مطالعات مشخص شد که ملات آجرچینی و ملات لایه‌های اندود، آهکی است. در مرحلهٔ عمل‌آوری، به همهٔ ملات‌ها مقداری ماسه و خاک اضافه شده است با این تفاوت که میزان خاک و ماسه در ملات آجرچینی بسیار بیشتر بوده و به همین دلیل، کیفیت آن نسبت به ملات اندودها پایین‌تر است. همچنین در ملات لایه‌های اندود، مقدار کمی دانه‌های زغال شناسایی شد.

واژگان کلیدی: ساختارشناسی، ملات آهکی، سُقایه ربع رشیدی، تبریز، ساختارهای آبرسانی ایلخانی.

*مسئول مکاتبات: yaserhamzavi99@gmail.com

©2024 by the Authours.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

در حوزه مطالعات باستان‌سنجی معماری تاریخی، ملات یکی از مهم‌ترین موضوعاتی است که مورد توجه قرار می‌گیرد. درگذشته با توجه به اقلیم هر منطقه و همچنین معادن موجود در آن، مواد و مصالح ساختمانی انتخاب و استفاده می‌شده است. پدیده‌ای که در معماری تاریخی ایران به‌طور مکرر رخ می‌داده، تخریب بخش‌هایی از بنا و استفاده از مواد و مصالحی مانند سنگ و آجر در ساخت بناهای جدید بوده است؛ اما به دلیل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، ملات تنها یک‌بار قابل‌استفاده است؛ مگر اینکه به‌عنوان پرکننده در ملات جدید مدنظر قرار گیرد؛ بنابراین در مطالعات باستان‌سنجی، اصالت ملات می‌تواند بیشتر مورد تأکید قرار گیرد.

در طول تاریخ، ملات‌های آهکی در سازه‌های آبی و بخش‌هایی از ساختمان‌ها که در معرض رطوبت بوده کاربرد گسترده‌ای داشته‌اند (Heidari, et al., 2013). در سازهٔ موسوم به سُقایه در مجموعهٔ ربع رشیدی تبریز لایه‌های اندود بر سطح دیوارهای آجری استفاده شده است. در اثر عوامل محیطی مانند رویش گیاهان در محل، ترک‌خوردگی در اثر نوسانات دما، رطوبت موجود در اثر برف و باران که موجب انتقال نمک‌های محلول می‌شوند، عوامل انسانی (بی‌توجهی به سازه) از زمان کاوش تا حال حاضر، بخشی از سازه موسوم به سُقایه دچار تخریب شده است و اگر به این صورت رها شود در سال‌های آتی تمامی ملات‌ها دچار فرسایش شدید خواهد شد. در پژوهش پیش رو، لایه‌های اندود موجود بر روی یکی از دیوارهای آجری سازهٔ موسوم به سُقایه در مجموعه ربع رشیدی تبریز موردمطالعه قرارگرفته است. علی‌رغم اینکه سازه سُقایه وضعیت خوبی در زمان کاوش داشته است، متأسفانه دچار فرسایش زیادی شده است و به‌ویژه، لایه‌های اندود اندکی که باقی بوده، به‌سرعت در حال تخریب است. با توجه به اینکه این بخش از محوطه ربع رشیدی در سال ۱۳۸۶ مورد کاوش باستان‌شناختی قرارگرفته است، مطالعات اندکی باهدف فن‌شناسی و آسیب‌شناسی ملات بین مصالح و ملات لایه‌های اندود که شواهدی از اقلیم منطقهٔ آذربایجان است، انجام شده است. لذا انجام مطالعات فنی بر روی ملات‌های این منطقه می‌تواند در شناخت و درک بیشتر اندیشه استادکاران سنتی و روش‌های فراوری ملات‌های این منطقه یاری‌رسان باشد؛ و از طرفی این اطلاعات پایه می‌تواند یاری‌گر مرمت‌گران بخش‌های باقی‌مانده از سازهٔ آبی موسوم به گرمابه باشد.

اطلاعات کافی در خصوص قدمت و همچنین نوع ملات استفاده‌شده در سازه موردمطالعه وجود ندارد؛ در طی مطالعات به یک جمع‌بندی کلی در مورد محل مورد بررسی پرداخته خواهد شد. ملات اندود در سازه نامبرده، مورد بررسی و آنالیز قرار می‌گیرد تا مواد و مصالح به‌کار رفته در ملات لایه‌های اندود به دست آید. با تکیه بر شناسایی فنی مواد و مصالح، می‌توان طرح حفاظت و مرمت این بخش را ارائه نمود. به دلیل اینکه این سازه دارای قدمت و ارزش تاریخی است حفاظت از آن بسیار حائز اهمیت بوده تا در ادامه بتوان به فنّاوری معماری آن برای کاربری خاص دست یافت. در طی مطالعات میدانی صورت گرفته در طی ۴ ماه در پژوهش حاضر، نگارندگان در محل حضور داشته و شاهد سست شدن و از بین رفتن بخش‌هایی از لایه‌های اندود بوده‌اند. وجود یک سازهٔ آبی با نقشه‌ای خاص و سازه‌ای آجری و سنگی که در برخی قسمت‌ها لایه‌های اندود بر روی‌هم قرار دارد، از نظر مطالعات باستان‌شناختی، تاریخ هنر و مطالعات فنی حائز اهمیت است. مطالعهٔ فنی ملات اندودهای سازهٔ موسوم به سُقایه در مجموعهٔ ربع رشیدی برای اولین بار بعد از کاوش، مورد پژوهش قرار می‌گیرد. در این راستا پرسش اصلی پژوهش را می‌توان به این صورت طرح کرد. ملات لایه‌های اندود در سازه موسوم به سُقایه در مجموعه‌ی ربع رشیدی دارای چه ساختار و ترکیباتی است؟ لایه‌های مختلف اندود از نظر ترکیب مواد چه تفاوت‌هایی با یکدیگر دارند؟

۲. پیشینهٔ پژوهش

۱-۲. پیشینهٔ مطالعات ربع رشیدی: مجموعهٔ ربع رشیدی که با شمارهٔ ۹۴۳ در فهرست آثار ملی ایران به ثبت رسیده است، در شمال شرقی تبریز و مجاور کوی ولیان‌کوه قرار دارد. این محل همچنین با اسامی رشیدیّه، رشیدآباد و

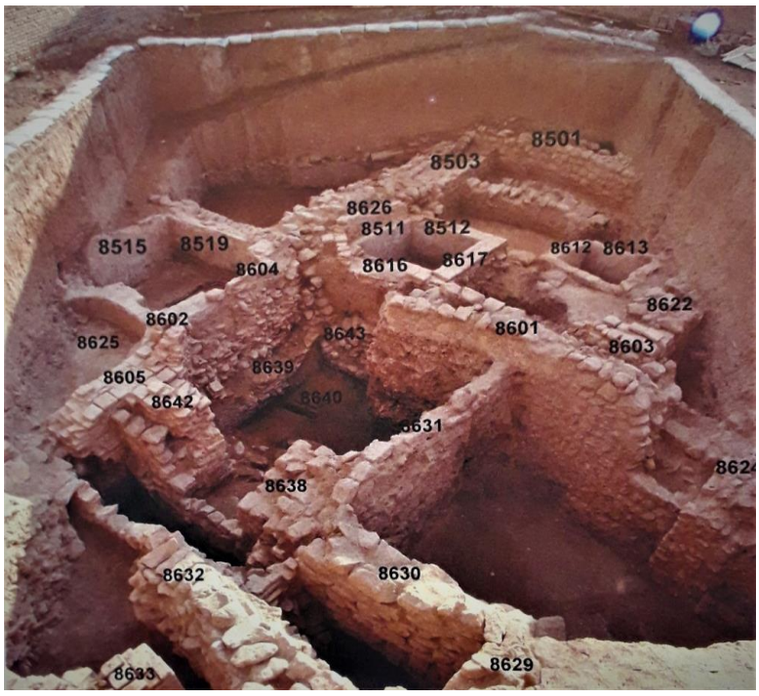
ابواب‌البرّ رشیدی نیز شناخته می‌شود؛ و متأسفانه پس از سقوط ایلخانان و حملات تاتارهای قایتاق و سرانجام عثمانی به ویرانه تبدیل و قشون عثمانی آنجا را به قلعه تبدیل می‌کند (شکل ۱) (Ajorloo, 2014; Ajorloo, 2020).

شکل ۱: الف: موقعیت شهر تبریز در ایران. ب: موقعیت قرارگیری سازهٔ سقایه ربع رشیدی در محوطهٔ تاریخی ربع رشیدی، تبریز

کاوش‌های بخش موسوم به سقایه که اولین بار توسط معاونت میراث فرهنگی آذربایجان شرقی از سال ۱۳۸۶ شروع شد، در ابتدا به طرح فرضیهٔ گرمابهٔ رشیدی توسط خانم لاله روح‌انگیز (RouhAngiz, 2016; RouhAngiz, 2017) منجر شد؛ و بعدها توسط تیم بین‌المللی ربع رشیدی تجدیدنظر شده و فرضیهٔ سقایه به معنای سیستم آبرسانی ربع رشیدی که در متن وقف نامهٔ ربع رشیدی آمده است، مطرح گردید (Gholdori & Ajorloo, 2023; Ajorloo, 2020). کاوش‌های ربع رشیدی از سال ۱۳۹۶ در چارچوب پروژهٔ بین‌المللی ربع رشیدی شروع شد(Ajorloo 2017; Ajorloo 2018; Roshan & Ajorloo2018; Ajorloo et al., 2018; Ajorloo 2019; Ajorloo & Lorain et al., 2023; Fuchs & Ajorloo 2023; Ajorloo & Moradi, 2020; Gholdori & Ajorloo 2023)؛ و در ادامهٔ همین کاوش‌ها علاوه بر تجدیدنظر در گرمابهٔ رشیدی به عنوان ساختار آبرسانی سقایه، آب‌انبار رشیدی در بالای تپهٔ جنوب شرقی بازشناسی شد که قبلاً در سال ۱۳۸۶ آن را مسجد تصور کرده بودند (Ajorloo 2017; Ajorloo 2018; Gholdori & Ajorloo, 2023). به هر حال ربع رشیدی معاصر صفویه به قلعهٔ عثمانی تبدیل شد (Ajorloo & Moradi, 2020) و بعدها حملات عثمانی آنجا را ویران کرد

Ajorloo 2017; Ajorloo 2018; Ajorloo et al., 2018; Ajorloo 2019; Ajorloo et al., 2019; Gholdori & Ajorloo 2023).

در هر دو حالت صحت فرضیات باستان‌شناسانهٔ گرمابه و سقایه که با تکیه بر شواهد موجود از جمله راه‌روهای آب و اشیای یافته شده و همچنین با توجه به مطالعات انجام شده، این سازه در مدت زمان کاربری‌اش تحت تأثیر آب قرار داشته است. در جریان کاوش، فضاهای به دست آمده کدگذاری شد (شکل ۲) (RouhAngiz, 2017). سازه موسوم به سقایه، بخشی از سازه‌های باقی‌مانده در مجموعهٔ ربع رشیدی (شکل ۳)، دارای دو بخش آجری و سنگی است که بر سطح دیوارهای آجری، چندین لایه اندود مشاهده می‌شود. معمولاً اندودهایی در دوره‌های متخلف جهت جلوگیری از نفوذ رطوبت بر سطح داخلی یا خارجی دیوارها اجرا که در صورت ایجاد لایه چرکی بر روی سطح اندود، لایه‌ای دیگر بر روی اندودهای قبلی اجرا می‌شده است. این کار باعث چندلایه شدن اندودها می‌شود.



شکل ۲: کدگذاری فضاهای کارگاه کاوش سازهٔ موسوم به سقایه در محوطهٔ تاریخی ربع رشیدی تبریز (RouhAngiz, 2016)

شکل ۳: نمایی از سازهٔ سقایه ربع رشیدی در محوطهٔ تاریخی ربع رشیدی تبریز

۲-۲. پیشینهٔ مطالعات آزمایشگاهی: ویژگی‌های شیمیایی و کانی‌شناسی ملات‌های آهک پوزولانی و ملات‌های سیمانی مدرن آرامگاه نور جهان، لاهور (پاکستان) از طریق PLM, XRD, SEM-EDS, XRF مورد مطالعه قرارگرفته است (Gulzar et al., 2014). در مقاله‌ای با عنوان «شناسایی ملات‌های باستانی پل شاپوری خرم‌آباد و امکان‌سنجی استفاده از آن‌ها در مرمت پل از طریق روش‌های آزمایشگاهی» مطالعات ساختارشناسی بر روی ملات به روش XRD, XRF انجام پذیرفته است (Mirderikvandi et al., 2015). نمونه‌های ملات جمع‌آوری‌شده از معبد رومی دیانا (مریدا، اسپانیا) با استفاده از میکروسکوپ نوری پلاریزان (POM)، XRD، آنالیز حرارتی (TGA-DSC) و XRF مورد مطالعه قرار گرفت که بر اساس نتایج، ملات‌ها از خمیر آهک و تکه‌های کوارتز، فلدسپات و بیوتیت همراه با قطعات سنگ گرانیتی دگرگونی به‌عنوان سنگ‌دانه استفاده شده است (Ergenç & Fort González, 2017). مقاله‌ای در سال ۱۳۹۷ توسط رازانی و حمزوی منتشرشده است که در این پژوهش، به کمک روش پتروگرافی مقطع نازک،XRD, XRF مطالعات ساختارشناسی بر روی ملات اندود در معبد ورجووی مراغه انجام‌شده است (Razani & Hamzavi, 2018).

آزمایش‌های فیزیکی نمونه ملات‌های تاریخی از معبد راماپا در هند، شامل تخلخل، تراکم و وزن مخصوص محاسبه و مشخص شد. روش‌های آنالیزی مانند XRD، SEM-EDS، XRF، TG-DTA و FTIR برای مطالعه ترکیب کانی شناسی و شیمیایی این ملات‌ها استفاده شده است. درنتیجهٔ این مطالعه، کربوهیدرات و کانی‌های کلسیت و کوارتز همراه با آثار واتریت و آراگونیت شناسایی شده است (Degloorkar & Pancharathi, 2020). در مقاله‌ای با عنوان «بررسی ساختار ملات اوایل دورهٔ اسلامی بر اساس نمونه‌های برج‌های آرامگاهی و قلعه‌های شرق مازندران با روش XRD» مطالعات فنی بر روی ملات در چند بنا صورت پذیرفته و در ادامه با یکدیگر مورد مقایسه قرارگرفته است (Mahyar et al., 2021). در پژوهشی که مطالعه ساختارشناسی بر روی ملات گچی انجام شده از روش XRD, XRF, SEM-EDS استفاده شده است (Hamzavi, 2021). در پژوهشی مطالعات شیمیایی، کانی‌شناسی و رنگ‌سنجی ملات‌های باستانی از برج اسلامی سیلا (والنسیا، اسپانیا) و قلعه فوئنگیرولا (مالاگا، اسپانیا) انجام پذیرفته است. در این مطالعه از روش REE, pED-XRF, XRD استفاده شده است. داده‌های تصویربرداری برای نمونه‌های پودری پتانسیل خوبی را به عنوان یک روش سریع، مطمئن، ارزان و غیرمخرب برای مشخص کردن ملات‌ها و انجام مطالعه مراحل ساخت در مجموعه‌های تاریخی نشان داد (Ramacciotti et al., 2022). در مقاله‌ای با عنوان «بررسی و شناخت ساختار ملات در برج بزرگ مجموعهٔ ربع رشیدی تبریز» بر روی ملات‌های برج بزرگ ربع رشیدی که مربوط به دورهٔ صفویه است، به روش XRD, XRF, SEM-EDS, FT-IR و پتروگرافی مقطع نازک مطالعات فنی صورت گرفته است. درنتیجهٔ مطالعاتِ ملات لایه‌های درونی و همچنین لایهٔ سطحی برج، ملات آهکی شناسایی‌شده است (Hamzavi & Afandipour, 2023). پژوهشی با موضوع مطالعهٔ ساختارشناسی ملات پنج بنا که در چهار اقلیم متفاوت ایران قرار دارند و مربوط به سه دورهٔ تاریخی هستند، با هدف دستیابی به پارامترهایی که بیشترین تأثیر در استحکام و ماندگاری ملات گچی در دوره‌های تاریخی را دارد، انجام شده است. در این راستا، از بناهای مورد مطالعه، نمونه‌برداری انجام پذیرفته است که با استفاده از آنالیزهای (XRD, XRF, EDS) و مطالعه با میکروسکوپ دیجیتال و همچنین SEM به ارزیابی و مقایسه میان این ملات‌ها اقدام شده است. نتایج حاصل از پژوهش گویای این مهم بوده که تفاوت اقلیمی و تفاوت دوره‌های تاریخی تأثیر زیادی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ملات گچی ندارد. دو پارامتر تأثیرگذار (که تأثیر پارامتر دوم بیشتر است) که در نتیجهٔ پژوهش حاضر ثابت شده است، الف: میزان و چگونگی ترکیب مواد برای ساخت ملات، ب: چگونگی عمل‌آوری ملات؛ است. استادکاران سنتی برای ماندگار کردن اثرشان، در مرحلهٔ عمل‌آوری ملات، تلاششان را کرده‌اند تا به کیفیت موردنیاز و متناسب با اقلیم برسند. یکی از نکات مهمی که برای چگونگی عمل‌آوری و حتی ترکیب ملات گچی مدنظر بوده، کارکرد ملات است. معمولاً ملات گچی با سه کارکرد (ملات بین مصالح سنگ و آجر، ملات برای اندود سطوح، ملات برای آرایه‌های گچی) اجرا می‌شده

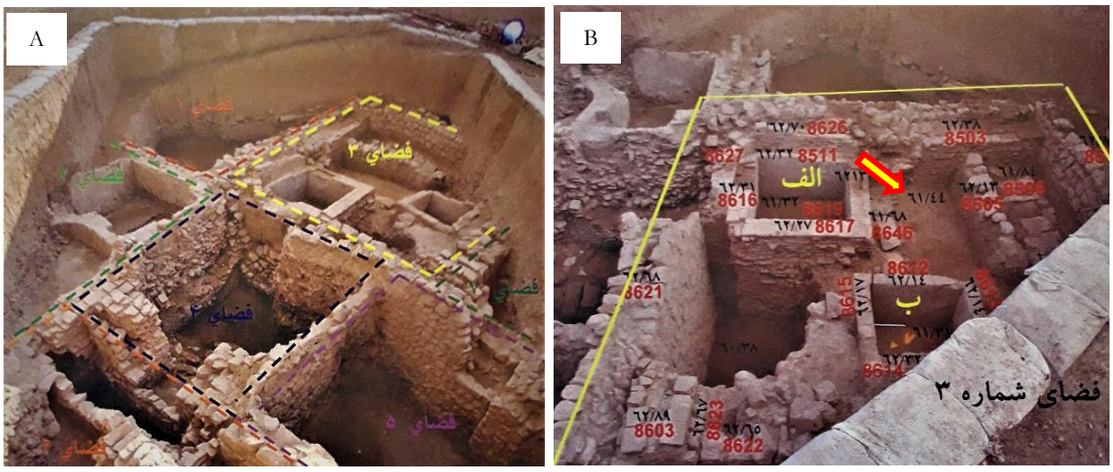
که هرکدام به زیر بخش‌هایی نیز قابل تقسیم است و همهٔ این‌ها در چگونگی عمل‌آوری ملات تأثیر دارد (Hamzavi et al., 2023).

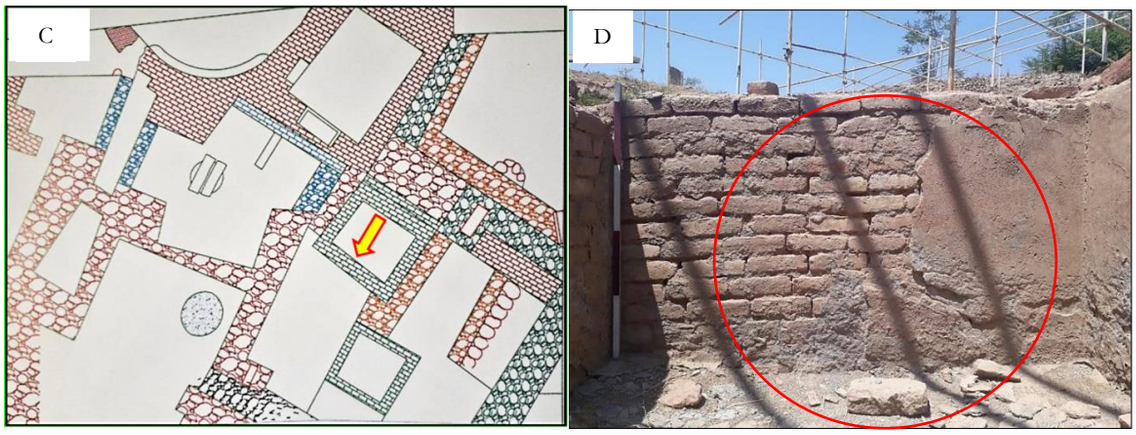
روش مطالعهٔ ملات در جوامع بین‌المللی تقریباً مشابه هم بوده و با اختلاف کمی از آثار ایران ارائه شده است. لازم به ذکر است که امکانات بسیاری از پژوهشگران غیر ایرانی از پژوهشگران ایرانی بیشتر است و به این دلیل تنوع روش بیشتری دیده می‌شود. در منابع فارسی نیز پژوهش‌هایی در خصوص شناخت فنی ملات‌های تاریخی صورت گرفته که بیشتر شامل ملات‌های گچی می‌شود و ملات‌های پایه آهکی کم‌تر موردمطالعه قرار گرفته است. از طرفی روش اتخاذ شده برای مطالعه، XRD, XRF, SEM-EDS, FT-IR و پتروگرافی مقطع نازک بوده است.

۳. توصیف و بررسی (معرفی اثر)

اثر انتخاب شده متعلق به مجموعه ربع رشیدی است؛ محل قرارگیری اثر (شکل ۳) و (شکل ۴)، طبق تقسیم‌بندی فضایی محل توسط تیم کاوش ۱۳۸۶ کدگذاری شده است. البته این محل ابتدا در هنگام کاوش در سال ۱۳۸۶ گرمابه نام‌گذاری شده است (شکل ۲) که بعدها کاربری گرمابه بودن آن رد شد (Roshan & Ajorloo, 2018) و نهایتاً فرضیهٔ ساختار آبرسانی سقایه مدنظر قرار گرفت (Gholdori & Ajorloo, 2023). ملات موردمطالعه بر سطح دیوارهٔ داخلی یکی از سه سازه آجری مربعی شکل (فضای شمارهٔ ۳، قسمت الف، دیوارهٔ با کد ۸۶۱۷) قرارگرفته است (شکل ۴).

بر سطح دیوارهٔ سازهٔ مورد مطالعه، سه لایه اندود اجرا شده است. ضخامت لایه‌های اندود اجرا شده در سطح، یکسان نیست (شکل ۵)؛ ضخامت لایه اول حدود ۲ الی ۴ میلی‌متر است که به دیوار آجری چسبیده است (در شکل ۵ مشاهده می‌شود که لایه‌های اندود از دیوار آجری جدا شده و در حال ریختن است. همان‌طور که در شکل ۴ د قابل‌مشاهده است، بخش زیادی از لایه‌های اندود از بین رفته است). لایه اول از استحکام کافی برخوردار نیست. لایه دوم نازک‌ترین لایه است (مرز بین لایه اول و دوم به سختی مشخص است و تا حدودی لایه دوم رنگ روشن‌تری نسبت به لایه اول دارد). ضخامت لایه دوم حدود ۲ میلی‌متر و لایهٔ سوم حدود ۵ میلی‌متر است. لایه سوم، رنگ تیره‌تر و دانه‌بندی مشخص‌تری نسبت به دو لایه قبلی خود دارد. در واقع پس از اجرای دیوار (در شکل ۵، ملات بین آجرها با شمارهٔ ۴ نشان داده شده)، اندود شمارهٔ ۱ اجرا شده است. پس از مدتی (مدت نامعلوم) لایهٔ اندود شمارهٔ ۲ اجرا شده و نهایتاً اندود شمارهٔ ۳ بر روی لایه‌های پیشین اجرا شده است.





شکل ۴: A, B, C: دیوارهٔ با کد ۸۶۱۷ در بخش الف از فضای ۳ محل انتخاب شده برای نمونه‌برداری و مطالعه بر روی ساختار ملات است (Rouhangiz 2017)، د: لایه‌های اندود مورد مطالعه در سازهٔ گرمابه دیوارهٔ با کد ۸۶۱۷

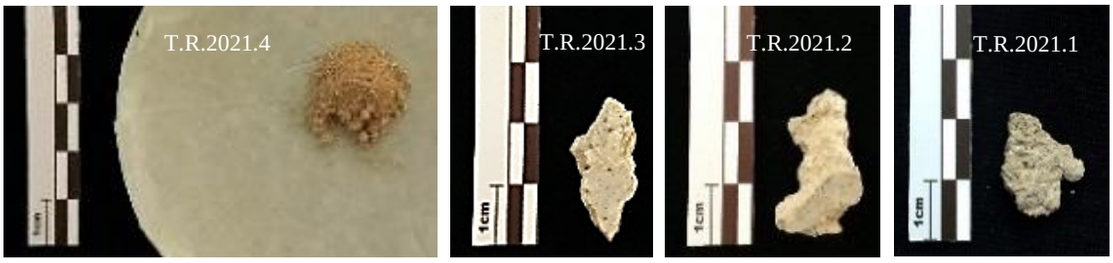
شکل ۵: لایه‌های اندود مورد مطالعه در سازه موسوم به سقایه ربع رشیدی، مشخص شدن محل نمونه‌های مطالعاتی ۱ الی ۴

٤. مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، ابتدا با تکیه بر مطالعهٔ منابع مکتوب، مطالعات و بررسی‌های میدانی صورت پذیرفته است که در نتیجهٔ آن‌ها و با توجه به مشکلات و ابهامات و شرایط موجود، نمونه‌برداری از لایه‌های مختلف اندود در بخشی از سازهٔ موسوم به گرمابه انجام‌شده است. از طرفی اطلاعات مربوط به دما و رطوبت نسبی هوا در یک سال تبریز تهیه شده تا با توجه به آن بتوان تحلیل‌های بهتری ارائه نمود. با تکیه بر منابع مکتوب و با توجه به شرایط موجود، روش‌های آزمایشگاهی انتخاب شد که در ادامه معرفی می‌شود. پس از به دست آمدن نتایج مطالعات آزمایشگاهی، بخش تحلیل ساختار بلورین و بخش‌های آنالیزی ازنظر فنی مورد تحلیل قرارگرفته است.

۱-٤. نمونه‌برداری: هدف از نمونه‌برداری به دست آوردن اطلاعات لازم از نمونه موردمطالعه است. کدگذاری نمونه‌ها به ترتیب (T) تبریز، (R) ربع رشیدی، تاریخ نمونه‌برداری و شمارهٔ نمونه است (شکل ۶). محل نمونه‌برداری، طبق شماره بر روی (شکل ۵) نشان داده شده است. محل نمونه‌برداری بر روی پلان و بخشی از سازهٔ انتخاب شده (شکل ۴) مشخص

شده است. در پژوهش حاضر، در گرمابهٔ ربع رشیدی یکی از بخش‌هایی که سه لایهٔ اندود بر روی هم اجرا شده و باقی‌مانده و از طرفی دیوار تکیه‌گاه با آجر و ملات غیر از گل اجرا شده (در بیشتر قسمت‌ها، ملات بین دیوارهای سنگی، ملات گلی است)، قسمت الف در فضای ۳ است (شکل ۴)؛ بنابراین با انتخاب این دیواره (دیوار با کد ۸۶۱۷) سه لایه اندود روی‌هم به علاوه یک ملات بین آجر تکیه‌گاه در کنار هم در دسترس بود (شکل ۵)، معیار انتخاب نمونه‌ها همین موارد است.



شکل ۶: نمونه‌های مطالعاتی از لایه‌های مختلف اندود در سازهٔ موسوم به سقایه، ربع رشیدی

۲-٤. روش‌های مطالعات آزمایشگاهی

طیف‌سنجی فلورسانس اشعه‌ی ایکس: چهار نمونهٔ مورد مطالعه با دستگاه XRF شرکت ARL، کشور آمریکا موجود در آزمایشگاه بنیاد علوم کاربردی رازی بررسی شده است.

پراش پرتوایکس: چهار نمونهٔ مورد مطالعه با دستگاه XRD شرکت JNA، کشور ایتالیا (لامپ پرتوایکس با هدف از جنس مس با حداکثر اختلاف پتانسیل kV ۴۰ و حداکثر شدت جریان mA ۳۰، نمونه ثابت و آشکارساز سوزن) تحت زاویه ۲ .θ. و زاویه تابش ۵–۹۰ درجه، موجود در آزمایشگاه بنیاد علوم کاربردی رازی بررسی‌شده است.

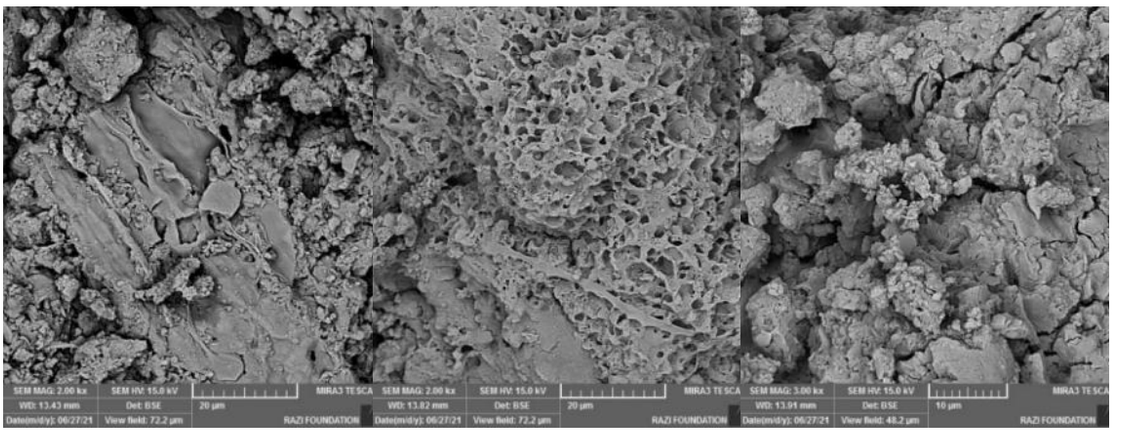
میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مجهز به آشکارساز EDS: نمونه‌های ۱ الی ۳ با دستگاه FE-SEM بنیاد علوم کاربردی رازی مدل MIRA3 که ساخت شرکت TESCAN دارای قدرت تفکیک در حد یک و نیم نانومتر در ولتاژ KV15 و چهار و نیم نانومتر در ولتاژ KV1 است، مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین آنالیزور EDS به‌کار رفته در این دستگاه دارای قدرت تفکیک ۱۲۶ ev > و حد تفکیک بیشتر از ۵۰۰۰ ppm برای شناسایی عناصر موجود از عنصر بر (B) به بعد در جدول تناوبی است.

۵. نتایج و بحث در یافته‌های پژوهش

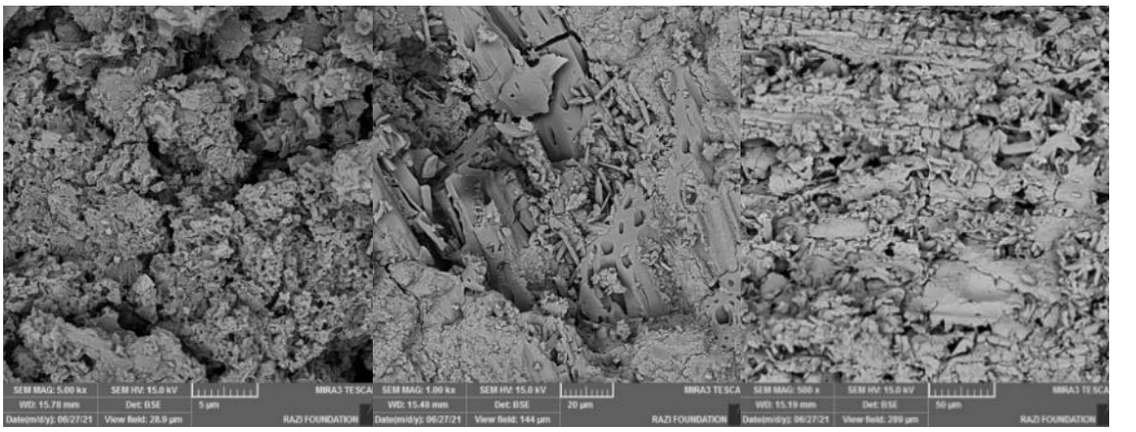
SEM: از نمونهٔ T.R.2021.1 تصاویری با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ برابر تهیه شد (شکل ۷). شاهد ریزترک در بخش‌های مختلف نمونه هستیم. در قسمت‌هایی از نمونه، موادی غیر بلوری (مواد آلی) دیده می‌شود که به نظر می‌رسد باقیماندهٔ زغال چوب در ساختار ملات باشد.

نمونهٔ T.R.2021.2 با بزرگنمایی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و تصاویری با بزرگ‌نمایی ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ برابر تهیه شد (شکل ۸). وضعیت انسجام بلورها در این نمونه نسبت به نمونهٔ پیشین بهتر است. به میزان بسیار اندک، بلور ژیپس هم در نمونه قابل مشاهده است. آثار مواد آلی مانند زغال چوب در نمونه دیده می‌شود.

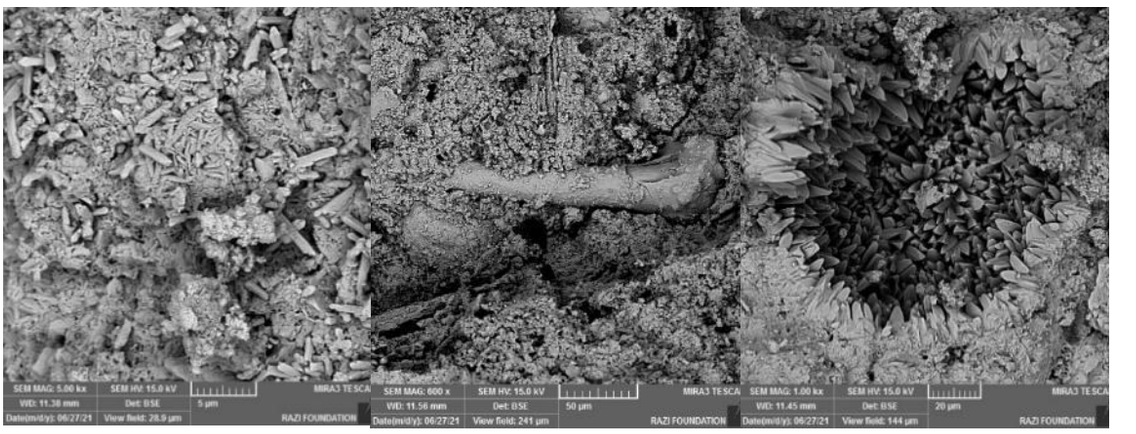
نمونهٔ T.R.2021.3 با بزرگنمایی‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت و تصاویری با بزرگ‌نمایی ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ برابر تهیه شد (شکل ۹). ساختار و ساختمان بلورها در این نمونه، متفاوت‌تر از دو نمونهٔ پیشین است. در برخی قسمت‌ها رشد بلورها نظم خاصی دارد و تقریباً در همهٔ قسمت‌ها، ساختار ملات از انسجام کافی برخوردار است. مواد آلی به میزان کمی در نمونه قابل مشاهده است. همچنین بلورهای ژیپس به میزان اندک ولی کاملاً مشخص قابل‌مشاهده است.



شکل ۷: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ برابر از نمونهٔ T.R.2021.1

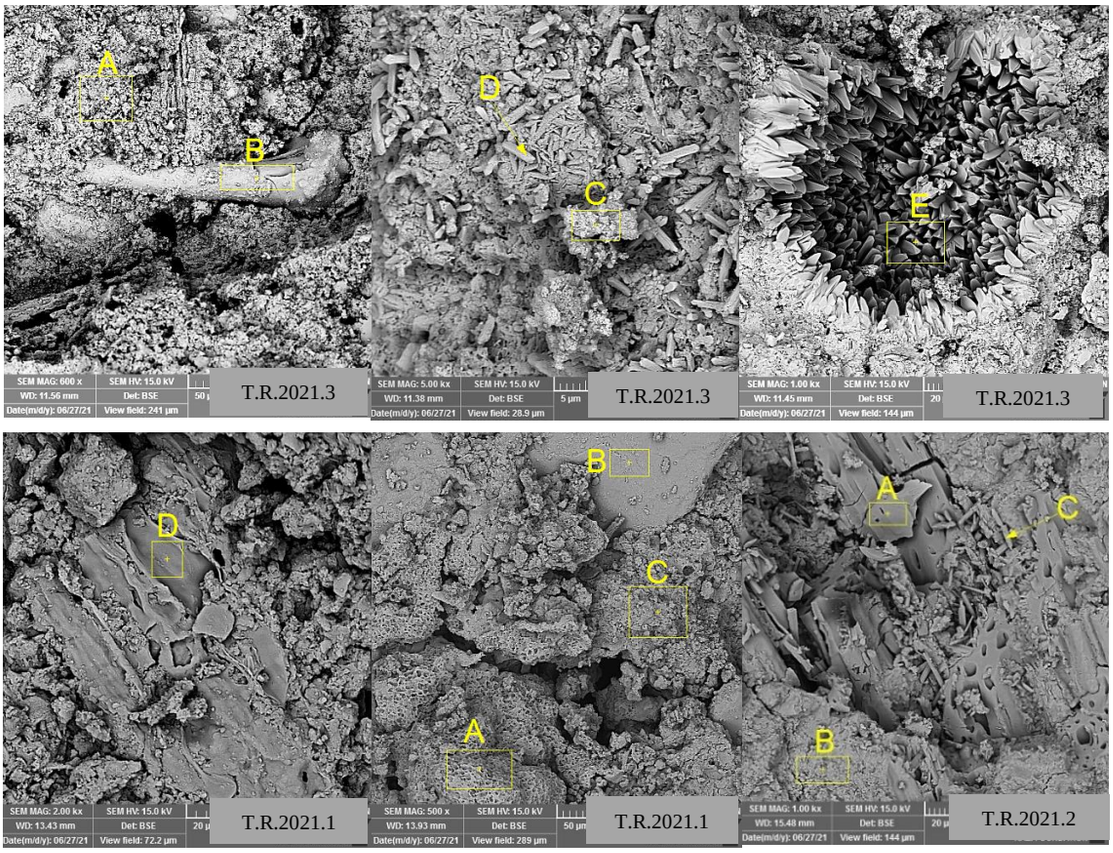


شکل ۸: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ برابر از نمونهٔ T.R.2021.2



شکل ۹: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ برابر از نمونهٔ T.R.2021.3

EDS: از بخش‌های مختلف سه لایهٔ اندود، آنالیز عنصری نقطه‌ای تهیه شد (شکل ۱۰)، (شکل ۱۱) و (جدول ۱).

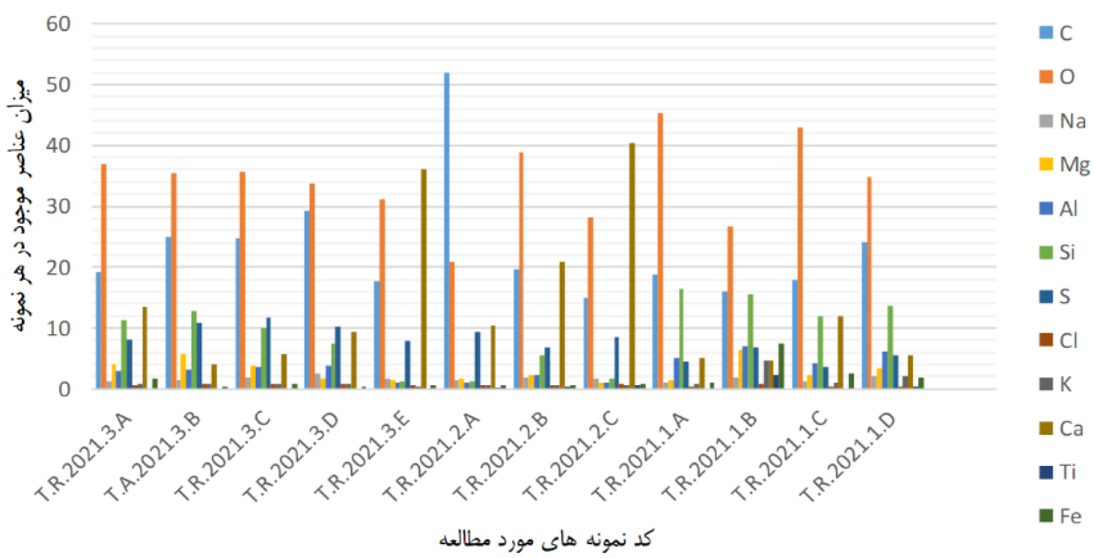


شکل ۱۰: مشخص کردن محل آنالیز عنصری نقطه‌ای از سه لایهٔ اندود مورد مطالعه

با وجود اینکه درنتیجهٔ آنالیز فازی، ژیپس شناسایی نشد، در تصاویر با بزرگ‌نمایی بالا از نمونهٔ T.R.2021.3 بلورهایی شبیه به بلور ژیپس دیده شد که از آن بخش، آنالیز تهیه گردید. میزان سولفور در این آنالیزها چشمگیر و قابل توجه بود. میزان سیلیسیوم و کلسیم هم طبق پیش‌بینی انجام‌شده، درصد بالایی را در نقاط مختلف نمونه به خود اختصاص داده‌اند. دیگر عناصر که مربوط به خاک هستند، در آنالیزها شناسایی‌شده‌اند. در واقع می‌توان گفت لایهٔ اندود اول ملات آهکی است که میزان قابل‌توجهی خاک و ماسه دارد (با تکیه بر نتیجهٔ آنالیز و میزان شناسایی شده عناصر موجود در خاک که در جدول ۱ قابل‌مشاهده است) و شاید به صورت ناخالصی، مقدار کمی گچ هم در نمونه وجود داشته باشد. با توجه به نتیجهٔ آنالیز نمونهٔ T.R.2021.2، میزان کربن شناسایی‌شده بسیار بالاست و در تصویر میکروسکوپی هم آثاری از مواد آلی مانند زغال چوب دیده می‌شود. میزان سیلیسیوم در این نمونه نسبت به نمونهٔ لایهٔ اول، کم‌تر است. دیگر موارد تقریباً شبیه به لایهٔ اول است. میزان سیلیسیوم در نمونهٔ T.R.2021.1 نسبت به دو نمونهٔ پیشین بیشتر است. همچنین میزان کلسیم نسبت به نمونه‌های پیشین کمتر است. همچنین میزان عناصر مربوط به خاک در این نمونه از نمونهٔ لایه دوم بیشتر است. در واقع می‌توان گفت در این نمونه که مربوط به اولین لایهٔ اندود است، میزان عناصر شناسایی‌شدهٔ آهک در ملات کمتر بوده و میزان عناصر شناسایی‌شدهٔ خاک و ماسه بیشتر است. به همین دلیل از نظر استحکامی ضعیف‌تر از دولایهٔ دیگر اندود است.

جدول ۱: نتایج به دست آمده از آنالیز عنصری نقطه‌ای، سه لایهٔ اندود مورد مطالعه

Elements / Sample	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
T.R.2021.3 A	19.27	36.98	1.33	4.01	2.87	11.23	8.08	0.56	0.71	13.35	-	1.62
T.R.2021.3 B	24.96	35.43	1.42	5.68	3.15	12.72	10.88	0.70	0.72	3.91	-	0.44
T.R.2021.3 C	24.84	35.61	1.97	3.79	3.69	10.05	11.75	0.85	0.91	5.75	-	0.78
T.R.2021.3 D	29.28	33.73	2.59	1.67	3.83	7.43	10.11	0.78	0.72	9.42	-	0.43
T.R.2021.3 E	17.79	31.28	1.70	1.48	1.04	1.29	7.83	0.61	0.40	36.05	-	0.52
T.R.2021.2 A	51.89	20.92	1.53	1.72	1.09	1.24	9.38	0.60	0.50	10.45	0.17	0.51
T.R.2021.2 B	19.66	38.78	1.82	2.32	2.24	5.45	6.77	0.55	0.66	20.85	0.29	0.61
T.R.2021.2 C	14.95	28.27	1.58	1.09	1.03	1.58	8.55	0.75	0.58	40.33	0.55	0.74
T.R.2021.1 A	18.76	45.27	1.07	1.54	4.99	16.43	4.50	0.48	0.90	5.09	-	0.96
T.R.2021.1 B	15.97	26.63	1.84	6.46	7.07	15.50	6.84	0.72	4.64	4.61	2.39	7.33
T.R.2021.1 C	17.99	42.94	1.27	2.20	4.25	11.85	3.68	0.37	1.03	11.90	-	2.50
T.R.2021.1 D	24.18	34.91	2.08	3.39	6.10	13.64	5.44	0.47	2.10	5.53	0.33	1.84



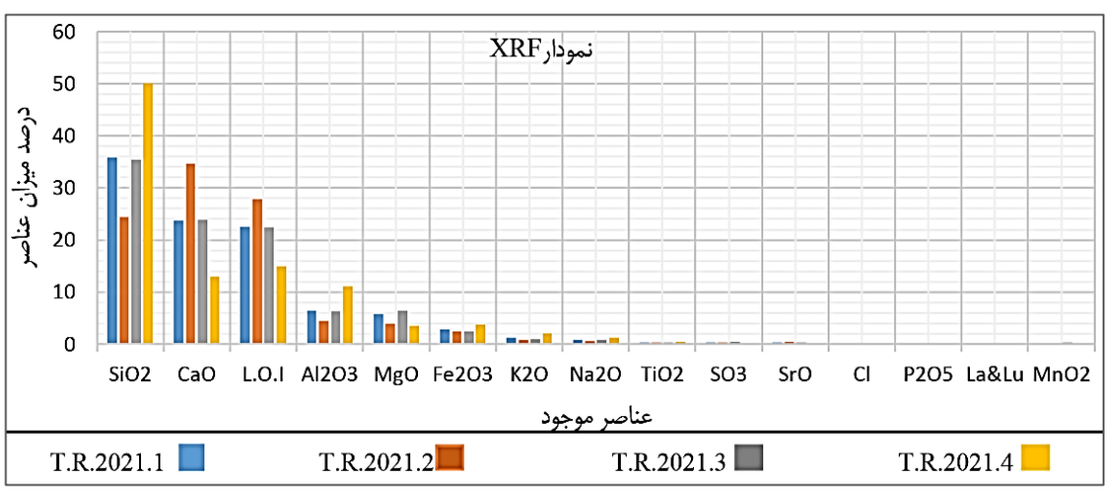
شکل ۱۱. نتایج به دست آمده از آنالیز عنصری نقطه‌ای، سه لایهٔ اندود موردمطالعه

XRF: در آنالیز عنصری نقطه‌ای (EDS) مطالعهٔ ویژه از بلورهای خاص در نقاط مختلف صورت گرفته که برای تکمیل اطلاعات آنالیز عنصری و ترکیب اکسیدی، از روش XRF استفاده شده تا عناصر موجود در نمونه به صورت میانگین ارائه شود. نتیجهٔ آنالیز عنصری از چهار نمونهٔ موردمطالعه مطابق (جدول ۲) و (شکل ۱۲) به دست آمد. معمولاً نتایج آنالیزهای

XRF برای ملات‌ها و کانی‌ها در پژوهش‌های بین‌المللی به‌صورت ترکیب اکسیدی ارائه می‌شود. دلیل این نوع ارائه می‌تواند به این صورت بیان شود که معمولاً کانی‌ها در طبیعت به‌صورت ترکیب اکسیدی یافت می‌شوند. اجزای ملات آهکی و یا گچی و یا مخلوط این دو، نیز به صورت ترکیب اکسیدی قابل تحلیل است و به واقعیت نزدیک‌تر است. در ترکیب اکسیدی به دلیل مشخص شدن میزان دقیق اکسیژن، مقدار عنصر مورد نظر نیز دقیق‌تر قابل‌شناسایی است. اگر نتیجه به صورت عنصری ارائه شود و میزان اکسیژن نیز به صورت جداگانه ارائه شود، در محاسبات و تحلیل‌ها، مقدار عنصر شناسایی‌شده با مقدار واقعی آن در ترکیب ملات، متفاوت خواهد بود. ترکیب اکسیدی سیلیسیم دارای درصد بالایی در بین نمونه‌های مورد بررسی را دارا است. همچنین ترکیب اکسیدی کلسیم، درصد بالایی را به خود اختصاص داده است که می‌تواند نشان‌دهندهٔ آهکی بودن ملات باشد. به دلیل میزان بسیار کم سولفور می‌توان گفت در نمونه ملات‌ها، گچ وجود ندارد. آخرین شاخص در (جدول ۳)، مربوط به Loss on ignition یا افت حرارتی آزمایشگاه است که بیشترین میزان افت حرارت مربوط به نمونه ملات لایه دوم است. در لایه اول و سوم تا حدودی این مقدار برابر است و کمترین آن مربوط به ملات بین آجر (نمونهٔ چهارم) است. در نمونهٔ چهارم (T.R.2021.4) میزان اکسید سیلیسیوم و آلومینیوم نسبت به دیگر نمونه‌ها بیشتر است و از طرفی میزان اکسید کلسیم کمتر از دیگر نمونه‌ها است. کیفیت ملات دیوارچینی نسبت به ملات لایه‌های اندود از نظر انسجام و استحکام، بسیار ضعیف‌تر و سست‌تر است. ترکیب اکسیدی آلومینیوم و سیلیسیوم ارتباط مستقیم باهم دارند. با بالا رفتن درصد اکسید کلسیم، میزان اکسید آلومینیوم نیز افزایش پیدا می‌کند که می‌تواند مربوط به خاک یا ماسه‌ای باشد که به آهک اضافه شده است. منیزیم، آلومینیوم، آهن و پتاسیم عناصری هستند که می‌توانند در خاک حضور داشته باشند؛ یا به‌صورت ناخالصی سنگ معدن بوده و گاهی افرادی که مسئول آماده‌سازی ملات بودند، خاک و ماسه را به ترکیب ملات اضافه می‌کردند.

جدول ۲: نتیجهٔ آنالیز XRF از چهار نمونهٔ مورد مطالعه، اندودهای بخشی از سازهٔ موسوم به سقایه ربع رشیدی

Sample	SiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	CaO %	Na_2O %	K_2O %	MgO %	TiO_2 %	MnO_2 %	SrO %	SO_3 %	L.O.I %
T.R.2021.1	9.35	5.6	8.2	7.23	9.0	2.1	8.5	3.0	-	2.0	2.0	5.22
T.R.2021.2	4.24	5.4	4.2	7.34	6.0	8.0	9.3	2.0	-	4.0	2.0	9.27
T.R.2021.3	4.35	3.6	5.2	9.23	9.0	1	5.6	3.0	1.0	2.0	5.0	4.22
T.R.2021.4	1.50	1.11	8.3	9.12	2.1	1.2	5.3	4.0	-	-	01.0<	9.14



شکل ۱۲: نتایج به دست آمده از آنالیز عنصری به صورت نمودار، چهار نمونهٔ ملات مورد مطالعه

XRD: نتیجهٔ آنالیز فازی از چهار نمونهٔ مورد مطالعه مطابق (جدول ۳) به دست آمد. کلسیت و کوارتز ترکیباتی است که در همه نمونه‌ها شناسایی‌شده است. نمونهٔ T.R.2021.1 حاوی کلسیت، کوارتز، آنورتیت و آنورتوکلاز است. بر اساس ترکیبات شناسایی‌شده، ملات مورد مطالعه را می‌توان به‌عنوان ملات مرکب طبقه‌بندی کرد. ملات‌های کامپوزیتی، مخلوطی از مواد معدنی مختلف که معمولاً حاوی ترکیبات پایه کلسیم و مواد معدنی سیلیکات هستند. وجود آنورتوکلاز و آنورتیت این نظر را تقویت می‌کند. حضور آنورتیت و آنورتوکلاز در ترکیب ملات، نشان می‌دهد که ممکن است دوام و مقاومت بهتری برای مقابله با عوامل محیطی از خود نشان دهد. وجود آنورتوکلاز نشان‌دهنده فعال‌سازی قلیایی است که واکنش-پذیری ملات را افزایش داده و در نتیجه باعث افزایش استحکام و کاهش تخلخل می‌شود. اگر مواد قلیایی مانند سدیم یا پتاسیم در ملات وجود داشته باشد، این قلیاها با ترکیبات خاصی مانند سیلیس یا آلومینوسیلیکات موجود در ملات واکنش می‌دهند که در نتیجه، محصولات واکنش دارای استحکام بالاتری هستند و می‌توانند به افزایش مقاومت فشاری کلی ملات کمک کنند. همچنین این قلیاها می‌تواند مقاومت ملات را در برابر حملات شیمیایی، مانند باران اسیدی یا مواد شیمیایی تهاجمی خاص موجود در محیط، بهبود بخشد. حضور این قلیاها می‌تواند روند سخت شدن ملات را تسریع بخشد و باعث فعال شدن اجزای واکنشی شود و در نتیجه ملات زودتر به استحکام مورد نیاز دست می‌یابد.

جدول ۳: نتیجهٔ آنالیز فازی XRD از چهار نمونه مورد مطالعه

T.R.2021.1	T.R.2021.2	T.R.2021.3	T.R.2021.4	Sample / Min	
–	√	–	–	Dolomite	$CaMg(CO_3)_2$
√	√	√	√	Calcite	$CaCO_3$
√	√	√	√	Quartz	SiO_2
√	–	√	–	Anorthite	$CaAl_2Si_2O_8$
–	–	–	√	Albite	$(Na,Ca)(Si,Al)_4O_8$
–	√	–	–	Illite	$(K,H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$
√	–	–	–	Anorthoclase	$(Na, K)(Si_3Al)\ O_8$
√	√	√	√	Amorphous Phase	

سیلیس به عنوان یک ماده پرکننده عمل می‌کند؛ چسبندگی و پلاستیسیته ملات را بهبود می‌بخشد و کار کردن آن را در طول اجرا آسان‌تر می‌کند. وجود کربنات کلسیم نشان می‌دهد که ملات کربناته شده است. فرآیندی که در آن دی‌اکسید کربن هوا با هیدروکسید کلسیم واکنش داده و کربنات کلسیم و آب تشکیل می‌دهد. این فرآیند به ملات اجازه می‌دهد تا در طول زمان سخت شود. وجود آنورتیت همچنین نشان‌دهنده پتانسیل هیدرولیکی ملات است که به آن اجازه می‌دهد در شرایط مرطوب، سخت شود.

نمونهٔ T.R.2021.2 حاوی دولومیت، کلسیت، کوارتز و ایلیت است. بر اساس ترکیبات شناسایی‌شده، ملات مورد مطالعه را می‌توان به عنوان ملات پایه آهکی با افزودنی‌های پوزولانی طبقه‌بندی کرد. حضور ایلیت نشان می‌دهد که این ملات می‌تواند استحکام، کارایی و دوام بیشتری از خود نشان دهد. دولومیت، یک ماده معدنی کربنات کلسیم منیزیم است. دولومیت اغلب در سنگ‌های رسوبی یافت می‌شود و می‌تواند به‌عنوان ماده پرکننده در ملات‌ها استفاده شود. وجود دولومیت، یک کانی متراکم و بادوام، نشان می‌دهد که ملات مقاومت خوبی در برابر شرایط جوی و محیطی دارد. وجود کانی رسی ایلیت، کارایی بهتری را برای ملات فراهم می‌کند. کانی‌های رسی به عنوان پرکننده عمل می‌کنند و انسجام و انعطاف‌پذیری ملات را افزایش می‌دهند. این امر باعث می‌شود ملات مخلوط، اعمال و شکل‌دهی به صورت لایهٔ اندود صاف در سطح دیوار را در طول اجرا، آسان‌تر کند. ترکیب کلسیت، دولومیت و سیلیس نشان می‌دهد که ملات مقاومت خوبی نسبت به دما می‌تواند داشته باشد.

نمونهٔ T.R.2021.3 حاوی کلسیت، کوارتز و آنورتیت است. آنورتیت یک سیلیکات آلومینیوم کلسیم است. بر اساس ترکیبات شناسایی‌شده، ملات مورد مطالعه را می‌توان به‌عنوان ملات بر پایه آهک طبقه‌بندی کرد. ملات آهک معمولاً از هیدروکسید کلسیم و سایر ترکیبات سیلیکات تشکیل شده است. سیلیکات‌های آلومینیوم کلسیم مانند آنورتیت می‌تواند به استحکام ملات کمک کند. آنورتیت یک کانی نسبتاً سخت و بادوام است که می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که ملات دارای خواص مکانیکی خوب و مقاوم در برابر عوامل جوی است؛ درحالی‌که وجود کربنات کلسیم نشان‌دهنده فرآیند کربناسیون است که امکان گیرش و سخت شدن را فراهم می‌کند. کارایی ملات ممکن است باوجود سیلیس بهبود یابد.
نمونهٔ T.R.2021.4 حاوی کلسیت، کوارتز و آلبیت است که وجود این ترکیبات در نمونه نشان می‌دهد که این ملات در دستهٔ ملات آهک هیدرولیک قرار دارد. ملات‌های آهک هیدرولیک به دلیل وجود ترکیبات واکنش‌دهنده خاصی به دلیل توانایی گیرش و سخت شدن در محیط با رطوبت بالا شناخته می‌شوند؛ از جمله آلبیت‌ها که دارای خواص پوزولانی هستند و باعث افزایش هیدرولیک ملات آهک می‌شود. آلبیت‌ها دارای ظرفیت تبادل کاتیونی عالی هستند که می‌تواند به کاهش نفوذپذیری ملات و افزایش مقاومت آن در برابر هوا کمک کند. ملات‌های آهک هیدرولیک در مقایسه با ملات‌های آهکی غیر هیدرولیک کارایی بهتری دارند. وجود سیلیس در ترکیب ممکن است به بهبود کارایی کمک کند و به کاربرد آسان‌تر و شکل‌دهی ملات در طول ساخت کمک کند.

نتیجه‌گیری

سازهٔ سقایه ربع رشیدی بنایی تاریخی با کاربری مرتبط با آب است که از مصالح سنگ و آجر با ملات آهکی و اندودهای آهکی ساخته‌شده است. پس از بررسی میزان رطوبت نسبی هوا در طول سال و همچنین نوسانات دمایی یک ساله در شهر تبریز، این پیش‌زمینه ایجاد شد که شرایط برای فرسایش ملات، به‌ویژه برای ملات تاریخی، بسیار محیا است. در ادامه، در مطالعات آزمایشگاهی، فرسایش ساختاری و اینکه به صورت تصاعدی این فرسایش افزایش می‌یابد، به صورت مشخص قابل‌تشخیص بود. با تکیه بر مطالعات آزمایشگاهی، این نکته محرز شد که ملات بین آجرها و ملات لایه‌های اندود سطح دیوار از نظر آهکی بودن مشابه هستند؛ ولی از نظر میزان آهک و میزان خاک و ماسه با یکدیگر متفاوت‌اند. در واقع کیفیت ملات بین آجرها نسبت به ملات لایه‌های اندود، پایین‌تر است. سرعت عمل‌آوری ملات آهکی برای دیوارچینی بالا بوده و عمل خیساندن ملات به خوبی انجام نشده است. از این نظر، وضعیت لایه‌های اندود بهتر است و عمل‌آوری آن در مدت زمان بیشتری انجام شده و این عمل یکی از دلایل بالاتر بودن کیفیت ملات لایه‌های اندود نسبت به ملات آجرچینی است. میزان خاک و ماسهٔ اضافه‌شده به ملات در لایه‌های اندود به‌صورت عمدی و هدفمند صورت گرفته است. دانه‌بندی و ترکیب دانه‌ها تقریباً در همه جای ملات به‌صورت یکنواخت است. ضخامت لایه‌های اندود یکسان نیست و به دلیل تیشه‌کاری نکردن سطح اندود پیشین، اتصال لایه‌های اندود به یکدیگر دچار ضعف شده و در بسیاری از قسمت‌ها دچار گسستگی شده است.
همچنین یکی از دلایل استحکام مناسب ملات لایه‌های اندود، استفاده از پودر زغال در ساختار ملات است که در این مطالعه، شواهدی از زغال در نمونهٔ ملات‌ها شناسایی شد. افزودن پودر زغال چوب به ملات آهکی مانند یک پوزولان عمل می‌کند که با آهک واکنش می‌دهد و محصولات واکنش اضافی را تشکیل می‌دهد؛ و در نتیجه استحکام و دوام ملات را افزایش می‌دهد. واکنش پوزولانی زمانی رخ می‌دهد که مواد پوزولانی مانند پودر زغال چوب با آهک در حضور آب واکنش دهند. در طی این واکنش، پودر زغال چوب با هیدروکسید کلسیم آزاد شده از هیدراتاسیون آهک (CaO) واکنش داده و منجر به تشکیل محصولات جدید واکنش می‌شود. واکنش را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:

پودر زغال‌سنگ + H_2O + $Ca(OH)_2$ ⟶ محصولات واکنش

واکنش پوزولانی بین پودر زغال چوب و هیدروکسید کلسیم منجر به تشکیل محصولات واکنش مانند سیلیکات‌های کلسیم، آلومینات‌ها و سایر ترکیبات می‌شود. این محصولات واکنش به میزان قابل‌توجهی به استحکام و پایداری ملات کمک می‌کنند و مقاومت بهتری در برابر حملات شیمیایی دارند. همچنین، محصولات واکنش تشکیل شده در طی واکنش پوزولانی به اتصال ذرات آهک به یکدیگر کمک می‌کند و انسجام و استحکام کلی را افزایش می‌دهد.

همچنین واکنشی که آهک با سیلیسیوم داده است، به دلیل وجود ماسه‌هایی است که در هنگام عمل‌آوری به ملات اضافه‌شده است. ماله‌کشی برای اجرای لایه‌های اندود باعث فشرده‌تر شدن ملات و استحکام بیشتر آن شده است؛ که این کار در مورد ملات بین آجرها انجام نشده و نتیجهٔ متفاوتی نیز از نظر استحکام ساختاری مشاهده می‌شود. با توجه به آهکی بودن ملات در لایه‌های اندود مورد مطالعه، می‌توان گفت سازهٔ مورد نظر ارتباط زیادی با آب و رطوبت داشته است. ولی نمی‌توان به صورت قطعی گفت که این سازه با کاربرد گرمابه بوده است و در این خصوص نیاز به مطالعهٔ بیشتر احساس می‌شود. به نظر می‌رسد در این بخش سازه‌ای از دورهٔ ایلخانان مغول بوده که در دورهٔ صفویه مداخلاتی بر روی آن صورت گرفته است.

سپاسگزاری

این تحقیق و مطالعه در چهارچوب سومین فصل از پروژهٔ بین‌المللی ربع رشیدی تبریز، مجوز شمارهٔ ۹۸۱۰۱۶۰۶ مورخهٔ ۱۳۹۸/۰۶/۱۰ صادره از طرف ریاست وقت پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری به نام بهرام آجورلو انجام شده است و نویسندگان از حمایت معاونت میراث فرهنگی آذربایجان شرقی و آقایان دکتر بهرام آجورلو (سرپرست هیئت بین‌المللی ربع رشیدی) و حسین اسماعیلی عتیق (سرپرست پایگاه پژوهشی ملی ربع رشیدی) سپاسگزار هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول فرآیند کار را طراحی کرده و داده‌ها را تجزیه و تحلیل و تفسیر کرده است. نویسنده دوم در انجام آزمایش‌ها شرکت کرده است. هر دو نویسنده نتایج را مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند و در مقاله نهایی مشارکت داشته‌اند.

فهرست منابع

Ajorloo, B. (2014). A Historical Approach to the Urban-planning and Architectural Complexes in the Ilkhānid Tabriz. *Journal of Iranian Islamic Period History*, *4*(7), 1-23. [in Persian]

Ajorloo, B. (2017). Report on the First Season of International Excavations & Restoration Studies at Rabʿ-e Rashidi by the Joint Iran-German Rashidiyya Expedition. Unpublished Official Report, archives of Rabʿ-e Rashidi Tabriz National Research Base, Iranian Ministry of Cultural Heritage, Tourism and Handicrafts (Unpublished).

Ajorloo, B. (2018). Report on the Second Season of International Excavations & Restoration Studies at Rabʿ-e Rashidi by the Joint Iran-German Rashidiyya Expedition. Unpublished Official Report, archives of Rabʿ-e Rashidi Tabriz National Research Base, Iranian Ministry of Cultural Heritage, Tourism and Handicrafts (Unpublished).

Ajorloo, B. (2019). Report on the Third Season of International Excavations & Restoration Studies at Rabʿ-e Rashidi by the Joint Iran-German Rashidiyya Expedition. Unpublished Official Report, archives of Rabʿ-e Rashidi Tabriz National Research Base, Iranian Ministry of Cultural Heritage, Tourism and Handicrafts (Unpublished).

Ajorloo, B. (2020). Archaeological excavations of Rabʿ-e Rashidi international Project: The Cultural heritage of Khwāja Rashid al-Din Fażl-Allāh Hamadāni. In A. Mortāzi (ed.), The Proceedings of the First International Conference in Honor of Khwāja Rashid al-Din Fażl-Allāh Hamadāni, Excluded Volume for Endowment and Religious Studies, 161-182. Tabriz: University of Tabriz Press.

Ajorloo, B., & Moradi, A. (2020). An Analytical Approach to the Function and Dating of the Great Southern Tower at Rab'e Rashidi in Tabriz. *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar*, *17*(85), 45-56. [in Persian] doi: 10.22034/bagh.2020.171487.3990

Ajorloo, B., Fuchs, C. & Moradi, A. (2018). New research approaches to Rabʿ-e Rashidi, Tabriz, 2016. In R. Shirazi (ed.), Proceedings of the 16th Annual Symposium on Iranian Archaeology, 39-43. Tehran: RICHT & ICAR.

Ajorloo, B., Korn, L. & Fuchs, C. (2019). The second season of international expedition to Rabʿ-e Rashidi, Tabriz, 2017. In R. Shirazi (ed.), Proceedings of the 17th Annual Symposium on Iranian Archaeology, 11-15. Tehran: RICHT & ICAR.

Degloorkar, N. K., & Pancharathi, R. K. (2020). Investigation of microstructure characterization of mortars from 800 years old heritage structures in Southern part of India. *Journal of Archaeological Science: Reports*, *34*, 102634.

Ergenç, D., & González, R. F. (2017). Preliminary investigation of the preparation of repair mortars for the Temple of Diana, Mérida, Spain. *Ge-conservación*, (11), 11.

Fuchs, C. & Ajorloo, B. (2023). The Rab'-e Rashidi site in Tabriz (Iran) & its architectural remains. In N. Marchetti et al. (Eds.), Proceedings of the 12 International Congress on the Archaeology of the Ancient Near East, 06-09 April 2021, Bologna (Vol. 2, 851-866). Wiesbaden: Harrassowitz Verlag.

Gholdori, N. J., & Ajorloo, B. (2023). An Introduction to the Hypothesis of SOQĀYA of Rabʿ-e Rashidi. Journal of Art and Civilization of Orient, 41, 6–17. DOI: 10.22034/jaco.2023.383140.1293

Gulzar, S., Chaudhry, M. N., Burg, J. P., & Saeed, S. A. (2014). Characterization of Mortars From the Nur Jahan Tomb Lahore, Pakistan. *International Journal of Conservation Science*, *5*(2). pp.151-160, 4 figs. (3 color), 37refs.International journal of conservation science, v.5, no.2.

Hamzavi, Y., Haji Seyyed Javadi, M., &Mosleh, M. (2023). An Investigation into the Characterization of Gypsum Mortar of three historical periods and four climates of Iran. *Journal of Research on Archaeometry*, 9(1). [in Persian] Doi: 10.52547/jra.9.1.346.

Hamzavi, Y. (2021). An Investigation into the Characterization of Gypsum Mortar of Seyed Shams-din Monument in Yazd, Iran. 11 (25): 3

Hamzavi, Y., & Afandipour, J. (2023). Investigation and Recognition of Mortar Structure in the Big Tower of Rab-e Rashidi Complex in Tabriz. *pazhoheshha-ye Bastan shenasi Iran*, *13*(38), 149-172. [in Persian] doi: 10.22084/nb.2023.26161.2474

Hamzavi, Y. (2021). An Investigation into the Characterization of Gypsum Mortar of Seyed Shams-din Monument in Yazd, Iran. *Maremat & Memari-e Iran*, 11 (25): 37-53. [in Persian] Doi:10.29252/mmi.580.13990415.

Heidari, D., Younesi, H., & Vatankhah, Gh. (2013). An Investigation of Historical Lime Mortars (Saruj) Case study: Shahzadeha public bath in Isfahan, *Maremat & memari-e Iran,* 3(5), 83. [in Persian] SID. https://sid.ir/paper/471285/fa

Lorain, T., Ajorloo, B., & Korn, L. (2023). Preliminary Results of the Iranian-German Archaeological Campaign at the Rab ʻ-i Rashīdī Complex in Tabriz. In *Proceedings of the 12th International Congress on the Archaeology of the Ancient Near East: 06-09 April 2021, Bologna*. Harrassowitz Verlag.

Mahyar, S., Firuzmandy Shirehjini, B., & Khamseh, H. (2021). Analysis of the Mortar of Early Islamic Era on Tomb Towers and Castles of Eastern Mazandaran by XRD Method. *Journal of Archaeological Studies*, *13*(1), 189-209. [in Persian]

Mirderikvandi, M., Hajebrahim, Z. A., & Heidari, B. D. (2015). A Study of the Ancient Mortars Used in Shapouri Bridge of Khorramabad and the Feasibility of Using them in the Restoration of Bridges through Laboratory Methods. [in Persian]

Ramacciotti, M., Gallello, G., Lezzerini, M., Pagnotta, S., Aquino, A., Alapont, L., ... & Pastor, A. (2022). Smartphone application for ancient mortars identification developed by a multi-analytical approach. *Journal of Archaeological Science: Reports*, *43*, 103433.

Razani, M., & Hamzavi, Y. (2018). Characterization of historic mortar from the architectural decoration and plaster of Rocky Temple of Verjuy in Maragheh, Iran. *Journal of Research on Archaeometry*, *4*(2), 21-33. [in Persian] Doi: 10.29252/jra.4.2.21

Roshan, M., & Ajorloo, B. (2019). The Analytical Revisiting of the Structure Known as Ilkhanid Bathhouse in Rab'e Rashidi, Tabriz. *Bagh-e Nazar*, *15*(68).

RouhAngiz, L. (2016). Archaeological exploration of Ruba Rashidi site. Third Congress of History of Architecture and Urban Planning of Iran. Tehran: Resane Pardaz. [in Persian]

RouhAngiz, L. (2017). The report of the third chapter of the archaeological excavation of Rabe Rashidi site. Archive of the General Department of Cultural Heritage, Handicrafts and Tourism of East Azerbaijan(unpublished). [in Persian]

آجورلو، بهرام. (۱۳۹۲). رهیافتی تاریخی به شهرسازی و مجموعه‌های معماری تبریز عهد ایلخانی .*فصلنامه تاریخ نامه ایران بعد از اسلام*.۴ (۷): ۱-۲۳.

آجورلو، بهرام. مرادی، امین. (۱۳۹۹). رهیافتی تحلیلی به دیرینگی و کارکرد برج بزرگ جنوبی ربع رشـــیدی تبریز. باغ نظر، ۱۷(۸۵)، ۴۵-۵۶.

حمزوی، یاسر. (۱۴۰۰). مطالعهٔ ساختارشناسی ملات گچی ایوان بقعهٔ سیدشمس‌الدین یزد (کتیبهٔ کوفی، آرایهٔ گچی قالبی، لایهٔ بستر گچی) .*نشریه علمی مرمت و معماری ایران*، ۱۱ (۲۵): ۳۷-۵۳.

حمزوی، یاســر. افندی‌پور، جواد. (۱۴۰۲). بررســی و شــناخت ســاختار ملات در برج بزرگ مجموعهٔ ربع‌رشــیدی تبریز .*پژوهش‌های باستان‌شناسی ایران*، دورهٔ ۱۳، شمارهٔ ۳۸: ۱۴۹-۱۷۲.

حمزوی، یاسر. حاجی سیدجوادی، سید محسن. مصلح، مریم. (۱۴۰۲). مطالعهٔ ساختارشناسی نمونه‌های ملات گچی از سه دورهٔ تاریخی و چهار اقلیم ایران. پژوهه باستان‌سنجی، ۹ (۱): ۲۵-۵۲.

حیدری، داریوش. یونســی، حامد. وطن‌خواه، غلامرضــا. (۱۳۹۲). پژوهشــی در ملات‌های آهکی تاریخی (ســاروج) نمونه موردی: حمام شاهزاده‌ها در اصفهان. مرمت و معماری ایران (مرمت آثار و بافت‌های تاریخی فرهنگی)، ۳(۵)، ۸۳-۹۸.

رازانی، مهدی. حمزوی، یاسر. (۱۳۹۷). ساختارشناسی ملات‌های تاریخی در آرایه‌های معماری و اندود داخلی معبد صخره‌ای ورجووی مراغه، ایران. *پژوهه باستان‌سنجی*،۴ (۲): ۲۱-۳۳.

روح‌انگیز، لاله. (۱۳۸۶). گزارش فصل سوم کاوش باستان‌شناسی محوطه‌ی ربع رشیدی. بایگانی اداره‌ی کل میراث فرهنگی، صنایع‌دستی و گردشگری آذربایجان شرقی.

روح‌انگیز، لاله. کاوش‌های باستان‌شناختی محوطهٔ ربع رشیدی. کنگره تاریخ معماری و شهرسازی ایران. تهران: رسانه پرداز؛ ۱۳۸۵.

ماهیار، شاهین. فیروزمندی شیره جینی، بهمن. خمسه، هایده. (۱۴۰۰). بررسی ساختار ملات اوایل دوره اسلامی بر اساس نمونه‌های برج‌های آرامگاهی و قلعه‌های شرق مازندران با روش .XRD *مطالعات باستان‌شناسی*،۱۳ (۱): ۱۸۹-۲۰۹.

میردریکوندی، محدثه. حاج ابراهیم زرگر، اکبر. حیدری‌بنی، داریوش. (۱۳۹۴). شناسایی ملات‌های باستانی پل شاپوری خرم‌آباد و امکان-سنجی استفاده از آنها در مرمت پل از طریق روش‌های آزمایشگاهی. مرمت و معماری ایران (مرمت آثار و بافت‌های تاریخی فرهنگی)، ۵(۹)، ۴۵-۵۸.