Research Paper

Study on Salt Weathering in Tuff Stones of Soltaniyeh Dome World Heritage Site, Iran

Sahar Ahmad Khan Beigi

Independent Researcher, M.A. in Conservation and Restoration of Cultural and Historical Objects. Tehran, Iran.

Abstract

The stone elements of the Soltaniyeh Dome in Zanjan have deteriorated due to factors such as the presence of harmful salts, rising damp, and inappropriate mortar jointing. This study investigates the salt-induced weathering of tuff stone blocks in the Soltaniyeh Dome through analytical and in situ experiments. The tuff stone, used extensively in the plinths of the dome, exhibits severe salt-induced deterioration, with visible surface damage attributed to salt crystallization cycles. Analytical techniques, including optical microscopy, X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), and scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), were employed to identify the nature of the salts and the weathering processes. The results indicate that the tuff stone is fine-grained and highly porous, allowing water to penetrate and evaporate easily, leading to the formation of salt efflorescence crusts on the surface. Salt crystallization within the stone›s pores has caused microstructural failure, resulting in extensive decay. The primary salts identified include nitratine, hexahydrite, nitre, and halite. The deterioration is driven by wet-dry cycles, high porosity, and the stone›s composition. To mitigate further damage, desalination and environmental control measures are recommended to prevent salt dissolution and recrystallization, thereby reducing stone degradation.

Keywords: Soltaniyeh Dome, tuff stones, salt crystallization, porosity, salt damage, mineralogy.

Knowledge of Conservation and Restoration

Vol.7,Issue.4,
Serial_No.22, 2025

https://kcr.richt.ir

Pages: 46 to 68

Corresponding Author

Sahar Ahmad Khan Beigi

Independent Researcher, M.A. in Conservation and Restoration of Cultural and Historical Objects. Tehran, Iran.

Email
S.Kbeigi@hotmail.com

Copyright © 2020,Knowledge of Conservation and Restoration. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-noncommercial 4.0. International License which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cited.

Introduction

Soluble salts are among the most destructive agents affecting porous mineral materials in historical buildings (Charola & Bläuer, 2015). Over time, these salts cause material decay, necessitating their removal from stone structures and wall paintings as a primary conservation measure. The damage caused by salts depends not only on efflorescence but also on environmental conditions and the material's characteristics. The Soltaniyeh Dome, a prominent structure from the Ilkhanate period, is globally significant for its architectural and historical value (Hamzelou, 2002). However, its stone plinths, particularly in the southeastern porch, have suffered damage such as surface flaking, increased porosity, and loss of durability due to rising damp and improper jointing (Kordi et al., 2011). This study examines the mechanisms of salt-induced deterioration in these stone plinths and proposes strategies for identifying crystallized salts and understanding the degradation process. Preserving historical stone structures is crucial due to their cultural significance and susceptibility to various destructive processes. This research aims to reduce restoration costs and provide sustainable conservation strategies.

Background

Research on salt deterioration mechanisms and analysis techniques is more extensive than studies on salt removal or mitigation (Kordi et al., 2011; Valenza & Scherer, 2010; Amoroso & Fassina, 1983; Mahboub Ali & Vatandoost, 1998; Stambolov & Van Asperen de Boer, 1976; Basiri & Pedram, 2009; Pedram & Zamani, 2011; Fadaei, 2005; Pirak, 2012). Previous studies on the Soltaniyeh Dome have focused on efflorescence and soluble salts in its brick walls and decorative elements, concluding that salts originate from external sources such as soil, mortar, and rising damp (Amin Shirazi Nejad, 1996). Salt crystallization, whether as surface efflorescence or subflorescence, leads to powdering and flaking of the tuff stone. While drainage improvements and desalination are recommended, specific approaches to salt removal and prevention remain underexplored. This study addresses these gaps by analyzing the structure and deterioration mechanisms of the southeastern stone plinths and proposing conservation strategies.

Research Methods

The study focused on the stone plinths of the southeastern façade of the Soltaniyeh Dome, selected based on the extent of efflorescence. The dome, a UNESCO World Heritage Site, is located in Soltaniyeh, 43 km from Zanjan. The gray-green tuff stone plinths, used extensively in the dome's construction, have suffered significant deterioration due to their placement at the base and exposure to moisture and salts. Analytical techniques, including XRD, XRF, and SEM-EDS, were employed to identify salt types, their sources, and the stone's structural characteristics. These analyses are essential for developing effective conservation strategies to reduce salt content and prevent further deterioration.

Results and Discussion

The study identified mechanical abrasion, salt efflorescence, and flaking as key factors in the deterioration of tuff stone plinths in the southeastern porch of the Soltaniyeh Dome. Salt crystallization, influenced by humidity and temperature changes, caused surface flaking and structural weakening (Torraca, 2009; Belmin & Siedel, 2005; Bläuer Böhm, 2005). Rising damp and poor drainage exacerbated salt migration, leading to further damage. Laboratory tests revealed low resistance to sodium sulfate cycles, with samples exhibiting cracking and flaking after repeated exposure (EN 12370: 1999). These findings underscore the need for targeted conservation strategies to mitigate salt-induced damage.

Results of Mineralogical Studies

Mineralogical analysis revealed that the gray-green tuff stone is a lithic crystal tuff with a porphyroclastic texture and vitric groundmass. The stone consists of phenocrysts, primarily plagioclase, altered to secondary minerals such as carbonates, sericite, and clay minerals. Quartz, feldspar, and iron oxides are also present, with voids often filled by quartz.

Despite its crystalline structure, the tuff shows signs of weathering, including the alteration of feldspar to clay and biotite to iron oxides. Its low thermal conductivity and resistance to weathering make it suitable for construction (Reedy, 2008).

Results of Structural Analysis

XRF analysis identified SiO_2 (73.59%) and Al_2O_3 (11.89%) as the primary components of the tuff stone, with minor amounts of CaO, Fe_2O_3, and K_2O. XRD analysis confirmed quartz (SiO_2) and kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) as the major crystalline phases, with orthoclase ($KAlSi_3O_8$) and calcite ($CaCO_3$) as minor phases. The stone's high porosity and lightweight yet durable nature make it suitable for construction. Petrographic images confirmed the XRD results, highlighting the stone's volcanic origin and tuff composition (Reedy, 2008).

Identification of Salts and Their Damage Mechanisms

XRD analysis identified sodium nitrate ($NaNO_3$), halite (NaCl), potassium nitrate (KNO_3), and hexahydrite ($MgSO_4 \cdot 6H_2O$) as the primary salts on the stone surface, with quartz (SiO_2) present in smaller amounts. These salts originate from the mortar, soil, and historical land use. Rising damp, due to poor drainage, facilitates salt migration and crystallization. Highly soluble salts like $NaNO_3$ and NaCl, along with $MgSO_4 \cdot 6H_2O$, cause significant damage through repeated dissolution and crystallization cycles, leading to surface flaking and structural weakening (Heritage et al., 2014; Robinson & Williams, 1997).

Microstructural Analysis Using Scanning Electron Microscopy

SEM-EDX analysis revealed significant structural differences between healthy and weathered tuff stones. In healthy stones, kaolinite sheets were compact and intact, while in historical samples, these sheets were irregular and separated, indicating moisture absorption and salt crystallization damage. The presence of sodium and chlorine in weathered samples confirmed salt-induced deterioration. Kaolinite's layered structure, combined with high porosity, facilitates moisture and salt penetration, accelerating decay. Additionally, clay minerals in the tuff swell with moisture, causing expansion and contraction, which, alongside salt crystallization, leads to surface flaking and structural disintegration (Heritage et al., 2014; Robinson & Williams, 1997).

Conclusion and Recommendations

This study investigated the structural characteristics and deterioration mechanisms of the tuff stone plinths in the southeastern porch of the Soltaniyeh Dome, a UNESCO World Heritage Site. The stones, primarily composed of quartz and kaolinite, exhibited significant damage, including surface flaking, salt crystallization, and delamination. The primary salts identified—nitratine, halite, nitre, and hexahydrite—originated from external sources such as gypsum-lime mortar, soil, and rising damp due to poor drainage. The high porosity of the tuff facilitated moisture and salt penetration, exacerbating deterioration through repeated dissolution and crystallization cycles. To mitigate further damage, desalination is recommended to reduce salt content in the stone's surface layers. Additionally, replacing the deteriorating mortar and improving drainage systems to minimize rising damp are crucial steps. These measures will help stabilize the structure and prevent further salt-induced decay. Future conservation efforts should focus on monitoring environmental conditions and implementing preventive maintenance to ensure the long-term preservation of this historic monument.

Acknowledgments

I would like to express my deepest gratitude to Dr. Omid oudbashi and Dr. Mehdi Razani for their invaluable guidance, expertise, and unwavering support throughout this research. Their insightful feedback and encouragement were instrumental in bringing this study to fruition

Conflict of Interest: None.

Support:Thisresearchwassupportedby ArtUniversity of Isfahan, both financially and **institutionally.**

Data Availability: The raw data of this study are available to the authors and can be accessed upon request through correspondence.

مقاله پژوهشی

تأثیر تخریب نمک‌ها در سنگ‌های ازاره‌ی ایوان جنوب شرقی گنبد سلطانیه زنجان

سحر احمد خانبیگی

پژوهشگر آزاد، کارشناس ارشد حفاظت و مرمت اشیا فرهنگی و تاریخی. تهران. ایران.

چکیده

سنگ‌های ازاره‌ی ایوان جنوب شرقی گنبد سلطانیه در زنجان به دلیل شرایط قرارگیری در پایین بنا و عواملی نظیر حضور نمک-های مخرب، رطوبت صعودی، بندکشی با ملاط نادرست دچار آسیب‌هایی از قبیل پوسته شدن، تغییر ظاهر بصری، افزایش تخلخل سطحی و از دست رفتن دوام و فرسایش شده است. در مقاله حاضر با اهداف شناسایی ماهیت نمک‌های موجود و شناسایی مکانیسم تخریب نمک در سنگ‌های ازاره جنوب شرقی بنای گنبد سلطانیه به مواردی از قبیل، ساختارشناسی، آسیب‌شناسی و گزارش راهکار درمانی و پیشنهاد حفاظت پایدار پرداخته شده است. از این‌رو جهت شناخت علمی از فرآیند فوق، مطالعات ساختارشناسی شامل آنالیز XRD، پتروگرافی، SEM-EDS به‌صورت شناسایی نوع سنگ با استفاده از روش‌های شناسایی میکروسکوپی و آنالیز شیمیایی سنگ‌ها، شناسایی ماهیت نمک‌های موجود در سنگ‌ها با استفاده از روش‌های شیمیایی و القا نمک به نمونه سنگ‌های آزمایشی تحت شرایط شبیه‌سازی شده (شرایط مرطوب و خشک) در آزمایشگاه به منظور تعیین میزان مقاومت سنگ‌ها در برابر نمک انجام گردید. در همین راستا نتایج آزمایش‌های ساختارشناسی سنگ و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی حاکی از آن است که سنگ به‌کار رفته در ازاره‌ی گنبد سلطانیه از نوع سنگ آذرآواری توف است که ساختاری بسیار متخلخل دارد. علاوه بر آن، نتایج آزمون‌های فیزیکی شامل تخلخل‌سنجی، جذب آب و تعیین مقاومت در برابر حمله‌ی نمک‌ها نشان از واکنش ضعیف سنگ در برابر رطوبت و چرخه‌های انحلال و باز تبلور نمک‌ها دارد. چرخه‌های تر و خشک شدن و تبلور نمک‌های محلول که شامل نمک‌های نیترات سدیم ($NaNO_3$)، هالیت ($NaCl$) نیتر، پتاسیم نیترات، (KNO_3)، هگزاهیدرات ($MgSO_4,6H_2O$) در میزان زیاد و کوارتز (SiO_2) در میزان کم عوامل اصلی هوازدگی فیزیکی در سنگ‌های توف بنا هستند. منافذ موجود در سنگ‌ها نقش قابل توجهی را در جذب و انتقال یون‌های نمک دارد که موجب آسیب تبلور نمک‌ها با توجه به رطوبت است که باعث اعمال فشار مکانیکی در سنگ‌های توف می‌شود. از این رو در بخش اقدامات عملی هم در آزمایشگاه و هم سایت اصلی با توجه به درصد بزرگنمایی زدودن چرکی‌ها و نمک‌های سطحی موجود، روش‌های مبتنی بر پاک‌سازی کاهش نمک می‌باید همراه با کنترل محیطی صورت بگیرد تا از این طریق نمک‌های باقی‌مانده فرصتی برای انحلال و بازتبلور پیدا نکنند و در نهایت از تخریب هر چه بیشتر سنگ‌ها جلوگیری به عمل آید.

واژگان کلیدی: گنبد سلطانیه، ازاره سنگی، توف، تبلور نمک، تخلخل، ماهیت نمک، آسیب نمک.

فصل‌نامه دانش حفاظت و مرمت

سال هفتم، شماره ۴

شماره پیاپی ۲۲، زمستان ۱۴۰۳

https://kcr.richt.ir

صفحات: ۴۶ تا ۶۸

نویسنده مسئول

سحر احمد خانبیگی

پژوهشگر آزاد، کارشناس ارشد حفاظت و مرمت اشیا فرهنگی و تاریخی. تهران. ایران

رایانامه

S.Kbeigi@hotmail.com

دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفاده غیرتجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می‌شود.

مقدمه

نمک‌های محلول به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و مخرب‌ترین عوامل تخریبی برای مصالح متخلخلِ معدنی بناهای تاریخی شناسایی شده‌اند (Charola & Blauer, 2015). ازآنجاکه نمک‌ها با گذشت زمان موجب فرسودگی و تخریب مصالح می‌شوند، ل درصد بزرگنمایی استخراج نمک‌ها از آثار بزرگ نظیر نقاشی‌های دیواری، بناهای سنگی و در کل آثار بزرگِ غیر منقول به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین و مرسوم‌ترین اقدام در امر مرمت محسوب می‌شود. تخریب مصالح[1] نه تنها از نظر سیستم شوره‌زنی[2] پیچیده است بلکه به خود اثر و محیط آن نیز بستگی دارد. از آنجا که نمک‌ها با گذشت زمان موجب فرسودگی و تخریب مصالح می‌شوند، ل درصد بزرگنمایی استخراج نمک‌ها از بستر به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین و مرسوم‌ترین اقدام در امر مرمت محسوب می‌شود.

بنای گنبد سلطانیه در جنوب‌شرقی زنجان در شهرستان سلطانیه واقع شده است. گنبد سلطانیه یکی از شاخص‌ترین بناهای دوره‌ی ایلخانی است که علاوه بر عظمت و شکوه معماری آن، گنجینه‌ی تزئینات وابسته به معماری نیز به‌شمار می‌آید و یکی از مهم‌ترین و ارزشمندترین بناهای آرامگاهی جهان است (Hamzelou, 2002, pp. 414–423). به‌منظور درک بهتر مکانیسم تخریب سنگ‌ها، القا نمک ۱۵ نمونه‌ی سنگ برداشت شده از معدن ویر در آزمایشگاه با شرایط آزمایشگاهی صورت گرفت. فرآیند بررسی تأثیرات تخریب نمک به این صورت اجرا خواهد شد که در گام اول دلیل آسیب‌های ایجاد شده در نمونه سنگ‌های مورد آزمون شناسایی شود تا بتوان چگونگی آسیب‌های ایجاد شده بر نمونه‌های آزمایشگاهی سنگ‌ها را تشخیص داد. سنگ‌های ازاره گنبد سلطانیه در اثر بلوری شدن نمک‌ها در لایه‌های سطحی (Kordi et al., 2011) محلی برای ذخیره‌ی نمک‌ها هستند و به‌طور گسترده‌ای تخریب شدند. می‌توان گفت خاستگاه رطوبت موجود در سنگ‌ها و در ادامه شوره‌زنی بر سنگ‌های ازاره وجه جنوب شرقی ایوان گنبد، رطوبت صعودی آلوده به نمکی است که به دلیل زهکشی نامناسب به ساختار سنگ نفوذ می‌کند و فشار ناشی از شکفتگی نمک‌ها بر سطح سنگ‌ها موجب تخریب آن‌ها می‌شود، دراین‌بین اثر سوء ملاط گچی بندکشی‌های سنگ‌های ازاره بر پیشبُرد آسیب بی‌تأثیر نیست.

به‌منظور پیشگیری از نفوذ رطوبت و نم‌کشیدگی دیوار، در پای‌بنا، سنگ‌ازاره قرار می‌دهند (Office of Research and Technical Standards, 1983). سنگ ازاره ایوان جنوب شرقی گنبد سلطانیه به‌دلیل شرایط قرارگیری در پی و عوامل محیطی همچون مقادیر بالای رطوبت صعودی و بندکشی‌های نادرست دچار آسیب‌هایی از قبیل از دست رفتن سطح رویی سنگ‌ها، هوازدگی سطوح و حضور گسترده‌ای از نمک‌ها در سنگ‌ها و بندهای اتصال آن‌ها و در کل تخریب سنگ‌ها گردیده است. همچنین سنگ‌های ازاره در برابر فشارات ناشی از تبلور نمک‌ها و در ادامه افزایش حجم نمک‌های متبلور شده دچار آسیب‌هایی از قبیل پوسته شدن، تغییر ظاهر بصری، افزایش تخلخل سطحی و از دست رفتن دوام و فرسایش شده‌اند. پژوهش حاضر با انجام بررسی‌های فن‌شناسی و آسیب‌شناسی بخشی از ازاره‌ی ایوان جنوب شرقی، اهداف خود را در قالب راهکارهایی همانند شناسایی نمک‌های متبلور شده بر سطح سنگ‌ها و انجام گزارشی مبنی بر مکانیسم تخریب نمک بر ازاره‌ی سنگی مربوط می‌کند. لازم به ذکر است انجام این پژوهش در رابطه با سازه‌های تاریخی سنگی که در معرض فروپاشی قرار دارند؛ از اهمیت زیادی برخوردار است؛ چراکه آسیب‌های وارده بر سنگ‌های تاریخی موجب صرف هزینه‌های بالای اقتصادی جهت تأمین اقدامات درمانی می‌شود. با در نظر گرفتن این مهم که تمام ساختارها و مواد دچار فرسایش می‌شوند، اما حفاظت از سنگ به دلیل استفاده گسترده از آن در میراث فرهنگی و مستعد بودن آن به طیف گسترده‌ای از فرآیندهای فروپاشی، از انحلال گرفته تا تخریب فیزیکی، از اهمیت ویژه‌ای برخورداراست.

پیشینه‌ی تحقیق

مطالعاتی که در ارتباط با مکانیسم تخریب نمک،

بررسی نمک‌ها با آزمایش‌های بیشتر و رویکردهای نظری موجود انجام شده بسیار بیشتر از مطالعات در ارتباط با حذف و یا کاهش آسیب نمک است.

(Kordi et al., 2011; Valenza & Scherer, 2010; Amoroso & Fassina, 1983; Mahboub Ali & Vatandoost, 1998; Stambolov & Van Asperen de Boer, 1976; Basiri & Pedram, 2009; Pedram & Zamani, 2011; Fadaei, 2005; Pirak, 2016).

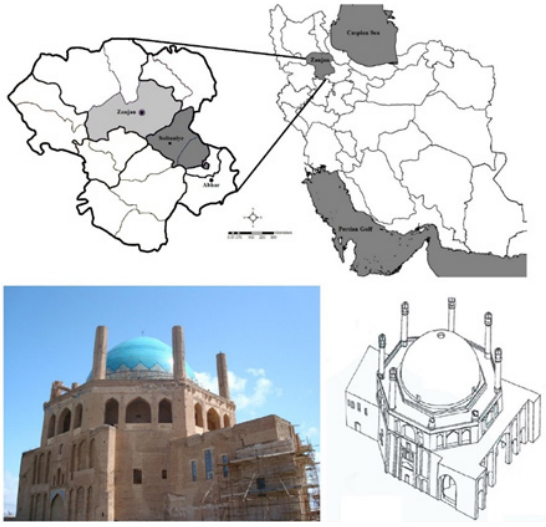
پیشینه‌ی مطالعات انجام شده در خصوص مشکل نمک‌های محلول و تخریب نمک‌ها بر روی بخش سلطانیه در دیوارهای آجری و سنگ‌های مجموعه محدود به تعداد بسیار کمی کار تحقیقاتی است، در مطالعات قبلی، ماهیت سیستم شوره‌زنی و نمک‌های محلول موجود در آجرها و دیوارهای تزئینی طبقه همکف بنای گنبد سلطانیه و بررسی تاریخی بنا، به‌منظور به‌دست آوردن تصویری روشن از فرآیند تخریب نمک‌ها بر ساختار متخلخل آجر و کاشی‌ها بررسی شده است. در این مطالعات نتیجه‌گیری شده است که منبع نمک‌ها خارجی است و از محیط بیرون، خاک پشت دیوارها و ملاط مصرفی تأمین می‌شود و نقش رطوبت صعودی در فرآیند تخریب مصالح توسط نمک‌ها به دلیل عدم وجود سیستم دفعِ صحیح آب در بنا و اطراف آن بی تأثیر نیست. پیشنهادِ درمان در بنا که به‌منظور جلوگیری از پیشروی تخریب نمک‌ها، برداشتن نمک‌ها با روش مکانیکی که با توجه به محلول بودن نمک‌ها در آب و به‌منظور جلوگیری از انتقال دوباره‌ی نمک‌ها به‌صورت محلول در دیوار آجری توصیه شده است (Shirazi Nejad, 1996).

بررسی‌های انجام شده‌ی دیگر نشان می‌دهد رشد بلورها در سنگ‌های ازاره و قسمت‌های پایین دیوارها یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب است. منابع نمک‌ها ملاط مصرفی گچ‌وخاک به‌کار رفته در پی، خاک به‌کار رفته در فضای سبز اطراف دیوارها و آب‌های زیرزمینی است. بلوری شدن نمک‌ها به دو صورت شوره‌زنی روی سطح و یا نهان‌شکفتگی باعث تخریب به شکل پودری شدن و پوسته شدن در لایه‌های سطحی سنگ توف شده است. شوره‌زنی روی سطح سنگ‌ها منجر به تشکیل قشر نمک‌های نمکی متراکم و در مواردی نیز شوره‌های کرکی و سست شده است. در این بررسی پیشنهاد شده است راه حفاظتی مناسب به‌منظور نگه‌داری سنگ‌ها ایجاد زهکش است که از آن طریق رطوبت صعودی حذف شود که تنها برای متوقف ساختن نفوذ نمک‌های محلول جدید مناسب است. برای آسیب‌های ایجاد شده توسط رشد بلور نمک‌ها در قبل می‌باید از روش درمانی مستقیم مرمتی مانند نمک‌زدایی به همراه استحکام‌بخشی استفاده نمود. پس از نمک‌زدایی به‌منظور آب‌ران نمودن و درمان تخریب‌هایی نظیر پوسته شدن و پودری شدن بایست استحکام‌بخشی انجام شود (Kordi et al., 2011). تنها دو پژوهش فوق در ارتباط با مشکل نمک‌ها در ازاره‌ی سنگی و آسیب نمک‌های محلول بر سنگ‌های ازاره و دیوارهای بنا انجام شده است، با این‌حال رویکردی خاص در ارتباط با زدایش و کاهش نمک‌های محلول، قطع منشأ نمک و تدابیری برای جلوگیری از پیش‌بُرد این امر انجام نشده است. از این رو در راستای اهداف بحثِ حفاظت از سنگ‌های جبهه‌ی جنوب شرقی محوطه‌ی میراث جهانی گنبد سلطانیه بدون هیچ‌گونه دخالت در ماهیت سنگ‌ها، بررسی ساختار سنگ و عوامل تخریب سنگ‌ها در قالب مطالعات فن‌شناسی به‌صورت تعیین مکانیسم تخریب در سنگ‌ها ماهیت نمک‌های موجود در سنگ‌های ازاره و آسیب‌شناسی به‌صورت و پیشنهاداتی جهت اقدامات و راه‌کارهای مناسب در مقابله با عامل فرساینده نمک به‌منظور حفاظت و بقا عمر سنگ‌ها در این مقاله صورت پذیرفته است.

روش پژوهش

به‌منظور مطالعه و بررسی نمک‌های موجود و شناسایی سازو کار تخریب سنگ‌ها بر اثر بازتبلور نمک‌ها، با توجه به میزان شوره‌های موجود، سنگ‌های ازاره‌ی جبهه‌ی جنوب شرقی داخل بنای گنبد سلطانیه انتخاب گردید. گنبد سلطانیه، مقبره اولجایتو، در شهر سلطانیه در ۴۳ کیلومتری زنجان واقع است و در فهرست آثار میراث جهانی به ثبت رسیده است. این بنای تاریخی تجلی‌گاه هنر و معماری دوره ایلخانی است که در اواخر قرن هشتم به دستور الجایتو ساخته شده است. گنبد سلطانیه به سبک معماری و شیوه‌ی آذری ساخته

شـده اسـت. در ایـن شیـوه، پیمون‌بنـدی و بهره‌گیـری از عناصـر یکسـان بـرای دسـتاوردی بـه انـدام و سـازوار، بهره‌گیـری بیشـتر از هندسـه و طـراحی معمـاری، گوناگونی طـرح و سـاختمان‌هایی بـا اندازه‌هـای بسیـار بـزرگ در دسـتور کار قـرار می‌گرفتـه اسـت (Razani et al.,2022). سـنگ‌ها مصالـحی هسـتند در ازاره‌هـای داخـلی و دیـوار ارگ بیـرونی بنـای گنبـد سـلطانیه به‌صـورت گسـترده‌ای بـه‌کار بـرده شـدند. ایـن سـنگ‌ها بـه دلیـل اسـتفاده در پی بنـا و قرارگیـری در قسـمت پاییـنی بنـا نسـبت بـه مصالـح دیگـر از جملـه دیوارهـای آجـری بیشـتر تخریـب شـده اسـت (شـکل ۱). ازاره سـنگی بنـای گنبـد سـلطانیه، در پـای دیوارهـا نصـب شـده اسـت و ارتفـاع سـنگ‌ها حـدوداً ۵۰ سـانتی‌متر و ابعـاد بخـش مـورد مطالعـه در ایـن مقالـه ۸ متـر اسـت. سـنگ‌های ازاره‌ی مربـوط همـگی خاکسـتری- سـبز رنگ‌انـد. بـا ایـن حـال در بسیـاری از سـنگ‌های ردیـف پاییـن ازاره بـار سـنگ‌ها از بیـن رفتـه و سـطح سـنگ در طـول زمـان صـاف و ناهمـوار گشـته، اسـتحکام خـود را از دسـت داده و در بـرخی سـنگ‌های ردیـف پاییـن بخش‌هـایی از سـطح سـنگ در حـال جـدا شـدن اسـت. حضـور نمک‌هـا و تبلورشـان در سـطح و سـاختار لایـه سـطحی سـنگ، به‌عنـوان یـکی از عوامـل مهـمِ مخـرب در سـطح سـنگ‌ها و تأثیـر رطوبـت نفـوذی



شکل ۱. الف) موقعیت گنبد سلطانیه بر روی نقشه جغرافیایی ایران(Razani et al.,2022).

Figure 1. a) Position of Soltaniyeh Dome on Iran's geographic map (Razani et al., 2022).

شکل ۱. ب) تبلور نمک‌ها بر دیوار سنگی قلعه در محوطه‌ی بیرونی گنبد سلطانیه و از دست رفتن بخش‌هایی از سنگ به دلیل فشار تبلور.

Figure 1.b) Salt crystallization on the stone walls of the fortress in the outer area of the Soltaniyeh Dome, leading to the loss of parts of the stone due to crystallization pressure.

شکل ۲. حضور نمک‌ها موجب بدنما شدن ظاهر سنگ‌ها و سست شدن ساختار سنگ و ملاط بین سنگ‌ها شده است.

Figure 2. The presence of salts has caused the stone's appearance to deteriorate and weakened the structure of both the stone and the mortar between the stones.

قابل بررسی است، چرا که بروز این پدیده باعث وارد آمدن خسارات جدی به مصالح به‌کار رفته در ازاره، بدنما شدن ظاهر سنگ‌ها و سست شدن اتصالات شده است(شکل ۲). فرآیند تبلور نمک‌ها به عواملی نظیر نوع نمک‌ها، میزان رطوبت و تغییرات دمایی بستگی دارد. بدین ترتیب شناسایی نوع نمک‌ها، منشأ نمک‌ها و بررسی ساختار سنگ با به‌کارگیری آنالیزهای دستگاهی ضروری است تا از این طریق بتوان با اطلاعات به‌دست آمده راه‌حل حفاظتی مطلوب را به‌منظور کاهش مقادیر نمک موجود در سنگ‌ها و جلوگیری از پیشرفت تخریب را پیشنهاد داد.

فرآیند نمونه‌برداری و انتخاب نمونه‌ها از سنگ‌های معدن "ویر" جهت شناسایی خواص فیزیکی

نمونه‌های انتخاب شده برای آزمون‌های شناخت خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ، نشانگر میانگین واقعی نوع و درجه‌ی مرغوبیت سنگ مورد نظر بودند. وجود معدن سنگ در روستایی به نام "ویر" در نزدیکی شهرستان سلطانیه سبب شده که علاوه بر گنبد سلطانیه در پی بناهای دیگر، به‌عنوان مصالح بوم‌آورد مورد استفاده قرار گیرد، از این‌رو نمونه‌ها از سنگ‌های معدن "ویر" برداشت گردید. در نهایت ۲۰ نمونه در قالب‌های مکعب مستطیل با ابعاد ۱۰×۵×۵ سانتی‌متر بُرش داده شدند و سطوح آزمونه‌ها به وسیله‌ی دستگاه سنگ فرز صاف و پرداخت شد. در نمونه‌برداری از معدن ویر دقت شد از میان سنگ‌های مرمتی جدید، سنگ‌های تاریخی نمونه انتخاب گردد تا شرایط آزمایش به شرایط اصلی خود سنگ‌های ازاره نزدیک‌تر باشد (شکل ۳). به‌منظور مطالعه و بررسی شناخت ماهیت سنگ‌های ازاره و آسیب‌شناسی

شکل ۳. انتخاب نمونه از معدن سنگ ویر و برش نمونه‌ها در اندازه‌های استاندارد.

Figure 3. Sample selection from the Vir stone quarry and cutting the samples into standard sizes.

آن از خـود سـنگ‌ها نمونـه برداشـته شـد.

در مرحلـه آزمایشـگاهی ساختارشـناسی و بـررسی خـواص فیزیـکی سـنگ، آزمون‌هـای دسـتگاهی نظیـر شناسـایی ترکیـب شیمیـایی سـنگ (XRF)، شناسـایی ترکیـب فـازی نمک ـا (XRD)، شناسـایی ترکیـب فازی سـنگ (XRD)، مطالعـات کانی‌شـناسی سـنگ، میکروسـکوپ الکتـرونی روبـشی و آنالیـز تفکیک انـرژی پرتوایکـس (SEM-EDX) بـا هـدف شناسـایی ویژگی‌هـا و خصوصیـات فیزیـکی سـنگ‌های ازاره‌ی ایـوان وجـه جنـوب شـرقی گنبـد سـلطانیه بـا اسـتفاده از تحلیل‌هـای مبتـنی بـر روش‌هـای مذکـور صـورت گرفـت، همچنیـن اندازه‌گیـری درصـد تخلخـل سـنگ، جـذب آب مخصـوص سـنگ و تعییـن مقاومـت سـنگ در برابـر حملـه‌ی نمـک بـا القـاء نمـک به‌منظـور شـناخت بهتـر سـاختار متخلخـل و رفتـار آن در برابـر عوامـل محیـطی بـه‌علاوه ترکیـب فـازی نمک‌هـای (XRD) تشـکیل شـده بـر ازاره سـنگی وجـه جنوب‌شـرقی بنـای گنبـد سـلطانیه مـورد مطالعـه قـرار گرفتـه اسـت، در ادامـه منابـع نمـک و رطوبـت شناسـایی گشـته و فرآینـد آسیـب توصیـف داده شـده اسـت. در مرحلـه میـدانی نیـز بـا انجـام اقدامـاتی از قبیـل بررسی‌هـای میکروسـکوپی ارائـه‌ی پیشـنهاد مطلوب‌تریـن درمـان جهـت کاهـش نمک‌هـای ازاره‌ی سـنگی اقـدام شـده اسـت. در نهایـت نیز بـا اسـتفاده از روش تحلیـلی- توصیـفی و پـس از بـررسی و مطالعـه در رونـد بـه آزمایـش نهـادن فرضیـه، اطلاعـات حاصـل از یافته‌هـای تحقیـق و همچنیـن پیشـنهادات حفاظـتی ارائـه شـده اسـت. به‌منظـور دسـتیابی بـه اهـداف تحقیـق و فرضیـاتی مبتـنی بـر شناسـایی ماهیـت نمک‌هـا و بـررسی تأثیـرات مخـرب نمـک بـر سـنگ، سـؤالاتی کلیـدی از قبیـل: اصلی‌تریـن منابـع نمک‌هـا کـدام اسـت؟ بـا توجـه بـه آسیـب نمک‌هـا بـر مصالـح متخلخـل مطلوب‌تریـن روش درمـانی به‌منظـور کاهـش محتـوی نمک‌هـای محلـول در آن چیسـت؟ پیـش خواهـد آمـد کـه برخـوردی روشـمند را به‌منظـور پاسـخ‌دهی بـه ایـن سـؤال طلـب می‌کنـد. برخـورد روشـمند در قالـب پیش‌بُـرد تحقیق در وارد شـدن بـه مبحـث نمـک‌زدایی سـاختار متخلخـل و مطالعـات آنالیـزی در راسـتای اهـداف ذکـر شـده کـه همـه‌ی ایـن مباحـث در مقالـه پیـشِ‌رو مطـرح می‌گـردد.

نتایج و بحث

- شناسایی فرآیند آسیب

محـور مطالعـات آسیب‌شـناسی در سـنگ‌های تـوف ازاره‌ی ایـوان وجـه جنوب‌شـرقی بنـای گنبـد سـلطانیه بـر اسـاس شـناخت حالـت ظاهـری سـنگ‌ها (شـناخت علائـم)، شـناخت گونـه‌ی آسیـب و توصیـف آن، آزمـون بـرخی از آسیب‌هـا و یافتـن منشـأ و علـت آسیـب اسـت. دلایـل بـرخی آسیب‌هـای بـه وجـود آمـده در ایـن سـنگ‌ها موقعیـت بنـا و منطقـه‌ی جغرافیـایی بنـا بـاز می‌گـردد. مـواد سـازنده سـنگ‌های ازاره و عوامـل مختلـف محیـطی در فرسـودگی دخیـل هسـتند و ایـن عوامـل می‌توانـد تأثیـر فیزیـکی و شیمیـایی داشـته باشـد. تغییـرات سـاختاری در سـنگ‌های ازاره بـه صـورت از بیـن رفتـن سـطح سـنگ‌ها توسـط سـایش مکانیـکی، شـوره‌زنی روی سـطوح نـاشی از انـحلال نمک‌هـا و جابه‌جـایی نمـک از داخـل بـه سـطح، پوسـته شـدن سـطح سـنگ‌ها و تـورق سـنگ‌ها ازاره در نتیجـه‌ی تبلـور نمک‌هـای محلـول و انبسـاط و انقبـاض حـرارتی و رطوبـتی حاصـل شـده اسـت (Torraca, G, 2009, 85-87).

در ایـن بنـا کـه بـا آسیـب نمـک روبـه‌رو شـده اسـت، میـزان، توزیـع، نـوع نمـک و همچنیـن خاسـتگاه نمک‌هـا (کـه می‌توانـد نتیجـه‌ی رویـداد تاریـخی، شـرایط بیـرونی و از خـود مصالـح بـه‌کار رفتـه در بنـا باشـد) بـررسی شـده اسـت (شـکل ۳). نمک‌هـایی کـه در سـطح متبلـور می‌شـوند بـه تغییـرات رطوبـت نسـبی هـوا بسیـار حسـاس هسـتند و تحـت تکـرار چرخه‌هـای حـل شـدن/ متبلـور شـدن موجـب آسیب‌هـای شـدیدی می‌شـود (Torraca, G, 2009, 85-87 and Houck & Scherer, 2006). تخریب‌هـای وارده در اثـر فرآینـد تبلـور نمک‌هـا عبـارت اسـت از تخریب‌هـای فیزیـکی کـه در اثـر فشـارهای وارده بـر اثـر تبلـور و تغییـر درجـه هیدراسیـون اسـت کـه در نهایـت به‌صـورت سسـت شـدن، خـورد شـدن و ورقـه ورقـه شـدن سـنگ‌ها بـروز می‌کنـد. بدنمـا شـدن سـطح سـنگ‌ها بـا قشـری از نمک‌هـا کـه در اثـر متبلـور شـدن نمک‌هـا در طـول زمـان تشـکیل شـده اسـت و فشـار تبلـور موجـب خـرد شـدن و تضعیـف سـاختار سـنگ می‌شـود؛ بـا توجـه بـه نـوع نمک‌هـا و شـرایط محیـطی

موجـود ایـن سیسـتم از نظـر تغییـرات بـاز تبلـور و تغییـر درجـه هیدراسیـون فعّـال اسـت (Belmin & Siedel, 2005 and Bläuer Böhm, C, 2005).

- پوسته شدن در اثر نمک‌های محلول

پوسـته شـدن[۳] در لایه‌هـای سـطحی سـنگ بـر اثـر خشـک و تـر شـدن‌های متـوالی، تـورم بـرخی از کانی‌هـای آبدوسـت و فشـار تبلـور نمک‌هـا در سـطح و داخـل سـنگ اتفـاق می‌افتـد. رطوبـت بـا انـحلال بـا انـحلال یون‌هـای سـولفاتی موجـود در مصالـح بـه آسـانی در داخـل ریزترک‌هـا و تخلخـل نفـوذ می‌کنـد. یون‌هـای محلـول علاوه بـر تجزیـه کانی‌هـای ناپایـدار، در اثـر تغییـرات دمـایی در فصـول گـرم سـال آب خـود را از دسـت داده و متبلـور می‌شـوند و تبلـور ایـن نمک‌هـا فشـار زیـادی بـه دیـواره لایـه سـطحی و ریـز ترک‌هـا وارد می‌کنـد و تکـرار ایـن رونـد در نهایـت سـبب تـورق و پوسـته پوسـته شـدن سـنگ می‌شـود. ایـن آسیـب به‌صـورت پیـش رونـده بـوده و باعـث جـدا شـدن ورقه‌هـا یـا پولک‌هـایی از مصالـح می‌شـود. ایـن آسیـب باعـث در معـرض قـرار گرفتـن سـنگ‌ها در مقابـل ورود رطوبـت و سـایر عوامـل مهاجـم کـه در مقاومـت سـنگ‌ها تأثیـر سـوء ایجـاد می‌نماینـد، می‌گـردد. نتیجـه‌ی نهـایی پوسیـدگی حاصـل از نمـک، خـرد شـدن لایـه نـازک سـطحی یـا تشـکیل یـک برآمـدگی یـا ورقـه‌ای از سـنگ خواهـد بـود (Valenza & Scherer, 2007,1009-1010) (شـکل ۴).

- نقش رطوبت و تخلخل در هوازدگی

انتقـال آب از کـف سـاختمان بـه داخـل مصالـح متخلخـل، موجـب سسـت شـدن و در نتیجـه ریختـن قسـمت‌هایی از سـنگ‌ها می‌شـود. ایـن امـر بیش‌تـر در سـنگ‌های ازاره مشـاهده می‌شـود کـه در نهایـت فعـل و انفعـالات آب در حالت‌هـای مختلـف فیزیـکی منجـر بـه از بیـن رفتـن مـواد می‌شـود (Javani, 2010, p. 13). تخلخـل در جـذب، هدایـت رطوبـت، هـوازدگی، تخریب‌هـای ایجـاد شـده در سـنگ‌های ازاره‌ی مـورد نظـر هماننـد تشـکیل قشـر نمک‌هـا بـر سـطح و داخـل سـنگ، تخریـب نـاشی از تبلـور و انـحلال نمک‌هـا نقـش مؤثـری دارد. رطوبـت صعـودی بـا انـحلال و انتقـال نمک‌هـای محلـول سـبب تجزیـه کانی‌هـای موجـود در سـنگ می‌شـود، از طـرفی رطوبـت عامـل اصـلی در اعمـال فشـار مکانیـکی بـر سـاختار متخلخـل سـنگ اسـت؛ ایـن فشـار مکانیـکی در سـنگ بـا انـحلال و تبلـور نمک‌هـای محلـول و تغییـر حالـت رطوبـت موجـود در تخلخـل سـنگ در اثـر تغییـرات دمـایی ایجـاد می‌شـود.

- آسیب ناشی از ملاط -گچ- خاک- آهک

آب حاصـل از نـزولات، توسـط ناودان‌هـای تعبیـه شـده در طبقـات فوقـانی بـدون آن کـه بـه مجـرای خـاصی هدایـت شـوند، بـه پـای دیواره‌هـای بناهـا می‌ریـزد. ایـن سیسـتم ناقـص دفـع آب، بـا توجـه بـه طـولانی و سـنگین بـودن فصـل بـارش در منطقـه، موجـب گردیـده تـا جـذب رطوبـت توسـط پی و دیواره‌هـا صـورت گرفتـه و بـه همـراه آن مقادیـری از نمـک نیتـرات، وارد پی و دیواره‌هـا شـود.

ایـن آب نفـوذی موجـب حـل شـدن گـچ موجـود در ملاط مصـرفی در خـود می‌شـود و باعـث می‌شـود تـا در صـورت بـروز موقعیـت مناسـب شـوره‌زنی (پدیـد آمـدن

شکل ۴. پوسته پوسته شدن سطح سنگ‌های ازاره ایوان وجه جنوب‌شرقی بنای گنبد سلطانیه.

Figure 4. Flaking of the surface of the stone plinths in the southeastern porch of the Soltaniyeh Dome.

شکل ۵. پدید آمدن شرایط تبخیر و تشکیل شوره بر سطح سنگ و ملاط.

Figure 5. Formation of evaporation conditions and efflorescence on the surface of the stone and mortar.

شرایط تبخیر) قشری از نمک تشکیل شود (شکل 5)(Rahmani, 1999, p. 73). ملاط‌ها معمولاً منافذ کوچک‌تری نسبت به منافذ سنگ‌ها دارند، از این رو می‌توانند رطوبت را از بستر جذب کنند؛ در نتیجه، احتمال آن می‌رود قشر نمک‌ها در ملاط تجمع یابند (Lubelli & Van Hess, 2014, 128). از طرف دیگر، برداشتن خاک پشت دیواره‌ها به‌منظور انجام کاوش‌های باستان‌شناسی، باعث برهم خوردن ناگهانی تعادل سیستم رطوبتی دیواره‌ها شده و به دنبال آن افزایش تبخیر و تبلور بروز خواهد کرد .

- نتایج شناخت خواص فیزیکی سنگ و شناسایی سنگ به روش دستگاهی

میزان جذب و درصد تخلخل زیاد در سنگ موجب افزایش جذب و نفوذ آب و در نتیجه فعال شدن مکانیسم‌های هوازدگی شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی نظیر انحلال، باز تبلور می‌گردد؛ در نتیجه آسیب‌هایی همانند نهان شکفتگی نمک‌های محلول در سنگ و لایه لایه شدن و پودر شدگی را در پی دارد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد سنگ ازاره، سنگ فشرده‌ای نیست و تخلخل نسبتاً بالایی دارد و این امر سبب جذب رطوبت بالای سنگ به میزان درصد موجود شده است (جدول ۱).

در چرخه‌های مختلف آزمون مقاومت در برابر القا نمک در بدنه و سطح نمونه سنگ‌ها تغییراتی از قبیل ترک‌خوردگی و پوسته‌شدن به وجود آمد (شکل ۶)، پس از ثبت این شرایط، چرخه ادامه داده شد

شکل ۶. ترک خوردن و پوسته شدن نمونه‌های آزمایشگاهی سنگ پس از تکرار ۱۶ چرخه‌ی آزمون مقاومت در برابر نمک.

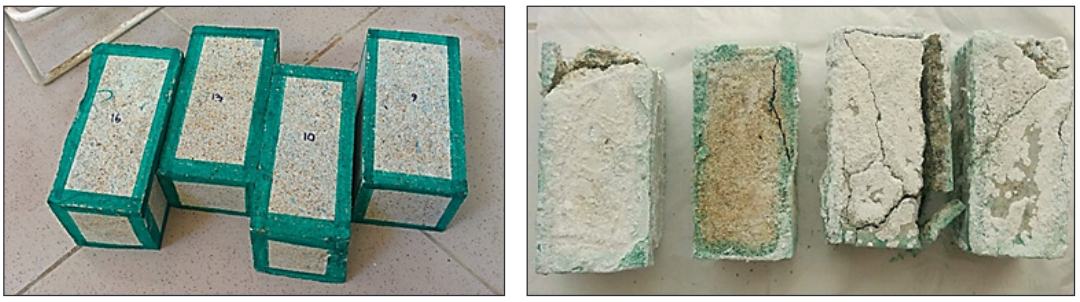
Figure 6. Cracking and flaking of laboratory stone samples after 16 cycles of salt resistance testing.

تا سنگ‌ها از بین بروند؛ عموماً بعد از تکرار تعداد چرخه‌هایی که وابسته به هر سنگ متفاوت است، سنگ شروع به کاهش وزن می‌کند و این کاهش وزن ناشی از پوسته شدن است. تا نهایت پس از تکرار ۳۵ چرخه بر ۴ نمونه از سنگ‌ها، به دلیل فشار بیش از حد تبلور نمک‌ها دچار ترک‌های عمیق و در نهایت باز شدن سنگ‌ها شد (شکل ۷). در این رابطه می‌توان این‌گونه اظهار نمود که سنگ مورد نظر بر اساس استاندارد EN 12370: 1999 و در مقابل چرخه‌های قرارگیری در نمک سولفات سدیم مقاومت کمی دارد و به صورت پوسته‌شدن، ترک‌های عمیق و در نهایت جدایش و باز شدن سنگ از هم از بین می‌روند.

جدول ۱. مطالعات آزمایشگاهی، اهداف آزمایش نمونه‌های تاریخی و نمونه‌ی سالم و مراجع استانداردها.

Table 1. Laboratory studies, objectives of testing historical and healthy samples, and standard references.

آزمون‌ها	گونه آزمایش	روش آماده‌سازی نمونه	هدف از انجام آزمایش	نتایج آزمون	استاندارد
شناخت ویژگی‌های فیزیکی	مقاومت در برابر نمک	نمونه در قالب مکعب مستطیل	تعیین میزان مقاومت سنگ در برابر آسیب نمک	مقاومت کم	EN 12370: 1999
	درصد تخلخل	نمونه در قالب مکعب مستطیل	تعیین میزان چگالی خشک و تخلخل کل برای درک رفتار هوازدگی سنگ	تخلخل کل: ۹٪	ISRM, 1979
	درصد جذب آب	نمونه در قالب مکعب مستطیل	تعیین ضریب جذب آب سنگ	مقدار متوسط جذب آب در فاصله‌ی زمانی ۲۴ ساعت ۴/۴٪ است	ASTM D1585, 2004



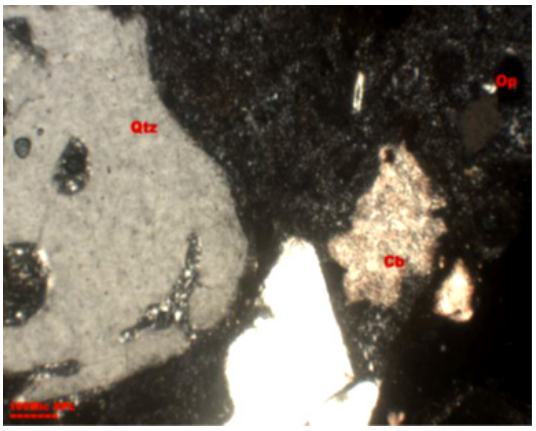
شکل ۷. (راست) نمایش سنگ‌ها در وضعیت سالم و قبل از شروع آزمون مقاومت سنگ‌ها در برابر نمک و (چپ) وضعیت سنگ‌ها پس از طی شدن ۳۵ چرخه.

Figure 7. (Right) Stones in their healthy state before the salt resistance test and (left) the condition of the stones after 35 cycles.

- مطالعات کانی‌شناسی سنگ

آنالیزهای پتروگرافی مقطع نازک نمونه‌ها جهت مطالعه‌ی کانی‌شناختی اجزاء تشکیل‌دهنده سنگ‌ها به‌عنوان روشی تکمیلی در کنار آنالیزی XRF, XRD تحت نور پُلاریزان با استفاده از میکروسکوپ نوری عبوری انجام گرفت. نمونه‌ی سنگ خاکستری- سبز رنگ به‌کار رفته در ازاره‌ی ایوان وجه جنوب شرقی بنای گنبد سلطانیه متشکل از فنوکریست‌های بلوری، شامل پلاژیوکلاز است و اکثراً این فنوکریست‌ها به کانی‌های ثانویه مانند کربنات، سریسیت و کانی‌های رسی تبدیل می‌شوند و قطعات سنگی بوده که در خمیره شیشه‌ای جای دارند (شکل ۸). ۱-کوارتز در ابعاد خاکستر ریز- درشت بی‌شکل گاه با حواشی خرد شده و خوردگی خلیجی دیده می‌شود که این مهم نشان‌دهنده‌ی عدم تعادل ماگما را در هنگام تبلور سنگ نشان می‌دهد.۲- فازهای بلوری که به‌طور کلی با کربنات و کمی اکسید اُپک جایگزین شده و شدت تجزیه شناسایی دقیق را نا مقدور ساخته است. ۳- لیتیک و قطعات شیشه‌ای پراکنده نهان و خیلی ریز بلور تجزیه و دگرسان شده که گاه حاوی کانی

رسی فـراوان اسـت. تصاویـر میکروسـکوپی نشـان دهنده‌ی آن اسـت کـه ایـن سـنگ پـر از حفـره اسـت و حفـرات در اغلـب مـوارد بـا کوارتـز پـر شـده‌اند (شـکل ۸). در زمینـه‌ی سـنگ بقایـای تراشـه‌های شیشـه و گاه شیشـه اسیـدی جریـانی کـه بـه سیلیـس- فلدسـپار و کانی رسی دِوتریفیـه[۴] شـده (زمـانی کـه طی فرآینـدی زمینـه‌ی شیشـه از دسـت می‌رود و بـه سیلیـس، فلدسـپات و کانی‌هـای رسی تجزیـه و تبدیـل می‌شـود)، خـرده بلورهـای فلدسـپار، کربنـات (گاه آغشـته بـه اکسیـد آهـن) و کـمی کلریـت بی‌شـکل و کانی‌هـای کـدر- اکسیـد آهـن (اکسیـد و ئیدروکسیـد آهـن) پدیـدار اسـت. در ایـن سـنگ می‌تـوان آلتراسیـون انـواع کانی‌شـناسی را هماننـد فروپـاشی پلاژیوکلاز فلدسـپار بـه خاک‌هـای رُس و آلتراسیـون بیوتیـت بـه اکسیـد آهـن



شکل ۸. عکس میکروسکوپی سنگ لیتیک با بافت پرفیروکلاستیک در نور XPL با بزرگ‌نمایی X100 دیده می‌شود: Qtz کوارتز در ابعاد خاکستری درشت با حواشی خرد شده و خوردگی خلیجی، آثار بلوری که به‌طور کلی با کربنات و کمی اکسید اپک Op جایگزین شده و لیتیک و قطعات شیشه‌ای پراکنده نهان و خیلی ریز بلور تجزیه و دگرسان شده که گاه حاوی کانی رسی فراوان است.

Figure 8. Microscopic image of lithic stone with a porphyroclastic texture under XPL light at 100x magnification: Qtz (quartz) appears as coarse gray grains with fragmented edges and bay-shaped corrosion; crystalline remnants are generally replaced by carbonates and minor opaque oxides (Op); lithic fragments and scattered glass shards are finely decomposed and altered, often containing abundant clay minerals.

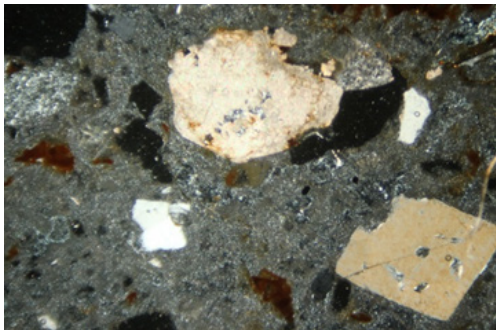
را مشـاهده نمـود. کانی‌هـای ثانـوی ایـن سـنگ عبـارت اسـت از کانی رسی، سـریسیت، کربنات، کلریـت و کانی‌های فـرعی آن شـامل کانی‌هـای کـدر- اکسیـد آهـن اسـت. نام سـنگ لیتیـک کریسـتال تـوف شیشـه‌ای ریولیـتی تجزیـه شـده و بافـت آن پرفیروکلاسـتیک اسـت و زمینـه‌ای ویتروکلاسـتیک و جریـانی دارد.

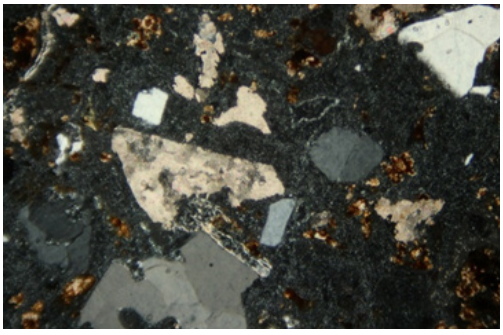
کانی‌هـای اصـلی تشـکیل‌دهنده‌ی توف‌هـا شـامل پلاژیـوکلاز، سـانیدین، پیروکسـن، آمفیبـول، کوارتـز و کانی‌هـای فـرعی آن‌هـا آپاتیـت، کانی‌هـای اپـک، زیرکـن، اسـفن، روتیـل، اکسیدهـا و هیدروکسیدهـای آهـن اسـت. توف‌هـایی کـه سـاختار متبلـور دارنـد نسـبتاً در برابـر هـوازدگی مقـاوم هسـتند به‌خصـوص زمـانی کـه بـا لایه‌ی پاتیـن انـدکی از کربنـات و سـولفات بـا سـاختار ریزبلوریـن پوشیـده شـدند (Reedy, 2008. 11-12-16) سـنگ مـورد نظـر در رسـاله از نـوع تـوف بـه رنـگ سـبز بی‌روح و کمرنـگی توصیـف می‌شـود کـه دارای زمینـه‌ای عمدتـاً شیشـه‌ای بـا کوارتـز و ریـز سـاختارهای آلـکالی فلدسـپار اسـت. ایـن سـنگ تـوف می‌توانـد شـامل کریسـتال‌های ریزدانـه باشـد و یـا بـا ماتریکـس شیشـه‌ای کـه عمدتـاً شـامل کوارتـز، سیلیکای ثانویـه و گاهی اوقـات میکا بلورین شـده باشـد. مقطـع میکروسـکوپی ایـن سـنگ زمینـه‌ی شیشـه‌ای بـا کوارتزهـای پراکنـده و فنوکریسـت‌های فلدسـپار را نشـان می‌دهـد (شـکل ۹)(Reedy, 2008. 12).

بررسی‌هـا نشـان داده اسـت کـه از سـنگ‌های تـوف در مصالـح سـاختمانی بـه دلیـل مقاومـت در برابـر هـوازدگی و هدایـت حـرارتی پاییـن آن به‌طـور گسـترده‌ای اسـتفاده شـده اسـت. تصاویـر مقطـع نـازک میکروسـکوپی نشـان می‌دهـد کـه ۵۰ درسـد سـنگ از کانی‌هـا و اجـزای شیشـه‌ای کـه در ماتریکـس شیشـه‌ای چیـده شـده‌اند تشـکیل یافتـه اسـت (شـکل ۹)(Reedy, 2008. 13).

- شناسایی ترکیب شیمیایی سنگ (XRF):

جهـت شناسـایی و تعییـن کـمّی عناصـر در نمونه‌ی سـنگ تاریـخی ازاره‌ی ایـوان وجـه جنـوب شـرقی بنـای گنبـد سـلطانیه آزمایـش XRF انجـام شـد. نتایـج آزمایش نشـان دهنـده‌ی آن اسـت کـه میـزان عناصـر (SiO_2) و (Al_2O_3) از دیگـر عناصـر موجـود در سـنگ بیشـتر اسـت و در نتیجه ایـن دو، عناصـر اصـلی سـنگ هسـتند (جـدول ۲).





شکل ۹. تصویر در نور XPL با بزرگ‌نمایی X40 دیده می‌شود: این سنگ توف عمدتاً از زمینه‌ی شیشه‌ای همراه با کوارتز پراکنده و فنوکریست‌های فلدسپار تشکیل شده است. تصویر میکروسکوپی در نور XPL با بزرگ‌نمایی X40 دیده می‌شود: این توف مقادیر زیادی از کانی‌ها و اجزای شیشه‌ای که در ماتریکس شیشه‌ای چیده شده‌اند، در خود دارد.

Figure 9. Image under XPL light at 40x magnification: This tuff stone primarily consists of a glassy matrix with scattered quartz and feldspar phenocrysts. The microscopic image under XPL light at 40x magnification shows that this tuff contains a significant amount of minerals and glassy components arranged within the glassy matrix.

جدول ۲. آنالیز تشخیص عنصری (XRF) نمونه‌ی سنگ تاریخی ازاره ایوان وجه جنوب شرقی بنای گنبد سلطانیه.

Table 2. Elemental analysis (XRF) results of the historical stone plinth sample from the southeastern porch of the Soltaniyeh Dome.

Compound	Concentration (%w/w)
SiO_2	73.59
Al_2O_3	11.89
CaO	1.65
Fe_2O_3	1.63
K_2O	1.59
Na_2O	0.46
MgO	0.22
TiO_2	0.215
SiO_3	0.161
P_2O_5	0.058
MnO	0.016
L.O.I	8.34

- شناسایی ترکیب فازی سنگ (XRD)

آزمایش XRD جهت شناسایی و تشخیص فازهای کریستالی تشکیل شده در نمونه‌ها و تعیین کیفی و نیمه‌کمی کریستال‌ها به روش پودری انجام می‌شود. با توجه به پیک[5]، مطالعه و بررسی نمودار به دست آمده از ساختار سنگ مورد استفاده در ازاره‌ی ایوان جبهه‌ی جنوب‌شرقی بنای گنبد سلطانیه به کمک روش پراش پرتوایکس به خوبی نشان‌دهنده‌ی حضور فازهای شاخص اصلی همانند کوارتز (SiO_2) و کائولینیت ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) است که پایه‌ی اصلی سنگ ازاره بنای مربوطه را تشکیل می‌دهد. فاز فرعی ارتوکلاز ($KAlSi_3O_8$) و ریز فاز فرعی کلسیت ($CaCO_3$) حدود ۵ درصد از ترکیب سنگ را به خود اختصاص داده است (جدول ۳). فاز شاخص کوارتز به‌عنوان ترکیب سیلیسی سنگ، اجزاء اصلی سنگ‌های آذرین بیرونی از جمله توف را تشکیل می‌دهد.

جدول ۳. نتایج آنالیز (XRD) سنگ ازاره‌ی ایوان وجه جنوب‌شرقی بنای گنبد سلطانیه.

Table 3. XRD analysis results of the stone plinths from the southeastern porch of the Soltaniyeh Dome

Phases	Chemical formula	Quantitative percentage
Quartz	SiO_2	Major Phase(s)
Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Major Phase(s)
Orthoclase	$KAlSi_3O_8$	Minor Phase(s)
Calcite	$CaCO_3$	Trace Phase(s)

مطالعـات کانی شـناسی نشـان‌دهنده‌ی ایـن مهـم اسـت کـه نمونه‌ی سـنگ مـورد نظـر از نـوع آذر آواری بـا فازهای شـاخص کوارتـز و کائولینیـت بـه همـراه کانی‌هـای رسی، کلسیـت و کلریـت اسـت. از جملـه ویژگی‌هـای بـارز ایـن سـنگ تخلخـل زیـاد آن اسـت؛ قسـمت‌های متخلخـل در تصاویـر پتروگـرافی بـه رنـگ خاکسـتری روشـن مشـخص اسـت. در مجمـوع، تصاویـر مقطـع نـازک پتروگـرافی نتایج آنالیـز پـراش پرتوایکـس را تأییـد می‌نمایـد. در طیـف پراش پرتوایکـس نیـز ایـن کانی‌هـا بـه دسـت آمـده کـه تأییـد کننـده تـوف و آذریـن بـودن سـنگ‌های بـه‌کار بـرده شـده در ازاره‌ی ایـوان وجـه جنوب‌شـرقی بنـای گنبـد سـلطانیه اسـت. سـنگ تـوف سـبک اسـت امـا بـه انـدازه‌ی کافی اسـتحکام دارد کـه بـرای سـازه‌های سـاختمانی مناسـب باشـد و در سـاختمان‌ها مـورد اسـتفاده قـرار بگیـرد (Reedy, 2008. 11).

- نتایج شناسایی ترکیب فازی نمک‌ها (XRD)

بـر اسـاس نتایـج به‌دسـت آمـده از آنالیـز XRD نمک‌های نیتـرات سـدیم (NaNO3)، هالیـت (NaCl) نیتـر، پتاسیـم نیتـرات، (KNO_3)، هگزاهیـدرات ($MgSO_4,6H_2O$) بـه مقـدار زیـاد و کوارتـز (SiO_2) بـه مقـدار کـم بـر سـطح سـنگ شناسـایی گردیـد (جـدول ۴). گونه‌هـای مختلـف رسـوبِ نمـک از یـک سیسـتم چنـد جـزئی، به‌طـور قابـل توجـهی متأثـر از نـوع مصالـح بـه‌کار رفتـه در بنـا اسـت؛ بنابرایـن نـوع نمـک می‌توانـد نشـانه‌ای از منشـأ باشـد.

جدول۴. نتایج آنالیز XRD نمک‌ها.

Table 4. XRD analysis results of the salts.

Phases	Chemical formula	Quantitative percentage
Nitratine	NaNO3	Major Phase(s)
Halite	NaCl	Major Phase(s)
Nitre	KNO3	Major Phase(s)
Hexahydrite	MgSO4, 6H2O	Major Phase(s)
Quartz	SiO2	Minor Phase(s)

- منشأ نمک‌ها

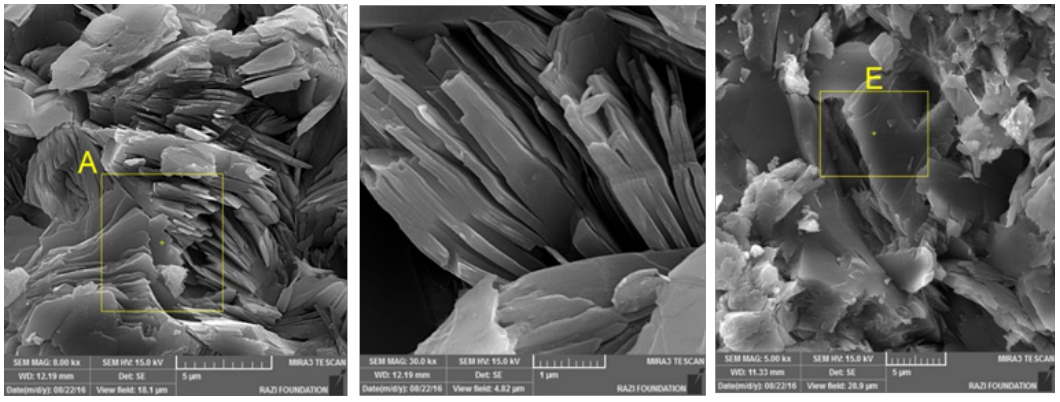
منشـأ نمک‌هـا در مصالـح سـاختمانی را می‌تـوان در سـنگ‌های سـاختمانی، ملاط مصـرفی، خـاک، مـواد مرمـتی، هـوای آلـوده، مـواد ضـد یـخ کـه حـاوی نمـک هسـتند، ارگانیسـم‌ها و منابـع ناشـناخته در نظـر گرفـت (Charola, 2013, 328). در خصـوص سـنگ‌های ازاره‌ی بنـای گنبـد سـلطانیه، منبـع نمک‌هـا، ملاط مصـرفی (کـه ترکیـبی از گـچ، خـاک و مقـدار کـمی آهـک اسـت) و خاک پشـت دیواره‌هـا اسـت. نمک‌هـای $MgSO_4,6H_2O$ از ملاط، نیتـر (KNO_3) و نیتـرات سـدیم ($NaNO_3$) نـاشی از غلظـت بـالای نیتـرات اسـت کـه بـا مسـکونی بـودن زمین‌هـای اطـراف گنبـد در سـال‌های گذشـته، مجـاورت دیواره‌هـا بـا گورسـتان و اقتصـاد دامـداری منطقه رابطـه‌ای مسـتقیم دارد. عامـل لازم دیگـر بـرای تشـکیل یـک سیسـتم فعـال تبلـور رطوبـت اسـت کـه ایـن رطوبت می‌توانـد رطوبـت صعـودی موجـود در دیواره‌هـا و پی بنـا باشـد و دلیـل آن عـدم وجـود سیسـتم دفـع آب صحیـح در بنـا و اطـراف آن اسـت. نمک‌هـا از آنیون‌هـای سـولفات، کربنـات، نیتـرات و کلـر در ترکیـب با فلـزات قلیایی سـدیم، پتاسیـم و غیـره تولیـد می‌شـوند. بـر اسـاس نتایـج به‌دسـت آمـده نیتراتیـن ($NaNO_3$)، بـا سـاختار بلـوری سـه گـوش و دو پهلـو دارای بیش‌تریـن مقـدار در ترکیـب اسـت و از حلالیـت بـالایی در آب (۷۳ گـرم در ۱۰۰ میلی‌لیتـر آب) برخـوردار بـوده و در رطوبـت نسـبی بـالای ۹۴ درصـد، حـل می‌شـود. پـس از آن هالیـت (NaCl) دومیـن ترکیـبی اسـت کـه دارای بیش‌تریـن مقـدار اسـت دارای حلالیـت بسیـار بـالایی بـوده و در رطوبـت نسـبی بـالای ۵۴ درصـد محلـول می‌شـوند. بـا توجـه بـه حلالیـت بسیـار بـالای ایـن دو نمـک بـه همـراه نیتـر (KNO_3)، همـراه بـا تغییـرات رطوبـت نسـبی در بنـا، آسـیب آن‌هـا قابـل توجـه اسـت. منیزیـم سـولفات ($MgSO_4,6H_2O$) از آنجـایی کـه در برابـر تغییـرات رطوبـت نسـبی بسیـار حسـاس اسـت، نمـک بسیـار خطرنـاکی اسـت. ایـن مهـم بـه دلیـل ایـن واقعیـت اسـت کـه ایـن نمـک چندیـن فـاز کریسـتالی هیدراتـه دارد و بـه همیـن دلیـل می‌توانـد متحمـل چندیـن وضعیـت هیدراتـه در پاسـخ بـه نوسـانات رطوبـت نسـبی شـود کـه در نهایـت منجـر بـه تخریـب سـنگ می‌شـود (Heritage et al, 2014, 105).

- فرسودگی ناشی از نمک‌های محلول

آسیب اصلی که در سنگ‌های ازاره‌ی ایوان وجه جنوب‌شرقی بنای گنبد سلطانیه دیده می‌شود، تبلور نمک‌های محلول در سنگ‌ها است. رطوبت صعودی سبب انحلال یون‌های کربناتی و سولفاتی موجود در مصالح بنا شده از راه تخلخل به درون سنگ نفوذ می‌کند. این محلول بعد از نفوذ با تأثیر متقابل بر کانی‌های ناپایدار کانی‌های رسی و کلسیت واکنش داده و سبب تجزیه و تبدیل آن‌ها به نمک‌های مختلف کربناتی و سولفاتی می‌شود. وجود مولکول آب (آب تبلور) در ساختار شیمیایی نمک‌هایی همانند سدیم سولفات ($Na_2SO_4.10H_2O$) و هگزاهیدرات ($MgSO_4,6H_2O$) سبب افزایش حجم آن‌ها شده و این افزایش حجم با فشار زیادی همراه است و در نهایت موجب شکسته شدن اتصالات بین کانی‌ها می‌گردد (Robinson, Williams. 1997). نمک‌ها ممکن است در سنگ و پیش از به کارگیری آن در ساختمان وجود داشته باشد و یا احتمالاً از منابع خارجی همانند: الف) مواد اتصال و بندگیری، ب) خاک و ج) جوّ حاصل شوند. نمک‌های محلول موجود در خاک‌ها یکی از عوامل اصلی در هوازدگی سنگ‌های آذرین مورد استفاده در ساختمان‌ها و بناهای تاریخی هستند. این نمک‌ها موجب از بین رفتن انسجام میان دانه‌های معدنی که در نهایت منجر به تجزیه‌ی خود دانه‌ها می‌شود هستند. تخریب موجود با فرآیند تبلور و انحلال نمک‌ها، اغلب کلرید سدیم، در داخل سنگ‌ها حاصل می‌شود، بنابراین از دلایل این آسیب می‌توان به وجود نمک‌های محلول در آب، نفوذپذیری سنگ، سرعت تبخیر و چرخه‌های تر و خشک اشاره کرد. فرآیند تخریب نمک‌ها به صورت انحلال، تبلور و آب‌گیری نمک‌ها در درون سنگ‌ها است. تبلور نمک‌ها در منافذ سنگ در زمانی که غلظت نمک محلول به سطح فوق اشباع می‌رسد، اتفاق می‌افتد؛ زمانی که نمک متبلور می‌شود به دیواره‌های منافذ موجود فشار می‌آورد که این فشار وارد شده، می‌تواند بیش‌تر از توان مقاومت و تحمل مکانیکی سنگ باشد و این مهم منجر به ایجاد شکاف جدید در سنگ می‌شود که این شکاف به نوبه‌ی خود باعث افزایش تخلخل سنگ شده و در نهایت از دست رفتن انسجام میان دانه‌های معدنی سنگ می‌شود. نمک متبلور شده با وارد شدن رطوبت یا بخار آبی که وارد سنگ می‌شود دوباره محلول شده و به خود آب می‌گیرد و می‌تواند در صورت وجود فصل دیگری از خشک شدن دوباره متبلور شده و موجب تخریب بیش‌تر سنگ شود (Rivas, T et al, 2010, 766). مکانیسم تخریب به آن صورت است که نمک‌های محلول (سولفات، کربنات، نیترات و کلرور) همراه با آب در منافذ سنگ داخل می‌شود و سپس بر اثر تبخیر و از دست دادن آب بر سطوح سنگ و ملاط متبلور می‌شوند (دهکردی، ۱۳۸۶، ۲۲). میزان رطوبت و درجه حرارت محیط، تخلخل سنگ، نفوذ پذیری آن، تعداد چرخه‌های تر و خشک، موقعیت قرارگیری مصالح در بنا و حلالیت نمک‌ها می‌تواند بر میزان شوره‌ها و شکل آن‌ها تأثیر بگذارد. در صورتی که تبلور نمک‌ها بر سطح سنگ مشاهده شود علت آن پایین بودن سرعت تبخیر در سطح سنگ‌ها است و موجب ایجاد آسیب تورق بر سطح سنگ می‌شود. حال اگر تبخیر در مدت زمان کوتاهی در سطح سنگ‌ها صورت بگیرد، نمک‌های محلول در زیر لایه‌های سطحی ته نشین و متبلور می‌شوند که در اصطلاح این پدیده نهان‌شکفتگی نامیده می‌شود (Vergès-Belmin, 2011, p. 62). قسمت‌هایی از سنگ‌های ازاره در طول زمان تراکم‌شان کمتر شده و آسیب‌پذیرتر هستند و بخش‌هایی از سنگ‌ها جدا شده است.

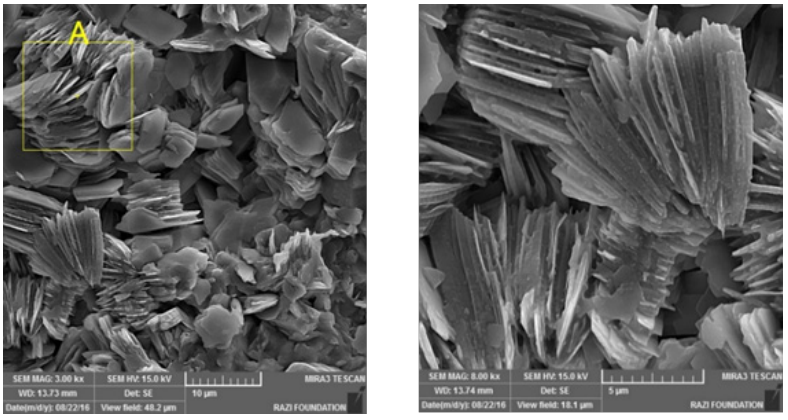
- شناسایی ریز ساختار سنگ با استفاده از (SEM-EDX)

به‌منظور شناخت بهتر ساختار و مقایسه آسیب و تغییرات موجود در نمونه‌ی سالم و نمونه‌ی تاریخی، از سنگ‌های ازاره، سنگ سالمِ معدن نمونه‌برداری شد. تصویر میکروسکوپ الکترونی در مجموعه تصاویر (۱۰) به همراه جدول نتایج آنالیز EDS (جدول ۵) از سنگ توف سالم برداشته شده از معدن نشان می‌دهد که ورقه‌های کائولینیت دچار هوازدگی نشده و انسجام و فشردگی مطلوب را دارند. در مقابل مجموعه اشکال (۱۱) از سنگ تاریخی ازاره ورقه‌های کائولینت که به



شکل ۱۰. تصویر SEM از ساختار ورقه‌ای کائولینیت نمونه سنگ سالم.

Figure 10. SEM image of the sheet-like structure of kaolinite in the healthy stone sample.



شکل ۱۱. تصویر SEM تخریب بلورهای کائولینیت همراه با شکستگی در لبه‌ها و بی‌نظمی در ساختار ورقه‌ای شکل آن در نمونه سنگ تاریخی.

Figure 11. SEM image showing the deterioration of kaolinite crystals, with fractures at the edges and disorganization in the sheet-like structure of the historical stone sample.

شکل نامنظم و از هم باز شده است را نمایان می‌کنند که نشان از جذب رطوبت و تبلور نمک‌ها بر ساختار و در نهایت تخریب سطح سنگ‌ها دارد. از آنجا که وجود کانی کائولینیت با ساختار ورقه‌ای، عاملی در جذب و انتقال رطوبت در لایه‌های سطحی است، این عامل در کنار تخلخل زیاد و به تبع آن قابلیت جذب رطوبت بالا، سبب جذب و انتقال رطوبت به همراه نمک‌های محلول در ساختار سنگ می‌شود.

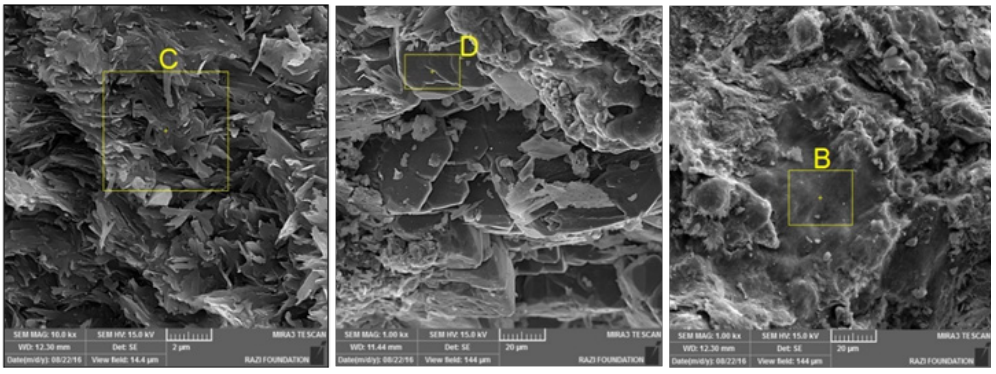
در شکل ۱۱ در بزرگنمایی ۸ هزار برابر به‌وضوح دانه‌هایی روی ورقه‌های کائولینیت مشاهده می‌شود که در نمونه‌ی سالم این نقطه‌ها حضور ندارند. از لحاظ مورفولوژیکی نمونه‌ی تاریخی تغییر پیدا کرده است، ورقه‌های کائولینیت در نمونه‌ی تاریخی از هم باز شده و در نمونه‌ی سالم ساختار ورقه‌ای شکل به هم فشرده‌تر است. نتایج عنصری شکل ۱۱ مقادیری از کلر و سدیم را در ناحیه‌ی تخریب شده سنگ تاریخی نشان می‌دهد که در آنالیز عنصری نمونه سالم به میزان بسیار کمی مشاهده می‌شود (جدول ۶).

تصویر میکروسکوپ الکترونی (مجموعه اشکال ۱۲) به همراه جدول نتایج آنالیز EDS (جدول ۶) از سنگ توف لیتیک زمینه سنگ سالم را نشان می‌دهد (تصویر چپ) که ذرات رسی کانی کوارتز را احاطه کردند. تصویر وسط

جدول ۵. نتایج آنالیز عنصری از سنگ‌های سالم و تاریخی ازاره‌ی ایوان وجه جنوب‌شرقی سلطانیه.

Table 5. Elemental analysis results of healthy and historical stone plinths from the southeastern porch of the Soltaniyeh Dome.

%W SampleName	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	C
سنگ سالم (A)	59.54	0.69	0.53	18.47	18.22	1.37	0.30	0.31	0.15	0.42	-
سنگ تاریخی و هوازده (A)	57.41	1.67	1.23	13.62	14.48	-	5.14	3.12	3.33	-	-
سنگ سالم (E)	48.92	0.86	0.75	23.39	24.42	-	0.62	0.40	0.21	0.45	-



شکل ۱۲. بافت سنگ توف لیتیک که کانی‌های رسی، کائولینیت و بلور کوارتز در آن مشخص است.

Figure 12. Texture of lithic tuff stone, showing clay minerals, kaolinite, and quartz crystals.

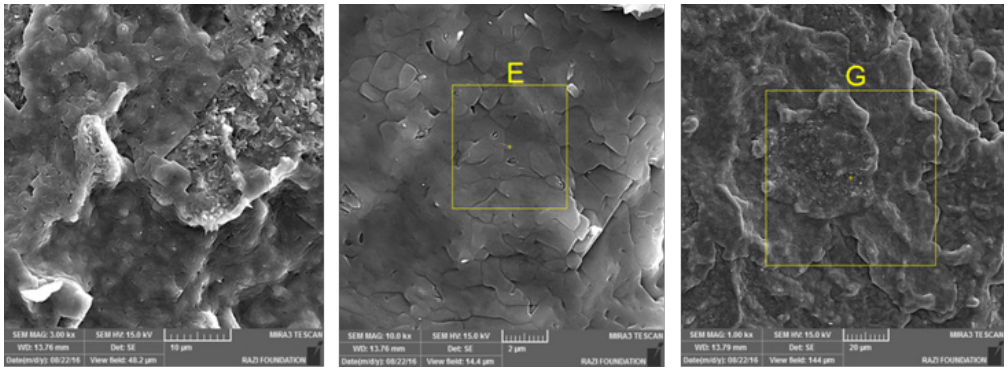
و سمت راست به ترتیب کانی‌های رسی: کائولینیت را که به صورت ورقه‌های شش ضلعی مشخص در زمینه‌ی سنگ است و و کانی کلسیت را نشان می‌دهد.

وجود کانی کائولینیت با ساختار ورقه‌ای، عاملی در جذب و انتقال رطوبت در لایه‌های سطحی است. این عامل در کنار تخلخل زیاد و به تبع آن قابلیت جذب

جدول ۶. نتایج آنالیز عنصری از سنگ‌های سالم توف از معدن روستای ویر.

Table 6. Elemental analysis results of healthy tuff stones from the Vir village quarry.

/%W SampleName	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	C
سنگ سالم	44.69	0.53	1.98	11.35	23.94	5.88	0.26	6.71	0.39	4.28	-
سنگ سالم	44.60	0.51	2.09	11.40	25.06	2.28	0.29	7.33	0.46	5.97	-
سنگ سالم	35.09	-	-	-	-	-	-	-	64.91		4.10



شکل ۱۳. (از راست به ترتیب الف، ب و ج) حضور نمک هالیت در زمینه‌ی سنگ تاریخی.

Figure 13. (From right to left: a, b, and c) Presence of halite salt in the matrix of the historical stone.

رطوبت بالا، سبب جذب و انتقال رطوبت به همراه نمک‌های محلول در ساختار سنگ می‌شود. دلیل از بین رفتن کانی‌های رسی در قسمت لبه‌ها، احتمالاً به علت حضور نمک بوده است.

در مجموعه تصاویر ۱۳ ساختار نمک موجود در زمینه سنگ تاریخی مشاهده می‌شود. شکل ۱۳ (ج) حضور یون‌های نمک در زمینه‌ی سنگ و بین ساختار ورقه‌ای شکل کائولینیت نشان می‌دهد. در شکل ۱۳ (ب) تصویر نمک‌ها با بزرگ‌نمایی ۱۰ هزار برابر مشاهده می‌شود؛ نتایج آنالیز عنصری نشان‌دهنده‌ی آن است که عناصر سدیم، کلر و آهن است. آنالیز عنصری شکل ۱۳ (الف) علاوه بر عناصر ذکر شده، سولفور نیز حضور دارد (جدول ۷).

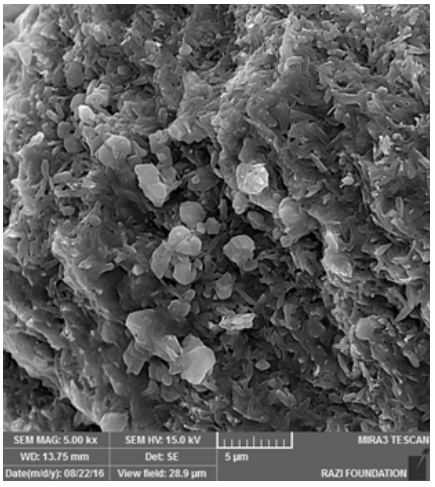
- نقش کانی‌ها و ترکیبات تشکیل‌دهنده‌ی سنگ در هوازدگی آن

سنگ توف لیتیک به علت داشتن کانی‌های رسی در بین ترکیبات خود، خاصیت لایه‌ای دارند. کانی‌های رسی ساختمان ورقه‌ای داشته و به دلیل صفحه‌ای بودن به موازات لایه‌بندی قرار می‌گیرند. علاوه بر این مهم، کانی‌های رسی قادرند رطوبت زیادی جذب کنند. بسیاری از آن‌ها بر اثر جذب آب، متورم می‌شوند و انبساط سنگ بر اثر ورود آب و انقباض آن‌ها در فصول خشک سال، سبب متلاشی شدن و درهم ریختن سنگ می‌شود؛ هوازدگی لایه‌ای و ورقه‌ای، حاصل فرآیندهای مذکور است. فشار تبلور نمک‌های

جدول ۷. نتایج آنالیز عنصری از نمک موجود در سنگ تاریخی و ازاره‌ی ایوان بنای گنبد سلطانیه.

Table 7. Elemental analysis results of salts present in the historical stone and the plinth of the southeastern porch of the Soltaniyeh Dome.

/%W SampleName	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	C
سنگ تاریخی و هوازده G	12.08	27.30	1.52	3.96	9.65	-	38.26	3.66	1.06	2.50	-
سنگ تاریخی و هوازده E	22.05	18.64	1.98	2.86	6.45	3.06	35.25	5.18	2.61	1.92	-



شکل ۱۴. زمینه‌ی سنگ تاریخی؛ در نمونه‌تاریخی کانی کائولینیت و کلسیت از لحاظ مورفولیژیکی تغییر کرده و ساختار سنگ دچار بی‌نظمی شده است.

Figure 14. Historical stone matrix; in the historical sample, the morphology of kaolinite and calcite minerals has changed, and the stone's structure has become disordered.

محلول در داخل و سطح سنگ‌ها به دلیل سختی پایین کانی کلسیت وکائولینیت با ساختار ورقه‌ای موجب شکسته شدن و از هم باز شدن ورقه‌های کائولینیت و بی‌نظمی در ساختار آن شده است (شکل ۱۴) که در کنار هوازدگی سنگ‌ها موجب تخریب هر چه بیشتر سنگ می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش بر مطالعه ویژگی‌های ساختاری و بررسی آسیب‌های به‌وجود آمده در سنگ‌های ازاره‌ی وجه جنوب‌شرقی بنای گنبد سلطانیه و شناسایی شده است. با توجه به ارزش‌هایی که این بنا به‌عنوان یک بنای ثبت شده در فهرست آثار ثبت جهانی دارد، دچار آسیب‌هایی از قبیل پوسته‌شدن، تبلور نمک‌ها بر سطح و تورق شده است که شناخت این آسیب‌ها در کنار شناخت ویژگی سنگ‌ها و از همه مهم‌تر شناخت منشأ آسیب‌ها راهگشای انتخاب روش صحیح حفاظت و مرمت آن می‌شود. در گام نخست با روش‌های علمی بررسی مواد، پراش پرتوایکس XRD و XRF و مطالعه‌ی مقطع نازک سنگ‌ها (پتروگرافی) ویژگی‌ها و خصوصیات فیزیکی سنگ‌های ازاره‌ی ایوان جنوب‌شرقی بنای گنبد سلطانیه شناسایی گردید؛ سنگ‌های به‌کار رفته در ازاره از انواع سنگ‌های آذر آواری اسیدی است و در تقسیم بندی‌های مرسوم سنگ در دسته توف‌های شیشه‌ای قرار می‌گیرد؛ از خصوصیات اصلی سنگ توف تخلخل زیاد آن است که این ویژگی به سنگ این امکان را می‌دهد تا به راحتی بُریده، حجاری و با ابزار ساده خُرد شود. فازهای اصلی تشکیل دهنده‌ی سنگ کوارتز و کائولینیت هستند و در تصاویر میکروسکوپ الکترونی زمینه‌ای از کانی کائولینیت همراه با کلسیت مشاهده گردید. دو خاصیت تخلخل زیاد به همراه بالاتر رفتن کششش موئینگی سنگ‌ها در طول زمان باعث شده این سنگ‌ها آسیب‌ها و فرسودگی‌هایی را متحمل شوند.

سنگ‌های ازاره بنای گنبد سلطانیه در شرایط محیطی قرار گرفته است که مهم‌ترین آسیب‌های آن‌ها، شکفتگی و حضور نمک‌ها بر سطح سنگ‌ها است؛ ترکیبات نیتراتین، هالیت، نیتر و هگزاهیدرات به‌عنوان نمک‌های موجود در ساختار سنگ شناسایی شدند و براساس نوع نمک و مطالعات انجام شده پیشین، به نظر می‌رسد منبع نمک‌ها ملاط گچ و خاک به‌کار رفته در بندکشی سنگ‌ها، خاک به‌کار رفته در پشت دیوارها و پی بنا و رطوبت فعال در محیط باشد. می‌توان اینطور نتیجه‌گیری نمود که منبع نمک‌ها درونی و از خود سنگ‌های توف لیتیک نیست؛ بلکه منشأ بیرونی دارد. با توجه به ساختار سست سنگ و آسیب تورق در کنار تبلور سطحی سنگ‌ها دچار نهان‌شکفتگی نیز شده‌اند و رطوبتی که موجب فعال شدن سیستم باز تبلور نمک‌ها می‌شود ناشی از رطوبت صعودی است. نمک‌ها در سیستم باز تبلور که قابلیت هیدراته شدن را دارند، به تغییرات جزئی در رطوبت صعودی حساس هستند و کوچک‌ترین تغییرها می‌تواند تعادل سیستم را برهم زند. در شرایطی که نمک‌ها در پاسخ به تغییرات رطوبت نسبی، چرخه‌ی انحلال و بازتبلور دارند؛ فرآیند نمک‌زدایی می‌تواند با کاهش میزان نمک در لایه‌ی سطحی بستر اثر موجب کاهش این فعالیت گردد.

در ارتباط با نقش تخریبی نمک‌ها و منشأ آن‌ها در بخش‌های آسیب دیده، بهتر است ملاط بندکشی نیز تعویض گردید. هدف اصلی این پروژه شناسایی عوامل تخریب سنگ‌های ازاره‌ی وجه جنوب شرقی ازاره‌ی گنبد سلطانیه و در ادامه پیشنهاد روش‌هایی در راستای کاهش دادن نمک‌های محلول در سنگ‌ها بود که این کاهش نمک موجب می‌شود از تخریب هرچه بیشتر سنگ‌های تخریب شده ممانعت به عمل آید. پس از درمان، اقدامات بعدی که می‌توان سایت مربوط پیشنهاد نمود آن است زهکشی مناسبی تعبیه شود تا نقش رطوبت فعالی برای نمک‌ها به حداقل برسد.

سپاسگزاری

صمیمانه ترین تشکر خود را به دکتر امید عودباشی و دکتر مهدی رازانی به خاطر راهنمایی‌های ارزشمند، تخصص و پشتیبانی بی‌وقفه‌شان در طول این پژوهش ابراز می‌کنم.

تضاد منافع: وجود ندارد. حامیان مادی و معنوی: دانشگاه هنر اصفهان حامی این تحقیق بوده است. دسترسی به داده‌ها: داده‌های خام این مطالعه از طریق مکاتبات قابل دسترسی است.

پی‌نوشت‌ها

1. Salt Attack
2. Efflorescence
3. Scaling
4. Devitrification
5. Peak

منابع / References

Amoroso, G. G., & Fassina, V. (1991). Stone decay and conservation (R. Vatandoost, Trans.). Tehran: Cultural Heritage Organization Publications. (Original work published 1983).

[آموروسو، جووانی جوزپه و فاسینا، واسکو. (۱۳۷۰). فرسودگی سنگ و حفاظت از آن (رسول وطن‌دوست، مترجم). تهران: انتشارات سازمان میراث فرهنگی کشور. [نسخه اصلی ۱۹۸۳].

Amin Shirazi Nejad, S. (1996). Investigating destructive efflorescence on decorative walls of the Soltaniyeh Dome. Proceedings of the First Conference on Conservation and Restoration of Historical-Cultural Monuments (pp. 252–261). Tehran.

[امین‌شیرازی‌نژاد، شهرزاد. (۱۳۷۵). بررسی شوره‌زنی مخرب در دیواره‌های تزئینی بنای گنبد سلطانیه. مجموعه مقالات نخستین همایش حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی (ص. ۲۵۲–۲۶۱). تهران.]

Basiri, S., & Pedram, B. (2009). Restoration plan of the Pearl Pool in Hasht Behesht Palace, Isfahan. Biannual Journal of Restoration and Research, 3 (6)، 43–70

[بصیری، سمیه و پدرام، بهنام. (۱۳۸۸). طرح مرمت حوض مروارید عمارت هشت بهشت اصفهان. دو فصلنامه مرمت و پژوهش، ۳ (۶)، ۴۳–۷۰.]

Belmin, V. (2011). Illustrated glossary on stone deterioration patterns/ICOMOS International Scientific Committee for Stone (G. Vatankhah & M. Razani, Trans.). Tehran: Jihad Daneshgahi Publications. (Original work published 2008).

[بلمین، ورونیک ورگس. (۱۳۹۰). فرهنگ مصور الگوهای تخریب سنگ/ کمیته بین‌المللی سنگ ایکوموس (غلامرضا وطن‌خواه و مهدی رازانی، مترجمان). تهران: سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی. [نسخه اصلی ۲۰۰۸].

Bläuer Böhm, C. (2005). Quantitative salt analysis in conservation of buildings/Quantitative Salzanalyse bei der Konservierung von Bauwerken. Restoration of Buildings and Monuments, 11 (6), 409–418.

Javani, A. (2010). Pathology (buildings, contexts, and ancient sites) Tehran: Ganj-e Honar.

[جوانی، آیدین. (۱۳۸۹). آسیب‌شناسی (بناها، بافت‌ها و محوطه‌های باستانی) . تهران: گنج هنر.].

Kordi, M., Mortazavi, M., & Razani, M. (2011). Investigating the role of salts in the deterioration of tuff stones in the southeastern porch of Soltaniyeh Dome, Zanjan. Biannual Journal of Restoration and Research, 6 (11)، 27–36.

[کردی، مهدی، مرتضوی، محمد و رازانی، مهدی. (۱۳۹۰). بررسی نقش نمک‌ها در تخریب سنگ‌های توف ازاره ایوان جنوب شرقی گنبد سلطانیه زنجان. دو فصلنامه مرمت و پژوهش، ۶ (۱۱)، ۲۷–۳۶.].

Lubelli, B., & Van Hees, R. P. J. (2014). Desalination of historical brick masonry. In A. Heritage, A. Heritage, & F. Zezza (Eds.), Desalination of historic buildings, stone, and wall paintings (pp. 122–129). Archetype Publications.

Mahboub Ali, S., & Vatandoost, R. (1998). Causes of efflorescence in limestone in historical buildings. Proceedings of the First Conference on Restoration of Historical Monuments and Architectural Decorations (1st ed.). Tehran: University of Art.

[محبعلی، شهریار و وطندوست، رسول. (۱۳۷۷). علل شوره‌زنی سنگ‌های آهکی در بناهای تاریخی. مجموعه مقالات نخستین همایش مرمت آثار تاریخی و تزئینات وابسته به معماری (چاپ اول). تهران: دانشگاه هنر.].

Office of Research and Technical Standards. (1983). Stone walls. Plan and Budget Organization. Publication No. 90.

[دفتر تحقیقات و معیارهای فنی. (۱۳۶۲). دیوارهای سنگی . سازمان برنامه و بودجه. نشریه شماره ۹۰.].

Pedram, B., & Zamani, N. (2011). A look at the conservation of stone lions in historical cemeteries.

Charola, A. E. (2013). Salts in the deterioration of porous materials: An overview. Journal of the American Institute for Conservation.

Charola, A. E., & Bläuer, C. (2015). Salts in masonry: An overview of the problem. Restoration of Buildings and Monuments, 21 (4-6), 119–135.

EN 12370: 1999. Natural stone test methods: Determination of resistance to salt crystallization.

Fadaei, H. (2005). Investigating the destructive effects of soluble salts on the bricks of Chogha Zanbil. Seventh Conference on Conservation and Restoration of Historical-Cultural Objects and Architectural Decorations. Tehran: Cultural Heritage, Handicrafts, and Tourism Organization.

[فدایی، حمید. (۱۳۸۴). بررسی اثر تخریب نمک‌های انحلال‌پذیر بر روی آجرهای چغازنبیل. هفتمین همایش حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی-فرهنگی و تزئینات وابسته به معماری . تهران: سازمان میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری.].

Hamzelou, M. (2002). Applied arts in the Soltaniyeh Dome. Tehran: Makan.

[حمزه‌لو، منوچهر. (۱۳۸۱). هنرهای کاربردی در گنبد سلطانیه . تهران: ماکان.].

Heritage, A., Heritage, A., & Funke, F. (2014). Counter-indications for poulticing treatments: Schloss Augustusburg, Bruhl, a case study. In A. Heritage, A. Heritage, & F. Zezza (Eds.), Desalination of historic buildings, stone, and wall paintings (pp. 101–117). Archetype Publications.

Houck, J., & Scherer, G. W. (2006). Controlling stress from salt crystallization. In Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone (pp. 299–312). Princeton University, Civil & Environmental Engineering/PRISM, Engineering Quad. E-319, Princeton, NJ 08544, USA.

applied in granite desalination: The role of the stone pore structure. Construction and Building Materials, 24 (5), 766–776.

Stambolov, T., & de Boer, J. V. A. (1976). The deterioration and conservation of porous building materials in monuments (pp. 39-40). Internat. Centre for the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural Property.

[استامبولو، تی. و ج. وان آسپرن‌دی بوئر. (۱۳۷۴). اضمحلال و حفاظت مواد ساختمانی متخلخل در بناهای تاریخی (شهلا ذبیحی، مترجم). اصفهان: انتشارات مولانا. [نسخه اصلی ۱۹۷۶].] .

Torraca, G. (2009). Lectures on materials science for architectural conservation.

Valenza, J. J., & Scherer, G. W. (2007). A review of salt scaling: I. Phenomenology. Cement and Concrete Research, 37 (7), 1007–1021.

Valenza, J. J., & Scherer, G. W. (2010). A review of salt scaling: Phenomenology (M. M. Bahri & A. Allahverdi, Trans.). Cement Research Center, Petroleum University of Technology, 1007–1021. (Original work published 2007).

[جان جی. والنزا و جرج دبلیو. شرر. (۱۳۸۹). مروری بر پوسته‌پوسته شدن نمکی: پدیده‌شناسی (محمد مهدی بحری و علی الهوردی، مترجمان). مرکز تحقیقات سیمان دانشگاه صنعت نفت، ۱۰۰۷–۱۰۲۱. [نسخه اصلی ۲۰۰۷].

Williams, R. B. G., & Robinson, D. A. (1981). Weathering of sandstone by the combined action of frost and salt. Earth Surface Processes and Landforms, 6 (1), 1–9.

Biannual Journal of Restoration and Research, 5 (10)، 433–454.

[بهنام پدرام و زمانی، نرجس. (۱۳۹۰). نگاهی به حفاظت شیرهای سنگی در گورستان تاریخی. دو فصلنامه مرمت و پژوهش،۵ (۱۰)، ۴۳۳–۴۵۴.].

Pirak M, Gorji M, Vahidzadeh R, Bahadori R. (2016). Analysis of Erosion Caused by Soluble Salts in Historical Monuments. JRA. 1(2), 51-73. doi:10.29252/jra.1.2.51.

[پیرک مهدی، عبدالله خان گرجی مهناز، وحیدزاده رضا، بهادری رویا.(۱۳۹۴) بررسی مکانیسم تخریب ناشی از نمک های محلول در بناهای تاریخی پژوهه باستان سنجی; ۱ (۲) :۵۱–۷۳].

Rahmani, R. (1999). Pathology and documentation of interior decorations of the Soltaniyeh Dome (Unpublished master's thesis). Isfahan University of Art.

[رحمانی، رضا. (۱۳۷۸). آسیب‌شناسی و مستندنگاری تزئینات داخلی بنای گنبد سلطانیه (پایان‌نامه کارشناسی ارشد، چاپ نشده). دانشگاه هنر اصفهان.].

Razani, M., Kordi, M., Mortazavi, M. and Sedghi, Y. (2022). Study of Colorants Materials on the Decoration Patterns on the North and Southeast Porches of Soltanieh Dome, Zanjan, Iran. pazhoheshha-ye Bastan shenasi Iran, 11(31), 265-288. doi: 10.22084/nb.2020.21774.2150.

[رازانی، مهدی. کردی، مهدی. مرتضوی، محمد و صدقی، یاسین. (۱۴۰۰). بررسی مواد رنگساز در نقوش تزئینی ایوان‌های شمالی و جنوب‌شرقی میراث جهانی گنبد سلطانیه. پژوهش های باستان شناسی ایران. ۱۱(۳۱)،۲۸۸–۲۶۵. /doi: ۱۰.۲۲۰۸۴ nb.۲۰۲۰.۲۱۷۷۴.۲۱۵۰].

Reedy, C. L. (2008). Thin-section petrography of stone and ceramic cultural materials . Archetype.

Rivas, T., Alvarez, E., Mosquera, M. J., Alejano, L., & Taboada, J. (2010). Crystallization modifiers