



## Original Paper

## Technical and Comparative Study of Monochrome Turquoise Nare Tile of the Ilkhanid and Safavid Periods (Dome of Soltaniyeh and Sheikh Safi Al-Din Ardabili's Shrine as the Case Study)



Soodabeh Yousefnejad\*

*PhD in Conservation & Restoration of Historical Artifacts, Art University of Tehran, Tehran, IRAN*

Received: 9/2/2020

Accepted: 12/23/2020

**Abstract**

In the current study, the samples of Nare tile (glazed bricks) of the Sheikh Safi Al-Din Ardabili's Shrine and Dome of Soltaniyeh were studied to understand the techniques of the tiling decorations applied in the architecture of the dome in the Safavid and Ilkhanid eras, with emphasizing on two prominent buildings of these two historical periods. The transition chromophore elements of the glazes were determined using Inductively Coupled Plasma (ICP) and constituent phases of the bodies by X-Ray Diffraction (XRD). According to the results, the nature of the glaze, its erosion, and chemical structure of the bodies of the studied samples was determined, and the possibility of the technical comparison of the samples of the two periods was provided in terms of the constituent compositions of the body and glaze and the rate of the erosion as well as the estimation of the historical Nare tile firing temperature.

**Keywords:** Nare Tile, Soltaniyeh, Sheikh Safi Al-Din Ardebili's Shrine, XRD, ICP

**Introduction**

Using glazed bricks in the buildings dates back to the Mesopotamian civilization, the first half of the third millennium BC. Sumerians and Akkadians covered the surfaces of their buildings with glazed bricks [1]. This tradition spread to Iran during the second millennium BC. The Elamites and then Achaemenid used glazed bricks to cover temples and palaces [2]. During the Seleucid, Parthian, and Sassanid periods, painting and plastering were mostly used to decorate buildings. However, in 903, in the early centuries of Islam during Abbasid Caliphate, Ibn Rasta stated about the Great Mosque of Baghdad: "the whole mosque was decorated with azure glazed bricks." Yaghoubi, a tenth-century writer, also described the green minaret of Bukhara in eastern Iran [3]. Tiling has been observed in the decoration of buildings since the Ghaznavids period and has reached its peak since the Seljuk period. At first, glazed tiles and bricks were used next to molded or carved bricks. At the end of the sixth century AH, patterned tiles were used in the altar of mosques, and faience mosaics were created by placing different pieces of monochrome tiles [4] [5]. Nare tiles were often used for the coverings of the domes. The difference between ordinary tiles and Nare tiles is in the thickness of the clay behind the tile glaze. The thickness of the Nare tiles is considered more to be better placed in the mortar and have more resistance [6].

**Materials and Methods**

The studied samples of the current research were three turquoise Nare tiles of the Sheikh Safi Al-Din Ardebili and two specimens from the Dom of Soltaniyeh. S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub> were related to the Sheikh-

\* Corresponding author: [syousefnezhad@yahoo.com](mailto:syousefnezhad@yahoo.com)

Safi Al-Din dome and were older than S<sub>3</sub>. S<sub>3</sub> was in the Shah Ismaeil's dome and was made in the contemporary era. S<sub>4</sub> and S<sub>5</sub> were in the Soltaniyeh Dome in the Ilkhanid era (Table 1) (Figure 4 & 5). The used devices were as follows: Celestron Digital Microscope, Philips X-Ray Diffraction, and Agilent Radial 375 Inductively Coupled Plasma. To identify the element and the possibility of scientific-technical comparison, the glazes were analyzed by the ICP method, and the bodies were examined by the XRD method to recognize the existing phases and estimate the firing temperature range.

### Results and Discussion

Quantitative analysis of glazes by the ICP method showed that the studied glazes contain more than 3% lead (Table 2). Copper ions in different pH environments can produce different shades of blue. Its value is 2% in S<sub>2</sub>, 2.3% in S<sub>1</sub> and 1.4% in S<sub>3</sub> (Figure 1-6), (Figure 2-6), (Figure 3-6). Cobalt also produces blue color. It has been less used compared to copper; Its maximum values are in S<sub>1</sub>, S<sub>5</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>4</sub>, respectively (Figure 8). The amount of alkaline elements of the glaze such as potassium in S<sub>1</sub> is 1.7%, S<sub>2</sub> 2% and in S<sub>3</sub> 1%, and sodium in S<sub>1</sub> is 5.7%, S<sub>2</sub> 8.4%, and S<sub>3</sub> 3.2%. In Soltaniyeh samples, the amount of copper as a turquoise agent is 1.3% in S<sub>4</sub> and 1.8% in S<sub>5</sub>; Potassium in S<sub>4</sub>, S<sub>5</sub> is 3.8%, 2.4%, and sodium is 3.8% and 6.7%, respectively. The amount of alkaline elements such as sodium and potassium as well as aluminum is a proper criterion for analyzing the erosion processes of glazes [30]. In the ion exchange process, the concentration of other ions, such as aluminum, increases as the alkaline ions are excluded from the glaze structure. The average amounts of sodium and potassium involved in the ion exchange process are: S<sub>1</sub> 4%, S<sub>2</sub> 5%, S<sub>3</sub> 2%, S<sub>4</sub> 4%, and S<sub>5</sub> 4.5%. The amount of aluminum in S<sub>1</sub> is 1.7%, S<sub>2</sub> 1.3%, S<sub>3</sub> 0.6%, S<sub>4</sub> 2%, S<sub>5</sub> 0.7% (Figure 7). The body of the bricks was analyzed by XRD to identify the constituent phases. The main and minor phases were identified in them (Table 3) (Figure 9). S<sub>1</sub> has the main phase of quartz, anorthite, augite, and cristobalite. Its minor phases are calcite and gypsum. Due to the presence of high-temperature phases such as anorthite, cristobalite, the presence of a partial phase of calcite can indicate the formation of this phase over time as secondary calcite, because when the firing temperature reaches about 700 °C, calcite and dolomite decomposes and disappears at about 870 °C. Studies have shown that the conversion of quartz grains to cristobalite occurs at about 1200 °C and the melting point of this phase is 1722 °C [32]. S<sub>2</sub> is composed of the main phases of quartz and anorthite, and the minor phases of hematite are made of orthoclase. The anorthite phase is formed at about 1200 °C. The process of its formation is as follows: first, gehlenite, which is the middle phase, is formed around 900 °C, and gradually turns into anorthite by increasing temperature [33]. S<sub>3</sub> consists of the main phases of quartz, gehlenite, and the minor phases of orthoclase, wollastonite. S<sub>4</sub> has the main phase of quartz, augite, and minor phases of calcite, microcline, albite, gypsum, gehlenite. S<sub>5</sub> consists of the main phase of quartz and the minor phases of gehlenite, Illite, calcite, and amorphous phase.

### Conclusion

According to the results, the transition chromophore element for creating the turquoise color in the glazes is the copper and less amount of cobalt. The amount of copper in the sample glazes of Sheikh Safi Al-Din Ardebili's Shrine is more than samples in the Dome of Soltaniyeh, except for S<sub>3</sub>. S<sub>4</sub>, then S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> and S<sub>5</sub> have the highest erosion, and the samples of Shah Ismaeil's dome have the lowest erosion, which, considering its contemporaneity is not an unexpected result. Firing temperatures of S<sub>1</sub> and S<sub>2</sub> can be more than 1000 °C due to the presence of the cristobalite phase as well as anorthite. Due to the presence of gehlenite and its formation at 900 °C, the firing temperature of S<sub>3</sub> can be around 900 °C. Due to the high-temperature phase of augite (from the group of pyroxene minerals) in S<sub>4</sub>, the firing temperature can be around 1000 °C. Due to the presence of gehlenite in S<sub>5</sub>, the firing temperature can be around 900 °C. The calcite phase indicates its secondary formation. Estimation of firing temperature has been reported in the case studies and only based on the XRD test.



CrossMark

## مطالعه فنی و مقایسه‌ای کاشی نره تک‌رنگ فیروزه‌ای ایلخانی و صفوی با پژوهش موردی نمونه‌هایی از گنبد سلطانیه و گنبد بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی سودابه یوسف‌نژاد\*

دکتری مرمت اشیاء فرهنگی و تاریخی، دانشگاه هنر تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۲

### چکیده

در این پژوهش نمونه‌هایی از کاشی نره گنبد الله الله، بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی و گنبد سلطانیه به‌منظور فن‌شناسی تزئینات کاشی‌کاری به‌کاررفته در معماری گنبد در دو دوره ایلخانی و صفوی و با تمرکز بر دو بنای شاخص مذکور از این دوره‌های تاریخی، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش، عناصر واسطه رنگ‌ساز لعاب نمونه‌ها به کمک روش پلاسما جفت شده ICP انجام شده و شناسایی فازهای تشکیل‌دهنده بدنه‌ها به کمک روش پراش پرتو ایکس XRD انجام شده است. بر اساس نتایج گزارش در این تحقیق، ماهیت لعاب و تحلیل فرایند فرسایش آن همچنین، ساختار شیمیایی بدنه‌های نمونه‌های مورد مطالعه مشخص شد و بر اساس نتایج به دست آمده امکان مقایسه فنی نمونه‌های مورد مطالعه دو دوره، از لحاظ ترکیبات سازنده بدنه و لعاب و میزان فرسایش آن‌ها، همچنین تخمین دمای پخت این کاشی‌های نره تاریخی، فراهم شد.

**واژگان کلیدی:** فن‌شناسی، کاشی نره، سلطانیه، بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی، ICP، XRD

\*نویسنده مسئول مکاتبات: تهران، خیابان حافظ، خیابان سرهنگ سخایی، دانشگاه هنر تهران، کد پستی: ۱۱۳۶۸۱۳۵۱۸  
آدرس الکترونیکی: [syousefnezhad@yahoo.com](mailto:syousefnezhad@yahoo.com)

حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقاله چاپ شده را با دیگران به اشتراک بگذارد منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.



CC

## ۱. مقدمه

استفاده از تزئینات لعاب‌دار در بناها به تمدن بین‌النهرین باستان در نیمه اول هزاره سوم قبل از میلاد بازمی‌گردد. سومری‌ها و اکدی‌ها در بین‌النهرین باستان، نمونه‌های هنری با کاربرد آجرهای لعاب‌دار خلق کردند. آنان سطوح بناهای خود را با تزئینات رنگین لعاب‌دار می‌پوشاندند [1]؛ این سنت طی هزاره دوم قبل از میلاد به ایران راه یافت به طوری که عیلامیان و پس از آن هخامنشیان نیز برای تزیین و پوشش سطحی بناهای مهم خود، مانند معابد و کاخ‌ها، از آجرهای لعاب‌دار استفاده می‌کردند [2]. به نظر می‌رسد که کاربرد آجرهای رنگین لعاب‌دار در زمان سلوکیان، پارتیان و ساسانیان رواج زیادی نداشته است و آنان بیشتر از سایر روش‌ها مانند نقاشی و گچ‌بری در تزیین بناها استفاده می‌کرده‌اند؛ اما در سال ۹۰۳ میلادی مقارن با سده‌های آغازین دوران اسلامی و خلافت بنی‌عباس، ابن رسته درباره مسجد بزرگ بغداد می‌نویسد، تمام مسجد با آجرهای لعاب‌دار لاجوردی تزیین شده بود. همچنین یعقوبی نویسنده سده دهم میلادی نیز از مناره سبزرنگ بخارا که در آن زمان در شرق ایران بوده است، تعریف می‌کند [3].

شهریار عدل در بررسی‌های مسجد دامغان، کتیبه کاشی مناره این مسجد را که مربوط به سال ۴۵۰ هجری قمری است از قدیمی‌ترین نمونه‌های کاربرد کاشی در معماری اسلامی ایران بیان می‌کند [4]. به‌هرحال استفاده

از تزئینات لعاب‌دار در بنا با روندی رو به گسترش در تاریخ هنر ایران، در دوران اسلامی رواج داشته است و از دوره غزنویان در تزئینات بناها مشاهده می‌شود و چنین به نظر می‌رسد که این شیوه از دوران سلجوقیان به اوج خود می‌رسد. هرچند که در آن دوران نیز در بسیاری بناها هنوز شیوه تزئینات آجرکاری به‌کاررفته می‌رفته است؛ مانند شیوه‌ای که خواجه نظام الملک برای ساختن مسجد جامع اصفهان به‌کاررفته برده است. آرتور پوپ درباره پیشرفت کاشی‌کاری در تزئین بناها می‌نویسد: «نخستین بار کاشی‌های لعابی در سده دوازدهم میلادی (حدود قرن ششم هجری قمری) در گنبد مسجد جامع قزوین پدید آمد، اما به‌محض این‌که این روش آغاز گردید، به‌تندی و با شتاب توسعه یافت و در چند نسل، تمام ساختمان‌ها با کاشی‌کاری‌های بسیار زیبا گوهر نشان شده بودند و این خود عصر جدیدی در تزئین هنر معماری ایران بود» [5]. در گنبد سرخ مراغه نیز، به تاریخ ساخت ۵۴۳ هجری قمری، در لابه‌لای آجرکاری‌های بنا تزئینات کاشی‌کاری به‌کاررفته است. بنا بر تاریخ‌های ذکرشده، این هنر در سده‌های آغازین اسلام وجود داشته و از دوران غزنویان در تزئینات بناها مشاهده‌شده و به‌تدریج از دوران سلجوقیان به بعد به‌وفور در بناهای مختلف تاریخی به‌کاررفته است (شکل ۱).

بنابراین، پس از دوره سلجوقیان استفاده از کاشی بسیار رایج شده و در تزئین بناهای دوران ایلخانی و



ب



الف

شکل ۱: الف گنبد سرخ مراغه، ب گنبد مسجد جامع قزوین

Fig.1: a Red dome Maragheh, bJame mosque of Ghazvin dome

<http://news.mrud.ir>

<http://iichs.org/baharestan>

حکومت‌های بعد از آنان به‌وفور استفاده‌شده و به اوج رسیده است، به‌طوری‌که جلوه‌ای خاص به بناهایی دوران اسلامی ایران، مانند مساجد، مدارس، کاخ‌ها، حمام‌ها و ... داده است. این هنر در دوران اسلامی به‌منظور استحکام بیشتر و آرایش بنا به شیوه‌های کاشی‌تک‌رنگ، کاشی معرق، کاشی هفت‌رنگ، کاشی زرین‌فام، تلفیق کاشی و آجر و کاشی‌های مکتوب یا کتیبه‌نگار به کار می‌رفته است. در آغاز، تزئین بناها با کاشی توأم با آجر و آجرهای تراش‌دار و گچ همراه بود و قطعات کاشی و آجرهای لعاب‌دار را در شکل‌های مختلف در کنار آجرهای قالب‌زده یا تراش‌دار به‌کاررفته می‌بردند [4]، رنگ‌های اصلی در آن‌ها فیروزه‌ای، آبی آسمانی و نارنجی ملایم بوده است. بیشتر طرح‌ها اشکال هندسی مثل پنجره مشبک و چندضلعی بود.

در پایان قرن ششم ه.ق. نوع جدیدی از تزئین دیوارها در ایران پدید آمد و آن کاشی‌های منقوشی بود که در ساختمان محراب‌ها در مساجد به‌کاررفته می‌رفتند و اغلب در کاشان ساخته و از آنجا به سایر نواحی در خاور نزدیک و میانه فرستاده می‌شدند. در آن زمان شیوه دیگری نیز موسوم به کاشی یکرنگ پدید آمد که با قراردادن قطعات با شکل‌های مختلف از این کاشی‌ها تزئینات کاشی معرق ایجاد شد. کاشی‌کاری‌های معرق در تزئینات معماری در اندازه‌های متنوع و مختلف قابل اجرا است؛ این نوع کاشی‌کاری ظاهراً نخست در شرق ایران پدید آمد و در زمان تیموریان، در هرات، به آخرین درجه از تکامل خود رسید. انتقال دربار تیموری از هرات به تبریز سبب شد که صنعت کاشی‌کاری نیز با آن منتقل شود و در آنجا کیفیت مرغوب‌تری به دست آورد، مانند نمونه کاشی‌های مسجد کبود تبریز. هنگامی که صفویان پایتخت خود را در آغاز قرن دهم ه.ق. به تبریز منتقل کردند، شاه اسماعیل هنرمندان را از سراسر کشور جمع‌آوری کرد و تزئینات بناهای به‌جای مانده از این دوران نشان می‌دهد که طرح‌های عالی گذشته و روش و کاربرد آن‌ها حفظ‌شده است؛ از قرن یازدهم ه.ق. یعنی زمان شاه‌عباس کاشی‌های چندرنگ جای کاشی‌های یکرنگ بریده‌شده را گرفت مانند نمونه‌های مسجد امام اصفهان، این هنر در سده‌های ۱۲ و ۱۳ ه.ق. رو به تباهی

گرایید و پس‌از آن در دوران معاصر دوباره احیاء شد [3]. برای پوشش گنبدها به‌ندرت، کاشی هفت‌رنگ یا معرق را به کار می‌گیرند. در پوشش گنبدها اغلب از نوعی کاشی ضخیم به نام کاشی نره‌ای استفاده می‌شود. تفاوت کاشی معمولی با کاشی نره‌ای در ضخامت گل پشت لعاب کاشی است. کاشی نره‌ای از لحاظ خمیر گل و لعاب روی آن چندان تفاوتی با سایر کاشی‌ها ندارد و چون روی گنبدها برف زیادتری می‌نشیند و یخ می‌بندد، ضخامت کاشی نره را بیشتر می‌گیرند که بهتر در ملاط قرارگیرد و مقاومت بیشتری را به دست آورد [6]. در این تحقیق، دو نمونه از کاشی‌های نره تک‌رنگ گنبد سلطانیه و سه نمونه از کاشی‌های مذکور، در بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی برای شناسایی و مقایسه ترکیبات سازنده لعاب و بدنه آن‌ها مورد مطالعه فن‌شناسی قرار گرفته‌اند. سؤالات پژوهش، در مورد مقدار و نوع عناصر رنگ‌ساز لعاب‌ها، میزان فرسایش آن‌ها و نیز شناسایی ترکیب شیمیایی بدنه‌های کاشی‌های نره و دمای پخت آن‌ها است. در ادامه نخست، به طور مختصر، به معرفی تاریخی این مکان‌ها پرداخته می‌شود.

### ۱-۱. اردبیل و بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی

اردبیل در شمال غرب ایران در امتداد سلسله جبال البرز بین دو رشته‌کوه سبلان و باغ رو واقع شده است. سابقه سکونت در منطقه اردبیل به گذشته‌های دور بازمی‌گردد، اما این شهر در زمان صفویان اهمیتی خاص یافت و به یکی از مراکز مهم بازرگانی تبدیل شد. از بناهای مهم آن، بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی است. مجموعه شیخ صفی‌الدین شامل مقبره شیخ صفی‌الدین اسحاق و بناهای متعلق به آن است که در پانزدهم دی‌ماه سال ۱۳۱۰ شمسی، به‌عنوان یکی از آثار ملی ایران به ثبت رسیده است. این مجموعه در محله قدیمی عالی‌قاپو قرار گرفته و شامل تعدادی بناها از دوران مختلف است که اساس آن‌ها در قرن هفتم ه.ق. پی افکنده شده است. گنبد الله که بنای اصلی مجموعه محسوب می‌شود، بر روی قبر شیخ صفی‌الدین و به دستور صدرالدین موسی که از مریدان وی بود، ساخته‌شده است که ابتدا به‌صورت بنایی منفرد

سطح خارجی بدنه بنا با کلمات الله الله با کاشی نره فیروزه‌ای در بین آجرهای خفته‌وراسته پوشیده شده است [7]. گنبد شاه اسماعیل نیز گنبدی دو پوشش است که با کاشی‌هایی به رنگ مشکی، فیروزه‌ای، زرد و سفید و با نقوش هندسی تزئین شده است.

## ۱-۲. سلطانیه

سلطانیه در ناحیه مرکزی متمایل به غرب استان زنجان قرار گرفته است و از شهرهای مهم دوره ایلخانی است؛ که قبل از ایلخانان مغول نیز مورد توجه بوده است و شواهد باستانی حاکی از آن است که دشت سلطانیه حداقل از هزاره پنجم قبل از میلاد مسکونی بوده، نام قدیم این شهر تا پیش از تسلط مغولان آگامبی و شرویاز بوده است [8]. پس از روی کار آمدن ایلخانیان این ناحیه به نام قنقور اولانگ تغییر نام یافت؛ حمدالله مستوفی در تاریخ گزیده نگاشته است که محل این شهر درجایی بود که مغولان به آن قنقور اولانگ می‌گفتند و اولانگ مرتع یا چمن‌زار را گویند [9]. پیش از اقدامات سلطان محمد خدابنده (الجایتو) سلطانیه با این نام شناخته نمی‌شد؛ سلطانیه قبل از آن که به پایتختی انتخاب شود به‌عنوان چراگاه و اردوگاه مورد استفاده بود تا این که در آغاز قرن

بوده و بعدها با اضافه شدن بناهایی دیگر و حیاط‌هایی در میان آن‌ها به‌صورت مجموعه‌ای واحد درآمد است؛ کتیبه آخرین سردر به سال ۱۰۵۷ ه.ق. اشاره دارد که می‌توان به تکمیل این بنا در طی چند سال پی برد. این بنا امروزه شامل: سردر ورودی، حیاط کوچک، صحن بقعه، قسمت‌های اصلی بقعه، گنبد شیخ صفی، گنبد شاه اسماعیل، سردر اصلی بقعه، حرم‌خانه، چینی‌خانه، رواق و شهید گاه است (شکل ۲-الف، ب). بیشتر نماهای اصلی بیرون مجموعه و قسمت‌هایی از فضاهای قابل‌دسترس داخل مجموعه شیخ صفی با کاشی پوشانده شده است اغلب این کاشی‌کاری‌ها به سبب آسیب‌های زیاد در قرن اخیر بازسازی شده‌اند. کاشی معرق بیشترین حجم تزئینات کاشی‌کاری مجموعه را تشکیل می‌دهد و در نماهای خارجی مجموعه استفاده شده است (شکل ۲-ج). در دیوار داخلی چینی‌خانه کاشی هفت‌رنگ و در نمای گنبد شاه اسماعیل نیز کاشی نره کار شده است. بقعه شیخ صفی مرکز اصلی شکل‌گیری و توسعه مجموعه است؛ بنایی است استوانه‌ای شکل و با گنبدی دو پوش که سطح بیرونی آن با کاشی‌های نره تکرنگ فیروزه‌ای و آجر پوشیده شده است. محیط آن ۲۲ متر است و بر روی ازاره هشت‌ضلعی سنگی، به ارتفاع ۱/۴۰ متر قرار گرفته است.



الف



ب

شکل ۲. الف بقعه شیخ صفی، بقعه شاه اسماعیل و نمای قنبدیل‌خانه، ب نمای شمالی گنبد شیخ صفی‌الدین اردبیلی و گنبد شاه اسماعیل و گنبد حرم‌خانه ج گنبد شیخ صفی و گنبد شاه اسماعیل محل برداشت نمونه

Fig.2: a Boghe sheikh safi, Boghe Shah Esmacil and façade of Ghandilkhane, b north facades of sheikh safi dome and Shah Esmacil dome and Hram khane dome, c Sheykh safi dome and the place of sampling in shah Esmacil dome

بسیار کرد تا این که سلطانیه پس از تبریز اولین شهر ممالک ایلخانی شد، اما اعتبار آن دوامی نداشت و پس از او و ابوسعید خان به یک‌باره از اهمیت افتاد و به همان سرعتی که آباد شده بود، ویران شد [11]. سلطانیه در دوران صفویان رونقی نداشته است. به طوری که پیر دل‌واله از سیاحان ایتالیایی که در عهد صفوی از ایران بازدید کرده است از ویرانی‌های این شهر می‌گوید [12]. همچنین سخنان مادام دیولافوا نشان‌دهنده ایجاد تغییرات در بنای سلطانیه در دوره صفوی است، چنان که می‌گوید این بنا تاکنون محفوظ مانده است و اگر یکی از شاهان صفوی به‌عنوان تعمیر دستی در آن نبرده بود، عظمت و شکوه خود را بیشتر نشان می‌داد [13]. در دوره قاجار و به دلیل جنگ‌های میان ایران و روسیه، سلطانیه مرکز تجمع و تشکیل نیروهای ایران شد و بیشتر به‌عنوان منطقه‌ای بیلاقی مورد توجه بوده است. در آن زمان نیز اقداماتی در مورد بازسازی گنبد صورت گرفت. به طوری که بنا بر گفته فلاندن یکی از سیاحان این دوره، سلطانیه در زمان فتحعلی شاه متحمل خسارات بسیاری شد؛ در این زمان وی برای بنای شهری جدید مواد و مصالح گنبد سلطانیه را مورد استفاده قرارداد ولی موفق به ساخت نشد [14].

پروفیسور پائولزی رئیس وقت دانشکده معماری فلورانس، از افرادی بوده که در مورد این بنا مطالعه کرده است. او می‌گوید: این بنا از یک هشت‌وجهی تشکیل شده که قطر داخلی آن نزدیک به ۲۶ متر و فاصله بین دو وجه خارجی آن ۴۲ متر است [15]. قطر این گنبد ۲۹ متر و ارتفاع آن از سطح زمین بیش از ۵۰ متر است و با کاشی نره تکرنگ فیروزه‌ای پوشانده شده است. این بنا سومین گنبد عظیم جهان پس از گنبد کلیسای سانتا ماریا دلفیوره در فلورانس و گنبد مسجد ایا صوفیه در استانبول است که البته هر دو پس از گنبد سلطانیه ساخته شده‌اند.

در این تحقیق، تعداد پنج نمونه، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که عبارت هستند از: دو نمونه کاشی نره تکرنگ فیروزه‌ای مربوط به دوره صفوی از گنبد شیخ صفی‌الدین اردبیلی، یک نمونه معاصر (چهل سال گذشته) مربوط به تزئینات کاشی گنبد شاه اسماعیل و دو نمونه، مربوط به دوران ایلخانی از گنبد سلطانیه. باهدف بررسی تفاوت‌ها و شباهت‌های مواد سازنده و فنون به‌کاررفته در



شکل ۳: گنبد سلطانیه و نمای شرقی بنا

Fig.3: Soltaniyeh dome and east façade of monument

هشتم هجری ارغون‌خان (چهارمین پادشاه ایلخانی) تصمیم به احداث شهر جدیدی در این منطقه گرفت و ساخت حصار شهر را آغاز کرد که پس از مدتی با درگذشت او کار ناتمام باقی ماند [10]. پس از او و در زمان پادشاهی برادرزاده‌اش الجایتو بود که عملیات ساخت شهر مورد توجه بسیار قرار گرفت به طوری که او ساخت این بنا را بانام سلطانیه آغاز کرد و آن را در مدت ۱۰ سال به انجام رساند. بدین ترتیب در سال ۷۱۳ ه.ق. در محلی که ابتدا چمن‌زار محسوب می‌شد، یکی از شهرهای بزرگ اسلامی بنا شد. دورتادور سلطانیه به دستور الجایتو بارویی مربع شکل و عظیم با دیوارهایی ضخیم ساختند و در وسط آن الجایتو قلعه بزرگی ساخت که خود به بزرگی شهری بود و در آن قلعه گنبدی جهت مقبره خود بنا کرد که همان گنبد معروف سلطان محمد خدابنده است. این گنبد بزرگ‌ترین گنبد تاریخی معماری جهان اسلام است که در سال ۷۱۳ ه.ق. به پایان رسیده است و دارای پلان هشت‌ضلعی منظم و سه‌طبقه است که دو طبقه آن دارای نمای داخلی و طبقه سوم نمای خارجی دارد. همچنین دارای هشت مناره با کاربرد تقویمی است (شکل ۳).

الجایتو پس از بنای سلطانیه تعدادی از اهل فن صنایع دستی را از تبریز به آنجا برد و در ترویج ساخت آثار مختلف، دستی مشغول داشت و در توسعه شهر تلاش

ساخت این تزئینات در دو دوره مختلف تاریخی، برای بررسی فن‌شناسی، لعاب و بدنه با روش‌های شیمی تجزیه دستگاهی مانند پلاسما جفت شده القایی ICP و همچنین پراش پرتو ایکس XRD مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این تحقیق مستخرج از پروژه عملی درس فن‌شناسی تطبیقی آثار در دوره دکتری نگارنده است و انتخاب دوره‌ها بر اساس محتوای درسی کلاس و انتخاب مکان بر اساس آثار شاخص دوره‌های تاریخی انتخابی در کلاس بوده است.

## ۲. پیشینه پژوهش

در مورد بناهای مورد مطالعه در این پژوهش، تحقیقاتی انجام شده است که در اینجا مروری در مورد آن‌ها انجام می‌شود. بیشتر این مطالعات در مورد جنبه‌های تصویری و نقوش تزئینی و معرفی انواع تزئینات به کاررفته در بنا مانند کاشی کاری، کاشی و آجر، آجرکاری، حجاری و گچ‌کاری و ترسیم آن‌ها است [16] [17]. از نقوش به کاررفته در تزئینات گنبد سلطانی، برای مطالعات تأثیر آن‌ها در سایر هنرها از جمله کتاب‌آرایی نیز بهره برده شده است [18]. همچنین سلطانی به عنوان آخرین مرکز حکومت ایلخانان و نشانگر هنر معماری و توانمندی شهرسازی در این دوره از تاریخ، نیز مورد پژوهش قرار گرفته است و سیمای تاریخی شهر سلطانی از طریق نقاشی‌های به جای مانده از گذشته در سفرنامه‌ها و آثار کالبدی باقی مانده در شهر که با توجه به مطالعات باستان‌شناسی انجام شده، ترسیم شده است؛ در مطالعات باستان‌شناسی شهر با آتکا به شواهد باستان‌شناسی از شکل، عملکرد، ساختار فضایی و اجتماعی ساکنان آن عوامل مؤثر بر ظهور، توسعه و افول این شهر مورد بررسی قرار گرفته است [19] [20]. آسیب‌شناسی و مستندنگاری تزئینات داخلی گنبد سلطانی و شناسایی رنگ‌دانه‌ها و ملاط به کاررفته در تزئینات این بنا نیز با روش‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین فن‌شناسی کاشی‌های پوسته خارجی گنبد سلطانی و طرح مرمت آن‌ها ارائه شده است [21] [22]. سپس طرح ساماندهی اقدامات مرمتی بر روی تزئینات بدنه‌های داخلی گنبد و مرمت‌های انجام شده در این بنا

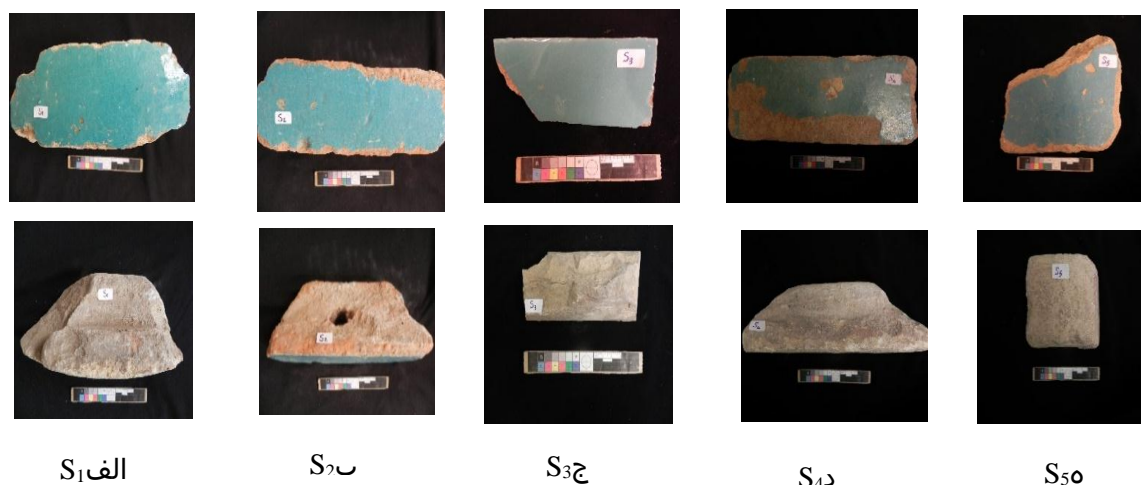
مورد بررسی و تفسیر گرفته است و تزئینات به کاررفته در این بنا مانند انواع کاشی کاری معرق، معقلی، زرین‌فام، آجرکاری قالبی، کنده‌کاری، آجر و کاشی، تزئینات گچی، حکاکی و... معرفی شده‌اند [23]. در تعدادی از پژوهش‌ها به بررسی جنبه‌های فرهنگی و قابلیت‌های گردشگری در این بنا و تحلیل عاملی موانع توسعه گردشگری روستایی در بخش سلطانیه پرداخته شده است [24] [25]. در مواردی نیز به کمک تحقیق پیمایش میدانی و با نگاه حفاظت مردمی از میراث فرهنگی به بیان تعارضات اجتماعی در حفاظت از میراث معماری پرداخته شده است [26]. در مورد بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی نیز پژوهش‌هایی شامل معرفی بنا، بررسی جایگاه سیاسی و شخصیت متولیان این بقعه، تاریخ بنا و تزئینات به کاررفته در آن، انجام شده است. کتیبه‌های موجود بر کاشی‌های لاجوردی در نقاط مختلف از جمله حاشیه گنبد و بالای در و پنجره‌ها و... مورد بازخوانی و ترسیم قرار گرفته‌اند؛ همچنین یافته‌های باستان‌شناسی در محوطه بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی معرفی شده است [27] [28]. در مورد مطالعه فنی کاشی‌های تاریخی به کمک روش‌های تجزیه دستگاهی نیز مطالعات بسیاری در سراسر جهان انجام شده است که یکی از روش‌های مطرح و مهم کاربردی آن‌ها، روش پراش پرتو X است.

## ۳. دستگاه‌ها و روش آزمایش

نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش، شامل سه نمونه کاشی نره فیروزه‌ای، مربوط به بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی و دو نمونه از گنبد سلطانیه زنجان است. تصویر نمونه‌ها و همچنین تصویر میکروسکوپی و مشخصات ظاهری آن‌ها در (جدول ۱) و (شکل ۴ و ۵) ذکر شده است. نمونه‌های  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$  مربوط به بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی است (شکل ۴ و ۵ الف-ب-ج) که از این سه، نمونه‌های  $S_1$  و  $S_2$  مربوط به گنبد بقعه شیخ صفی، از دوره صفوی و قدیمی‌تر از نمونه  $S_3$  هستند؛  $S_3$  مربوط به گنبد شاه اسماعیل و از نمونه‌های ساخته شده گنبد در دوره معاصر است. از نمونه‌های مربوط به گنبد شیخ صفی نمونه  $S_2$  به لحاظ شکل هندسی بدون انحنا است و از نظر

زنجان در اسفندماه ۱۳۹۲ و دی‌ماه ۱۳۹۳، برای انجام مطالعات آزمایشگاهی و پژوهش‌های فن‌شناسی در اختیار گذاشته شده‌اند. دستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق عبارت هستند از: میکروسکوپ دیجیتالی سلسترون، دستگاه پراش اشعه ایکس Philips و دستگاه پلاسمای

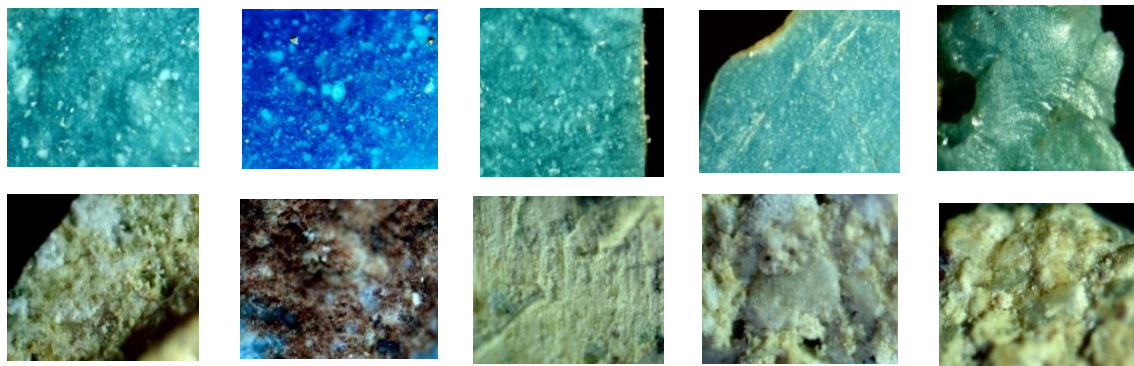
رنگ بدنه و فام رنگی لعاب فیروزه‌ای با نمونه S<sub>1</sub> تفاوت دارد. S<sub>1</sub> دارای انحنا در بدنه است. نمونه‌های S<sub>4</sub> و S<sub>5</sub> (شکل ۴ و ۵ ج-ه) مربوط به گنبد سلطانیه و دوره ایلخانی هستند. نمونه‌های مطالعاتی با هماهنگی مسئولان میراث فرهنگی استان اردبیل و گنبد سلطانیه



شکل ۴: نمونه‌های مورد مطالعه (تصویر از لعاب و بدنه)  
Fig.4: samples (glazes and bodies)

جدول ۱. مشخصات ظاهری نمونه‌های مورد مطالعه  
Table 1: aspects of samples

وزن نمونه (kg) Weight of samples	ابعاد نمونه* (cm) Dimansion of samples	رنگ نمونه Color of samples		محل نمونه Place of sample	کد نمونه code
		بدنه body	لعاب glaze		
1.4	23x9x10			گنبد بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی Sheykh Safi-al-din dome	S <sub>1</sub> **
1.4	23x8x8			بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی Sheykh Safi-al-din dome	S <sub>2</sub>
0.35	۲x5.5x4			گنبد شاه اسماعیل صفوی Shah Esmaeil safavi dome	S <sub>3</sub>
1.5	25x8x7			گنبد سلطانیه، ایلخانی Soltaniyeh dome, Ilkhani	S <sub>4</sub>
1.2	11x۲x12			گنبد سلطانیه، ایلخانی Soltaniyeh dome, Ilkhani	S <sub>5</sub>
* اندازه‌های داده شده مربوط به ابعادی هستند که مشخص و قابل اندازه‌گیری بودند The given dimensions correspond to the dimensions that were definite and measurable					
** این نمونه انحنا دارد. This sample has a curvature.					



S<sub>1</sub> الف

S<sub>2</sub> ب

S<sub>3</sub> ج

S<sub>4</sub> د

S<sub>5</sub> ه

شکل ۵: تصویر میکروسکوپی X40 بدنه (ردیف پایین) و لعاب نمونه‌های مورد مطالعه (ردیف بالا)

Fig.5: Microscopic X40 bodies (down) and glazes of samples (top)

جفت شده القایی Agilent Radial 375.

### ۳-۱. بحث و بررسی نتایج

نمونه‌برداری از لعاب و بدنه‌ها به کمک ابزار انجام شد و برای شناسایی عنصری لعاب‌ها و امکان مقایسه علمی-فنی دوره‌ای آن‌ها، لعاب‌ها توسط روش پلاسمای جفت شده القایی، مورد تجزیه قرار گرفتند. نتایج آن‌ها به صورت عددی در (جدول ۲) و به شکل نمودار میله‌ای و مقایسه‌ای در (شکل ۱-۶)، (شکل ۲-۶) و (شکل ۳-۶) گزارش شده است. نمونه‌های برداشت شده از بدنه‌ها نیز برای شناسایی فازهای موجود و تخمین حدودی دمای پخت آن‌ها توسط روش پراش پرتو ایکس XRD مورد تجزیه و بررسی قرار گرفتند و نتایج تجزیه فازی، بر اساس گزارش آزمایشگاه در نمودارهایی ارائه شده است، مطابق با (شکل ۹). تفاوت فام رنگی در لعاب‌های فیروزه‌ای و بدنه نمونه‌های مورد مطالعه، نشان از تفاوت ترکیب این نمونه‌ها دارد که در ادامه، نتایج تجزیه عنصری در لعاب و تجزیه فازی در بدنه، می‌تواند این تفاوت را نشان دهد.

### ۳-۱-۱. پلاسمای جفت شده القایی ICP

تجزیه کمی عنصری نمونه‌های لعاب مورد مطالعه به روش پلاسمای جفت شده القایی همچنان که در (جدول ۲) آمده است، نشان می‌دهد که لعاب‌های مورد مطالعه در این پژوهش دارای مقدار بیش از ۳٪ سرب هستند و

عامل ایجاد رنگ آبی در نمونه‌های مورد مطالعه هر دو دوره مورد بررسی در این پژوهش، عنصر مس است؛ اما مقدار آن حتی در نمونه‌های یک دوره متفاوت است. مقدار این عنصر به ترتیب در نمونه‌های گنبد بقعه شیخ صفوی، S<sub>1</sub> برابر با ۳/۲٪، در S<sub>2</sub> ۲٪ و در نمونه S<sub>3</sub> مربوط به گنبد شاه اسماعیل به مقدار ۱/۴٪ است. میزان عنصر کبالت که آن‌هم از عوامل ایجاد رنگ آبی در نمونه‌های لعاب است، در مقایسه با مقدار مس گزارش شده در هر نمونه بسیار کم است، بیشترین مقدار کبالت به ترتیب در S<sub>1</sub>، S<sub>5</sub>، S<sub>4</sub>، S<sub>2</sub>، S<sub>3</sub> گزارش شده است. مقادیر مس و کبالت برای مقایسه در نمونه‌ها به صورت نمودار در (شکل ۸) نشان داده شده است. مقدار عناصر قلیایی موجود در لعاب مانند، پتاسیم در نمونه‌های مورد مطالعه S<sub>1</sub> ۱/۷٪، S<sub>2</sub> ۲٪ و S<sub>3</sub> ۱٪ و عنصر سدیم S<sub>1</sub> ۵/۷٪ در S<sub>2</sub> ۸/۴٪ و در نمونه S<sub>3</sub> ۳/۲٪ است. نتایج به صورت نمودار برای مقایسه در (شکل ۱-۶)، (شکل ۲-۶)، (شکل ۳-۶)، (شکل ۴-۶) و (شکل ۷) ارائه شده است؛ در نمونه‌های گنبد سلطانیه نیز مانند سایر نمونه‌های این پژوهش، مقدار سرب بیش از ۳٪ گزارش شده است و مقدار عنصر مس به عنوان عامل ایجاد رنگ آبی در این نمونه‌ها به ترتیب مقدار ۱/۳٪ و ۱/۸٪ در نمونه‌های S<sub>4</sub> و S<sub>5</sub> است؛ همچنین مقدار عنصر پتاسیم به ترتیب در نمونه S<sub>4</sub>، S<sub>5</sub> ۳/۸٪ و ۲/۴٪، سدیم ۳/۸٪، ۶/۷٪ است، مطابق با نمودار (شکل ۱-۶)، (شکل ۲-۶)، (شکل ۳-۶)، (شکل ۴-۶) و (شکل ۷). عناصر واسطه رنگ‌ساز مانند مس و کبالت عوامل ایجاد رنگ در لعاب

شد با خروج یون‌های قلیایی از ساختار لعاب، غلظت سایر یون‌ها مانند آلومینیوم افزایش می‌یابد. بدین منظور در اینجا به بررسی مقدار آلومینیوم در هر یک از نمونه‌ها بر اساس نتایج حاصل از گزارش پرداخته می‌شود:  $S_1$  ۱/۷٪،  $S_2$  ۱/۳٪،  $S_3$  ۰/۶٪،  $S_4$  ۲٪،  $S_5$  ۰/۷٪. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین غلظت آلومینیوم در نمونه  $S_4$  و پس از آن به ترتیب در نمونه‌های  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_5$  و در آخر نمونه  $S_3$  که کم‌ترین مقدار در آن گزارش شده است، وجود دارد (شکل ۷).

### ۳-۱-۲. پراش پرتو ایکس XRD

نمونه‌های بدنه‌های سرامیکی آجرهای لعاب‌دار

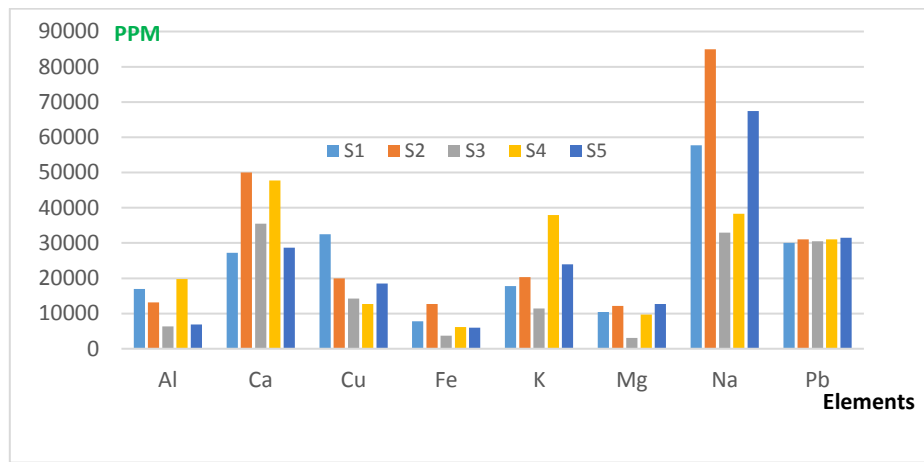
هستند و میزان عناصر قلیایی مانند سدیم و پتاسیم و همچنین مقدار عنصر آلومینیوم برای تحلیل فرایندهای فرسایش در لعاب‌ها معیاری مناسب است [29]. در فرایندهای فرسایش لعاب یعنی فرایند تبادل یونی، با خروج یون‌های قلیایی از ساختار لعاب، غلظت سایر یون‌ها مانند آلومینیوم افزایش می‌یابد، این موضوع در نمودارهای میله‌ای (شکل ۶-۱)، (شکل ۶-۲)، (شکل ۶-۳) (شکل ۴-۶) و (شکل ۷)، برای مقایسه میزان فرسایش در این نمونه‌ها ترسیم شده است. بر این اساس، مقدار متوسط عناصر قلیایی سدیم و پتاسیم که در فرایند تبادل یونی در فرسایش لعاب شرکت می‌کنند عبارت هستند از: نمونه  $S_1$  ۴٪،  $S_2$  ۵٪،  $S_3$  ۲٪،  $S_4$  ۴٪،  $S_5$  ۴/۵٪. همان‌طور که گفته

جدول ۲: نتایج تجزیه کمی عنصری نمونه‌های لعاب به روش پلاسما جفت شده القایی بر حسب ppm  
Table 2: Results of quantitative analysis of glazes by inductively coupled plasma (ICP)

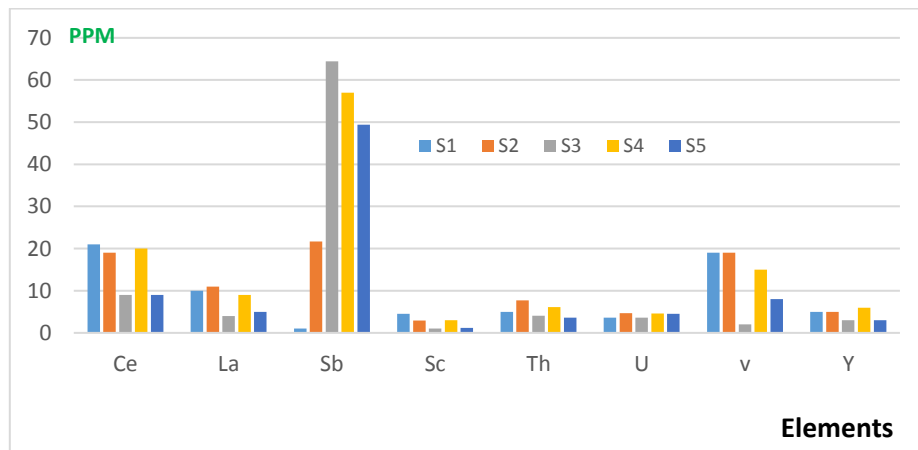
	Ag	Al	As	Ba	Be	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	K
DL	0.1	100	0.5	5	0.2	100	0.1	1	1	1	1	100	100
S <sub>1</sub>	2.6	17000	>100	234	1	27228	0.42	21	164	34	32443	7770	17774
S <sub>2</sub>	48.9	13143	43	357	1	49962	0.36	19	9	43	19956	12721	20284
S <sub>3</sub>	5	6309	4.3	127	0.8	35457	1.8	9	8	8	14250	3747	11416
S <sub>4</sub>	3.9	19760	41.8	297	1	47779	0.35	20	30	80	12688	6145	37973
S <sub>5</sub>	7.3	6860	43.3	91	0.9	28705	0.36	9	37	11	18462	5967	23916

	La	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	S	Sb	Sc	Sr
DL	1	1	100	5	0.5	100	1	10	1	50	0.5	0.5	2
S <sub>1</sub>	10	88	10435	229	1.52	57683	3846	813	>3%	1992	1.03	4.5	292
S <sub>2</sub>	11	69	12142	296	1.7	84968	2519	1578	>3%	2043	21.7	2.9	704
S <sub>3</sub>	4	33	3090	90	0.71	32920	1561	143	>3%	845	64.4	1	152
S <sub>4</sub>	9	103	9690	318	1.05	38333	1647	868	>3%	2262	57	3	465
S <sub>5</sub>	5	37	12686	240	0.86	67453	2708	469	>3%	1076	49.4	1.2	353

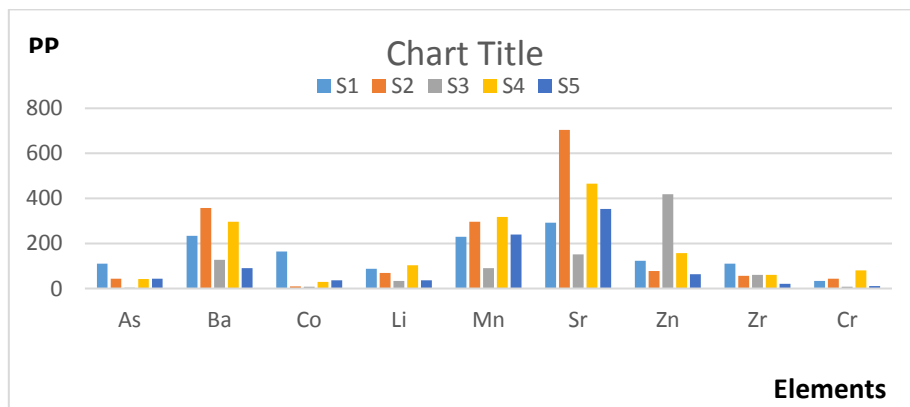
	Th	Ti	U	v	Y	Yb	Zn	Zr
DL	0.5	10	0.5	1	0.5	0.2	1	5
S <sub>1</sub>	5	2480	3.6	19	5	0.6	123	111
S <sub>2</sub>	7.7	1463	4.7	19	5	0.6	77	57
S <sub>3</sub>	4.1	51	3.6	2	3	0.4	418	60
S <sub>4</sub>	6.1	939	4.6	15	6	0.7	157	60
S <sub>5</sub>	3.6	173	4.5	8	3	0.4	64	21



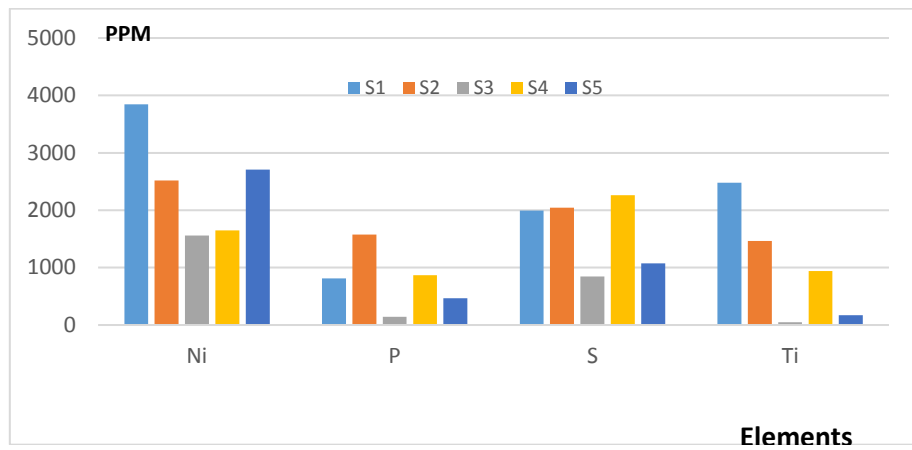
شکل ۶-۱: نمودار میله‌ای مقایسه‌ی عنصری بین نمونه‌های لعاب مورد مطالعه  
Fig. 6-1: Elemental comparison bar chart of the studied glaze samples



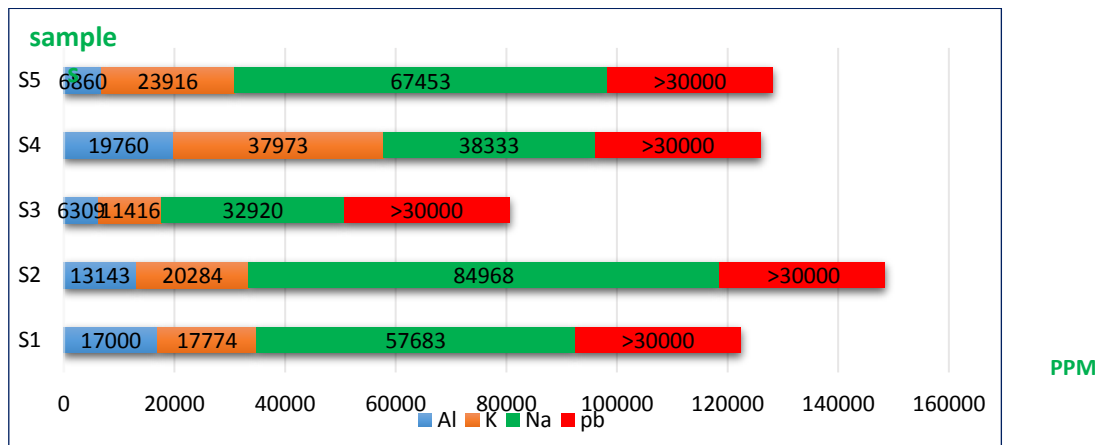
شکل ۶-۲: نمودار میله‌ای مقایسه‌ی عنصری بین نمونه‌های لعاب مورد مطالعه  
Fig. 6-2: Elemental comparison bar chart of the studied glaze samples



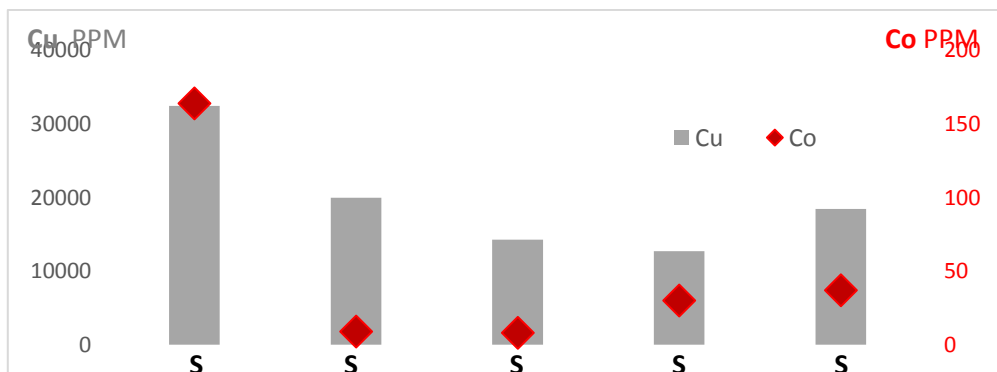
شکل ۶-۳: نمودار میله‌ای مقایسه‌ی عنصری نمونه‌های لعاب مورد مطالعه  
Fig. 6-3: Elemental comparison bar chart of the studied glaze samples



شکل ۴-۶: نمودار میله‌ای مقایسه‌ی عنصری بین نمونه‌های لعاب مورد مطالعه  
Fig. 6-4: Elemental comparison bar chart of the studied glaze samples



شکل ۷: نمودار مقایسه‌ی مقداری عناصر قلیایی، آلومینیوم و سرب در نمونه‌های لعاب مورد مطالعه  
Fig. 7: Comparison diagram of some alkaline elements, aluminum and lead in the studied glaze samples



شکل ۸: نمودار مقایسه‌ی مقداری عناصر کبالت و مس در نمونه‌های لعاب مورد مطالعه  
Fig. 8: Comparison diagram of some cobalt and copper elements in the studied glaze sample

مورد مطالعه برای شناسایی فازهای تشکیل دهنده، با دستگاه XRD مورد تجزیه قرار گرفتند و فازهای اصلی و جزئی در آن‌ها شناسایی شدند، مطابق با (جدول ۳) و (شکل ۹). بنا بر نتایج گزارش شده که در (جدول ۳) خلاصه شده است، تفاوت‌هایی در ترکیب بدنه‌های سرامیکی مورد مطالعه مشاهده می‌شود. نمونه S<sub>1</sub> مربوط به گنبد بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی، دارای فاز اصلی کوارتز، آنورتیت، اوژیت، کریستوبالیت است و فازهای جزئی در این نمونه کلسیت و ژیپس است. در این نمونه با توجه به حضور فازهای دمابالا مانند آنورتیت و کریستوبالیت، وجود فاز جزئی کلسیت می‌تواند نشان از تشکیل این فاز در طی زمان به صورت کلسیت ثانویه باشد، زیرا وقتی دمای پخت به حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، کلسیت و همچنین دولومیت شروع به تجزیه شدن می‌کنند و در حدود ۸۷۰ درجه سانتی‌گراد از بین می‌روند [30]. بررسی‌ها نشان داده است که تبدیل دانه‌های کوارتز به کریستوبالیت در حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد و نقطه ذوب این فاز، ۱۷۲۲ درجه سانتی‌گراد است [31]؛ بنابراین با توجه به وجود کریستوبالیت همچنین آنورتیت، در این نمونه، دمای پخت نمونه S<sub>1</sub> می‌تواند بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده باشد. نمونه S<sub>2</sub> از فازهای اصلی کوارتز و آنورتیت تشکیل شده و فازهای جزئی در این نمونه هماتیت و ارتوکلاز است. فاز آنورتیت نیز در حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شود. روند تشکیل فاز آنورتیت به این صورت است که در مرحله اول ژلنیت که فاز میانی است در حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل و به تدریج با افزایش دما به آنورتیت تبدیل می‌شود [32]. در نمونه

S<sub>3</sub> مربوط به گنبد شاه اسماعیل، از فازهای اصلی، کوارتز و ژلنیت و از فازهای جزئی ارتوکلاز، ولاستونیت تشکیل شده است. با توجه به حضور ژلنیت به عنوان فاز اصلی و تشکیل این فاز در ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، دمای پخت این نمونه می‌تواند حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد (همان منبع). از نمونه‌های گنبد سلطانیه، S<sub>4</sub> دارای فاز اصلی کوارتز و اوژیت و فازهای جزئی کلسیت، میکروکلین، آلبیت، ژیپس و ژلنیت است. با توجه به گزارش فاز دمابالای اوژیت (از گروه کانی‌های پیروکسن) دمای پخت این نمونه می‌تواند حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد. نمونه S<sub>5</sub> سلطانیه از فاز اصلی کوارتز و فازهای جزئی ژلنیت، ایلیت، کلسیت و فاز بی‌شکل تشکیل شده است. در این نمونه با توجه به حضور فاز ژلنیت دمای پخت می‌تواند در حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد و حضور فاز کلسیت نشان از تشکیل ثانویه آن دارد.

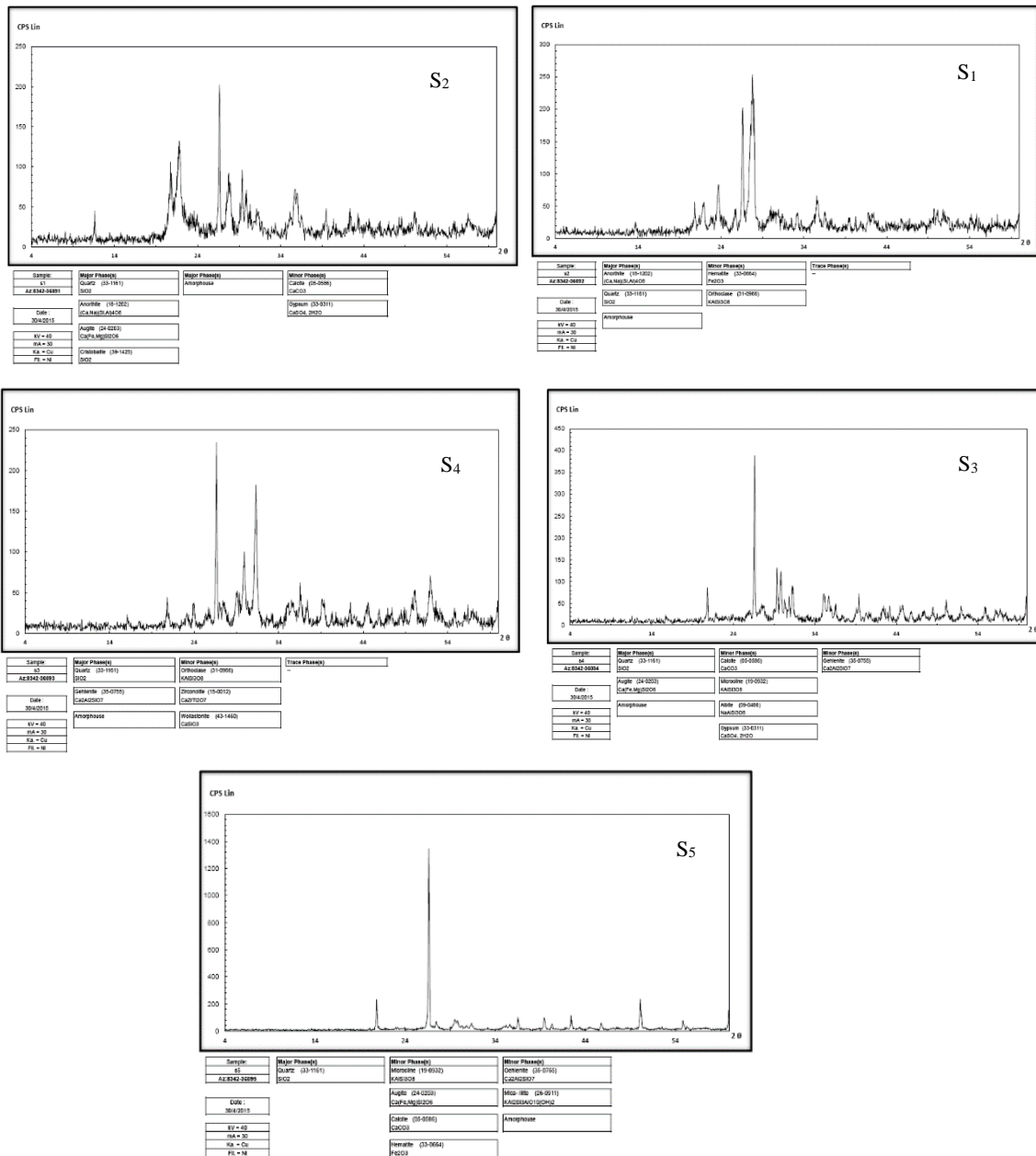
#### ۴. نتیجه‌گیری

بر اساس آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، نتایج تجزیه کمی عنصری لعاب‌های فیروزه‌ای مورد مطالعه به روش پلاسما جفت شده القایی نشان می‌دهد که همه لعاب‌های مورد مطالعه در این پژوهش، در ترکیب عنصری خود بیش از ۳٪ سرب دارند. عنصر واسطه رنگ‌ساز برای ایجاد رنگ آبی فیروزه‌ای در این لعاب‌ها مس و به مقدار کمتری نیز کبالت است. یون مس در محیط‌هایی با pH متفاوت می‌تواند فام‌های متفاوتی از رنگ آبی را ایجاد کند. همچنین حضور یون کبالت نیز در ایجاد فام‌های مختلف آبی موثر است. بیشترین میزان این یون بر اساس

جدول ۳: نتایج تجزیه پراش پرتو X بدنه‌های سرامیکی مورد مطالعه

Table 3: XRD analysis results

samples	Major phases	Minor phases
S <sub>1</sub>	Quartz, Anorthite, Augite, cristobalite amorphouse,	Calcite, gypsum
S <sub>2</sub>	Anorthite, Quartz, amorphouse	Hematite, orthoclase
S <sub>3</sub>	Quartz, gehlenite, amorphouse	Orthoclase, zirconolite, wollastonite
S <sub>4</sub>	Quartz, augite, amourphouse	Calcite, microcline, albite, gypsum, gehlenite
S <sub>5</sub>	Quartz	Microcline, augite, calcite, hematite, Gehlenite, mica-illite, amorphouse



شکل ۹: نمودارهای تجزیه بدنه‌های سرامیکی به روش XRD  
Fig. 9: Diagrams of decomposition of ceramic bodies by XRD

فرسایش و انجام فرایندهای تبادل یونی در لعاب با سپری شدن زمان و خروج یون‌های قلیایی از ساختار لعاب و بالا رفتن غلظت سایر یون‌ها در لعاب از جمله Al، با مشاهده نمودار مقایسه‌ای عناصر در (شکل‌های ۶) و (شکل ۷) می‌توان گفت بیشترین فرسودگی را نمونه S4 ایلخانی از گنبد سلطانیه دارد و پس از آن نمونه‌های S1 و S2 صفوی و پس از آن S5 از گنبد سلطانیه و کم‌ترین میزان فرسودگی در نمونه S3 از گنبد شاه اسماعیل است که با توجه به

نتایج تجزیه ICP به ترتیب در نمونه‌های S1، S4، S5 و S2 گزارش شده است. در مورد نمونه‌های بقعه شیخ صفی مشاهده می‌شود که مقدار عنصر رنگ‌ساز مس در نمونه S1، S2 و S3 به ترتیب ۲٪، ۳/۲٪ و ۱/۴٪ است و در نمونه‌های گنبد سلطانیه S4 و S5 برابر با مقدار ۱/۳٪ و ۱/۸٪ است که نشان می‌دهد در نمونه لعاب‌های بقعه شیخ صفی به جز S3 مقدار مس بیش از نمونه‌های سلطانیه است. با توجه به سپری شدن فرایندهای

سلطانیه نیز با توجه به نتایج به دست آمده از تجزیه پراش پرتوایکس با حضور فاز اوژیت، دمای پخت می‌تواند در حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد و در نمونه S<sub>5</sub> نیز با حضور فاز ژلنیت گزارش شده در نتایج آزمایش، دمای پخت در حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تخمین زده می‌شود. این نتایج در مورد نمونه‌های موردی مطالعه شده در این پژوهش و بر اساس آزمایش پراش پرتوایکس XRD گزارش شده است.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از استاد ارجمند سرکار خانم دکتر حمیده چوبک، همچنین مسئولین محترم میراث فرهنگی استان اردبیل و گنبد سلطانیه زنجان و کارشناسان محترم آزمایشگاه مطالعات مواد معدنی زرآما برای انجام آزمایش‌های آنالیز دستگاهی، قدردانی می‌شود.

معاصر بودن آن بناها، این نتیجه دور از انتظار نیست. با توجه به نتایج حاصل از تجزیه پراش پرتو ایکس XRD با شناسایی فازهای موجود در بدنه‌های کاشی‌های نره می‌توان در مورد حدود تقریبی دمای پخت نمونه‌ها تخمین‌هایی زد؛ برای گزارش دقیق، روش‌های مکمل نیز مانند آنالیز حرارتی نیاز است. بر این اساس در نمونه‌های S<sub>1</sub> و S<sub>2</sub> با توجه به گزارش کریستوبالیت و آنورتیت، دمای پخت تقریبی بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد تخمین زده می‌شود و با توجه به اینکه کانی کلسیت در حدود ۸۷۰ درجه سانتی‌گراد از بین می‌رود، حضور این فاز در همه نمونه‌های مورد مطالعه در این آزمایش نشان از تشکیل آن به صورت فاز کلسیت ثانویه در طی زمان است. در نمونه S<sub>3</sub> مربوط به گنبد شاه اسماعیل با توجه به گزارش XRD و حضور فاز ژلنیت، دمای پخت در حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تخمین زده می‌شود و در نمونه S<sub>4</sub> گنبد

### References

- [1] Moortgat, A. The Art of Ancient Mesopotamia (The Classical Art of the Near East) English Translation: Judith Filson, (Translated by Zahra Basti, Mohammad Rahim Sarraf). Tehran: SAMT, 2008: 296-302. [in Persian]  
[مورتگات آتون. هنر بین‌النهرین باستان (هنر کلاسیک خاور نزدیک) ترجمه انگلیسی: جودیت فیلسون، مترجمان: زهرا باستی، محمدرحیم صراف، تهران: سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها؛ ۱۳۸۷، ۲۹۶-۳۰۲.]
- [2] Girshman, R. The ziggurat of Tchogha Zanbil. Volume one. Translated by Asghar Karimi. Tehran: Cultural Heritage Organization; 1994: 130-139. [in Persian]  
[گیرشمن رومن. زیگورات چغازنبیل. جلد اول. ترجمه اصغر کریمی. تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور؛ ۱۳۷۳، ۱۳۰-۱۳۹.]
- [3] Wolf, H. Ancient Iranian Crafts, Translated by Sirus Ebrahimzadeh. Tehran: Scientific and Cultural Publishing Company; 2005:105-108. [in Persian]  
[ولف هانس. صنایع دستی کهن ایران. ترجمه سیروس ابراهیم‌زاده. تهران: شرکت انتشارات علمی و فرهنگی؛ ۱۳۸۴، ۱۰۵-۱۰۸.]
- [4] Graminejad, A.; Geraminejad, H. Tiling. Tehran: Ettehad Publications; 2009, 8. [in Persian]  
[گرامی‌نژاد ابولقاسم. گرامی‌نژاد حمیدرضا. کاشی‌کاری. تهران: انتشارات اتحاد؛ ۱۳۸۸، ۸.]
- [5] Pope, A.; Ackerman, P. A survey of Persian art, from prehistoric times to the present. Translated by Najaf Daryabandari. Tehran: Scientific and Cultural Publications; 2009:1324. [in Persian]  
[پوپ آرتور ایهام، آکرمن فیلیس. سیری در هنر ایران از دوران پیش از تاریخ تا امروز معماری دوران اسلامی. ترجمه نجف دریابندری. تهران: انتشارات علمی و فرهنگی؛ ۱۳۸۸، ۱۳۲۴.]
- [6] Kiyani, F. An Introduction to the Art of Tiling in Iran, Mah-e Honar Book, No.153; 2011.[in Persian]  
[کیانی فاطمه. در آمدی بر هنر کاشیکاری ایران، کتاب ماه هنر، شماره ۱۵۳؛ ۱۳۹۰.]
- [7] Mesbahi, Sh; Lost Safavid Art and Architecture: Sheikh Safi Al-Din Ardabili Complex, Reconstruction of Aali Qapu Portal and Regeneration of Its decorations with an introduction by Dr. Baqer Ayatollah Zadeh Shirazi. Tehran: Rasaneh-Pardaz Publications; 2009: 9-14. [in Persian]  
[مصباحی شکوفه. گمشده‌ای از هنر و معماری صفویه

- تهران: انتشارات روزنامه نقش جهان؛ ۱۳۲۴: ۸۵.]
- [15] Pirnia, M.K. Introduction to Islamic architecture in Iran, Urban and suburban buildings. Tehran: Iran University of Science and Technology Press; 1995: 224. [in Persian]
- [پیرنیا محمد کریم. آشنایی با معماری اسلامی ایران ساختمان‌های درون‌شهری و برون‌شهری. تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران؛ ۱۳۷۴: ۲۲۴.]
- [16] Hamzelou M. Soltaniyeh: Applied Arts in Soltaniyeh dome; 2001. [in Persian]
- [حمزه‌لو منوچهر، سلطانیه: هنرهای کاربردی در گنبد سلطانیه. تهران: انتشارات بهدید، ۱۳۸۰]
- [17] Asgari A. "Decorative motifs of Soltanieh historical monuments". Thesis for obtaining a bachelor's degree in handicrafts. Tehran University of Arts; 1991. [in Persian]
- [عسگری ابراهیم. «نقوش تزئینی بناهای تاریخی سلطانیه». پایان‌نامه برای اخذ درجه کارشناسی صنایع دستی. دانشگاه هنر تهران؛ ۱۳۷۰.]
- [18] Bagchee, Nandini. Book illumination and architectural decoration: the Mausoleum of Uljaytu in Sultaniyya Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Architecture Massachusetts Institute of Technology. Date Issued; 2000.
- [19] Karimian, R. The Rise and Fall of a Capital: The Formation, Development, Authority and Destruction of the City of Soltanieh. Archaeological Studies; 2014, 6(1): 54 -39. [in Persian]
- [کریمیان رضوانه، طلوع و غروب یک پایتخت: شکل‌یابی، توسعه، اقتدار و اضمحلال شهر سلطانیه. مطالعات باستان‌شناسی ۱۳۹۳، ۶(۱): ۵۴-۳۹.]
- [20] Ahmadi N., Lotfi M. The Trusteeship of Sheikh Safi al-Din Ardabili's Shrine during the Safavid period. Islamic History Quarterly; 2009,19(3): 47-28. [in Persian]
- [احمدی نزهت، لطفی مریم. تولیت بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی در دوره حکومت صفویان. فصلنامه تاریخ اسلام ۱۳۸۸؛ ۱۹(۳): ۴۷-۲۸.]
- [21] Moradi P. "Technology and pathology and restoration plan of the outer shell tiles of Soltanieh Dome", Thesis for obtaining a master's degree in the restoration of historical-artistic works, University of Art, Tehran; 2012. [in Persian]
- [مرادی پری‌چهر. «فن‌شناسی و آسیب‌شناسی و طرح
- مجموعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی طرح بازسازی سردر عالی‌قاپو و احیای تزئینات آن با مقدمه دکتر باقر آیت‌الله زاده شیرازی. تهران: انتشارات رسانه‌پرداز؛ ۱۳۸۸: ۹-۱۴.]
- [8] Mokhlesi, M. A. Historical geography of Soltanieh. Tehran: Mokhlesi Publications; 1985: 3. [in Persian]
- [مخلص‌محمدعلی. جغرافیای تاریخی سلطانیه. تهران: انتشارات مخلص؛ ۱۳۶۴: ۳.]
- [9] Mostofi, H. Selected history. Tehran: Amirkabir Publications; 2002: 67. [in Persian]
- [مستوفی حمدالله. تاریخ گزیده. تهران: انتشارات امیرکبیر؛ ۱۳۸۱: ۶۷.]
- [10] Kiani, M. Y. Iranian Architecture (Islamic Period), SAMT Press; 2000: 72. [in Persian]
- [کیانی محمد یوسف. معماری ایران (دوره اسلامی). انتشارات سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها (سمت)؛ ۱۳۷۹: ۷۲.]
- [11] Iqbal Ashtiani A. Detailed history of Iran from the Mongol conquest to the proclamation of constitutionalism. First volume. Tehran: Amirkabir Publications; 1995: 525. [in Persian]
- [اقبال آشتیانی عباس. تاریخ مفصل ایران از استیلای مغول تا اعلان مشروطیت. جلد اول. تهران: انتشارات امیرکبیر؛ ۱۳۷۴.]
- [12] Della Valle, P. Travelogue of Peter Della Valle, Travel to Persia. Translated by Shoa'uddin Shafa. Tehran: Book Translation and Publishing Company; 1969: 262. [in Persian]
- [دلاواله پیترو. سفرنامه پیترو دلاواله قسمت مربوط به ایران. ترجمه شعاع‌الدین شفا. تهران: بنگاه ترجمه و نشر کتاب؛ ۱۳۴۸]
- [13] Dieulafoy, J. Madame Dieulafoy's travelogue. Translated by Homayoun Farahvashi. Tehran: Donyay-e Ketab Publications; 2013: 110. [in Persian]
- [دیولافوا ژان. سفرنامه مادام دیولافوا. ترجمه همایون فره‌وشی. تهران: انتشارات دنیای کتاب؛ ۱۳۹۲: ۱۱۰.]
- [14] Flandin, E. Eugene Flandin's travelogue to Iran in 1840-1841. Translated by Hossein Noursadeghi. Tehran: Naghsh-e Jahan Press; 1945: 85. [in Persian]
- [فلاندن اوژن. سفرنامه اوژن فلاندن به ایران در سال‌های ۱۸۴۰ - ۱۸۴۱. ترجمه حسین نور صادقی.

- مرمت کاشی‌های پوسته خارجی گنبد سلطانیه» پایان‌نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد مرمت آثار تاریخی-هنری، دانشگاه هنر، تهران؛ ۱۳۹۱.
- [22] Rahmani R. "Pathology and documentation of interior decorations of Soltanieh dome". Thesis for obtaining a master's degree in restoration of historical and cultural monuments. Art Campus of Isfahan University; 1999. [in Persian]
- [رحمانی رضا. «آسیب‌شناسی و مستند نگاری تزئینات داخلی بنای گنبد سلطانیه». پایان‌نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد مرمت آثار تاریخی-فرهنگی. دانشکده پردیس هنر اصفهان؛ ۱۳۷۸.]
- [23] Mo'ayedzadeh, M. "The Organization Plan for the restoration of the interior body decorations of Soltanieh Dome", Thesis for obtaining a master's degree in the restoration of historical and artistic works. Tehran University of Arts; 2014. [in Persian]
- [مؤیدزاده مونا. «طرح ساماندهی اقدامات مرمت تزئینات بدنه‌های داخلی گنبد سلطانیه» پایان‌نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد مرمت آثار تاریخی-هنری. دانشگاه هنر تهران؛ ۱۳۹۳.]
- [24] Afghan A. Investigating and Recognizing the tourism-recreational-cultural Complex in Soltanieh. Thesis for obtaining a master's degree in architecture. Art Campus of Isfahan University; 1999. [in Persian]
- [افغان آتوسا. مطالعه و شناخت مجموعه جهانگردی-تفریحی-فرهنگی در سلطانیه. پایان‌نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد معماری. دانشکده پردیس هنر اصفهان؛ ۱۳۷۸.]
- [25] Yaqubi J. Factor analysis of barriers to tourism development in Soltanieh County of Zanjan province. Geographical Research Quarterly; 2013, 28(4): 194-183. [in Persian]
- [یعقوبی جعفر. تحلیل عامل موانع توسعه گردشگری در بخش سلطانیه استان زنجان. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی ۱۳۹۲، ۲۸(۴): ۱۹۴-۱۸۳.]
- [26] Razeqi A. Pir Babaei M. Nadimi H. Causes of conflicts in the conservation of architectural heritage, a case study: The Word Registered Heritage of Soltanieh Dome and citadel. Iranian Islamic City Studies Quarterly; 2013, 13: 54-45. [in Persian]
- [رازقی علیرضا، پیربابایی محمد تقی، ندیمی حمید. علل بروز تعارض‌ها در حفاظت از میراث معماری، مطالعه موردی: مجموعه ثبت جهانی گنبد و ارگ سلطانیه. فصلنامه مطالعات شهر ایرانی اسلامی ۱۳۹۲، ۱۳: ۵۴-۴۵.]
- [27] Shayestehfar, M., Golmaghanizadeh Asl, M. The Ornaments of the inscriptions on the Exterior Facade of Sheikh Safi Al-Din Ardabili, Shrine, Social Sciences and Humanities, Shiraz University; 2002, 19(1): 103-84. [in Persian]
- [شایسته‌فر مهناز، گل‌مغانی‌زاده اصل ملکه. تزئینات کتیبه‌ای نمای بیرونی بقعه شیخ صفی‌الدین اردبیلی، علوم اجتماعی و انسانی دانشگاه شیراز ۱۳۸۱، ۱۹(۱): ۱۰۳-۸۴.]
- [28] Yousefi, H., et al. Reconsidering the Architecture of Shaikh Safi al-Din Ardabili's Shrine: New Findings in Archeological Excavations at Janat Sara Site, Intl. J. Humanities; 2013, 2(1): 49-67.
- [29] Eppler, R. A. Glazes and glass coatings / by Richard A. Eppler and Douglas R. Eppler. The American Ceramic Society 735 Ceramic Place Westerville, Ohio USA; 1998: 236-238.
- [30] Cultrone, G., Sidraba, I., Sebastina, E. Mineralogical and physical characterization of the bricks used in the construction of the "Triangul Bastion" Riga (Latvia), Applied clay science; 2005, (289): 297-308.
- [31] Rahaman, M., N. Ceramic Processing and Sintering, CRC press, New York; 2003.
- [32] Okada, k., et al. Effects of Grinding and Firing Conditions on CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub> Phase Formation by Solid-State Reaction of Kaolinite with CaCO<sub>3</sub>, Applied Clay Science; 2003, 23(5-6): 329-336. DOI: 10.1016/S0169-1317(03)00132-7