



Characterizing the Technology and Structure of Celadon Wares from the City of Gour; An Archaeometrical Approach

Majid Montazer Zohouri¹, Rémy Chapoulie², Mohammadamin Emami³

1. Assistant Professor, Department of Archaeology, Faculty of Literature and Humanities, University of Tehran, Tehran, Iran (Corresponding Author). **Email:** majidzohouri@ut.ac.ir

2. Professor, Archéosciences Bordeaux /UMR 6034 CNRS, Université Bordeaux Montaigne, France.

Email: remy.chapoulie@u-bordeaux-montaigne.fr

3. Professor, Department of Conservation and Archaeometry, Art University of Isfahan, Isfahan, Iran. **Email:** m.emami@aui.ac.ir

Article Info	Abstract
Pp: 383-406	use of high-energy synchrotron rays in order to identify and characterize historical and cultural materials as accurately as possible, usually in a non-destructive manner and with very high accuracy, has become a suitable method to identify the elemental composition of archaeological materials in very small quantities. Furthermore, cathodoluminescence rays can lead to better identification of the chemical composition and phase changes in the historical samples. Cathodoluminescence rays generated from the crystalline compounds lead to new mineralogical interpretations in order to better understand the manufacturing technology and the origin of historical material. In line with the archaeological investigation and studies conducted during the years 1392-1393, a significant number of celadon ceramics, and engraved and glazed pottery were found at the site of Gour. In this research, seven potsherds were examined using conventional laboratory methods and high-energy X-ray beams produced in synchrotron and microscopic cathodoluminescence. These studies were carried out to identify the chemical properties of these ceramics and how they were manufactured. In line with these studies, it was found that these ceramics were made of kaolinite clay and baked at a temperature of ca. 1200 degrees Celsius in two manufacturing stages, and specific proportions of raw materials Si/Al were used in the chemical composition of their body and glaze. This proportion and the method of firing and the condition of the kiln were proof of the coherence and strength of the celadon, which is identical to the temperature interval of the formation of the crystalline phases between the body and the glaze, so-called reaction phase-interphase area.
Article Type: Research Article	
Article History:	
Received: 22 September 2023	
Revised form: 16 January 2024	
Accepted: 10 February 2024	
Published online: 22 May 2025	
Keywords: The City of Gour, Celadon Ware, Photon Rays, Synchrotron, Cathodoluminescence.	

Cite this The Author(s): Montazer zohouri, M., Chapoulie, R. & Emami, S. M., (2025). "Characterizing the Technology and Structure of Celadon Wares from the City of Gour; An Archaeometrical Approach". *Journal of Archaeological Studies*, 17(1: 36): 383-406.

<https://doi.org/10.22059/jarcs.2024.363663.143227>



Published by: University of Tehran Press.

Homepage of this Article: https://jarcs.ut.ac.ir/article_95903.html?lang=en

1. Introduction

The environmental, economic, industrial, and spatial characteristics of the city have been the subject of several detailed studies (Huff, 1970; Huff, 1973; Huff, 2008). The city exhibits a circular urban plan approximately 2 kilometers in diameter, enclosed by two concentric mudbrick ramparts and a surrounding moat. It is connected to the surrounding plain by two perpendicular streets intersecting at the city's center and features four main gates. Portions of the circular fortification are still preserved, including large governmental and religious structures situated in the city center.

Despite the limited number of archaeological excavations conducted in the area, these investigations have produced valuable findings. The most significant research has been carried out by Dietrich Huff and colleagues (Huff and Gignoux, 1978; Karimian and Montazer-Zohouri, 2014). Ceramic sherds represent the most important category of archaeological finds at the site. Research indicates that the ceramics from Ardashir Khurrah date from the late Arsacid and Sasanian periods through the early, middle, and late Islamic periods, spanning approximately the 7th to the 16th/17th centuries CE (Karimian and Montazer-Zohouri, 2014).

Studies focusing on the cephalina (citadel) of Ardashir Khurrah have further clarified the chronological range of pottery production in the city. These analyses suggest that ceramic material from the site spans from the late Parthian and Sasanian periods through to the early Islamic centuries and into the middle and late Islamic periods (approximately the 1st through 11th centuries AH / 7th through 17th centuries CE) (Karimian and Montazer-Zohouri, 2014). As such, the ceramic assemblage from Ardashir Khurrah constitutes a critical source for understanding the cultural and historical development of this important ancient city.

One of the key types is the celadon wares imported from China. Iran and China had cultural and commercial relations from the pre-Islam period; many archaeological finds indicate this interaction. The China-Iran relationship lasted into the Islamic period; celadon wares are one of the most important sources of evidence on the two commercial cooperation between the two countries. Celadon had been known as a commercial Chinese product in the Islamic lands (Emami *et al.*, 2019). This ware type has a frit body covered with revitalized glaze in the green to brown color range. Celadon ware is a common type in a large number of Islamic sites, distributed across the Iranian Plateau via the main and secondary trade roads from the 7th and 8th to the 16th-17th centuries. The celadon wares found in Ardshirkhoreh are in the green and grey color range and date back to the 13th-14th and the 15th-17th centuries. Similar types have been found at Siraf, Kish, and Rab-e Rashidi (Morgan, 1991, Takahito, 1988). Most celadons are found in the citadel (Arg) and along the eastern street in Ardshirkhowreh. The Chinese celadons have been imported to the area by the southern ports like Siraf and then scattered in the hinterlands city like Ardshirkhowreh.

2. Material and Methods

New insights on the chemical composition of the stoneware pottery with bluish green glaze so called celadon from Ardeshir-Khore, 4th century AC (Iran) have been achieved by SR-based X-ray diffraction analysis and cathodoluminescence microscopy. Techniques based on synchrotron radiation have been widely applied in archaeology. High-energy synchrotron radiation makes it possible to characterize the composition of the newly formed minute crystalline phases within the matrix of the pottery. At the same time, cathodoluminescence imaging provides new insight into mineralogical criteria that are not visible with the usual optical microscopy approach. However, the tiny crystals which are revealed, can be considered as real markers for the knowledge of important features such as the highest firing temperatures reached at this time.

3. Discussion

Celadon wares are structurally a unique pottery type with numerous chronologically sensitive characteristics. These materials are indications of maritime and land trade from the Far East and China to Iran (Huang *et al.*, 2020, Molera i Marimon *et al.*, 2022). In this regard, the history of the emergence of Celadon in Iran dates back to the Sassanid era and then the peak period of the use of this type of historical pottery in Iran to the Ilkhanid era and the cities of the Persian Gulf: Kerman, Sistan, Jiroft, Kashan, Ray and Qazvin are among the important places for the existence and production of this type of pottery in the Iranian Plateau (Huang *et al.*, 2020, Molera i Marimon *et al.*, 2022, Amirhajloo and Sedighian, 2023, Barnes *et al.*, 2010).

The exact characteristics of the geo-chemical fingerprint and phase composition of the primary clay paste is reflected by the re-crystallizations through firing as an important criterion for the “chaîne opératoire” in ceramic technology of the past (Tite *et al.*, 2012). The determination of newly formed minute crystalline phases by synchrotron XRD is essential, since identification of the reaction products during the firing of primary clay, sometimes cannot be well clarified by routine methods (Emami *et al.*, 2021). Multidisciplinary methods are crucial for determining the primary clay base, as well as the manufacturing processes of these prestigious objects (Cheng *et al.*, 2002). Synchrotron based XRD results enable the characterization of both mineralogical constituents of a pottery and its fabrication by identifying high temperature phases and defining kiln atmosphere conditions. The samples were studied earlier by cathodoluminescence imaging to localize the specific zones of recrystallization and the newly formed crystals. Crystal growth and its statement is revealed by means of the cathodoluminescence color of the minerals and will be interpreted as a generation of high temperature silica and calcium phases such as mullite and anorthite.

4. Conclusion

The composition and structure of the celadon were first observed using the common methods

of polarizing microscopy, and then through using high-energy beams of synchrotron and Low-energy rays of cathodoluminescence. Characteristically the results indicate the use of illitic soil with different amounts of carbonate compounds. The cooking temperature of the salads is about 1270 degrees Celsius based on the high temperature phases of the sherds. Moreover, the celadon are made in two stages: first, the body is fired and then the glaze is put on before the body is completely sintered. SR-XRD and CL microscopy have clarified insights into the characterization of high temperature phases in the body and phase-interphase area between the body and the celadon glaze. Anorthite occurred mostly in interphase zones between body and glaze. Over high firing temperature of the celadons (ca. 1200°C), formation of high temperature phases such as mullite and other aluminosilicates, might be notable in association with SiO₂/Al₂O₃ wt% ratios.

Acknowledgments

The experimental work presented in this paper was carried out as a part of a research project, funded by the Gerda Henkel Stiftung, Germany No:AZ53/V/22. The corresponding author greatly appreciates this support. The corresponding author would also like to thank the SESAME synchrotron facility for accepting and establishing project ID20210013. The experiments were performed at the ID09-MS/XPD beamline with the collaboration of SESAME staff. The authors are also appreciate the Archéosciences Bordeaux laboratory (Université Bordeaux Montaigne-CNRS). Sincerely thanks to two anonymous reviewers for kindly proofreading and comments to this article and suggesting important highlights.

Observation Contribution

Dr. Majid Zohouri for data managing , questionnaires and archaeological activities and reviewing of the text. Prof. Chapoulie, data analysis, Prof. Emami, data analysis, strategy of research and interpretation a well as reviewing the final text.

Conflict of Interest

The authors approved that they have no conflict of interest.

شناسایی فناوری و ساختار سلادن‌های به‌دست آمده از شهر گور؛ مطالعات باستان‌سنجی برپایه پرتو کاتودولومینسانس و باریکه سینکروترون

مجید منتظرظهوری^۱، رمی شاپولی^۲، سید محمد امین امامی^۳

۱. استادیار گروه باستان‌شناسی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، نویسنده مسئول. majidzohouri@ut.ac.ir **رایانامه:**

۲. استاد مؤسسه تحقیقات فیزیک کاربردی در باستان‌شناسی، دانشگاه بوردو مونتنین، بوردو، فرانسه.

remy.chapoulie@u-bordeaux-montaigne.fr **رایانامه:**

۳. استاد گروه مرمت آثار تاریخی و فرهنگی و باستان‌سنجی، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران. m.emami@au.ac.ir **رایانامه:**

چکیده	تاریخچه مقاله
کاربرد روش‌های علمی و آزمایشگاهی بر پایه سنجش داده‌های رقومی و تحلیل تصاویر در مقیاس متفاوت جایگاه مناسبی را در مطالعات باستان‌شناسی ایجاد نموده است. استفاده از پرتوهای پرنرژری سینکروترون در راستای شناسایی هرچه دقیق‌تر مواد تاریخی و فرهنگی و معمولاً به‌صورت غیرتخریبی و با دقت بسیار بالا به شناسایی هرچه بهتر مواد مورد بررسی در مقادیر بسیار جزئی کمک نموده است؛ همچنین مطالعه نمونه‌ها با پرتوهای کاتدی و ایجاد شاخصه لومینسانس در کانی‌های موجود در نمونه‌ها، می‌تواند به شناسایی هرچه بهتر ترکیب شیمیایی و تغییرات فازی در نمونه‌های تاریخی منجر گردد. پرتوهای ایجاد شده کاتودولومینسانس از ترکیبات بلورین موجود در نمونه‌های مطالعاتی باعث یافتن تحلیل‌های نوین کانی‌شناسی در راستای درک بهتری از فن‌آوری ساخت و منشأ یک ماده تاریخی می‌شود. در راستای بررسی و مطالعات باستان‌شناسی انجام شده در طی سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۹۳ ه.ش. در محدوده شهر گور تعداد قابل توجهی سفال سلادن و سفال‌های منقوش و دارای لعاب به‌دست آمده است. در این تحقیق تعداد ۷ قطعه از سفال‌های مکشوفه با استفاده از روش‌های مرسوم آزمایشگاهی و استفاده از باریکه پرنرژری اشعه ایکس تولید شده در سینکروترون و کاتودولومینسانس میکروسکوپی مورد بررسی قرار گرفتند. این مطالعات در راستای شناسایی خصوصیات شیمیایی این سلادن‌ها، نحوه ساخت آنان انجام گردید. در راستای این مطالعات مشخص گردید که این سفال‌ها از خاک رس کائولینی و در درجه حرارت حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و در دو مرحله پخته شده و از نسبت‌های مشخصی از مواد خام در ترکیب شیمیایی بدنه و لعاب آن‌ها استفاده شده است. این تناسب و نحوه پخت مواد دلیلی است بر انسجام و استحکام سلادن، که با درجه حرارت شکل‌گیری فازهای بلورین بین بدنه و لعاب همسانی دارد.	صص: ۴۰۶-۳۸۳ نوع مقاله: پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱ کلیدواژگان: شهر گور، سفال سلادن، پرتوهای فوتونی، سینکروترون، کاتودولومینسانس.

ارجاع به مقاله: منتظرظهوری، مجید؛ شاپولی، رمی؛ و امامی، سید محمدامین، (۱۴۰۴). «شناسایی فناوری و ساختار سلادن‌های به‌دست آمده از شهر گور؛ مطالعات باستان‌سنجی برپایه پرتو کاتودولومینسانس و باریکه سینکروترون». *مطالعات باستان‌شناسی*، ۱۷(۱): ۳۶-۴۰۶.

<https://doi.org/10.22059/jarcs.2024.363663.143227>



Published by: University of Tehran Press.

صفحه اصلی مقاله در سامانه نشریه: https://jarcs.ut.ac.ir/article_95903.html

۱. مقدمه

شهر گور یا اردشیرخوره در دشت فیروز آباد در استان فارس واقع شده است. این شهر باستانی توسط «اردشیر بابکان» (مؤسس سلسله ساسانی) تأسیس گردید. شهر اردشیرخوره، نقش مهمی در رخداد‌های سیاسی، اجتماعی و مذهبی دوره ساسانیان داشته و نخستین پایتخت ساسانیان محسوب می‌گردد. متون پهلوی ساسانی و بسیاری از گزارشات مورخان و جغرافیدانان قرون اسلامی هرکدام در بازه زمانی خود اطلاعات ارزنده‌ای پیرامون ویژگی‌های عمومی (محیطی، معیشتی و صنعتی) و ویژگی‌های فضایی این شهر در اختیار ما قرار می‌دهند (فره‌وشی، ۱۳۵۴؛ اصطخری، ۱۳۷۳؛ ابن حوقل، ۱۳۴۵؛ ابن بلخی، ۱۳۶۳؛ مسعودی، ۱۳۶۵). اردشیرخوره، شهری است مدور با قطر دو کیلومتر، محصور در دو باروی گلی و خندقی که به وسیله دو خیابان عمودبرهم در محور جهات اصلی و چهاردروازه به دشت پیرامون مرتبط می‌گشت. در مرکز این شهر نیز بقایای دژی مدور و بناهای عظیم مذهبی و حکومتی جای دارند (تصویر ۱). تاکنون کاوش‌های محدود باستان‌شناسی در این شهر صورت گرفته که نتایج ارزشمندی داشته است. از میان کاوش‌ها و بررسی‌های باستان‌شناختی که تاکنون صورت پذیرفته، می‌توان به اقدامات باستان‌شناختی «دیتیش هوف»، «مسعود آذرنوش» و «مجید منتظرظهوری» اشاره نمود (Huff, 1970; Huff, 1973; Huff, 2008; Huff, 2014; Huff & GIGNOUX, 1978؛ کریمیان و منتظرظهوری، ۱۳۹۳؛ منتظرظهوری، ۱۳۹۲؛ ۱۳۹۸ و ۱۴۰۰).

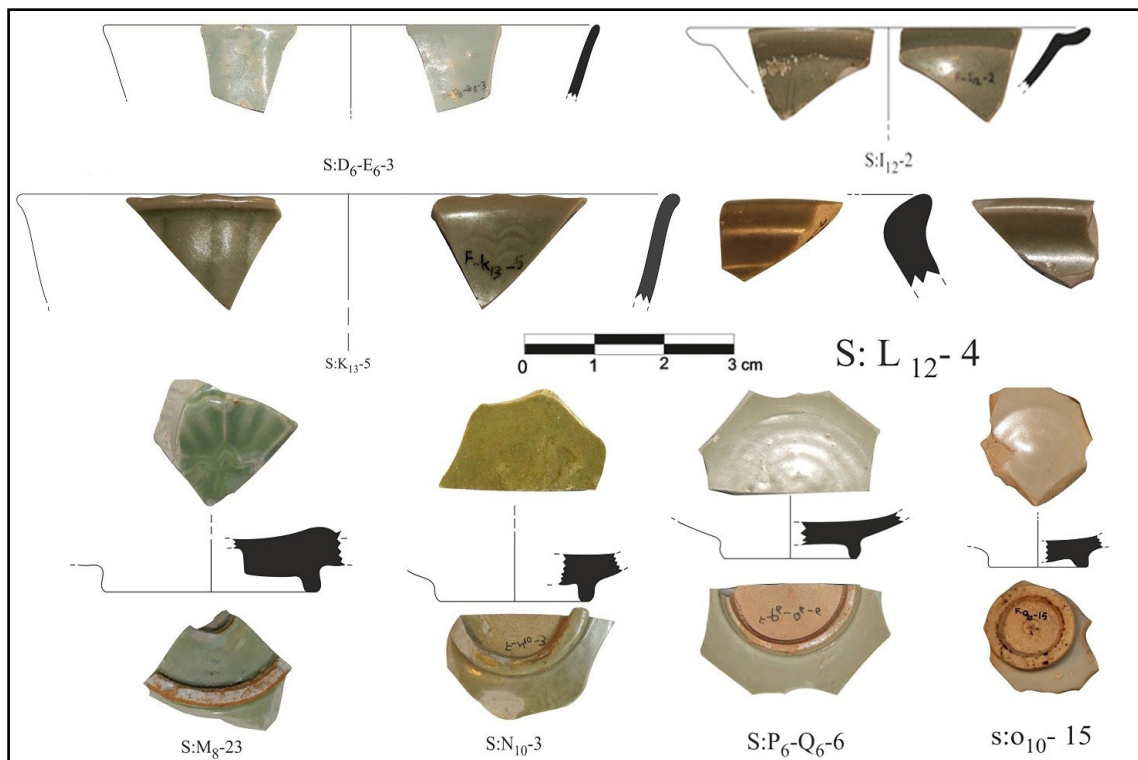
سفالینه‌های شهر اردشیرخوره جزو با ارزش‌ترین مواد فرهنگی و مطالعاتی این محوطه باستانی محسوب می‌گردند. مطالعات صورت گرفته بر روی سفالینه‌های شهر اردشیرخوره مشخص کرد که سفال‌های این شهر مربوط به بازه زمانی اواخر اشکانیان، ساسانیان، قرون اولیه، میانی و متأخر دوران اسلامی (قرن اول تا قرون ۱۰ الی ۱۱ ه.ق.) است (منتظرظهوری، ۱۳۹۲). یکی از گونه‌های بسیار مهم سفالی که در بررسی‌های باستان‌شناختی مورد مطالعه قرار گرفت، گونه سفالی موسوم به سلا دون است که به نظر می‌رسید، براساس متون تاریخی و همچنین مطالعات میان‌رشته‌ای و مقایسات تطبیقی انجام یافته، این اشیاء انتقال یافته به ایران از طریق تجارت دریایی از کشور چین بوده باشد (Maniatis & Tite, 1978; Tite et al., 2012). سفال‌های سلا دون به دست آمده از شهر اردشیرخوره که در طیف‌های رنگی سبز و خاکستری به دست آمده‌اند، به قرون ۷-۸ و ۹-۱۱ ه.ق. (صفوی) تعلق دارند که قابل مقایسه با نمونه‌های سلا دون یافت شده در بندر سیراف و کیش و ربع رشیدی هستند (Morgan, 1991; Takahito, 1988). بیشتر سفال‌های سلا دون شهر اردشیرخوره از بررسی سطحی بخش ارگ و در امتداد خیابان شرقی این شهر یافت شده‌اند. به احتمال زیاد سلا دون‌های چینی از طریق تجارت دریایی به بنادر جنوبی خلیج فارس همانند سیراف وارد شده و سپس به شهرهای همچون اردشیرخوره انتقال یافته است. ایران و چین از روزگار پیش از اسلام در ارتباط تجاری و فرهنگی بوده‌اند که شواهد باستان‌شناسی زیادی از این ارتباطات تجاری در گستره دو سرزمین به دست آمده است. این ارتباط تجاری در دوران اسلامی نیز ادامه یافت و یکی از مهم‌ترین شواهد و مستندات باستان‌شناختی این روابط تجاری در قلمرو سرزمین ایران، سفال گونه سلا دون است. سلا دن‌ها در بازه زمانی دوران اسلامی از کالاهای تجاری منتقل شده از چین محسوب می‌گردید (Hao et al., 2013; Whitehouse, 1983). این گونه ظروف سفالین لعاب‌دار که از طیف رنگی و کیفیت متنوع برخوردار بود، از طریق مسیرهای اصلی و فرعی تجاری به خصوص مسیر خشکی و دریایی جاده ابریشم در دوران اسلامی از قرون دوم و سوم هجری قمری در بیشتر قلمرو فرهنگی ایران توزیع گردیده و تا قرون ۱۰ و ۱۱ ه.ق. مناسبات تجاری سلا دن ادامه داشته است (Giehler, 2014; Wang et al., 2019). برهمن اساس، در قرون بعدی و در اوایل قرن ۱۰ و اوایل قرن ۱۱ ه.ق. ظروف سلا دن در حجم بالا از طریق دریا و از سمت سواحل جنوبی کشور، وارد ایران شد. باتوجه به این تنوع زیاد در مقدار و کیفیت مواد به کار برده شده در آنان و همچنین زیبایی این دسته از سفال‌ها، در ایران نیز سفالگران به تقلید از این گونه ظروف پرداختند و سفالینه‌هایی در کارگاه‌های مهم سفالگری در کرمان، سیراف و جزیره کیش ساخته شد (Emami et al., 2019a) و نخستین بار در اواخر دوره ایلخانیان هنر تولید سلا دن به اوج خود رسید

(کرمی و کیانی، ۱۳۶۴)؛ همچنین در جزیره هرمز در خلیج فارس تعداد زیادی از تکه ها و قطعات سفال های آبی و سفید سلاذن یافت شده که به نیمه قرن ۱۰ ه.ق. و بعد از آن تعلق دارد (Crowe, 2002).

«سلاذن» یک واژه فرانسوی به معنای «سبز روشن تا مغز پسته ای» و در فرهنگ زبان انگلیسی آکسفورد به معنای «لعب سبز مایل به خاکستری» بر روی بدنه سفال های بدنه سنگی است. یکی از خصوصیات بارز این گونه از سفالینه ها تنوع رنگی لعب آنان باتوجه به ضخامت لعب و شرایط پخت کوره است (Wood, 1996; Cogswell et al., 1999). این لعب نخستین بار در چین که از مراکز مهم و اصلی ظهور و تکامل ظروف سرامیکی و پورسلان است، شناخته شده و قدمت آن به حدود ۱۶۰۰ پ.م. برمی گردد (Colomban et al., 2003; Zhu et al., 2011). سفالینه های سلاذن چینی دارای بدنه ای از خاک سخت و طیف رنگی سبز تا قهوه ای و از انواع لعب های احیایی هستند که در دوران اسلامی باتوجه به شواهد باستان شناسی به لحاظ توزیع مکانی و کمیت و فراوانی گستره وسیعی از محوطه های دوران اسلامی ایران را به خود اختصاص داده است. از منظر شناسایی ماده، سفال سلاذن از دسته سفال های بدنه سنگی (Stone Ware) به شمار می آید. این تقسیم بندی براساس درجه حرارت پخت سفال (بیش از ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد)، نوع ماده خام (غنی از کوارتز و عمدتاً از خاک رس کائولینیتی) و نحوه آماده سازی آن صورت گرفته است. سلاذن ها عمدتاً دارای یک لعب زیتونی رنگ و در برخی موارد نیز آبی متمایل به سبز هستند که در اثر وجود ترکیبات دارای آهن و تیتانیم در بافت لعب به وجود آمده است (Hidaka et al., 2011; Hidaka et al., 2012a). سفال های سلاذن لعابدار عمدتاً با ترکیب شیمیایی اولیه خاک رس به کار رفته شامل: SiO_2 , Na_2O , K_2O , MgO , CaO , Al_2O_3 است. یون های فلزات واسطه در شبکه کریستالین کانی های تشکیل دهنده لعب سرامیک ها قرار گرفته اند و رنگ سبز آبی ایجاد شده توسط واکنش شیمیایی احیا و در تبدیل Fe_2O_3 به FeO پدیدار گشته است (Hidaka et al., 2012a; Laird, 1918).

ضرورت مطالعه بر روی ظروف سلاذن، نه تنها از لحاظ تاریخی و باستانی حائز اهمیت است، بلکه از نقطه نظر علمی و ساختار شناسی این دسته از سفال ها بسیار مهم بوده و خصوصیات منحصر به فردی را از خود نشان می دهند. ظروف سلاذن اطلاعات بسیار زیادی را در زمینه موقعیت های اجتماعی، ارتباطات اقتصادی بین اقوام گوناگون در اختیار می گذارد. این دسته از سفال ها تأثیر زیادی را در صنعت سفالگری دوران اسلامی داشته، و روابط تجاری و اقتصادی پر رونقی را در مسیر دریایی و خشکی جاده ابریشم داشته است. این ظروف نسبت به سایر ظروف سفالین (لعب دار و بدون لعب) دارای مقاومت و استحکام زیادی بوده که این مهم خود از نکات جالب در تحلیل چگونگی ایجاد چنین مقاومتی در ساختار این دسته از سفال ها است. به طور کلی مطالعات فن شناسی و آسیب شناسی در راستای فهم فن آوری ساخت سفال سلاذن با تکیه بر بررسی های بین رشته ای و آزمایشگاهی تابه حال به طور مقطعی انجام شده و چنین مطالعات سیستماتیکی از لحاظ پتانسیل تحقیقاتی در آینده بسیار مهم خواهد بود. لزوم تحقیقات باستان سنجی در راستای شناسایی مواد باستانی با استفاده از داده های علمی و آزمایشگاهی بر بسیاری از اندیشمندان محرز است، اما روش های نوین و غیر متداول آزمایشگاهی در مطالعه آثار تاریخی و فرهنگی می تواند به نتایج بسیار جالب توجهی منتهی گردد. در این راستا روش های جدید آنالیز و تحلیل مواد بر پایه استفاده از باریکه های پرتوهای پر انرژی پروتونی و الکترونی (بیکیسی و سینکروترون)، (Quartieri, 2015) و همچنین مشاهدات میکروسکوپی بر پایه پرتوهای کم انرژی کاتودولومینسانس می توانند ساختارها و نکات جالب توجهی را در خصوص ترکیب شیمیایی و ساختار شناسی مواد به اثبات رسانند (Emami et al., 2021).

در این مطالعه، سلاذن های مکشوفه از شهر گور (اردشیر خوره) با استفاده از پراش اشعه ایکس بر پایه پرتوهای پر انرژی سینکروترون به دلیل قدرت تفکیک بسیار بالا و شناسایی فازهای کریستالین حتی در مقادیر بسیار اندک مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. پرتوهای کاتدی و تصاویر کاتودولومینسانس گویای خصوصیات ترمودینامیکی و حرارتی ساختارها و تغییرات ساختار بلورین موجود در داخل سلاذن ها بوده که با روش های



شکل ۲: تصاویر و طرح‌های سفال‌های سلاذن شهر گور (نگارندگان، ۱۴۰۲).

Fig. 2: Drawing and image of celadon pottery from Gour city (Authors, 2023).

۳. روش‌های آنالیز دستگاہی

الف) پترولوژی و پتروگرافی نمونه‌ها با استفاده میکروسکوپ پلاریزان

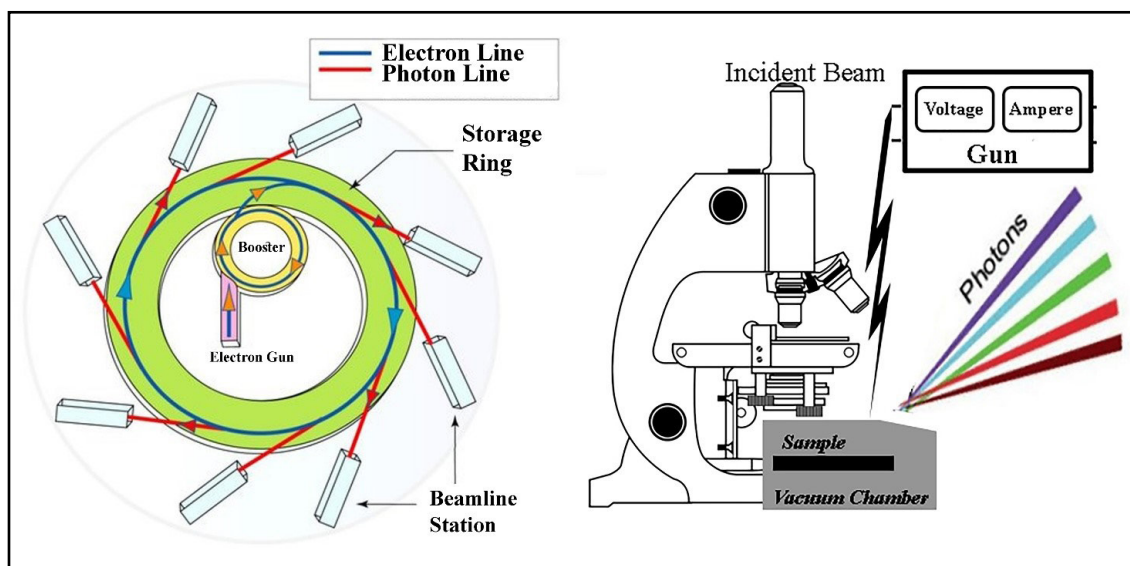
در این روش مقاطع نازک مواد با ضخامت ۳۰ میکرومتر مورد بررسی و مشاهده قرار می‌گیرند. در این خصوص، از میکروسکوپ پلاریزان مدل Leica DM و نرم‌افزار LAS V4.4 در مؤسسه Archéosciences دانشگاه بوردو استفاده گردید. ضخامت ۳۰ میکرون از این بابت حائز اهمیت است که کانی‌های موجود در داخل ساختار سفال در این ضخامت ضریب شکست و رنگ تداخلی خاص خود را نشان می‌دهند که اثر انگشتی است برای شناسایی دقیق یک کانی (Riederer, 2004). مشاهده با استفاده از میکروسکوپ نوری، روشی است که براساس سرعت عبور نور از یک مقطع نازک و شکست نور به صورت یک اثر انگشت از یک کانی انجام می‌گیرد. پتروگرافی از بعد تخصصی به معنای چپستی و وجود یک فاز بلورین در داخل بافت سفال است و خصوصیات خاص آن کانی که می‌تواند متأثر از منشأ تشکیل آن نیز باشد؛ درحالی‌که پترولوژی به چگونگی و چرایی وجود یک فاز بلورین در داخل بافت سفال می‌پردازد. پترولوژی درحقیقت در راستای حوزه پایداری یک کانی یا مجموعه‌ای از کانی‌ها در داخل بافت سفال صحبت می‌کند. مجموعاً با استفاده از این روش به پرسش‌هایی از قبیل این‌که چه فازی در داخل جسم است؟، و چرا در داخل این جسم است؟، پرداخته می‌شود. با استفاده از روش‌های پتروگرافی و پترولوژی در باستان‌شناسی قادر خواهیم بود تا ساختار مواد تشکیل دهنده یک شیء را بشناسیم و در بسیاری موارد براساس واکنش‌های انجام شده (حرارتی و یا فرسایشی) به چگونگی تغییرات فازی و نحوه ساخت شیء پی ببریم (Quinn, 2009).

ب) کاتدولومینسانس میکروسکوپی

روش کاتدولومینسانس یکی از روش‌های نوین در بررسی مواد تاریخی و فرهنگی است. این روش کاربردهای

زیادی در علم زمین‌شناسی و زیست‌شناسی داشته و به همین دلیل جایگاه درست خود را نیز در باستان‌شناسی و باستان‌سنجی یافته است (Chapoulie *et al.*, 2005a; Chapoulie & Daniel, 2007; Goetze *et al.*, 2001; Götze, 2000). در این روش سطح صاف نمونه‌ها چه در قالب مقطع نازک و یا صیقلی مورد تابش کم انرژی الکترون قرار می‌گیرد. چون این تابش الکترونی از انرژی پایینی برخوردار است واکنش بین الکترون‌ها با مواد و کانی‌های سازنده سطح یک ماده (سنگ، سفال، استخوان، جواهر و کانی‌های طبیعی) خود را در قالب طیف رنگی قابل مشاهده آشکار می‌سازند (شکل ۳: راست). از آنجایی که در طبیعت مواد یا کانی خالص بسیار به ندرت یافت می‌شود، مواد براساس موقعیت به وجود آمدن و مقادیر و نوع ناخالصی لومینسانس متفاوتی را از خود ساطع می‌کنند که این خود اثر انگشتی وابسته به نحوه تشکیل و منشأ نمونه‌هاست (Hayward, 1998; Hunt, 2013). خصلت کاتدولومینسانس در کانی‌ها تحت شرایط گوناگونی ایجاد می‌گردد که کاملاً در باستان‌شناسی کاربردی بوده و قابل تحلیل هستند (Emami *et al.*, 2021):

۱. در اثر ایجاد حرارت و تغییرات شبکه بلورین (عملیات حرارتی در اشیاء تاریخی).
۲. واکنش‌های شیمیایی و فعل و انفعالات شیمیایی مواد با محیط پیرامون (تخریب، اکسیداسیون و شرایط دفن).
۳. چیدمان اتم‌ها در شبکه بلورین (مشخصه نوع کانی براساس منشأ تشکیل آن و چگونگی قرارگیری اتم‌های سازنده آن در شبکه بلور).
۴. استرس و فشار (محیط زمین‌شناسی محل تولید ماده خام و کار گرم یا سرد بر روی مواد)؛ البته شایان ذکر است که کاتدولومینسانس در مواد و ترکیبات فلزی رخ نمی‌دهد.



شکل ۳: راست: کاتدولومینسانس میکروسکوپی و نحوه قرارگیری نمونه و نوع آشکارسازی با پرتوهای نور مرئی؛ چپ: حلقه سینکروترون و بخش‌های تفکیک پرتوهای پر انرژی براساس روش آنالیز (نگارندگان، ۱۴۰۲).

Fig. 3: Right: Cathodoluminescence Microscopy, sample location and detection of phases regarding the visible light spectra (Authors, 2023).

بازپراش یا انعکاس پرتوی کاندی از روی نمونه‌ها باعث می‌شود تا بتوان ساختارهایی را مشاهده کرد که با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی نتوان آنان را دید. از آنجایی که سلا‌دن‌ها اصولاً مواد تاریخی هستند که در معرض حرارت قرار گرفته و از کوارتز به عنوان ماده پرکننده در بافت بدنه استفاده شده و همچنین از خاک رس مرغوبی برای درست کردن آنان استفاده شده است، می‌توانند مورد مناسبی در راستای مطالعه و مشاهده با استفاده از این روش باشند. گرادیان حرارتی ایجاد شده (روند پخش و نفوذ حرارت از خارج به

داخل بدنه سفال) در حین پخت سفال و نحوه انتقال حرارت، با مشاهده تغییرات انجام شده در ساختارهای بلورین موجود در بافت بدنه سلاذن هماهنگی داشته و قابل مشاهده است (Odelli *et al.*, 2022). جهت مطالعه و مشاهده خلصت لومینسانس در نمونه‌های مطالعاتی از دستگاه Nuclide Luminoscope متصل به میکروسکوپ نوری مدل Leica MC125 و شرایط تولید پرتوی الکترونی تحت شرایط 10-12 kV و 250-300 μ A در مؤسسه Archéosciences دانشگاه بوردو و بدون استفاده از پوشش استفاده شد.

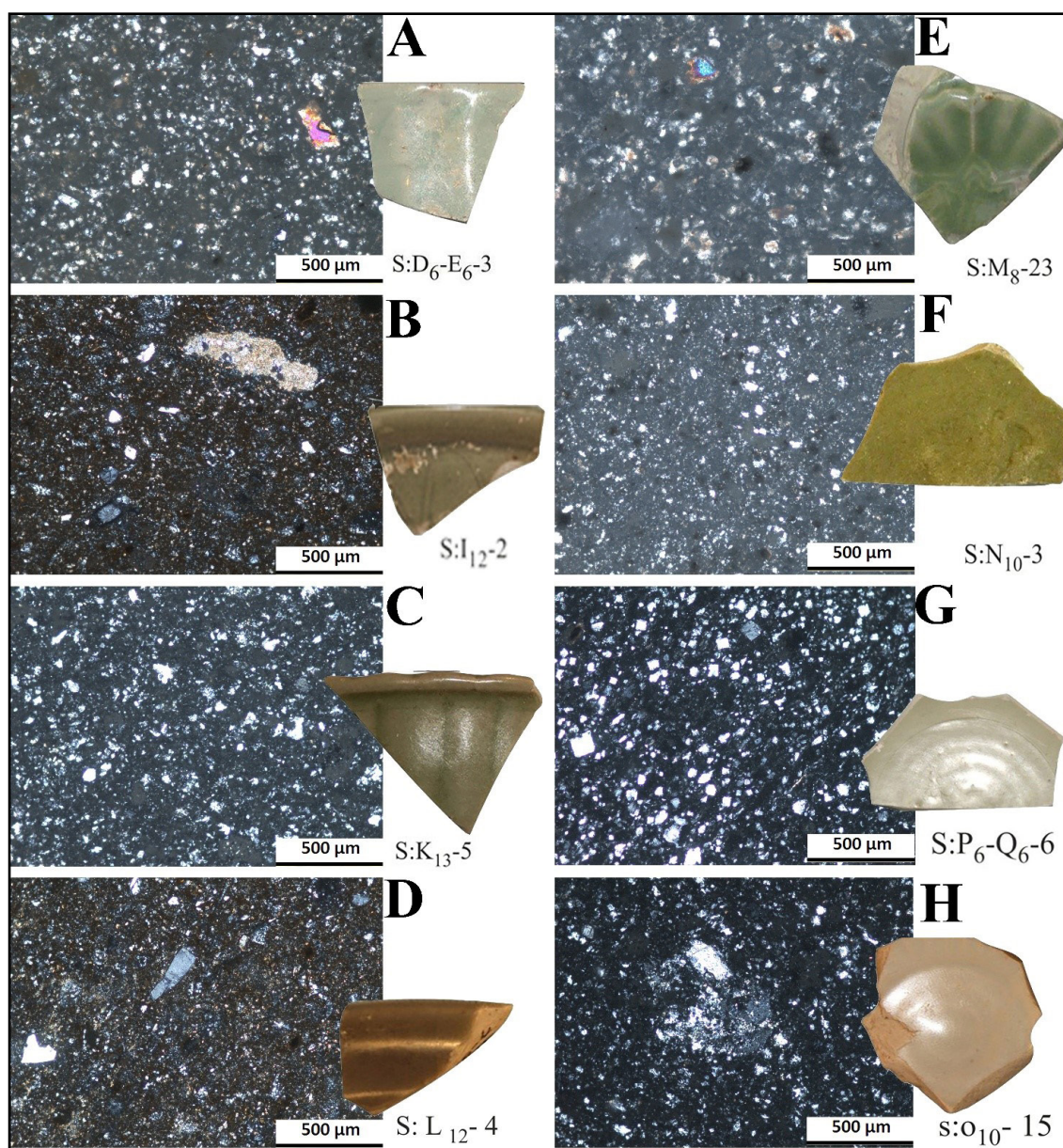
ج) آنالیز فازی براساس پراش اشعه ایکس از منبع سینکروترون

استفاده از شتاب‌دهنده‌ها و پرتوهای پرانرژی سینکروترون در تحلیل ساختار مواد باستانی و تاریخی و ترکیب شیمیایی آنان در یک دهه اخیر گسترش و کاربرد زیادی را نشان داده است (Abdollahi *et al.*, 2020; Emami *et al.*, 2021). آزمایشگاه‌های سینکروترون در دنیا، درواقع تولیدکننده ذرات باردار بسیار پرانرژی هستند که در امتداد یک حلقه و در یک میدان مغناطیسی بسیار قوی با سرعتی نزدیک به سرعت نور در حرکت و چرخش هستند و می‌توانند تا یک میلیون بار درخشان‌تر از نور خورشید باشند (Willmott, 2019). به همین دلیل، با توجه به انرژی بالای این پرتوها و دامنه بسیار گسترده انتشار آنان در سینکروترون، امواج از طول موج پرتوهای گاما تا امواج رادیویی قابل تولید و دیده شدن است. در سینکروترون تعداد بسیار زیادی الکترون از یک منبع تولید شده (E-Gun) و به سمت یک شتاب‌دهنده (Booster) خطی ارسال می‌شوند (مونوکروم)، (Storage Ring). انرژی این الکترون‌های تولید شده برابر با ۴۰ مگا الکترون ولت (MeV40) است که پس از گذر از چندین میدان مغناطیسی در طول حلقه سینکروترون انرژی معادل اگیگا الکترون ولت (GeV1) را به دست می‌آورد (Rahighi *et al.*, 2015). الکترون‌ها در مسیر خود از فیلترهایی به نام آئینه‌های موازی‌کننده پرتو، تکفام‌کننده و آئینه‌های متمرکزکننده عبور کرده و به چندین گروه براساس انرژی و دامنه طول موج تقسیم می‌شوند که به آنان «خط پرتو» (Beamline) گفته می‌شود (شکل ۳: چپ)؛ خطوط پرتو در نهایت، براساس انرژی مورد نیاز تولیدکننده پرتوهای پرانرژی، XRD1, XRF2, XAFS2, XANES4, SAXS5, WAXS6 هستند که در کلیه علوم پایه، فنی و مهندسی و پزشکی کاربرد دارند. پرتوهای سینکروترون در مطالعات باستان‌شناسی بسیار کاربردی و مهم هستند؛ چراکه با استفاده از این روش می‌توان بدون تخریب مواد تاریخی را مورد مطالعه قرار داد. این درحالی است که در بسیاری موارد مقدار نمونه می‌تواند بسیار جزئی و اندک باشد که بتوان از این روش به عنوان یک روش غیرتخریبی نام برد. از علل بسیار مهم و کلیدی در این خصوص می‌توان به انرژی بسیار بالای الکترون‌های تولید شده، اندازه قطر پرتوی بسیار ریز و واگرایی بسیار اندک پرتو اشاره کرد (Quartieri, 2015; Pradell *et al.*, 2010). در طی این مطالعه، بررسی فازهای بلورین موجود در نمونه‌ها در بخش XRPD Material Science در مرکز تحقیقات سینکروترون سزامی واقع در کشور اردن و محاسبات کیفی فازهای کریستالین با استفاده از نرم‌افزار XPert HighScore version 6.6.1 انجام گردید. در این روش نمونه‌ها در دو حالت سطح صیقلی مقطع نازک و نمونه پودر (Capillary) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند.

۴. نتایج

الف) پتروگرافی و پترولوژی مقطع نازک سلاذن‌های مورد مطالعه

مشاهدات میکروسکوپی و پترولوژی و پتروگرافی مقاطع نازک سلاذن‌ها برپایه مشاهده نمونه‌ها توسط پلاریزاتور+آنالیزاتور بیان‌کننده شباهت‌های زیاد بین این چند نمونه مطالعاتی است (شکل ۴). همان‌گونه که در تصویر نیز دیده می‌شود، تمامی نمونه‌ها دارای یک بافت زمینه (ماتریکس) بسیار منسجم و با تخلخل کم هستند. رنگ بافت زمینه بیشتر به سمت خاکستری تیره است که با برخی خصوصیات ظاهری نمونه‌ها نیز شباهت دارد و حاکی از پخت نمونه در درجه حرارت بالا دارد (Eramo, 2020). تنها تفاوت مشهود در تصاویر



شکل ۴: تصاویر میکروسکوپ پلاریزان سلاذن‌ها براساس پترولوژی و پتروگرافی که نشان‌دهنده شباهت‌های ساختاری در بین تمامی نمونه‌های مورد مطالعه است. بافت نمونه‌ها سیلیسی و مواد پرکننده آلومینوسیلیکات در ترکیبات متفاوت (D, H) و مقادیر جزئی کربنات‌های حرارت‌دیده (B) و فازهای درجه حرارت بالا از گروه پیروکسن‌ها هستند (A, E)، (نگارندگان، ۱۴۰۲).

Fig 4: Petrology and petrography of investigated celadons; fabrication of the samples are identic and similar in siliceous texture. Furthermore the additives are characterized through the occurrences of aluminosilicates in different chemistry (D, H), decomposed carbonate (B) and high temperature phases as pyroxene family (A, E). (Authors, 2023).

B و D دیده می‌شود که بافت نمونه‌ها کمی به سمت رنگ قرمز سوق یافته که دلیلی است بر استفاده از خاک رس با مقادیر بیشتری از ترکیبات آهنی و متفاوت با بقیه نمونه‌ها. علت این تفاوت همچنین در وجود فازهای آهکی (میکرایتی) است که در این دو نمونه با رنگ قهوه‌ای و زرد و در مرکز تصاویر دیده می‌شوند؛ همچنین در نمونه D مقادیری از فازهای اورتوکلاز که از نوع فلدسپات‌های پتاسیک هستند با رنگ خاکستری و ساختار نیمه‌شکل‌دار (هیپ‌ایدیومورف) در تصویر مشخص هستند (شکل ۴: D). درجه حرارت پخت این دو نمونه نیز با بقیه نمونه‌ها مشابه است و تفاوت در وجود فازهای کربناته حرارت‌دیده است که هنوز در

بافت نمونه وجود داشته و کاملاً از بین نرفته است (شکل ۴: B). باتوجه به این موارد و رنگ تقریباً اکسیدی بافت زمینه درجه حرارت پخت در این دو نمونه را می‌توان تا حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد تخمین زد (Eramo, 2020, Fabbri et al., 2014). بافت مواد پرکننده سلاذن‌ها همان‌طور که از سرامیک‌های بدنه سنگی انتظار می‌رفت، شامل دانه‌های کوارتز در اندازه‌های نسبتاً یکسان است. تمامی دانه‌های کوارتز در تصاویر خود را به رنگ سفید تا خاکستری نشان می‌دهند که از مشخصات بارز کوارتز در زیر نور پلاریزه هستند. بافت مواد پرکننده و زمینه تمامی این نمونه‌ها به‌هنگام چرخش در زیر نور پلاریزه هیچ تغییر رنگ (بی‌رفرنژانس) از خود نشان نمی‌دهد و همسان‌گرد هستند که دلیلی است بر پخت کامل و در درجه حرارت بالای نمونه‌ها. در غیراین صورت و در درجه حرارت‌های پایین‌تر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد فازهای اولیه موجود در بافت زمینه سبب ایجاد ناهمسان‌گردی و تغییرات رنگ به‌هنگام چرخش نمونه‌ها می‌شود (Burton et al., 2021). فازهای درجه حرارت بالا با رنگ آبی و بنفش که گویای وجود ترکیبات پیروکسنی هستند در نمونه‌های A و E به وضوح مشاهده می‌شوند. از مشخصات این فازها، ساختار نسبتاً آیدیومورف (ساختار خوددشکل)، رنگ آبی تا ارغوانی و به دلیل سختی بالا خاصیت رنگین‌کمانی در کناره‌کانی است. نمونه‌های C, F و G دارای خصوصیات مشابهی از بابت مواد پرکننده بوده و همچنین ورز بسیار خوبی را در داخل بافت زمینه از خود نشان می‌دهند. در تصویر ۴: H، تنها موردی است که ذرات پرکننده دارای اندازه‌های متفاوت‌تری بودند؛ البته این تفاوت در دانه‌بندی در این نمونه به دلیل استفاده از خرده‌سنگ‌های گرانیتی در داخل نمونه است. همان‌طور که در مرکز این تصویر مشخص است، دانه‌های درشت‌تر از قطعات کوارتز در بافت نمونه دیده می‌شود که مربوط به استفاده از خرده‌سنگ به عنوان مواد پرکننده است (Burton et al., 2021). رنگ میکروسکوپی خرده‌سنگ‌ها در زیر نور پلاریزه به‌مانند همان ترکیبات کوارتزی و آلکالی‌فلدسپات است؛ با این تفاوت که در این ساختار اکثراً به هم چسبیده و در بسیاری موارد حتی فرسوده شده‌اند (Emami, 2020). ولی آن‌چه این مطالعه را به سمت روش‌های دیگر و دقیق‌تر سوق داد، این مهم بود که به غیر از کوارتز و خرده‌سنگ و بقیه فازهای درجه حرارت بالا نظیر پیروکسن که قابل مشاهده بودند، چه تغییراتی را در شکل‌گیری فازهای درجه حرارت بالا در بافت زمینه سلاذن می‌توان مشاهده کرد که این مواد را به صورت خاص و با ساختاری محکم نشان می‌دهد؛ به عبارتی در حین پخت روند تغییرات فازی در داخل بافت زمینه به چه صورت است؟

ب) شناسایی فازهای کریستالین توسط پراش اشعه ایکس از منبع پراش سینکروترون

براساس محاسبات کیفی انجام شده براساس الگوریتم ریتقلد، فازهای کریستالین متعددی در بافت سفال‌ها شناسایی گردید (جدول ۱). فازهای بلورین شناسایی شده در تمامی نمونه‌ها دیده شده که در این بین کوارتز مهم‌ترین و اصلی‌ترین فاز شناسایی شده در بافت سلاذن است؛ همچنین نتایج مطالعات فازی با استفاده از سینکروترون نشان‌دهنده وجود بسیاری از فازهای پدیدار شده در درجه حرارت بالا است (شکل ۵). این مهم نشان می‌دهد که سلاذن‌ها از درجه حرارت پخت بالا (> ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد) و زمان پخت مناسبی برخوردار بودند. کوارتز، کلسیت، آلیت اصولاً فازهای اولیه‌ای هستند که در هنگام درست‌کردن سفال به عنوان مواد افزودنی به آنان اضافه شده و یا در سنگ اولیه می‌توانند در داخل بافت سفال مشاهده شوند (مانند: خرده‌سنگ).

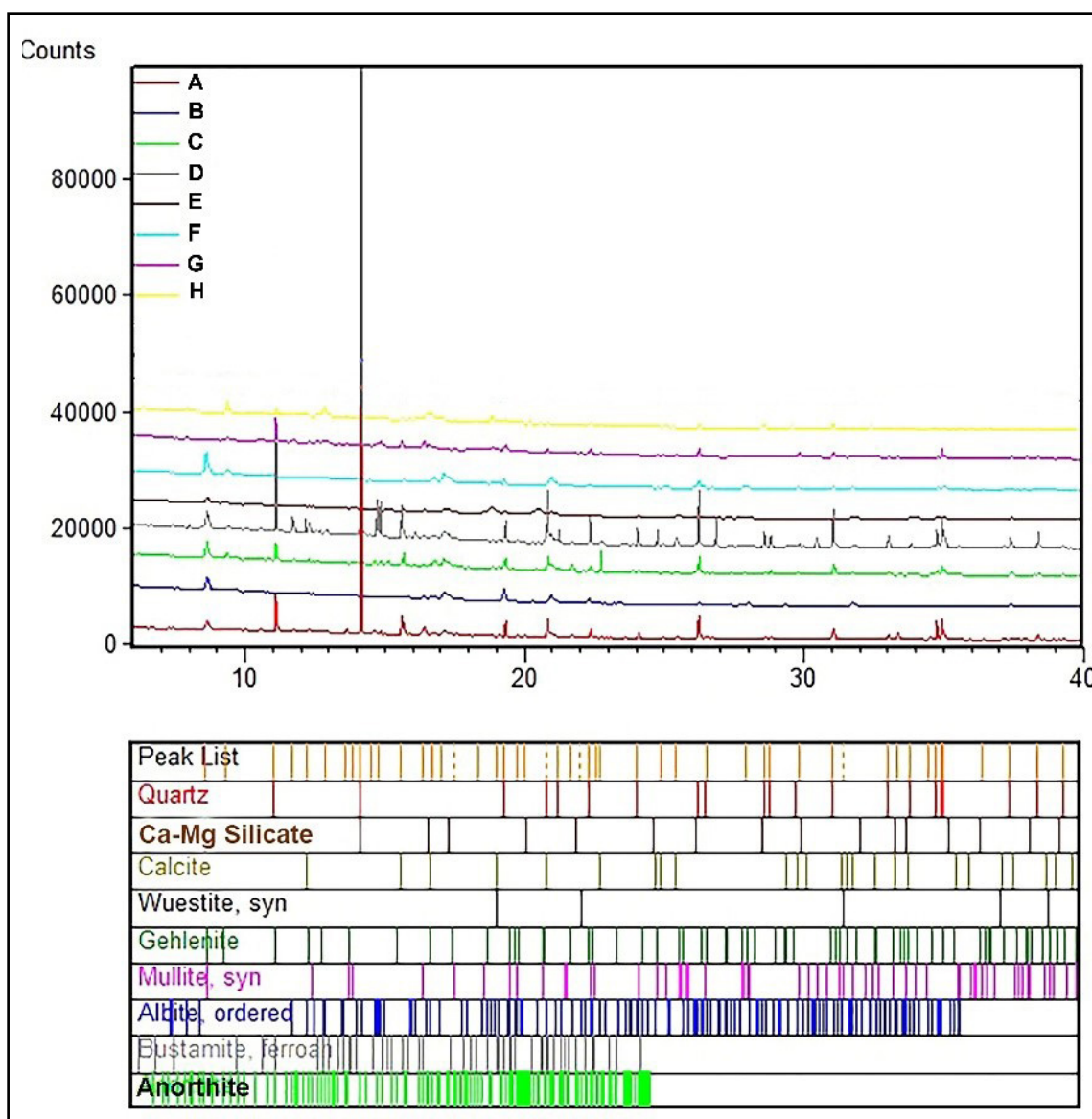
فازهای مولیت، آنورتیت، ووستیت و سیلیکات‌های کلسیم و منگنز و گنیت همگی به صورت میکروکریستالین در داخل بافت سفال هستند و به همین دلیل، با استفاده از سینکروترون قابل شناسایی بودند. فازهای درجه حرارت بالا در بسیاری موارد نشان از نوع ماده خام اولیه و مورد استفاده در ساخت سفال‌ها هستند؛ به‌مانند وجود مولیت (Mullite). این فاز، از جمله ترکیباتی است که وجود آن اهمیت بالایی دارد. وجود مولیت اولاً نشان از استفاده خاک رس کائولینیته دارد (Wood, 2012) و ثانیاً می‌تواند نتیجه پخت در دو مرحله باشد

جدول ۱: فازهای بلورین شناسایی شده در داخل بافت سلدان های مورد مطالعه و فرمول شیمیایی آنان (نگارندگان، ۱۴۰۲).

Tab. 1: Crystalline phase composition within the fabrics of Celadon and their chemical formula (Authors, 2023).

نام کانی	فرمول شیمیایی
کوارتز	SiO ₂
سیلیکات کلسیم و منیزیم (اوژیت، دیوپسید)	(Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al) ₂ O ₆
کلسیت	CaCO ₃
ووستیت	FeO
گلنیت	Ca ₂ Al[AlSiO ₇]
مولیت	2Al ₂ O ₃ ·SiO ₂
آلبیت	NaAlSi ₃ O ₈
بوستامیت	CaMnSi ₂ O ₆
آنورتیت	CaAl ₂ Si ₂ O ₈

پختن سفال و ریختن لعاب داغ حدود ۱۱۰۰ درجه بر روی بدنه سفال) یا در اثر خنک شدن بسیار سریع لعاب در فاز سیلیکاته روی سطح سفال که با تشکیل ساختارهای سوزنی مولیت همراه است (مانند: صنعت شیشه‌گری در قدیم)، (Rice, 1988; Khizanishvili & Mamaladze, 1969). این سرعت سرد شدن و عدم یکسانی ضریب انبساط حرارتی بدنه و لعاب باعث ایجاد ترک‌های ریز در لعاب شده که در سلدان‌ها اکثراً دیده می‌شود. آنورتیت (Anorthite)، سیلیکات‌های کلسیم منیزیم و گلنیت (Gehlenite) همگی فازهایی هستند که در هنگام پخت سفال تا درجه حرارت‌های بالا به وجود می‌آیند (عموماً تا بیش از ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد)، (Rathossi & Pontikes, 2010). وجود آنورتیت و گلنیت همچنین دلیلی است بر وجود مقادیر زیاد ترکیبات کربناته، عمدتاً از نوع کلسیت، که تحت شرایط حرارتی تغییر یافته در برخی نمونه‌ها نیز در زیر میکروسکوپ مشاهده شدند. گلنیت در درجه حرارت‌های حدود ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و در اثر واکنش مرز دانه‌ای در بین CaO، Al₂O₃ و SiO₂، شروع به شکل‌گیری می‌کند و همچنین کاملاً بستگی به اندازه دانه‌بندی خاک رس دارد (Heimann & Maggetti, 1982). اصولاً خاک‌های با دانه‌بندی درشت‌تر از کائولین و در حد ایلیت مقادیر بیشتری از گلنیت را در هنگام پخت ایجاد می‌کنند. به همین دلیل، می‌توان عنوان کرد که خاک کائولینیتی دارای مقادیر کم کربنات بوده که برای این منظور استفاده شده است (Rathossi & Pontikes, 2010; Maggetti, 1982). ووستیت فاز غنی از آهن است که به دلیل تجمعات آهنی بر روی سطح سفال و عمدتاً به واسطه وجود Fe²⁺ تحت شرایط احیاء در داخل لعاب سلدان به وجود می‌آید. وجود ووستیت نیز به دلیل قرارگیری ماده در درجه حرارت بالا قابل اثبات و مشاهده است (Hidaka et al., 2012b). در بین تمامی فازهای مشاهده شده بوستامیت (Bustamite) که نوعی از سیلیکات‌های کلسیم و منگنز است نیز مشاهده می‌شود. بوستامیت از زمره فازهای درجه حرارت بالا است که اولاً به دلیل حرارت بالا و سرد شدن سریع ایجاد می‌شود و همچنین دلایل وابسته به فن‌آوری ایجاد لعاب از یک منشأ غنی از کلسیم و منیزیم دارد که در سلدان‌های مورد مطالعه مشاهده شده است (Molera i Marimon et al., 2022). مطالعات انجام‌شده فازی نشان می‌دهد که احتمال استفاده از خاک کائولینیتی (با مقادیری از کربنات) در درست کردن این سفال‌ها دخیل بوده، اما وجود کائولین در داخل ترکیبات شناسایی شده حاکی از درجه حرارت بالا و سرعت سرد شدن سریع است، که می‌تواند دلیلی بر شکل‌گیری این فاز در محیط سیلیکاته لعاب باشد (Molera et al., 2022). نکته حائز



شکل ۵: مطالعات فازی با استفاده از سینکروترون و شناسایی فازهای بلورین متعدد در ترکیب بافت سفال (نگارنده، ۱۴۰۲).

Fig. 5: Phase studies using synchrotron and identification of the diverse crystalline composition of the celadons (Authors, 2023).

اهمیت در اینجا این است که باتوجه به شناسایی کائولینیت و البته فازهای کربناته در این نمونه ها، دمای پخت بالا را می توان انتظار داشت. دمای تجزیه کائولین ۶۰۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی گراد، تخریب کربنات ها در ۶۵۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی گراد و پیدایش مولیت در حرارت ۱۲۰۰ درجه است. در این صورت باید محدوده ای در داخل بافت سفال سلادن وجود داشته باشد که به عنوان محدوده تأثیرات فازی بتوان از آن نام برد. مشاهده این محدوده و اکانش همچنین اطلاعات خوبی در ارتباط با شرایط و دفعات پخت و همچنین ریز بودن اجزای کریستالین و چگونگی کریستالیزاسیون در فاز مذاب و بدنه سلادن ها را تعیین می کند.

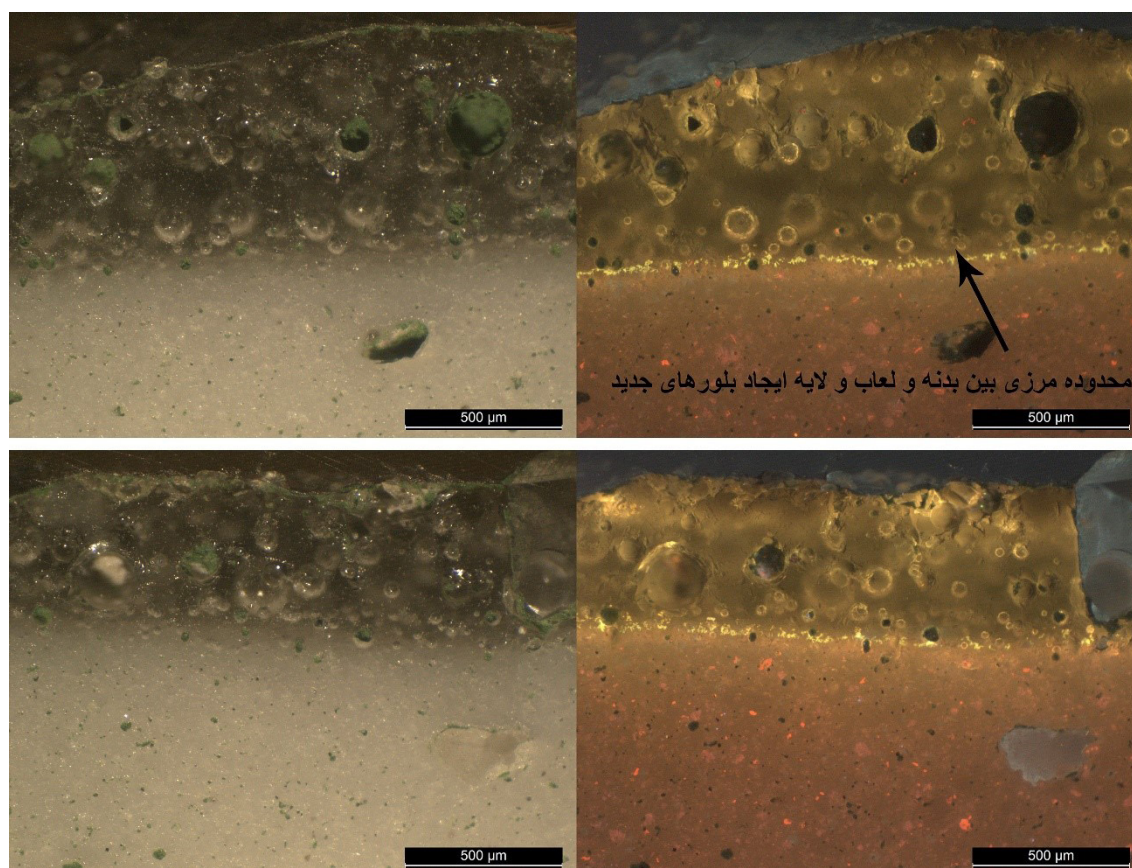
ج) ساختار بدنه و لعاب براساس خصوصیات لومینسانس مواد تشکیل دهنده

همان طور که در قسمت مواد و روش ها اشاره شد، کاتدولومینسانس ساختارهایی را مشهود می سازد که با استفاده از روش های مرسوم قابل شناسایی نیستند؛ چراکه لومینسانس کانی ها خصلتی است وابسته به

ساختار بلورین مواد و اثرانگشت کانی‌شناسی و ژئوشیمی آنان محسوب می‌شود. سفال سلادن جسمی است که تحت تأثیر حرارت بالا قرار داشته و بسیاری از واکنش‌های کانی‌شناسی و تبدلات بلورین در داخل بافت سفال و در حین گرمایش و پخت آن شکل گرفته است؛ از این رو، می‌توان مناطق حرارت دیده را از دیگر مناطق موجود در ساختار سفال متمایز کرد و فازهای جدیدی که در درجه حرارت‌های بالا به وجود آمده‌اند را نیز شناسایی کرد (Chapoulie *et al.*, 2005b; Chapoulie *et al.*, 2016).

مطالعه مقاطع صیقلی سلادن‌ها با استفاده از نور معمولی نشان از هموژن (یکنواخت) بودن ساختار سفال دارد و محدوده بین بدنه سفال و لعاب چسبیده به آن توسط رنگ سبز ناشی از وجود ترکیبات آهنی مشخص گردیده است (شکل ۶: سمت چپ). مرز بین بدنه و لعاب از لحاظ فازهای پدیدار شده و تحول حرارتی در داخل بدنه سلادن مشهود نیست. این محدوده پس از مشاهده توسط میکروسکوپ کاتدولومینسانس کاملاً از یک دیگر متمایز می‌گردد. بررسی و مشاهدات کاتدولومینسانس بر روی تمامی مقاطع سلادن انجام گردید و در این قسمت به تحلیل یافته‌هایی می‌پردازیم. تصاویر گرفته شده از سفال‌های سلادن با استفاده از میکروسکوپ کاتدولومینسانس نشان از این دارد که سفال‌ها در دو مرحله ساخته شده‌اند؛ مرحله پخت سفال و مرحله لعاب دادن بر روی بدنه سفال (شکل ۶: سمت راست).

مشاهدات براساس تصاویر کاتدولومینسانس در این بررسی حاکی از این است که بدنه سفال دارای فازهایی است که رنگ لومینسانس قرمز از خود نشان داده و برخی نیز در بافت زمینه دارای لومینسانس ضعیف‌تری بوده و به رنگ صورتی دیده می‌شوند. کانی‌هایی که رنگ لومینسانس قرمز نشان می‌دهند، اکثراً ذرات



شکل ۶- ساختار بدنه و لعاب براساس خصوصیات لومینسانس مواد تشکیل دهنده و تازه به وجود آمده در محدوده مرزی بین بدنه و لعاب
Fig 6: The structure of the body and glaze based on the luminescence properties of the ingredients and neo-formation of the crystalline phases in interface area (Authors, 2023)

حاوی منگنز و کلسیم هستند که نشان از حضور فازهای درجه حرارت بالا چون پیروکسن و گلنیت به صورت یکنواخت در داخل بدنه سلاذن بوده و در اندازه‌های بسیار ریز و به صورت یک بافت نسبتاً یکنواخت در داخل بدنه سلاذن‌ها دیده می‌شوند (Emami *et al.*, 2021; Hayward, 1998). حضور فازهای بلورین با لومینسانس خوب و در محدوده رنگ نارنجی تا قرمز و ارغوانی دلیل است بر ایجاد فازهای درجه حرارت بالا. از طرفی، رنگ لومینسانس کوارتز که صورتی تیره است، تغییرات زیادی نداشته که خود دلیلی است بر استفاده از یک منبع یکسان ماده خام در تولید این مواد. حضور باند زرد رنگ در فاصله بین بدنه و لعاب حاکی از یک فاصله زمانی بسیار اندک بین پخته شدن سفال و پوشش دادن آن توسط لعاب است؛ چراکه در این محدوده تشکیل مقادیر بسیار جزئی فازهای بلورین با ترکیب کانی‌شناسی و ساختاری آنورتیت و مولیت در فاصله مرزی امکان‌پذیر است و دلیلی است بر این مهم که سلاذن‌ها در دو مرحله متفاوت ایجاد شده‌اند. در ابتدا بدنه ساخته شده و سپس با فاصله زمانی اندکی پوشش لعاب روی آن قرار گرفته است (Chapoulie *et al.*, 2005b; Molera *et al.*, 2001). در داخل بافت سیلیکاته لعاب نیز فازهای بسیار ریز و دندان‌ای شکل دیده می‌شوند که اندازه آنان در حد کمتر از ۱۰۰ میکرومتر است. این فازهای سوزنی شکل ترکیبات مولیتی هستند که در اثر سرعت سرد شدن بالا یا سریع سلاذن‌ها در داخل بافت لعاب و اکثراً در کنار تخلخل‌های ناشی از درجه حرارت بالای لعاب در هنگام ایجاد آن به وجود می‌آید.

۵. بحث و تحلیل

سلاذن‌ها از لحاظ ساختاری سفال‌های بسیار منحصربه‌فردی هستند با خصوصیات تاریخی بسیار در خورتوجه؛ این مواد نشانه‌هایی هستند از تجارت دریایی و زمینی از شرق دور و چین به ایران (Molera *et al.*, 2020; Marimon *et al.*, 2022; Barnes *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2020). در این ارتباط سابقه ظهور سلاذن در ایران به زمان ساسانی و سپس دوران اوج شکوفایی استفاده از این گونه از سفال‌های تاریخی در ایران به دوره ایلخانی برمی‌گردد و شهرهای کناره خلیج فارس، کرمان، سیستان، جیرفت، کاشان، ری و قزوین از زمره اماکن مهم وجود و تولید این نوع سفال در فلات ایران معرفی می‌شوند (Barnes *et al.*, 2010; Amirhajloo & Sedighian, 2023; Pradell *et al.*, 2008). در همین راستا، مطالعات انجام شده بر روی سلاذن‌های مکشوفه از بندر تاریخی حریره در جزیره کیش انجام گردید که گویای احتمال تجارت دریایی بین ایران و شرق دور بوده است (Emami *et al.*, 2019b).

براساس مطالعات انجام شده بر روی این قطعات به دست آمده، سلاذن‌های مکشوفه از شهر گور تولید محلی داشته و از یک نوع خاک رس کائولینیتی برای تولید آن استفاده شده است. این نوع خاک رس صرفاً براساس مقادیر متفاوت کربنات موجود در آن طبقه‌بندی می‌شوند. باتوجه به فازهای شناسایی شده و درجه حرارت بالا در سلاذن‌های مطالعاتی، می‌توان عنوان کرد که براساس نحوه و روند تشکیل فازهای موجود در بدنه سلاذن‌ها، خاک مورد استفاده از نوع کائولینی بوده است. خاک کائولین دارای روند تغییرات فازی مشخصی برحسب درجه حرارت در حین پخته شدن سفال است که در تمامی سفال‌های مورد مطالعه نیز دیده شدند (Ptáček *et al.*, 2011; Karunadasa *et al.*, 2019). تغییرات کائولینیت به عنوان یک رس بسته به مقادیر کربنات اضافه شده به خمیره سفال متفاوت است و در ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد شبکه بلور کائولین تخریب شده، سیلسیم و آلومینیوم آزاد شده سبب تولید فازهای جدید و در درجه حرارت بالا می‌شوند (Jasmund & Lagaly, 1993). این فرآیند تا حدود ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ادامه دارد. در ۸۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد فازهای کربناته چون کلسیت نیز تخریب شده و وجود کلسیم و احتمالاً مقادیری از منگنز سبب تولید آلومینوسیلیکات‌هایی از خانواده پیروکسن یا بوستامیت شده که همگی در داخل بافت سلاذن‌ها شناسایی شدند. خاک کائولینیتی نسبتاً خالص در انتهای فرآیند پخت در درجه حرارت ۱۰۵۰ تا ۱۲۷۵ درجه سانتی‌گراد تولید مولیت به صورت میکروبلورین می‌کند (Wood, 2012). که از خصوصیات و

مشخصه‌های اصلی این خاک بوده و به همین دلیل می‌توان عنوان کرد که از خاک کائولینیتی در درست کردن سلاذن‌های اردشیرخوره استفاده شده است. لازم به توضیح است که ترکیب یک بدنه سرامیکی متشکل از مخلوطی از کائولن (خاک چینی)، کوارتز، فلدسپات و منافذ (باز) به عنوان تابعی از دما از پخت بیش از ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، سبب ایجاد ترکیبی یک خمیر سفت است که از مولایت، فاز شیشه، کوارتز تشکیل شده است (Heimann & Maggetti, 1982). تغییرات شیمیایی انجام شده حاصل از تخریب کائولین و تشکیل مولیت براساس معادلات زیر ارائه شده است (امامی، ۱۴۰۰).

درجه حرارت بر حسب سانتی‌گراد	تغییرات فیزیکو شیمیایی کائولین در حین پخت
۶۰۰ – ۴۰۰	$\text{Al}_2(\text{OH})_4(\text{Si}_2\text{O}_5) \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ تخریب کائولین و تشکیل متاکائولین
۹۵۰	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \rightarrow \gamma\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2$ تشکیل فازهای بلوری با ترکیب اسپینل
۹۸۵	ایجاد منطقه یوتکتیک کوارتز – پلاژیوکلاز – و شیشه
۱۲۷۰ – ۱۱۵۰	$3\text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{SiO}_2 \rightarrow 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 4\text{SiO}_2$ ایجاد بلورهای سوزنی مولیت در بافت سیلیسی

در فرآیند پخت یک سفال ساده و بدون نقش عمدتاً یک مرحله پخت کافی بوده است، مگر این‌که در برخی موارد در معرض حرارت مضاعف و مجدد قرار گرفته باشد (به‌مانند: بوته‌های ذوب در فرآیندهای متالورژیکی)؛ اما در ارتباط با سلاذن‌ها نکته حائز اهمیت این است که آیا لعاب این سفال‌ها بلافاصله در هنگام درست شدن بر روی سطح سفال کشیده شده یا بعد از آن. در این خصوص، یکی از عوامل مهم قابل توجه از لحاظ خصوصیات فیزیکی بین بدنه و لعاب و تفاوت در ضریب انبساط گرمایی مواد متشکله است. ضریب انبساط گرمایی خصلتی است که در اثر آن افزایش حجم سطح یک ماده در اثر حرارت دیدن را مورد بحث قرار می‌دهد. به همین نسبت سرد شدن و کاهش حجم نیز از خصوصیات معکوس ضریب انبساطی است که اگر در سطح تماس دو ماده (لعاب و بدنه سفال) بسیار سریع ایجاد شود، سطح ماده دچار ترک می‌شود (Krapukaitytė). در روش کاندولومینسانس میکروسکوپی با آشکار شدن مرز نارنجی-زرد رنگ در منطقه بین بدنه و لعاب نشان از اختلاف در درجه حرارت زیاد بین بدنه و پوشش لعاب در شرایط حرارتی حین کار و ایجاد فازهای جدید سوزنی‌شکل مولیت است. تحت این شرایط لعاب بر روی سطح نه خیلی سرد سفال و با فاصله زمانی کم پوشش داده شده و به همین دلیل بلورهای سوزنی‌شکل و ریز از نوع آنورتیت (به دلیل لومینسانس نارنجی) در این محدوده مشخص می‌گردند.

۶. نتیجه‌گیری

شهر اردشیرخوره از شهرهای بسیار مهم در دوره ساسانی در تاریخ ایران است. بررسی‌های سیستماتیک جدید انجام‌شده در این شهر، آثار بسیار زیادی را در ارتباط با فرهنگ سفالگری و به خصوص تولید سلاذن در اختیار قرار داده است. تولید و وجود سفال سلاذن می‌توانست دلیلی بر تولید محلی نمونه‌های سفالین در این محدوده باشد. تعداد ۷ نمونه از سلاذن‌های مکشوفه مورد مطالعه قرار گرفتند. در این خصوص خصوصیات پتروگرافی،

ترکیب فازی و ساختارشناسی بافت سلاذن‌ها با استفاده از روش‌های متداول میکروسکوپی پلاریزان در ابتدا مورد مشاهده قرار گرفتند و سپس خصوصیات فازی و ساختارشناسی آنان با استفاده از پرتوهای پراثری سینکروترون و همچنین پرتوهای کم‌انرژی کاتودولومینسانس مورد مطالعه قرار گرفتند. سلاذن‌های شهر گور به دلیل تغییرات کانی‌شناسی مشاهده شده از یک منبع ماده خام رسی کائولینیتی با درصد کم آهک و غنی از آهن نشان داده شده است. لعاب این سفال‌ها تحت شرایط احیا کننده و در دماهای بالاتر از ۱۱۰۰ درجه و شروع تشکیل شدن مولیت انجام می‌گیرد. خصوصیات فازی بیانگر استفاده از خاک کائولینیتی با مقادیر متفاوتی از ترکیبات سیلیکانه و مواد پرکننده عمدتاً کوارتزی درست شده است. درجه حرارت پخت سلاذن‌ها براساس فازهای درجه حرارت بالا تا ۱۲۷۰ درجه سانتی‌گراد تخمین زده می‌شود و درست کردن سلاذن با توجه به کانی‌سازی در به صورت مرز مشخص در دو مرحله انجام شده است در غیر این صورت کانی‌سازی مجدد شکل نمی‌گرفت؛ ابتدا بدنه سفالین پخته شده و تا قبل از سرد شدن کامل بدنه، لعاب سلاذنی بر روی آن قرار گرفته است.

سپاسگزاری

کار تجربی ارائه شده در این مقاله به عنوان بخشی از یک پروژه تحقیقاتی انجام شده شماره AZ53/V/22 است که توسط Gerda Henkel Stiftung، آلمان تأمین مالی شده است. نویسندۀ مسئول از این حمایت بسیار قدردانی می‌کند. نویسندۀ مسئول همچنین مایل است از تأسیسات سینکروترون SESAME برای پذیرش و ایجاد پروژه ID20210013 تشکر کند. این آزمایش‌ها در خط پرتو ID09-MS/XPD با همکاری کارکنان SESAME انجام شد. نویسندگان همچنین از آزمایشگاه (Archéosciences Bordeaux Université) Bordeaux Montaigne-CNRS قدردانی می‌نمایند. صمیمانه از دو داور ناشناس برای ویرایش و نظرات لطف‌آمیز در مورد این مقاله و پیشنهاد نکات برجسته مهم تشکر می‌کنیم.

درصد مشارکت نویسندگان

دکتر مجید منتظر ظهوری برای مدیریت داده‌ها، پرسشگری و فعالیت‌های باستان‌شناسی و بررسی متن؛ پروفیسور شاپولی، تحلیل داده‌ها، پروفیسور امامی، تحلیل داده‌ها، استراتژی تحقیق و تفسیر و همچنین بررسی متن نهایی، در نگارش این مقاله مشارکت داشته‌اند.

تعارض منافع

نویسندگان تأیید کردند که هیچ تضاد منافی ندارند.

پی‌نوشت

1. X- Ray Diffraction
2. X- Ray Flourescence
3. X-ray absorption fine structure
4. X-ray Absorption Near Edge Spectroscopy
5. Small-angle X-ray scattering
6. Wide-angle X ray scattering

کتابنامه

- ابن بلخی، (۱۳۷۴). فارس نامه. مصحح و محقق: منصور رستگار فسایی، شیراز: بنیاد فارس‌شناسی.
- ابن حوقل، (۱۳۴۵). صورة الارض. ترجمۀ دکتر جعفر شعار، تهران: انتشارات بنیاد فرهنگ ایران.
- اصطخری، ابواسحاق ابراهیم، (۱۳۷۳). مسالک و ممالک. ترجمۀ محمد بن اسعد بن عبدالله تستری، به‌کوشش: ایرج افشار.

- امامی، سید محمد امین، (۱۴۰۰). علم مواد در باستان‌شناسی و باستان‌سنجی. انتشارات جهاد دانشگاهی اصفهان.
- فره‌وشی، بهرام، (۱۳۵۴). کارنامه‌ی اردشیر بابکان. تهران: دانشگاه تهران، مؤسسه انتشارات.
- مسعودی، أبو الحسن علی بن حسین، (۱۳۶۵). التنبیه و الإشراف. ترجمه‌ی ابو القاسم پاینده، ج. ۲، تهران: شرکت انتشارات علمی و فرهنگی.
- منتظرظهوری، مجید، (۱۳۹۲). «گزارش بررسی سیستماتیک شهر اردشیرخَرّه». پژوهشکده‌ی باستان‌شناسی، منتشر نشده.
- کریمیان، حسن؛ و منتظرظهوری، مجید، (۱۳۹۳). «اردشیرخوره از شکل یابی تا زوال با استناد به متون تاریخی». پژوهش‌های ایران‌شناسی، ۴ (۲): ۶۵-۸۳. <https://doi.org/10.22059/jis.2015.56678>
- کریمیان، حسن؛ و منتظرظهوری، مجید، (۱۳۹۸). اردشیرخوره نخستین پایتخت ساسانیان (شکل‌گیری، توسعه، فضاهای شهری و بناهای تاریخی). تهران: سازمان جهاد دانشگاهی.
- منتظرظهوری، مجید، (۱۴۰۰). «آرامگاه شهر گور، الگویی نو از سنتی کهن». مطالعات باستان‌شناسی پارسه، ۵ (۱۷): ۱۹۱-۲۱۸. DOR: 20.1001.1.26455048.1400.5.17.15.7

- Abdollahi, M., Asgharizadeh, S., Razani, M., (2020). "A Review of the Applications of Synchrotron Radiation in Archaeological Sciences". *Journal of Research on Archaeometry*, 6: 155-174.

- Amirhajloo, S., Sedighian, H., (2023). "Recent Archaeological Research in South Iran: Excavation at the Old City of Sirjan (The Site of Qal'eh Sang)". *Iran*, 61: 75-93.

- Burton, M. M., Quinn, P. S., Bennallack, K., Farahani, A., Howland, M. D., Najjar, M. & Levy, T. E., (2021). "Ceramic technology at Wadi Fidan 61, an early Pottery Neolithic site (ca. 6500 B.C.E.) in the Faynan region of southern Jordan". *Journal of Archaeological Science: Reports*, 38: 103029.

- Barnes, L. E., Pengbo, D., Li, H., Yoh, K., Jixian, L., Li, Z., Cheng, Q. & Sargent, W. R., (2010). *Chinese ceramics from the paleolithic period through the Qing dynasty*. Yale University Press.

- Colomban, P., Liem, N.Q., Sagon, G., Tinh, H. X. & Hoành, T. B., (2003). "Microstructure, composition and processing of 15th century Vietnamese porcelains and celadons". *Journal of Cultural Heritage*, 4: 187-197.

- Crowe, Y., (2002). *Persia and China: Safavid Blue and White Ceramics in the Victoria & Albert Museum 1501-1738*. La Borie.

- Cogswell, J., Neff, H. & Glascock, M., (1996). "The effect of firing temperature on the elemental characterization of pottery". *Journal of Archaeological Science*, 23: 283-287.

- Cultrone, G., Rodriguez-Navarro, C., Sebastian, E., Cazalla, O. & De La Torre, M. J., (2001). "Carbonate and silicate phase reactions during ceramic firing". *European Journal of Mineralogy*, 13: 621-634.

- Chapoulie, R., Cazenave, S. & Cerepi, A., (2005a). "Apport de la cathodoluminescence à haute résolution à l'étude de la diagenèse météorique dans les formations sédimentaires carbonatées". *Comptes Rendus Géoscience*, 337: 337-346.

- Chapoulie, R. & Daniel, F., (2007). "Cathodoluminescence: recherches sur une méthode d'analyse en archéométrie". *British Archaeological Reports (BAR)*: 1-16.
- Chapoulie, R., Déléry, C., Daniel, F. & Vendrell-Saz, M., (2005b). "Cuerda seca ceramics from al-andalus, islamic spain and portugal (10th– 12th centuries ad): Investigation with sem–edx and cathodoluminescence". *Archaeometry*, 47: 519-534.
- Chapoulie, R., Robert, B. & Casenave, S., (2016). "The cathodoluminescence phenomenon used for the study of ancient ceramics and stones, Cities of Memory". *International Journal on Culture and Heritage at Risk*, 1: 53-72.
- Emami, M., Khanjari, R., Naghavi, S., (2019a). "Identification of microstructure and chemical composition of Celadon wares from the Harireh ancient city of Kish Island, Iran". *Periodico di Mineralogia*, 88 (1): 105-115
- Emami, M., Chapoulie, R. & Abdi, K., (2021). "Cathodoluminescence microscopy for interpreting the fabric and heating process of ancient pottery: Preliminary study on the technological features of pottery from the Kur River basin". *Archaeometry*, 64: 337-356.
- Emami, M., (2020). "Production of Pottery from Esfandaghe and Jiroft, Iran, late 7th-early 3rd Millennium BC". *Materials and Manufacturing Processes*, 35: 1446-1454.
- Eramo, G., (2020). "Ceramic technology: how to recognize clay processing". *Archaeological and Anthropological Sciences*, 12 (8): 2-24
- Fabbri, B., Gualtieri, S. & Shoval, S., (2014). "The presence of calcite in archeological ceramics". *Journal of the European Ceramic Society*, 34: 1899-1911.
- Giehler, T., (2014). "The Ceramics of Eurasia How export porcelain has shaped a globalized world". *International Monetary Review*, 105: 13-45
- Goetze, J., Ploetze, M. & Habermann, D., (2001). "Origin, spectral characteristics and practical applications of the cathodoluminescence (CL) of quartz-a review". *Mineralogy and Petrology*, 71: 225-250.
- Götze, J., (2000). "Cathodoluminescence in applied geosciences". *Cathodoluminescence in geosciences*: 457-477.
- Heimann, R. B., & Maggetti, M., (2019). "The struggle between thermodynamics and kinetics". *Phase evolution of ancient and historical ceramics*: 233-282.
- Huff, D., (1970). "Zur Rekonstruktion des Turmes von Firuzabad". *ISTAMBUL. MITTEIL*, 19, 319-338.
- Huff, D., (1973). "Der Takht. I. Nishin in Firuzabad. Mass-Systeme Sasanidischer Bauwerke I la T.-IN Dans LE Fars. Systeme Des Masses Dans L'architecture, Les Constructions Sassanides". *Archäologischer Anzeiger*, 87: 517-540.
- Huff, D., (2008). "Formation and ideology of the Sasanian state in the context of archaeological evidence". *The Sasanian Era*, 3: 31-59.
- Huff, D., (2014). "Das Plansystem von Ardašīr-xwarrah: Agrarkolonisatorisches Großprojekt und gebautes Staatsmodell eines von Gott gegebenen Königiums". *PHILIPPIKA Altertumswissenschaftliche Abhandlungen Contributions to the Study of Ancient World Cultures*: 153-210.

- Huff, D. & Gignoux, P., (1978). "Ausgrabungen auf Qala-ye Dukhtar bei Firuzabad 1976: A. Vorläufiger Grabungsbericht| B. Pithos-Inschriften von Qala-ye Dukhtar". *Archäologische Mitteilungen aus Iran, Berlin*, 11: 117-150.
- Hidaka, M., Ohashi, K., Wijesundera, R. P., Choi, J.Y., Kumara, L. S. R., Sung, N. E., Watanabe, M., Koga, K. & Park, Y. J., (2011). "Correlation between glaze-colors and structural properties of the HIZEN celadons produced in the Edo period of Japan, by means of X-ray diffraction (I), (Correlação entre cores de esmaltes e propriedades estruturais de celadons Hizen produzidos no período Edo do Japão, por meio de difração de raios X (I))". *Cerâmica*, 57: 106-114.
- Hidaka, M., Takeuchi, K., Wijesundera, R. P., Kubuki, S., Kumara, L.S.R., Eon Sung, N., Sugihara, S. & Momoshima, N., (2012a). "Structural and electronic properties of iron oxides in the celadon glazes (II) (Propriedades estruturais e eletrônicas de óxidos de ferro em esmaltes celadon (II))". *Cerâmica*, 58: 534-541.
- Hayward, C. L., (1998). "Cathodoluminescence of ore and gangue minerals and its application in the minerals industry". *Modern approaches to ore and environmental mineralogy*, 27: 269-319.
- Hunt, A. M., (2013). "Development of quartz cathodoluminescence for the geological grouping of archaeological ceramics: firing effects and data analysis". *Journal of archaeological science*, 40: 2902-2912.
- Hidaka, M., Takeuchi, K., Wijesundera, R., Kumara, L., Sugihara, S., Momoshima, N., Kubuki, S. & Sung, N. E., (2012b). "Structural and electronic properties of iron oxides in the celadon glazes (II)". *Cerâmica*, 58: 534-541.
- Huang, S., Freestone, I.C., Zhu, Y. & Shen, L., (2020). "The introduction of celadon production in North China: Technological characteristics and diversity of the earliest wares". *Journal of Archaeological Science*, 114: 105057.
- Hao, W., Zheng, T., Li, Y., Zheng, J., Zhu, J., Glascock, M. D. & Wang, C., (2013). "Provenance study of Chinese proto-celadon in Western Han Dynasty". *Ceramics International*, 39: 6325-6332.
- Jasmund, K. & Lagaly, G., (1993). *Tonminerale und Tone; Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt*. Steinkopff Verlag Darmstadt.
- Karunadasa, K. S., Manoratne, C., Pitawala, H. & Rajapakse, R., (2019). "Thermal decomposition of calcium carbonate (calcite polymorph) as examined by in-situ high-temperature X-ray powder diffraction". *Journal of Physics and Chemistry of solids*, 134: 21-28.
- Krapukaitytė, A., Tautkus, S., Kareiva, A. & Zalieckienė, E., (2008). "Thermal analysis-a powerful tool for the characterization of pottery". *Chemija*, 19: 4-8
- Khizanishvili, I. & Mamaladze, R., (1969). "Mullite formation in porcelain bodies containing perlite". *Glass and Ceramics*, 26: 608-611.
- Laird, J., (1918). "THE COMPOSITION OF CHINESE CELADON POTTERY". *Journal of the American Ceramic Society*, 1: 675-678.

- Maniatis, Y. & Tite, M., (1978). "Ceramic technology in the Aegean world during the Bronze Age". *Thera and the Aegaen World*, 1: 4839-4492.
- Morgan, P., (1991). "New thoughts on Old Hormuz: Chinese ceramics in the Hormuz region in the thirteenth and fourteenth centuries". *Iran*, 29: 67-83.
- Maggetti, M., (1982). "Phase analysis and its significance for technology and origin". *Archaeological ceramics*, Smithsonian Institution Press: 121-133.
- Molera i Marimon, J., Colomer i Busquets, M., Vallcorba, O. & Pradell, T., (2022). "Manganese crystalline phases developed in high lead glazes during firing". *Journal of the European Ceramic Society*, 42 (9): 4006-4015.
- Molera, J., Pradell, T., Salvadó, N. & Vendrell-Saz, M., (2001). "Interactions between clay bodies and lead glazes". *Journal of the American Ceramic Society*, 84: 1120-1128.
- Molera, J., Colomer, M., Vallcorba, O. & Pradell, T., (2022). "Manganese crystalline phases developed in high lead glazes during firing". *Journal of the European Ceramic Society*, 42(9): 4006-4015.
- Odelli, E., Volpintesta, F., Raneri, S., Lefrais, Y., Beconcini, D., Palleschi, V. & Chapoulie, R., (2022). "Digital image analysis on cathodoluminescence microscopy images for ancient ceramic classification: methods, applications, and perspectives". *The European Physical Journal Plus*, 137: 611.
- Ptáček, P., Šoukal, F., Opravil, T., Havlica, J. & Brandštetr, J., (2011). "The kinetic analysis of the thermal decomposition of kaolinite by DTG technique". *Powder Technology*, 208(1): 20-25.
- Pradell, T., Molera, J., Salvadó, N. & Labrador, A., (2010). "Synchrotron radiation micro-XRD in the study of glaze technology". *Applied Physics A*, 99: 407.
- Pradell, T., Molera, J., Smith, A. D. & Tite, M. S., (2008). "Early Islamic lustre from Egypt, Syria and Iran (10th to 13th century AD)". *Journal of Archaeological Science*, 35: 2649-2662.
- Quartieri, S., (2015). "Synchrotron Radiation in Art, Archaeology and Cultural Heritage". *Synchrotron Radiation*, Springer: 677-695.
- Quinn, P. S., (2009). *Interpreting Silent Artefacts: Petrographic Approaches to Archaeological Ceramics*. Oxford: Archaeopress.
- Riederer, J., (2004). "Thin section microscopy applied to the study of archaeological ceramics". *Hyperfine Interactions*, 154: 143-158.
- Rahighi, J., Lamchi Rachti, M., Eghbali, R., Salimi, E., Ghasem, H., Sarhadi, K.H., Jafarzadeh Khatibani, M., Dehghani, J., Saeidi, F. & Sadeghipanah, A., (2015). "Iranian Light Source Facility, A third generation light source laboratory". *Iranian Journal of Physics Research*, 15: 159-173.
- Rice, P. M., (1988). *Pottery Analysis: A Source Book*. The University of Chicago Press, Chicago.
- Rathossi, C. & Pontikes, Y., (2010). "Effect of firing temperature and atmosphere on ceramics made of NW Peloponnese clay sediments. Part I: Reaction paths, crystalline phases, microstructure and colour". *Journal of the European Ceramic Society*, 30: 1841-1851.

- Tite, M. S., (1999). "Pottery production, distribution, and consumption the contribution of the physical sciences". *Journal of archaeological method and theory*, 6: 181-233.
- Tite, M. S., Freestone, I. C. & Wood, N., (2012). "An Investigation into the Relationship between the Raw Materials used in the Production of Chinese Porcelain and Stoneware Bodies and the Resulting Microstructures". *Archaeometry*, 54: 37-55.
- Takahito, M., (1988). *Cultural and Economic relations Between East and West: Sea Routes*. Ott Harrassowitz Verlag.
- Whitehouse, D., (1983). "Maritime trade in the Gulf: The 11th and 12th centuries". *World Archaeology*, 14: 328-334.
- Wang, M., Zhu, T., Ahmed, K.B. & Kusimba, C.M., (2019). "The Sources of East African Chinese Longquan Celadon and Imitation Celadon, China and East Africa: Ancient Ties". *Contemporary Flows*, 135.
- Wood, N., (1999). *Chinese glazes: Their origins, chemistry, and recreation*. University of Pennsylvania Press.
- Wood, N., (2021). "Nought-point-two per cent titanium dioxide: A key to Song ceramics?". *Journal of Archaeological Science: Reports*, 35: 102727.
- Willmott, P., (2019). *An introduction to synchrotron radiation: techniques and applications*. John Wiley & Sons.
- Zhu, T., Huang, H., Wang, H., Hu, L. & Yi, X., (2011). "Comparison of celadon from the Yaozhou and Xicun kilns in the Northern Song Dynasty of China by X-ray fluorescence and microscopy". *Journal of Archaeological Science*, 38: 3134-3140.