

Investigation of Ultrasonic Vibration Influence on the Fineness and Pigments of Terra Sigillata Engobe

Hojjatollah Askari Alamouti^{*1}, Vahid Fartashvand²

1- Department of Handicraft, Faculty of Art, Alzahra University, P.O. Code: 1993893973, Tehran, Iran

2- Department of Industrial Design, Faculty of Art, Alzahra University, P.O. Code: 1993893973, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24-02-2026

Accepted: 15-06-2026

Available online: 01-07-2026

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI:10.30509/jcst.2026.167779.1282

Keywords:

Terra sigillata

Ultrasonic

Non-glazed ceramic coating

Engobe

ABSTRACT

Terra sigillata is one of the oldest and most lustrous non-glazed ceramic surface coatings, yet its traditional preparation is time-consuming and inefficient. On the other hand, high frequency and low amplitude of ultrasonic vibration could improve coating quality. This study investigates the effect of ultrasonic treatment (sonication) of secondary clays as an alternative to conventional methods of producing terra sigillata. The research examines whether ultrasonic processing of the engobe can improve engobe particle quality, influence color characteristics, and accelerate or modify the preparation process. An experimental laboratory approach was performed, and the validity of the results was evaluated using field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), color measurement, and EDS. Findings indicate that ultrasonic treatment significantly reduces the time required to obtain a usable engobe compared to traditional settling methods and decreases material waste. In other words, this technology eliminates the required rest time that reduces preparation time about 72 hr. Also, all of sonicated engobe could be used without any wastage. The particle size is reduced from above 1µm to under 200 nm. Colorimetric analysis further shows that combining ultrasonic processing with careful selection of the settled fraction produces desirable color variations and enhanced visual uniformity ($\Delta E^ \approx 23\%$). Overall, the results suggest that sonication can serve as an effective method for improving efficiency and controlling surface qualities in the preparation of terra sigillata and related ceramic coatings.*

*Corresponding author: * h.askari@alzahra.ac.ir



ارزیابی تاثیر ارتعاشات فراصوتی بر ریزدانگی و رنگدانه‌های انگوب ترا سیگیلاتا

حجت‌اله عسکری‌الموتی^{۱*}، وحید فر تاشوند^۲

۱- استادیار، گروه صنایع دستی، دانشکده هنر، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران، کدپستی: ۱۹۹۳۸۹۳۹۷۳

۲- استادیار، گروه طراحی صنعتی، دانشکده هنر، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران، کدپستی: ۱۹۹۳۸۹۳۹۷۳

چکیده

ترا سیگیلاتا یکی از قدیمی‌ترین و درخشان‌ترین پوشش‌های سطحی سرامیکی بدون لعاب است، با این حال فرایند سنتی تهیه آن زمان‌بر و ناکارآمد است. از سوی دیگر امواج التراسونیک با ایجاد ارتعاشات با دامنه میکرونی و فرکانس بالا می‌تواند منجر به بهبود خواص شود. این پژوهش اثر استفاده از امواج فراصوت بر رس‌های ثانویه به‌عنوان روشی جایگزین برای شیوه‌های مرسوم تولید ترا سیگیلاتا بررسی می‌نماید. این پژوهش بررسی می‌کند که آیا پردازش التراسونیک گلابه می‌تواند کیفیت ذرات انگوب را بهبود بخشد، بر ویژگی‌های رنگی تأثیر بگذارد و فرایند آماده‌سازی را تسریع یا دگرگون کند؟ رویکرد پژوهش به‌صورت آزمایشگاهی تجربی انجام شده و اعتبار نتایج با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM)، اندازه‌گیری رنگ و طیف‌سنجی EDS ارزیابی شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که تیمار فراصوتی زمان لازم برای دستیابی به یک انگوب قابل استفاده را به‌طور معناداری در مقایسه با روش‌های سنتی ته‌نشینی کاهش می‌دهد و میزان اتلاف ماده را نیز کم می‌کند. به عبارت دیگر، این فناوری نیاز به زمان استراحت را که در روش سنتی حدود ۷۲ ساعت است حذف کرده و زمان آماده‌سازی را کاهش می‌دهد. همچنین کل دوغاب فراصوتی‌شده بدون هیچ‌گونه اتلاف قابل استفاده است. اندازه ذرات از مقادیر بالاتر از ۱ میکرومتر به کمتر از ۲۰۰ نانومتر کاهش می‌یابد. تحلیل رنگ‌سنجی همچنین نشان می‌دهد که ترکیب پردازش فراصوتی با انتخاب دقیق بخش ته‌نشین‌شده، تغییرات رنگی مطلوب و یکنواختی بصری بهتری ایجاد می‌کند ($\Delta E \approx 23\%$). در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که سونیکیشن می‌تواند روشی مؤثر برای افزایش کارایی و کنترل ویژگی‌های سطحی در تهیه ترا سیگیلاتا و پوشش‌های سرامیکی مرتبط باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۵/۰۴/۱۰

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI:10.30509/jcst.2026.167779.1282

واژه‌های کلیدی:

ترا سیگیلاتا

فراصوت

پوشش غیرلعابی سرامیک

انگوب

۱- مقدمه

سفال عموماً در قالب ریخته‌گری می‌شد. طرح‌های برجسته، برگرفته از مجموعه‌ای گسترده از الگوها و صحنه‌های تصویری، در قالب‌هایی (که با مهرهایی با الگوی مورد نظر قالب‌گیری شده بودند) نیز ریخته‌گری شده و سپس روی ظروف اعمال می‌شدند (۳). دستیابی به گلابه پوششی براق یا همان ترا سیگیلاتا از طریق جدا کردن ذرات ریزدانه معلق گل و آب با نسبت تقریبی برابر حاصل می‌شود. با این توضیح که حدوداً ۷۲ ساعت پس از ترکیب آب و گل در یک ظرف شفاف، لایه‌ی میانی مخلوط گل و آب، جدا می‌شود. در نتیجه استحصال آن نسبتاً پرهزینه و زمان‌بر است.

ترا سیگیلاتا همزمان با وجوه مختلف پژوهشی قابل تعریف است. در نتیجه طیف‌های متنوعی از تحقیقات در مورد ترا سیگیلاتا می‌توان برشمرد و به نحوی ساختارمند قابل تقسیم‌بندی و نقد است. این پژوهش‌ها در سه دسته جامع موضوعی مرتب شده‌اند. ۱- فن‌شناسی و فناوری ساخت؛ ۲- باستان‌سنجی و تحلیل آثار باستانی، و ۳- مطالعات مروری و بین‌رشته‌ای.

۱-۱- فن‌شناسی و فناوری ساخت

در این زمینه‌ی پژوهشی، ماسکارو و همکارانش (۴) با بررسی باستان‌سنجی ۲۵ قطعه از سفال‌های سفالی با پوشش قرمز که در شهر آرتزو، توسکانی (مرکز ایتالیا) یافت شده و به چندین کارگاه مهم از قرن اول پیش از میلاد تا قرن دوم میلادی نسبت داده می‌شود، می‌پردازند. ایشان با استفاده از روش‌های پیشرفته آنالیز شیمیایی، میکروسکوپی، و پراش اشعه ایکس دریافتند که همه سفال‌ها یک بدنه سرامیکی بسیار ریزدانه را نشان دادند که ترکیبات کانی‌شناسی مشابهی دارند. لئون و همکارانش (۵) با استفاده از طیف‌سنجی عنصری و موادسنجی پیشرفته روند انتقال فناوری تولید ترا سیگیلاتا را از ایتالیا به گال بررسی کردند. یافته کلیدی ایشان افزایش دمای پخت از ۹۵۰ تا بیش از ۱۰۷۰ درجه سانتیگراد و تغییر ترکیب انگوب بود که کیفیت و دوام ظروف را بالا برد. شاو و همکارانش (۶) آزمون‌هایی با روش پراش پرتو ایکس، رنگ‌سنجی و میکروسکوپ الکترونی روی نمونه‌های مختلف ترا سیگیلاتا انجام دادند. نتایج نشان‌دهنده اهمیت انتخاب خاک رس‌های خاص و کنترل دقیق دمای پخت بود که موجب ایجاد پوشش صیقلی با ویژگی‌های ترکیبی منحصر به فرد می‌شد. این مقاله از پژوهش‌های پایه در زمینه تحلیل فناوری تولید ترا سیگیلاتا است. شاو و همکارانش در مقاله دیگری (۷) با تکیه بر رویکرد بین‌رشته‌ای، راهنما و مرجعی کاربردی در ارزیابی علمی فناوری ترا سیگیلاتا به پژوهشگران ارائه کرده و با تحلیل مقایسه‌ای تمامی مراحل زنجیره تولید تا آزمون، تصویری جامع و به‌روز از فرایند ساخت تا شناسایی

اجرای پوشش روی سفالینه‌های باستانی، پیش از کشف لعاب به دو منظور اصلی پرکردن روزنه‌ها و منافذ احتمالی و دیگری به منظور تزیین و نقاشی ظروف صورت می‌گرفته است. پیدایش لعاب تا میزان بسیار زیادی توانست کیفیت این دو هدف را ارتقاء دهد. اما با وجود شکل‌گیری صنایع جدیدی که در خدمت فراوری مواد معدنی سرامیک قرار دارند، هنوز نمی‌توان از تجربیات فنی دنیای باستان و پیش از لعاب، چشم‌پوشی کرد. به ویژه در ساخت آثار هنری سرامیکی، همواره فنون باستانی این توانایی را دارند که کیفیت دیداری و هنری غیرقابل تکرار ارائه دهند. از جمله این روش‌ها، پوشش براق غیرلعابی است که در یونان و روم باستان استفاده می‌شد. این پوشش معروف به ترا سیگیلاتا، نوعی سفال روم باستان است که با رنگ مایل به قرمز و سطح براق از طریق فرایند رسوب‌گذاری و سپس جدا کردن گلابه به دست می‌آید. در برخی منابع تعریف ترا سیگیلاتا پوششی است که شامل سوسپانسیون ریز رس ایلیت بوده و روی سفال اعمال شده و تحت شرایط کنترل‌شده برای دستیابی به یک سطح براق پخته می‌شود (۱). برخی دیگر معتقدند که ترا سیگیلاتا یک اصطلاح نسبتاً جدید بوده و این مفهوم را نمی‌توان در منابع باستانی یافت. اگرچه در متون آنگلو‌ساکسون، اصطلاح «ظروف سامی» به طور سنتی (و هنوز هم در برخی منابع) برای اشاره به همین نوع سفال با پوشش براق استفاده می‌شد. هری کیسکین در کتاب (۲) با بیان این مقدمه می‌نویسد: تعریف این مفهوم کاملاً مشخص نیست و این اصطلاح فقط به معنای ظروف ظریف رومی‌دوره‌های هلنیستی و رومی با سطح براق به رنگ قرمز، نارنجی یا سیاه بوده و از سوی دیگر، دامنه مفهوم اصلی با گنجاندن ظروف ساده و بدون تزیین ساخته شده با همان روش گسترش یافته است. سیمونتا منچلی تعریف بسیار گسترده‌ای ارائه داده و معتقد است ترا سیگیلاتا به معنای ظروف ظریف با لاک قرمز است که از قرن دوم پیش از میلاد تا قرن ششم میلادی در دنیای روم تولید شده است. مهم‌ترین زیربخش‌های تجاری آن شامل شرقی، ایتالیایی، گالیک و آفریقایی می‌شوند. در نتیجه، این مفهوم زیربخش‌های جغرافیایی مانند ایتالیایی، اسپانیایی، آفریقایی و غیره را به خود دیده است. از سوی دیگر در دانشنامه بریتانیکا ترا سیگیلاتا سفال‌های قرمز روشن و صیقلی هستند که در سراسر امپراتوری روم از قرن اول پیش از میلاد تا قرن سوم میلادی مورد استفاده قرار می‌گرفتند (شکل ۱). این اصطلاح همچنین به معنای سفال ساخته شده از خاک رس با طرح‌های قالب‌بده یا مهری است. بدنه این

1. Terra sigillata
2. Illitic clay
3. Simonetta Menchelli
4. Terra

5. Sigillata
6. Gallia

در ترکیب گلابه‌ها، مقادیری از سرب در ترکیب با آلومینای خاک به کار می‌رفته است. ملیکا یزدانی و داود آقاعلی‌گل (۱۳) با استفاده از دستگاه‌های طیف سنجی و پراش اشعه ایکس توانستند به رنگدانه و ترکیبات پوشش سفالینه‌های قلعه الموت دست پیدا کنند.

۳-۱- مطالعات مروری و بین‌رشته‌ای

سویم چیذر^۳ (۱۵)، ترکیبی از مطالعات تاریخی، باستان‌شناسی و هنر سرامیک را تنظیم کرده است. وی ضمن بررسی تاریخچه ترا سیگیلاتا، فرایند غوطه‌وری برای استحصال ذرات رس در تولید پوشش‌های گلی را به تفصیل بیان نموده و تفاوت‌های منطقه‌ای در فناوری‌ها را هم تحلیل کرده است. این کتاب به عنوان یکی از مراجع مهم معاصر فارسی در این حوزه شناخته می‌شود. همچنین ویدا رضایی (۱۶)



شکل ۱: نمونه تاریخی از روم باستان. انگوب براق ترا سیگیلاتا (۹).

Figure 1: A historical ancient rome ware: a lustrous terra sigillata engobe (9).



شکل ۲: روش اعمال انگوب ترا سیگیلاتا روی ظروف گلی در حالت چرمینه. (۱۴)

Figure 1: Application procedure of terra sigillata engobe on clay bodies at the leather-hard stage (14).

می‌دهند. نویسندگان به تفکیک ویژگی‌های بدنه و پوشش ترا سیگیلاتا را توصیف کرده‌اند. در توصیف بدنه معتقدند: بدنه ظروف عمدتاً از خاک رس با درصد بالای آهن و سیلیکات‌ها تشکیل شده و این خاک‌ها معمولاً از نوع ایلیتی هستند که باعث رنگ قرمز متمایل به نارنجی در بدنه می‌شود. همچنین دمای پخت این ظروف بین ۸۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده که منجر به تثبیت رنگ و سفتی مناسب بدنه می‌شود. در توصیف پوشش نیز این ویژگی‌ها برشمرده شده است: پوشش سطح خارجی ظروف از خاک رس نرم‌تر و یکنواخت‌تری ساخته شده که موجب براق بودن و زیبایی سطح ظروف می‌شود. این پوشش ساختار متراکمی دارد و ترکیب آن نسبت به بدنه متفاوت است، به طوری که پوشش معمولاً غنی‌تر از سیلیکات‌ها و آهن است. پرادل و مالرا (۸) به بررسی جامع روش‌های تحلیلی مورد استفاده برای شناسایی و توصیف سرامیک‌های ترا سیگیلاتا می‌پردازند. این مقاله بخشی از یک مجموعه موضوعی گسترده‌تر با عنوان «سرامیک: پرسش‌ها و پاسخ‌های پژوهشی» است که هدف آن راهنمایی پژوهشگران در مطالعه سرامیک‌های باستان‌شناسی از زمان حفاری تا مطالعه و نگهداری در مجموعه‌های موزه است. مقاله یک دید کلی از وضعیت فعلی مطالعات انجام شده بر روی سرامیک‌های ترا سیگیلاتا ارائه می‌دهد.

۲-۱- باستان‌سنجی و تحلیل آثار باستانی

این دسته از مطالعات بیشتر بر تحلیل‌های شیمیایی و کانی‌شناسی نمونه‌های تاریخی جهت یافتن منشاهای جغرافیایی و تاریخی ساخت آثار تمرکز دارند. به عنوان مثال گریفا و همکارانش (۱۰) با انجام تحلیل کانی‌شناسی و شیمیایی روی نمونه‌ها، تفاوت‌های مهم در مواد خام و روش‌های تولید مراکز مختلف را ثبت کرده و توانستند منشأهای جغرافیایی را با دقت تفکیک کنند. راسموسن^۲ و همکارانش (۱۱) با ارائه روشی نوین مبتنی بر تحلیل تغییرات حساسیت مغناطیسی نمونه‌های سرامیکی در طی بازپخت تدریجی، توانسته دمای پخت اصلی سرامیک‌های باستانی را با دقت بالا و به صورت غیرمخرب تعیین کند. اهمیت این روش در دقت بیشتر نسبت به روش‌های سنتی، قابلیت کاربرد روی نمونه‌های کوچک و حفظ تمامیت نمونه‌های با ارزش باستانی است. این پیشرفت به پژوهشگران امکان می‌دهد شرایط فنی تولید و کیفیت سرامیک‌های باستانی را بهتر و دقیق‌تر بازسازی کنند که برای فهم فناوری‌های گذشته و حفاظت از میراث فرهنگی ارزشمند است. مسعود باتر و فائزه سراجی (۱۲) از طریق شیوه‌های مختلف آزمایشگاهی، ترکیب تخمینی گلابه پوششی و رنگدانه‌های مصرفی در گلابه نقاشی را بررسی کرده‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد

1. Ceramics: Research questions and answers

2. Rasmussen

۲- روش تجربی

۲-۱- مواد و روش‌ها

نقشه عملیاتی تحقیق به این ترتیب است که با استفاده از رس قرمز لالچین همدان یک نمونه گلابه تهیه می‌شود. سپس تحت شرایط ثابت و دو متغیر زمان و شدت دستگاه التراسونیک، گلابه‌ها روی نمونه‌ها اعمال می‌شوند. در نهایت پس از پخت نمونه‌ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، نتایج خروجی آزمون دستگاه‌های ارزیابی کیفی و کمی ذرات مورد تطبیق تحلیلی قرار می‌گیرند. بر اساس داده‌های منتشر شده تاکنون هیچ تحقیقی به تلفیق فناوری مدرن امواج التراسونیک با فرایند تولید گلابه نپرداخته است و این زمینه برای اولین بار توسط نویسندگان ارائه می‌گردد. این روش تحقیق برای سنجش اثر فراصوت بر پوشش‌های دوغابی عموماً به صورت تجربی و آزمایشگاهی و با مراحل زیر توصیف می‌شود:

- ۱- آماده‌سازی نمونه دوغاب (تهیه دوغاب با ترکیب مشخص شامل آب و ذرات جامد با درصد حجمی یا وزنی معین)
- ۲- اعمال امواج فراصوت با فرکانس و توان معین
- ۳- آزمون فیزیکی نمونه‌ها

برای این منظور بدنه رس قرمز لالچین همدان مطابق با دستورالعمل‌های سویم چیذر (۱۵)، (۴۰ درصد گل، ۶۰ درصد آب و ۰.۵ درصد سیلیکات سدیم) تهیه شد. بدنه در ابعاد ۷×۷ سانتی‌متر مربع آماده شد. در مرحله چرمینگی، گلابه‌ها روی بدنه‌ها اعمال شد. منظور از گلابه در این مقاله، همواره پوشش گلی یا انگوب ترا سیگیلاتا است. نامگذاری گلابه‌ها به این ترتیب است که در سه حالت خام (بدون اعمال ارتعاشات فراصوت)، فراصوت‌شده بلافاصله و فراصوت‌شده پس از ۷۲ ساعت طبقه‌بندی شدند. در جدول ۱، کد گلابه‌های متنوعی که تولید شدند، با جزئیات فنی همچون شیوه اعمال (غرقابی/قلمو)، میزان و شدت فراصوت و همچنین مدت زمان استراحت نمونه‌ها آمده است. مطالعات معتبر در حوزه سرامیک ترا سیگیلاتا روش‌های متعدد تحلیلی را برای بررسی ویژگی‌های پوشش گلابه و بدنه ظروف پیشنهاد می‌کنند. از مهم‌ترین و پرستفاده‌ترین روش‌ها می‌توان به دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی اشاره کرد. این روش قادر به نمایش ریزساختار پوشش و بدنه، اندازه و توزیع ذرات و تراکم سطح است.

جدول ۱: کدگذاری نمونه‌ها.

Table 1: Coding of Samples.

Sample Code	Engobe Processing Method	Time Factor	Application Method
T1	Terra Sigillata	72 hours	Brush
T2	Terra Sigillata + Ultrasonic	72 hours	Brush
T3	Ultrasonic	Immediate	Brush

با معرفی این تکنیک و بیان تاریخچه، به زعم خود تلاش کرده است جامعه هنری ایران را با یک شیوه تزیین باستانی آشنا کند. وی همچنین می‌کوشد، با تلفیق دوددهی راکو، نتایج پوشش ساگار را در قالبی جدید تجربه کند. تمدن و سرپولکی (۱۷)، کاربرد پوشش گلی یا همان انگوب را در سفال ایران از پیش از تاریخ تا دوران اسلامی، مرور کرده‌اند. ایشان در بیان نتایج، انگوب را جایگزینی برای لعاب جهت پوشش سطح و کاهش تخلخل سطحی عنوان کرده‌اند. جمع‌بندی کلی پیشینه به این شکل است که در بخش فن‌شناسی و فناوری ساخت، منابع به طور مکرر اهمیت ترکیب شیمیایی کنترل شده و دمای پخت دقیق را به عنوان عامل تعیین‌کننده کیفیت پوشش ترا سیگیلاتا مطرح کرده‌اند. تنوع دما و ماده بین مناطق مختلف بازتاب تفاوت‌های تکنیکی و دسترسی به منابع محلی است که به خوبی مستندسازی شده است. در بخش باستان‌سنجی، تمرکز بر تحلیل دقیق مواد با تقریب زیاد منشأیابی جغرافیایی و تشخیص تحولات تجارت دوره روم باستان است. چیذر و رضایی، با ادغام دیدگاه‌های فنی، تاریخی، و باستان‌شناسی، تصویری کاربردی از ترا سیگیلاتا ارائه می‌دهد (شکل ۲). در تمامی منابع اشاره شده، ایده استفاده از فناوری‌های نوین نظیر پردازش مواد با التراسونیک برای ساخت ترا سیگیلاتا دیده نمی‌شود که نوآوری ایده مقاله را تایید می‌کند. این ایده برگرفته از دانش و پژوهش‌های پیشین نویسندگان در حوزه کار بر روی امواج التراسونیک و پوشش ترا سیگیلاتا نشأت گرفته و بدیع است.

این پژوهش با هدف تسهیل و تسریع ساخت ترا سیگیلاتا و همچنین با فرض بهبود کیفی ذرات در اثر امواج فراصوت طراحی و تنظیم شده است. سوال اصلی تحقیق این است که آیا قرار گرفتن گلابه در معرض امواج توان بالای فراصوت می‌تواند، کیفیت همسان یا بهتر و سرعت دستیابی بالاتری نسبت به روش سنتی جدا کردن ایجاد کند؟ انتظار می‌رود در گام اول، اعمال ارتعاشات فراصوت به درون محلول گلابه منجر به ریزدانه‌گی شود. ریزدانه‌گی منجر به افزایش سطح تماس و بهبود یکنواختی تفجوشی می‌شود. البته، این امر با فرایند آسیاب گلوله‌ای (آسیاب مکانیکی) نیز میسر است که از مزایای فرایند فراصوت نسبت به آسیاب مکانیکی، دستیابی به ذرات با ابعاد کوچکتر (مقیاس نانو)، زمان کوتاه‌تر فرایند، عدم چسبندگی ذرات به ساچمه‌های آسیاب و توزیع اندازه باریک‌تر اشاره کرد. همچنین از فرایند فراصوت می‌توان در مقیاس‌های کوچکتر حجمی استفاده کرد. علاوه بر آن، شکستن ذرات با ارتعاشات فراصوت منجر به شکستن مولکولی می‌شود و این امر می‌تواند در فرایندهایی که با واکنش‌های الکتریکی و شیمیایی و نیاز به حضور آنیون یا کاتیون هستند، بسیار مفید باشد. روش پژوهش تجربی و آزمایشگاهی و در نهایت تحلیل کمی داده‌ها با محوریت میکروسکوپ الکترونیکی روبشی گسیل میدانی و رنگ‌سنجی است.

سیگیلاتا با استفاده از طیف‌سنج مدل XRite SP-64 مطابق استانداردهای ASTM D2244 و ASTM E1331 جمع‌آوری شد تا اثر ارتعاشات فراصوت بر ویژگی‌های نوری سطحی مورد ارزیابی قرار گیرد. برای سنجش رنگ، از مختصات (L^*, a^*, b^*) CIELAB استفاده شد، که یکی از استانداردهای پذیرفته‌شده در تحلیل رنگ مواد مختلف به‌ویژه در سرامیک و پوشش‌های سرامیکی است (۱۸، ۱۹)؛ این فضا مبنای دید انسانی برای روشنایی و تهرنگ را فراهم می‌کند و می‌تواند اختلاف رنگ ΔE را به‌صورت کمی بیان کند (۲۰). از روش طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)، برای سنجش ترکیب شیمیایی انگوب استفاده شد و نتایج در جدول ارائه گردید. دستگاه مورد استفاده ساخت شرکت Rigaku و مدل Ultima iv است. برای اعمال ارتعاشات فراصوت از یک دستگاه فراصوت با بسامد نامی ۲۰ کیلوهرتز و شدت امواج W/cm^2 ساخت شرکت فراصوت تجهیز ایرانیان (مدل FTI-UH20S) استفاده شد.

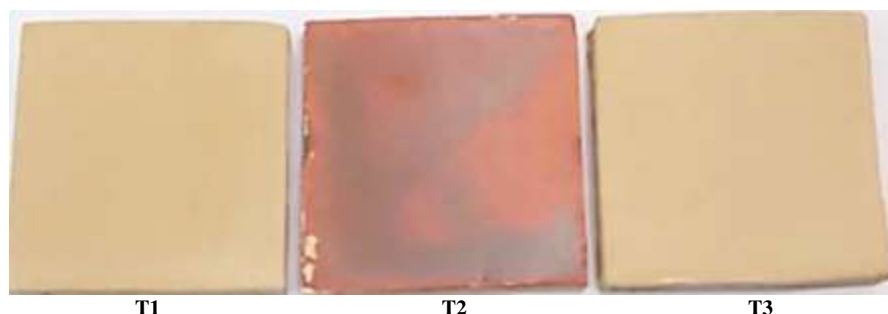
۳- نتایج و بحث

نمونه مینا در شکل ۴a، تصویر ریزساختاری نمونه‌ای از انگوب با بزرگنمایی ۴۰ هزار برابر نشان داده شده است که بدون استفاده از ارتعاشات فراصوت برای ایجاد روکش روی سطح سفال استفاده شده است. مطابق این تصویر اندازه ذرات جامد، بیش از یک میکرون و دارای شکل نامنظم هستند. برای مشاهده شکل دقیق‌تر ذرات جامد، شکل ۴b، تصویر را با بزرگنمایی ۷۵ هزار برابر نشان می‌دهد که مطابق آن وجود تخلخل و فضای خالی بین ذرات جامد به وضوح قابل رویت است. شکل ۴c نیز نمایی کلی ارائه شده است که برای بیان وجود توزیع اندازه ذرات مختلف در حالت کاربرد اصیل مطابق با روش سنتی است.

انگوب‌ها بعد از آماده‌سازی، به مدت چهار دقیقه با امواج فراصوت مورد فرآوری قرار گرفت. سپس یکی از نمونه‌ها (T2)، مطابق روش رایج سنتی برای ایجاد حالت ته‌نشینی ذرات درشت، به مدت ۷۲ ساعت ساکن ماند و پس از ته‌نشینی ذرات، با جدا کردن ذرات سرنشین شده، بر روی نمونه‌ها اعمال شد. نمونه دیگر فراصوت‌شده (T3) بلافاصله روی بدنه اعمال شد. گلابه‌های بدون فراصوت، ۷۲ ساعت پس از ساخت، مطابق روش سنتی ترا سیگیلاتا، لایه‌ی میانی ذرات معلق در آب جدا شد و در معرض هوا و تابش خورشید قرار گرفت تا به غلظت مطلوب برسد. گلابه پوششی با قلم‌مو اعمال شد. برای این کار از قلم‌موی تخت ۴ سانتی‌متری در چهار جهت اصلی اضلاع روی سطح کشیده شد. در شکل ۳ تصاویر نمونه‌ها نشان داده شده است. در روش سنتی ترا سیگیلاتا یکی از مراحل که در ایجاد براقیت سطح ظروف با پوشش ترا سیگیلاتا موثر است، پولیش کردن سطح پس از اعمال گلابه است. به‌ویژه اگر این کار روی چرخ سفالگری انجام شود، براقیت بسیار مطلوبی ایجاد می‌کند. با توجه به مسطح و کوچک بودن نمونه‌ها، از تست براقیت در این تحقیق صرف نظر و صرفاً بر اندازه ذرات تمرکز شده است. برای هر حالت، دو نمونه به‌عنوان تکرار آزمایش تهیه شد تا قابلیت اطمینان نتایج اندازه‌گیری‌ها افزایش یابد. نمونه‌ها پس از پخت، به اندازه 1×1 سانتی‌متر مربع برش داده شدند.

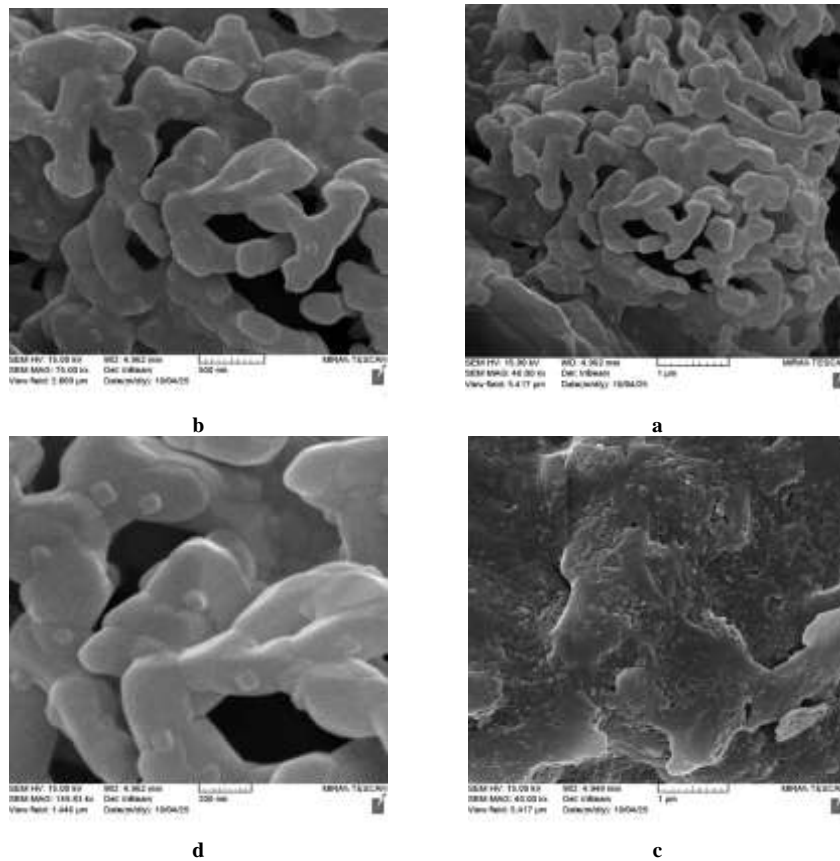
۲-۲- روش‌های ارزیابی

ارزیابی نمونه‌ها منطبق بر شیوه‌های مورد اشاره در پیشینه پژوهش، تلفیقی از روش‌های آزمایشگاهی مختلف بوده است. برای سنجش ریزدانه‌گی از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) توسط دستگاه ساخت شرکت Tescan مدل MIRA \ LMU تهیه گردید. در این مطالعه، اندازه‌گیری رنگ نمونه‌های ترا



شکل ۳: نمونه‌ها پس از پخت.

Figure 3: Fired samples.

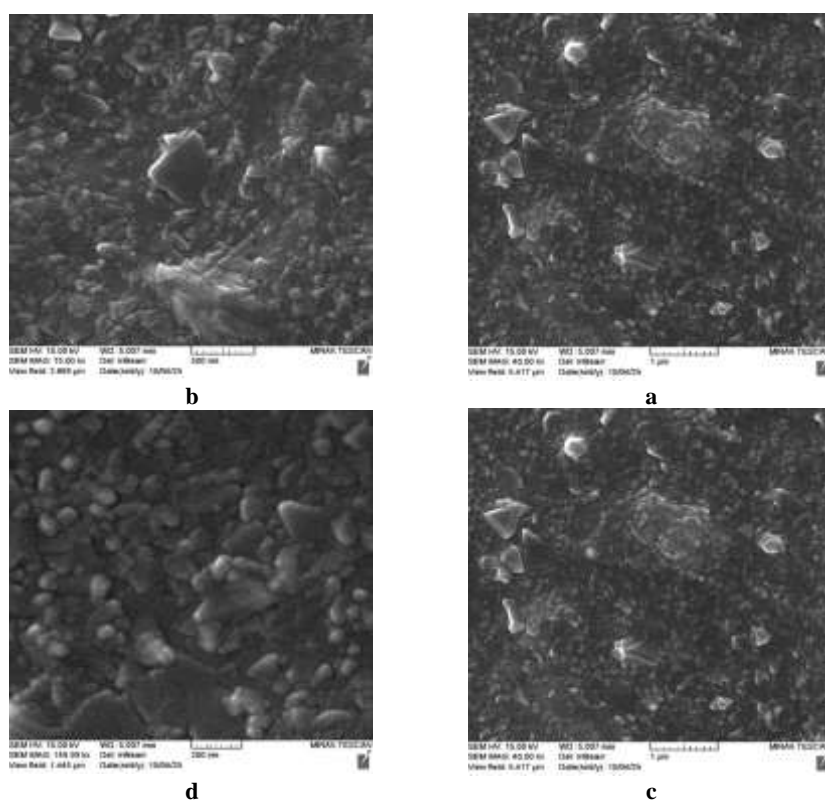


شکل ۴: تصاویر FESEM انگوب‌ها (a-d) بدون اعمال ارتعاشات فراصوت و زمان ماند ۷۲ ساعت (نمونه T1) با بزرگنمایی ۴۰ تا ۱۵۰ هزار برابر.

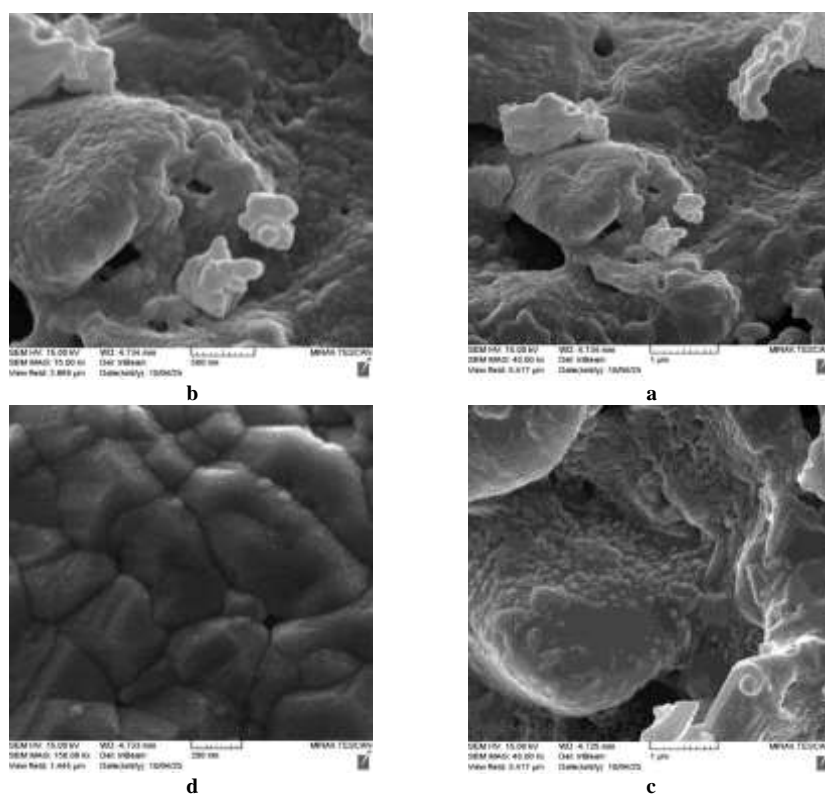
Figure 4: FESEM images (a-d) of engobes without ultrasonic vibration treatment and with a 72-hour residence time (T1 sample), at magnifications ranging from 40,000 \times to 150,000 \times .

در شکل ۵، تصاویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی نمونه‌هایی که پس از ۷۲ ساعت زمان ماند بر روی سفال‌ها، امواج فراصوت روی آنها اعمال شده، ارائه گردیده است. با مقایسه شکل ۵ c با شکل ۴ c، به خوبی تاثیر ارتعاشات فراصوت در یکسان‌سازی اندازه ذرات جامد قابل ملاحظه است. این عامل می‌تواند در سوق دادن به داشتن سطحی با کیفیت بالا، مقاوم در مقابل عوامل بیرونی نظیر باران‌های اسیدی و محیط‌های خورنده به خوبی خود را نشان دهد. با مقایسه شکل ۵ b با شکل ۴ b، به راحتی نشان داده می‌شود که وجود ارتعاشات فراصوت سبب ریزدانه‌گی ذرات و در نتیجه کاهش تخلخل شده است. اعمال ارتعاشات فراصوت در داخل محیط محلول منجر به ایجاد پدیده حفره‌زایی می‌شود که نتیجه آن ایجاد ضربات پیاپی به صورت تقریبی بیست هزار بار در ثانیه برای شکستن ذرات است. این انرژی آزاد شده می‌تواند منجر به ایجاد ذرات با ابعاد نانو گردد که این امر سبب کاهش تخلخل و فضای باز بین مواد جامد می‌گردد. همان‌گونه که از تصاویر مشخص است ارتعاشات فراصوت منجر به سوق دادن اندازه ذرات به محدوده نانومتری شده است که مزایای متعددی

در دوام انگوب دارد. شکل ۵ d با مقیاس ۲۰۰ نانومتر محدوده اندازه ذرات را نشان می‌دهد. در روش سنتی، برای اینکه ذرات درشت وارد انگوب نشود، از زمان برای ته‌نشینی ذرات درشت استفاده می‌شود که ادامه، بخش بالایی و ته‌نشین نشده برای استفاده برداشته می‌شود. این ریزدانه‌گی مشاهده شده هم سبب کاهش زمان ماند نیاز برای ته‌نشینی می‌شود و هم در مقابل سبب می‌شود که کسر بیشتری از محلول آماده شده قابلیت استفاده داشته باشد. این ریزدانه کردن ذرات با فناوری فراصوت منجر به افزایش کیفیت انگوب و یکنواختی سطح می‌شود؛ زیرا ذرات ریزتر، سطحی یکنواخت، بدون حفره، تخلخل و ناهمواری ایجاد می‌کنند. همچنین، لایه‌ای نازک‌تر و یکنواخت‌تر روی بدنه خاک رس تشکیل می‌دهند. مزیت دیگر ریزشدن ذرات بدون تغییر در ترکیب شیمیایی به دلیل عدم افزوده شدن مواد، این است که ذرات درشت روی سطح ماده پایه باقی می‌مانند، در حالی که ذرات ریز به داخل بدنه نفوذ و تخلخل را کاهش می‌دهند (۲۱). این پدیده علاوه بر کاهش میزان تخلخل، ضخامت نهایی لایه پوشش و چسبندگی آن را بهبود می‌دهد.



شکل ۵: تصاویر FESEM انگوب‌ها (a-d) با اعمال ارتعاشات فراصوت و زمان ماند ۷۲ ساعت (نمونه T2) با بزرگنمایی ۴۰ تا ۱۵۰ هزار برابر.
Figure 5: FESEM images (a-d) of engobes subjected to ultrasonic vibrations with a 72-hour residence time (T2 sample), at magnifications ranging from 40,000× to 150,000×.



شکل ۶: تصاویر FESEM انگوب‌ها (a-d) با اعمال ارتعاشات افراصوت و بدون زمان ماند ۷۲ ساعت (نمونه T3) با بزرگنمایی ۴۰ تا ۱۵۰ هزار برابر.
Figure 6: FESEM images (a-d) of engobes subjected to ultrasonic vibrations without a 72-hour residence time (T3 sample), at different magnifications ranging from 40,000× to 150,000×.

ترکیب ریزساختاری سطح در مواد سرامیکی می‌تواند به‌طور مستقیم بر رفتار بازتاب نور تأثیر بگذارد؛ این موضوع به معنای این است که وقتی توزیع ذرات یکنواخت‌تر می‌شود، پراکندگی نور کاهش می‌یابد و مختصات CIELAB تغییر می‌کند. مطابق داده‌های جدول ۲ از منظر رنگی نماد a^* و b^* برای نمونه T1 و T3 تقریباً در یک محدوده قرار دارند؛ این بدین معنی است که نمونه فراصوت‌شده بدون زمان استراحت از منظر قرمز/سبز بودن (a^*) و زرد/آبی بودن (b^*) و سفید/سیاه بودن (L^*) در یک حالت ظاهری قرار دارند ولی نمونه‌ای که فراصوت و زمان استراحت داشته یعنی T3، از دو نمونه قرمزی بیشتری داشته و زردی آن کمتر است که با داده مشاهده شده در تصویر خام مطابق شکل ۳ هم‌خوانی دارد. این قرمز بودن می‌تواند شاخص حضور اکسید آهن بیشتر در نمونه T2 باشد. شاخص L^* هم نشانگر کاهش سفیدی نمونه فراصوت‌شده به همراه جدا کردن است که تیره‌تر بودن این نمونه مشهود است یعنی سطح آن پس از پخت نسبت به نمونه سنتی تیره‌تر دیده شد. در بررسی FESEM نیز دیده شد که فرایند فراصوت، باعث کاهش تجمعات ذرات و یکنواخت‌تر شدن ساختار سطحی شده است، که این تغییرات می‌تواند رفتار بازتابی سطح بعد از پخت را تغییر دهد. سطوح با تخلخل کمتر معمولاً بازتاب کمتری دارند و در نتیجه عدد L^* برای آن‌ها کمتر خواهد بود. ستون‌های مربوط به ΔL^* ، Δa^* ، Δb^* تغییرات را نسبت به نمونه مینا یعنی T1 نشان می‌دهد. شاخص ΔE نشان‌دهنده اندازه اختلاف رنگ (۲۴) است و همه موارد بالا را در بر می‌گیرد، تغییرات رنگی نمونه فراصوت و جداشده را نسبت به نمونه مینا نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از طیف رنگ، مشاهده می‌شود که اعمال ارتعاشات فراصوت بدون اعمال زمان استراحت روش سنتی، همان نتایج رنگی با در نظر گرفتن اثرات مطلوب مرتبط با ریزدانه‌ها را ارائه می‌دهد. این فرایند می‌تواند به عنوان یک جایگزین زمان استراحت ۷۲ ساعت باشد. از طرفی، تلفیق فرایند فراصوت و زمان استراحت نشانگر این است که در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت ریزدانه‌ها و شکست در ذرات تشکیل‌دهنده گلابه رخ داده که با گذر زمان ته‌نشین شده و سطحی با رنگ جدید ارائه شده است. یعنی اعمال فراصوت طیف رنگ جدیدی با ویژگی جذاب بدون تغییر در ترکیب شیمیایی ایجاد کرده است. شگفتی این فناوری در این است که می‌توان با تلفیق با روش سنتی، به رنگ‌های جدید رسید.

برای بررسی این مزیت زمانی، نمونه‌هایی تهیه گردید که صرفاً تحت ارتعاشات فراصوت قرار گرفته و بدون زمان ماند ۷۲ ساعت برای ته‌نشینی ذرات درشت (مطابق روش سنتی)، استفاده شدند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی این نمونه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق این تصویر در مقایسه با حالت بدون فراصوت، برهم‌خوردن شکل ظاهری نمونه‌ها به خوبی مشهود است. در این حالت ذرات ریز و درشت در کنار یکدیگر دیده می‌شوند که از تصویرهای با بزرگنمایی بالا قابل رویت است. همچنین وجود تخلخل در این تصویرها نشان می‌دهد که نسبت به حالتی که از ارتعاشات فراصوت بهره گرفته شده و زمان ماند به محلول داده شده است، سطح تخلخل بیشتری وجود دارد. با مقایسه تصویر با بزرگنمایی ۱۵۰ هزار برابر اثر ریزش‌دهی در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت به خوبی مشهود است. در حالی که زمان ماند نیز در نظر گرفته شده، این ریزش‌دهی بیشتر نمود پیدا کرده است. همین تصویر نیز گواه حذف تخلخل در حالت استفاده از ارتعاشات فراصوت می‌باشد. یکی از شاخص‌های مهم ارزیابی روکش، جذب آب است و میزان تخلخل روی این عامل اثرگذار است. حفره‌ها و سوراخ‌ها و موئینگی بین ذرات منجر به افزایش جذب آب می‌گردد. جذب آب می‌تواند به دلیل ضریب انبساط متفاوت انگوب و لعاب باعث کنده شدن از پایه سفال شوند. ریزدانه کردن ذرات تحت ارتعاشات فراصوت می‌تواند این عیب را تا حد قابل قبولی برطرف نماید.

علاوه بر اینکه ریزدانه‌ها در مرحله پوشش‌دهی موثر است، به‌علت اینکه تخلخل کاهش می‌یابد، منجر به افزایش سطوح تماس می‌شود. افزایش سطوح تماس در مرحله پخت اثرگذاری زیادی دارد. پیشتر نویسندگان این امر را در خصوص پودرهای فلزی بررسی و بهبود و افزایش استحکام قطعات فلزی را مشاهده نموده‌اند (۲۲، ۲۳). همچنین ریزدانه‌ها سبب می‌شود که در مرحله پخت سطح تماس بیشتری بین انگوب و لایه زیرین وجود داشته باشد و از جدا شدن پوشش جلوگیری کند. همچنین این ریزدانه‌ها بر رنگ پوشش از منظر زنده و یک‌دست شدن رنگ نیز تأثیر می‌گذارند که این امر در پژوهش‌های بعدی به صورت عمیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین وجود حفره و تخلخل بر مشخصات بیرونی و ظاهر کار نیز تأثیرگذار است. مطالعات نشان داده‌اند که اندازه و توزیع ذرات، تخلخل سطحی و

جدول ۲: نتایج مختصات رنگی CIELAB و اختلاف رنگ نمونه‌های کاشی نسبت به نمونه مینا (نمونه T1).

Table 2: CIELAB color coordinates and color difference values of tile samples relative to the reference sample (T1 sample).

Sample number	Light Source	Observer	L^*	a^*	b^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE	ΔE_{2000}
T1	D65	10°	69.40	11.28	22.07	—	—	—	—	—	—	—
T2	D65	10°	48.02	15.17	12.30	-21.38	3.88	-9.77	-5.26	-9.10	23.83	12.73
T3	D65	10°	66.75	12.53	23.05	-2.65	1.24	0.99	1.45	-0.64	3.09	1.39

جدول ۳: ترکیب شیمیایی انگوب (درصد وزنی)

Table 3: Engobe chemical composition (wt. %)

Element	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
Wt. %	2.37	28.36	1.46	3.29	12.67	32.83	0.76	1.64	14.82	1.8

ته‌نشینی و آماده‌سازی حذف می‌شوند. داده‌های رنگ‌سنجی CIELAB نیز تأیید می‌کنند که ترکیب اثر فراصوت با انتخاب مناسب فاز ته‌نشسته، تغییرات رنگی مطلوب (در حدود ۲۳ درصد شاخص ΔE) و یکنواختی دیداری را به همراه دارد. این نتایج نشان می‌دهد که فناوری فراصوت می‌تواند جایگزینی عملی و مؤثر برای فرایند سنتی دستیابی به ترا سیگیلاتا باشد و مسیر نوینی برای تسریع، بهبود کیفیت و افزایش بهره‌وری این پوشش غیرلغابی ارائه دهد.

تشکر و قدردانی

از زحمات آزمایشگاه مرکزی دانشگاه الزهرا آقای دکتر محمدی و پژوهشگاه رنگ خانم مهندس خلیلی و آقای دکتر ابراهیم قاسمی قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

در جدول ۳ مشاهده می‌شود که بیشترین عنصر سیلیس و اکسیژن هستند که احتمالاً بخشی از اکسیژن به صورت سیلیس (SiO_2) و اکسید (MgO , CaO , Fe_2O_3 و Al_2O_3) در زمینه وجود دارد. همچنین وجود کربن به دلیل دی اکسید کربن (CO_2) و وجود گوگرد به دلیل دی اکسید گوگرد (SO_2) است.

۴- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که اعمال امواج فراصوت بر گلابه، به طور قابل توجهی ریزدانه‌های ذرات (کاهش اندازه از بالای یک میکرون به زیر ۲۰۰ نانومتر) و یکنواختی سطح پوشش ترا سیگیلاتا را افزایش می‌دهد. کاهش تخلخل و همگنی بیشتر ذرات منجر به بهبود کیفیت نوری و مکانیکی پوشش شده و امکان کاهش زمان ته‌نشینی و افزایش بهره‌وری مواد را فراهم می‌کند. به‌ویژه، فناوری فراصوت توانسته بهره‌وری گلابه را تا حدود ده برابر نسبت به روش سنتی افزایش دهد (عدم نیاز به جداسازی و زمان استراحت ۷۲ ساعت)، زیرا بخش بیشتری از محلول دوغاب قابل استفاده می‌شود و فرایندهای طولانی

۵- مراجع

1. Bimson M. The technique of Greek black and terra sigillata red. *Antiquaries J.* 1956;36(3-4):200-204. <https://doi.org/10.1017/S0003581500061096>.
2. Kiiskinen H. Production and trade of Etrurian Terra Sigillata pottery in Roman Etruria and beyond between c. 50 BCE and c. 150 CE [dissertation]. Turku: University of Turku; 2013. ISBN 978-951-29-5400-1.
3. Britannica. Terra sigillata ware [Internet]. *Encyclopaedia Britannica*; 2026 [cited 2026 Feb 26].
4. Mascaro ME, Cantisani E, Ricci M, Pallecchi P, Vilucchi S, Dalconi MC, et al. The production of terra sigillata in Arezzo, Central Italy: an archaeometric investigation. *Archaeometry.* 2025;67(3):604-624. <https://doi.org/10.1111/arc.13023>.
5. Leon S, et al. Evolution of terra sigillata technology from Italy to Gaul: A material characterization study. *J Anal At Spectrom.* 2015;30(9):658-665. <https://doi.org/10.1039/c4ja00367e>.
6. Sciau P, et al. Characterization of Roman terra sigillata. *J Archaeol Sci.* 2000;27(4):45-58. <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0522>.
7. Sciau P, Sanchez C, Gliozzo E. Ceramic technology: how to characterize terra sigillata ware. *Archaeol Anthropol Sci.* 2020;12(9):1-22. <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01137-8>.
8. Pradell T, Molera J. Analytical techniques for characterizing terra sigillata ceramics. *Archaeol Anthropol Sci.* 2020;12(4):200-216. doi:10.1007/s12520-020-01108-7.
9. <https://latininscriptions.ashmus.ox.ac.uk/collections/gallery/detail/?a=an1966.250>.
10. Grifa C, et al. A comparative study of terra sigillata ceramics from Puteoli and the Bay of Naples. *J Archaeol Sci Rep.* 2019;24:77-95. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.03.014>.
11. Rasmussen P, et al. New method for estimating firing temperatures of ancient ceramics. *J Archaeol Sci.* 2012; 39(12):1208-1215. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.07.025>.
12. Bater M, Serajii F. Identification of the Chemical Composition of the Slip Coating and the Colors Used in Some Slip-painted Pottery from the Sistan Region. *J Stud Color World*, 2023; 13(3): 269-282. [In Persian].
13. Yazdani, M., Agha Aligol, D. Characterization of Red and Brown Color on Mina'i Ceramics from Sixth to Seventh Century AH in Iran Based on Instrumental Methods. *J Color Sci Tech*, 2025;18(4):253-270. <https://doi.org/10.30509/jest.2025.167437.1248> [In Persian].
14. <https://www.smaltd.com/en/glossary/terra%20sigillata>.
15. Chizder S. Terra sigillata: history, techniques, and functions of clay coatings. Heidari F, translator. Tehran: Picreh Publications; 2021. [In Persian].
16. Rezaei V. Study of decorative terra sigillata methods and integration with smoke firing in Raku kilns [master's thesis].

- Isfahan: University of Art, Faculty of Visual and Applied Arts; 2014. <https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/e4f065778879a31a709fd6c265185154> [In Persian].
17. Tamaddon M, Serpolaki H. Terra sigillata ceramics: investigation of slip or clay coating applications in the history of Iranian pottery. *Golestane Honar*. 2006;2(1):54-70. [In Persian].
18. Abed F.M., Amirshahi S.H., La'el A., Reconstruction of Reflectance Curves from CIEXYZ Values Using Interpolation Method in Three Dimensional Space, *J Color Sci Tech*. 2008;2(1):1-7 <https://doi.org/10.1001.1.17358779.1387.2.1.1.5> [In Persian].
19. Ameri F., Safi M., Khalili N.; Investigating the Precision and Trueness of Spectrophotometers Using BCRA Ceramic Standard Tiles, *J Color Sci Tech*. 2018;12(1):73-80. <https://doi.org/10.1001.1.17358779.1397.12.1.7.1> [In Persian].
20. McGrath JR, Beck M, Hill ME. Replicating red: Analysis of ceramic slip color with CIELAB color data. *J Archaeol Sci Rep*. 2017;14:432-438. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.06.020>.
21. Rezaghi E, Khajeh Aminian M, Zare H. Investigation of physical properties of ceramic tiles with the addition of refractory dolomite and magnesite in the slip composition. *J Color Sci Technol*. 2018;12(1):13-21. <https://doi.org/10.1001.1.17358779.1397.12.1.2.6> [In Persian].
22. Fartashvand V, Abedini R, Abdullah A. Influence of ultrasonic vibrations on the properties of press-and-sintered titanium. *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*. 2022;236(11): 1518-1525. <https://doi.org/10.1177/09544054221078386>.
23. Fartashvand V, Abdullah A, Sadough Vanini S.A., Effects of high power ultrasonic vibration on the cold compaction of titanium. *Ultrasonics sonochemistry*. 2017; 36:155-161. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.11.017>.
24. Xu BT, Zhang B, Kang Y, Wang YN, Li Q. Applicability of CIELAB/CIEDE2000 formula in visual color assessments of metal-ceramic restorations. *J Dent*. 2012;40 Suppl 1:e3-e9. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2012.04.011>.

How to cite this article:

Askari Alamouti H, Fartashvand V. Investigation of Ultrasonic Vibration Influence on the Fineness and Pigments of Terra Sigillata Engobe. *J Color Sci Tech*. 2026;19(4):407-417. <https://doi.org/10.30509/jcst.2026.167779.1282> [In Persian]