



Sharif University of Technology

<https://sjie.journals.sharif.edu/>



Research Article

A Novel Method for Designing Glaze Formulation Using Mathematical Programming

Hossein Shams Shemirani* and Hamid Reza Zahedi Neiestani

Industrial Engineering Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

* corresponding author: (h.shams@iut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 24 April 2024

Revised: 28 September 2024

Accepted: 8 October 2024

Keywords:

Glaze formulation,
mathematical modeling,
seger formula,
batch formula,
applied optimization.

Abstract

Glaze is one of the fundamental components of ceramic products such as tiles, porcelain dishes, and sanitary ceramics. The formulation of glaze is a critical and complex process, representing one of the most significant and challenging aspects within the ceramic industry. Establishing the optimal formulation for glaze production is crucial for enhancing product quality and minimizing production costs. In this study, grounded in practical experiences from a factory setting, the issue of glaze formulation is examined and analyzed using an operations research approach for the first time globally. The outcomes of the developed model were tested and successfully implemented on the production line. To ensure the practical implementation of this research within the industry and to enhance user accessibility, a user-friendly software was developed. It is crucial to recognize that different factories employ a variety of raw materials in their glaze production processes. This variation arises from factors such as the unavailability of certain raw materials, the elevated costs associated with some materials, and the expenses related to transportation. The chemical composition of raw materials varies significantly, with the percentage of oxides differing based on the specific mine and the section of the mine from which they are sourced. Consequently, determining the optimal proportion of available raw materials for producing a glaze with a specific Seger formula necessitates repeated analysis. This iterative process is essential to identify the appropriate formula, which can then be implemented in the production line. In this study, conducted with real-world data and a thorough understanding of the problem through the production process, as well as an extensive review of relevant literature, the issue of designing a glaze formula is analyzed using operations research methodology. This paper presents a novel approach to glaze formulation, which can serve as a foundation for future research in this area.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

To Cite this article:

Shams Shemirani, H. and Zahedi Neiestani, H.R. 2025. A novel method for designing glaze formulation using mathematical programming, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(1), 73-85. <https://doi.org/10.24200/ij65.2024.63797.2387>



روشی نوین برای طراحی فرمولاسیون لعاب با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی

حسین شمس شمیرانی* و حمیدرضا زاهدی نیستانی

گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*نویسنده مسئول (h.shams@iut.ac.ir)

چکیده

لعاب، یکی از اصلی‌ترین مواد در تهیه‌ی چینی‌آلات محسوب می‌شود و همواره روش فرمولاسیون آن از مهم‌ترین و چالش‌برانگیزترین کارها در صنعت سرامیک بوده است. تنظیم فرمول مناسب برای تولید لعاب، هم از نظر بهبود کیفیت محصولات و هم از نظر کاهش هزینه‌های تولید، بسیار حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر، که براساس تجربیات عملی در یکی از کارخانه‌های کشور ایران انجام شده است، برای اولین بار در جهان، مسئله‌ی فرمولاسیون لعاب با رویکرد پژوهش در عملیات، بررسی و تحلیل شده است. نتایج حاصل از مدل طراحی شده، آزمایش و در خط تولید پیاده‌سازی شده است. برای آنکه نتایج حاصل از پژوهش حاضر به‌صورت عملی در صنعت قابل استفاده باشند و کاربران به‌راحتی بتوانند از مزایای آن بهره‌مند شوند، یک نرم‌افزار کاربرپسند نیز برای آن طراحی و ایجاد شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۵

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

واژگان کلیدی:

فرمولاسیون لعاب،

مدل‌سازی ریاضی،

فرمول زگر،

فرمول بچ،

بهینه‌سازی کاربردی.

۱. مقدمه

صنایع چینی و سرامیک طی چند دهه‌ی اخیر، رشد فزاینده‌ای هم از نظر کمیت و هم از نظر کیفیت داشته است. فروش کالاها در بازار جهانی، تحت تأثیر دو عامل قیمت و کیفیت قرار دارد. کیفیت محصول یک شاخص مهم رقابتی است. لعاب قشر نازک شیشه‌مانندی است که بر سطح برخی از محصولات سرامیکی قرار می‌گیرد. برای ساخت لعاب، پودر مواد شیشه‌ساز با آب مخلوط می‌شود و تا زمان تشکیل دوغابی با غلظت مناسب، همزده می‌شود. سپس دوغاب لعاب، با قلم‌مو یا با روش غوطه‌ورسازی یا با اسپری کردن به‌صورت لایه‌ای نازک بر روی سطح بدنه اعمال می‌شود. هنگامی که بدنه در دمای صحیح پخت شود، ذرات لعاب ذوب می‌شوند و لایه‌ای پیوسته و شیشه‌ای‌مانند بر سطح بدنه تشکیل می‌دهند. لعاب باید ویژگی‌هایی نظیر ثبات در مقابل شرایط محیطی، مقاومت در مقابل اثر صابون‌ها، و سختی کافی داشته باشد، آنچنان‌که به آسانی خراش بر ندارد. در ضمن، باید در عین سرد شدن، انقباض مساوی با انقباض سرد شدن بدنه داشته باشد تا از ترک خوردن لعاب جلوگیری شود. وجود لعاب به این دلایل سودمند است:

۱- بدنه‌ای که سطح آن لعاب داشته باشد، سطحی صاف، صیقلی، و غیرجاذب رطوبت دارد و به آسانی قابل تمیز کردن خواهد بود.

۲- با وجود لعاب می‌توان رنگ‌ها و بافت‌های متنوعی بر روی سطح بدنه ایجاد کرد.

در فرآیند تولید لعاب، تعدادی ماده‌ی اولیه‌ی معدنی با یکدیگر ترکیب می‌شوند. اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی مواد اولیه، اکسیدهایی هستند که درصد وجود آن‌ها با دستگاه آنالایزر^۱ شناسایی می‌شود. پژوهشگران صنعت سرامیک طی سال‌ها کوشش و پژوهش توانسته‌اند برای محصولات مختلف، فرمول‌های مناسبی را براساس میزان اکسیدهای مختلف شناسایی کنند، که اصطلاحاً به آن‌ها، فرمول زگر^۲ آن لعاب گفته می‌شود.

زگر، پدر علم سرامیک، اولین کسی بود که لعاب‌ها را بر حسب اکسیدهای تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها فرمول‌بندی کرد. همچنین وی اکسیدها را به سه گروه اسیدی، خنثی، و قلیایی تقسیم‌بندی کرد و مجموع مولی اکسیدهای قلیایی را نیز برابر واحد در نظر گرفت و دیگر اکسیدهای فرمول را بر مبنای آن محاسبه کرد.^[۱۶]

مواد اولیه‌ی مختلف با توجه به اینکه از کدام معدن و نیز از کدام قسمت معدن تهیه شده‌اند، آنالیز شیمیایی متفاوتی دارند و درصد اکسیدهای موجود در آن‌ها متفاوت است. بنابراین تعیین اینکه درصد استفاده از مواد اولیه‌ی تهیه‌شده یا

² Seger

¹ Analyzer

در عمل اتفاق می‌افتد)، آزمایشگاه مؤظف است فرمول جدیدی برای بچ طراحی کند، که کاری طاقت‌فرسا و دشوار است. الگوریتم رایج در صنعت و مطرح‌شده در کتب مرجع سرامیک،^[۱۴-۱۶] مطابق این گام‌هاست:

۱- ترسیم جدولی که در آن نسبت مولی هر اکسید براساس فرمول زگر در بالای آن درج شود.

۲- لحاظ‌کردن ستونی به جدول، که جرم معادل مواد تأمین‌کننده‌ی اکسیدهای موردنظر در آن درج شود. جرم معادلی که برای اولین ماده‌ی اولیه نوشته می‌شود، باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که اولین اکسید نوشته‌شده در بالای جدول را حذف کند.

۳- به ترتیب، جرم معادل موادی که به وسیله‌ی اولین ماده‌ی خام به ترکیب لعاب اضافه می‌شوند، به‌صورت افقی نوشته می‌شود و از کل مقدار موردنیاز مشخص‌شده‌ی آن در بالای جدول کم می‌شود.

۴- دومین ماده‌ای که در ستون مواد اولیه نوشته می‌شود باید به اندازه‌ای انتخاب شود که دومین اکسید مشخص‌شده در بالای جدول را حذف کند.

۵- به همین ترتیب اکسیدهای حاصل از ماده‌ی اولیه کم می‌شوند و تفاضل آن‌ها به دست می‌آید. این عملیات تا حذف کامل اکسیدهای بالای جدول ادامه می‌یابد.

۶- سرانجام نسبت‌های جرمی مواد اولیه در جرم معادل آن‌ها ضرب می‌شود تا جرم هر ماده برحسب گرم به‌دست آید.

با بررسی‌های به‌عمل‌آمده مشخص‌شد که بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در سال‌های دور و نزدیک بر روی بهبود خواص و ویژگی‌های فنی لعاب و طراحی فرمول زگر متمرکزند و فقط در کتاب‌های مرجع، یک روش ابتکاری برای طراحی فرمول بچ، که موردنیاز فرایند تولید است، مطرح شده است. پژوهش حاضر اولین اقدامی بوده است که مسئله‌ی طراحی فرمول بچ لعاب را با رویکرد پژوهش در عملیات بررسی و تحلیل کرده است. همچنین، روشی مؤثر و کارآمد را به جای استفاده از روش ابتکاری متداول در صنعت، برای این موضوع مطرح کرده و ابزاری بسیار قدرتمند، سریع، و انعطاف‌پذیر را در اختیار کارشناسان صنعت سرامیک قرار داده است تا بتوانند طراحی فرمول بچ را به بهترین وجه ممکن انجام دهند.

در جدول ۱، مقایسه‌ی روش‌های مطرح‌شده در نوشتارها و کتاب‌های مرتبط با موضوع ارائه شده است.

تئودوسیو^۳ و همکاران (۲۰۲۲)،^[۱] و ایسایا^۴ و همکاران (۲۰۲۱)،^[۲] به بررسی بهینه‌سازی ترموکرومیک لعاب برای افزایش کارایی انرژی در ساختمان‌ها پرداخته و نشان داده‌اند که چگونه می‌توان با استفاده از مدل‌های ریاضی، خواص نوری و حرارتی لعاب را بهبود بخشید. همچنین، کرارتی^۵ (۲۰۲۲)،^[۳] به بهینه‌سازی همزمان طراحی و کنترل پنجره‌های لعاب‌کاری هوشمند پرداخته و نشان داده است که بهینه‌سازی می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و بهبود کیفیت محیط زیست داخلی ساختمان کمک کند. برخی مطالعات دیگر،^[۴-۶] هم به بررسی بهینه‌سازی چندهدفه‌ی ویژگی‌های لعاب‌های ترموکرومیک پرداخته‌اند، که هدف‌شان بهبود کارایی انرژی ساختمان‌ها بوده و دریافته‌اند که بهینه‌سازی چندهدفه در بهبود کیفیت و کاهش هزینه‌های تولید لعاب تأثیر قابل‌توجهی داشته است. هونگ^۶ و همکاران (۲۰۲۱)،^[۷] در بررسی بهینه‌سازی چندهدفه‌ی

قابل دسترس، برای تولید لعابی با فرمول زگر مشخص، چگونه باید باشد؛ فعالیتی است که به‌طور مکرر باید انجام شود تا فرمول مناسب شناسایی و وارد خط تولید شود. کارخانه‌های مختلف از مواد اولیه‌ی یکسان برای تولید لعاب استفاده نمی‌کنند. این امر ناشی از عواملی چون در دسترس‌نبودن بعضی از مواد اولیه، هزینه‌ی بالای برخی از مواد، و هزینه‌های حمل‌ونقل است.

برای هر لعاب ۲ گونه فرمول مطرح است:

۱. **فرمول بچ**^۱: فرمولی که بر حسب مواد اولیه است و درصد استفاده از آن‌ها را مشخص می‌کند. از فرمول بچ در خط تولید استفاده می‌شود و هر کارخانه، فرمول خاص خود را دارد.

۲. **فرمول زگر**: فرمولی براساس مقدار مولی اکسیدهای تشکیل‌دهنده‌ی آن لعاب است؛ که در تمامی کارخانجات یکسان است.

از آنجا که فرمول‌های بچ به آنالیز شیمیایی مواد اولیه وابسته هستند، با هر تغییری در مواد اولیه باید دوباره طراحی شوند. فرمول‌های بچ، به‌طور دائم تغییر می‌کنند و این موضوع، یک چالش اساسی برای کارخانه‌هایی است، که باید لعاب تولید کنند.

نوآوری اصلی مسئله‌ی حاضر، به‌کارگیری دانش پژوهش در عملیات برای مدل‌سازی مسئله‌ی فرمولاسیون لعاب است، که برای اولین بار در ایران و نیز جهان انجام شده است. با بررسی‌هایی که به‌عمل آمده است مشخص شد که متخصصان ایرانی و خارجی صنعت سرامیک به‌دلیل عدم آشنائی با دانش پژوهش در عملیات، از روش‌های مبتنی بر سعی و خطا و نیز مدل‌سازی‌های مقدماتی ریاضی برای این کار همچنان استفاده می‌کنند.^[۱۴-۱۶]

در پژوهش حاضر، که به‌صورت عملیاتی با داده‌های واقعی و شناخت دقیق مسئله از طریق فرایند تولید و نیز مطالعه‌ی کتاب‌ها و نوشتارهای منتشرشده در این زمینه انجام شده است، مسئله‌ی فرمولاسیون لعاب با استفاده از دانش پژوهش در عملیات، مدل‌سازی و تحلیل شده است. نوشتار حاضر، یک رویکرد جدید را برای فرمولاسیون لعاب معرفی می‌کند و می‌تواند نقطه‌ی شروعی برای بسیاری از پژوهش‌های دیگر در این زمینه باشد.

گام‌های اجرای پژوهش حاضر، به این صورت بوده است:

۱. شناسایی و تعریف دقیق مسئله‌ی فرمولاسیون موجود در کارخانه.
۲. بررسی دقیق روش‌های موجود برای حل مسئله‌ی فرمولاسیون لعاب.
۳. طراحی مدل ریاضی فرمولاسیون لعاب با رویکرد پژوهش در عملیات.
۴. آزمون عملی نتایج حاصل از مدل ریاضی.
۵. طراحی و ایجاد نرم‌افزار کاربردی برای عملیاتی‌سازی سیستم طراحی‌شده.

۲. مرور پژوهش‌های مرتبط

با توجه به بررسی‌های به‌عمل‌آمده، مشخص شد که کارشناسان و متخصصان صنعت سرامیک برای طراحی فرمول بچ در آزمایشگاه از یک روش ابتکاری^۲ استفاده می‌کنند. به این صورت که درصد استفاده‌ی هر یک از مواد اولیه را با سعی و خطا افزایش یا کاهش می‌دهند تا به فرمول زگر موردنظر نزدیک شوند. روش اخیر، علاوه بر اینکه وقت‌گیر و زمان‌بر است، دقت چندان بالایی نیز ندارد. همچنین با تغییر مواد اولیه یا تغییر آنالیز شیمیایی آن‌ها (موضوعی که مکرراً

⁴ Isaia

⁵ Krarti

⁶ Hong

¹ Batch

² Heuristic method

³ Teodosiu

جدول ۱. مرور ادبیات و پژوهش‌های مرتبط.

Row	Study	Year	Improving Glaze Properties	Heuristic Formulation Solution	Optimal Formulation Solution
1	[12]	2023	✓		
2	[7]	2023	✓		
3	[3]	2022	✓		
4	[4]	2022	✓		
5	[1]	2022	✓		
6	[13]	2022	✓		
7	[2]	2021	✓		
8	[5]	2021	✓		
9	[9]	2020	✓		
10	[10]	2020	✓		
11	[8]	2020	✓		
12	[6]	2020	✓		
13	[11]	2019	✓		
14	[16]	2003	✓	✓	
15	[15]	2001	✓	✓	
16	[14]	2001	✓	✓	
17	Current Study	—			✓

فرآیندهای صنعتی را نشان داده‌اند. یانگ^۴ و همکاران (۲۰۲۳)^[۱۲] در مطالعه‌ای به بهینه‌سازی ترکیبی ویژگی‌های نوری لعاب پرداخته و از مدل‌های ترکیبی برای بهبود عملکرد لعاب استفاده کرده‌اند. نتایج مطالعه‌ی اخیر نشان داده است که بهینه‌سازی ترکیبی می‌تواند به بهبود دقت و کارایی فرآیندهای تولیدی منجر شود. همچنین، ژو^۵ (۲۰۲۲)^[۱۳] از رویکرد بهینه‌سازی چندمرحله‌ای مبتنی بر یادگیری ماشین برای بهبود سیستم‌های لعاب‌کاری استفاده کرده است، که نشانگر قدرت بالای بهینه‌سازی ترکیبی در مدیریت پیچیدگی‌های فرآیندهای صنعتی است. فقط در برخی منابع^[۱۴-۱۶] به صنعت تشریح سرامیک از گذشته تاکنون پرداخته شده است. همچنین، فعالیت‌های صورت‌گرفته در زمینه‌های ساخت و تولید لعاب، بررسی و یک روش ابتکاری برای طراحی فرمول بچ ارائه شده است. ضعف بزرگی که در مرور ادبیات مشاهده می‌شود، عدم استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی برای طراحی فرمول بچ است. در حالی که این موضوع یکی از مهم‌ترین چالش‌های صنعت سرامیک در

لعاب براساس ارزیابی عملکرد نوری و انرژی نشان داده‌اند که چگونه می‌توان با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه، کارایی لعاب را در شرایط مختلف بهبود بخشید. پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی هوش مصنوعی و یادگیری ماشین^۱، فرصت‌های جدیدی را برای بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی، از جمله فرمولاسیون لعاب فراهم کرده است؛ که استفاده از آن‌ها می‌تواند به شناسایی الگوهای پیچیده و بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک کند. ژو و ژنگ (۲۰۲۰)^[۸] در مطالعاتی به بررسی بهینه‌سازی مبتنی بر عدم قطعیت تصادفی در سیستم‌های لعاب‌کاری پرداخته و از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی فرآیند استفاده کرده‌اند. مطالعات ایشان نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با استفاده از روش‌های پیشرفته، عدم قطعیت‌ها را مدیریت و کارایی فرآیند را افزایش داد. هی^۲ (۲۰۲۰)^[۱۰] و روزنداهل^۳ و همکاران (۲۰۱۹)^[۱۱] در مطالعات خود از روش‌های کنترل فازی برای بهینه‌سازی فرآیند پخت لعاب در کوره‌های رولری استفاده کرده و قابلیت‌های بالای کنترل پیشرفته در بهبود

⁴ Yang⁵ Zhou¹ Machine learning² He³ Rosendahl

$$\sum_j X_j = 100 \quad (2)$$

$$M_i * MOL_i = \sum_j A_{ij} * X_j \quad \forall i \quad (3)$$

$$SMOLG = \sum_k MOL_k \quad (4)$$

$$SEGPARM_i * SMOLG = MOL_i + PS_i - NS_i, \forall i \quad (5)$$

$$\sum_j Cost_j * X_j \leq GlazeCost \quad (6)$$

$$L_j \leq X_j \leq U_j \quad \forall j \quad (7)$$

$$PS_i \geq 0, NS_i \geq 0, MOL_i \geq 0, \forall i, \\ SMOLG \geq 0, X_j \geq 0, \forall j \quad (8)$$

که در آن‌ها، رابطه‌ی ۱، بیانگر تابع هدف مسئله است و مجموع انحراف‌ها از زگر مطلوب هر یک از اکسیدها را کمینه می‌سازد. برای آنکه مجموع استفاده از مواد اولیه، برابر ۱۰۰ شود، رابطه‌ی ۲ لحاظ شده است. برای محاسبه‌ی میزان مول هر یک از اکسیدها از رابطه‌ی ۳ و برای محاسبه‌ی مجموع مولی اکسیدهای قلیایی از رابطه‌ی ۴ و برای محاسبه‌ی انحراف بالا یا انحراف پایین از زگر مطلوب هر یک از اکسیدها از رابطه‌ی ۵ استفاده شده است. به‌منظور بیشترنشدن هزینه‌ی مواد اولیه از هزینه‌ی موردنظر از رابطه‌ی ۶ استفاده شده است. رابطه‌ی ۷، حدهای بالا و پایین درصد استفاده از هر یک از مواد اولیه را مشخص می‌کند. رابطه‌ی ۸، نیز بیانگر غیرمنفی‌بودن متغیرهای تصمیم مسئله است.

۴. حل عددی یک مسئله‌ی نمونه

برای طراحی فرمول بچ برای لعابی، که فرمول زگر آن مطابق جدول ۲ است، از ۸ نوع مواد اولیه که آنالیز شیمیایی آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است، استفاده شده است.

هزینه‌ی تأمین، حد پایین مص رف، و حد بالای مصرف مواد اولیه مطابق جدول ۴ است.

جرم مولکولی اکسیدها، در جدول ۵ ارائه شده است.

بیشینه‌ی هزینه‌ی قابل قبول برای فرمول بچ، ۱۶۶ واحد پولی است.

با استفاده از روش ابتکاری رایج در صنعت، که قبلاً در قسمت مقدمه بیان شده است، فرمول بچ مطابق جدول ۶ به‌دست می‌آید.

دنیای واقعی است. در پژوهش حاضر، با طراحی و معرفی مدل ریاضی قابل استفاده و کاربردی برای فرمولاسیون لعاب، گام مهمی در جهت بهبود فرآیندهای تولید لعاب برداشته شده است.

۳. شرح مسئله و مدل‌سازی ریاضی

با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی می‌توان مسئله‌ی فرمولاسیون لعاب را در زمان کمینه‌ی ممکن و با درنظرگرفتن عوامل و ملاحظات فنی و نیز نکاتی دیگر از قبیل قیمت تمام‌شده‌ی لعاب، استفاده از مواد اولیه‌ی جدید و حذف برخی از مواد اولیه از فرمولاسیون تعیین کرد. اجزاء مدل ریاضی طراحی‌شده در روابط ۱ الی ۸، عبارت‌اند از:

– مجموعه‌ها

I: مجموعه‌ی اکسیدها

J: مجموعه‌ی مواد اولیه؛

K: مجموعه‌ی اکسیدهای قلیایی.

– داده‌های عددی

A_{ij}: درصد وزنی اکسید i در ماده‌ی اولیه‌ی j؛

M_i: جرم مولکولی اکسید i؛

SEGPARM_i: مقدار زگر موردنظر برای اکسید i؛

Cost_j: هزینه‌ی تأمین ماده‌ی اولیه‌ی j؛

GlazeCost: بیشینه‌ی هزینه‌ی قابل قبول برای فرمول بچ؛

U_j: حد بالای مصرف برای درصد وزنی ماده‌ی اولیه‌ی j؛

L_j: حد پایین مصرف برای درصد وزنی ماده‌ی اولیه‌ی j.

– متغیرهای تصمیم

X_j: درصد استفاده از ماده‌ی اولیه‌ی j؛

SMOLG: مجموع مولی اکسیدهای قلیایی؛

MOL_i: مقدار مولی حاصل برای اکسید j؛

PS_i: انحراف بالای اکسید i از زگر موردنظر؛

NS_i: انحراف پایین اکسید i از زگر موردنظر

$$Minimize : \sum_i (PS_i + NS_i) \quad (1)$$

جدول ۲. فرمول زگر یک لعاب نمونه.

Oxide	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	BaO	ZnO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO
Target Seger Value	2.90	0.00	0.30	0.05	0.05	0.04	0.06	0.15	0.65

جدول ۳. مواد اولیه‌ی قابل دسترس و آنالیز شیمیایی آن‌ها.

Raw Material No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	BaO	ZnO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO
1	48.80	0.07	36.10	0.00	0.00	2.60	0.14	0.35	0.12
2	54.88	0.07	40.63	0.00	0.00	2.88	0.18	0.40	0.14
3	74.00	0.03	14.60	0.00	0.00	5.60	3.90	0.00	0.80
4	98.00	0.04	0.78	0.00	0.00	0.15	0.08	0.01	0.02
5	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.39	32.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	56.00
7	0.00	0.00	0.00	77.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	99.99	0.00	0.00	0.00	0.00

جدول ۵. جرم مولکولی اکسیدها.

Oxide	Molecular Weight (g/mol)
SiO ₂	60
TiO ₂	80
Al ₂ O ₃	102
BaO	153
ZnO	81
K ₂ O	94
Na ₂ O	62
MgO	40
CaO	56

جدول ۴. هزینه، حد پایین مصرف، و حد بالای مصرف مواد اولیه.

Raw Material No.	Cost (per unit)	Minimum Usage (%)	Maximum Usage (%)
1	150	0%	100%
2	110	0%	100%
3	230	0%	100%
4	192	0%	100%
5	110	0%	100%
6	105	0%	100%
7	140	0%	100%
8	190	0%	100%

طبق برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهادی، فرمول بچ مطابق جدول ۷ به‌دست آمده است.

واقعی، معمولاً تعداد مواد اولیه‌ی فرمولاسیون لعاب کمتر از ۲۰ ماده و نیز تعداد اکسیدهای موجود در لعاب کمتر از ۱۵ اکسید است. بنابراین سباز مسئله در ابعاد بالای آن حدود ۶۶ متغیر و حدود ۷۳ محدودیت کارکردی می‌شود. مسائل برنامه‌ریزی خطی در چنین ابعادی و حتی ابعادی بسیار بزرگ‌تر از آن با نرم‌افزارهای حل‌کننده‌ی^۱ تجاری و صنعتی مانند Gurobi و Cplex در کسری از ثانیه، جواب بهینه‌ی دقیق و سراسری چنین مسائلی را محاسبه و شناسایی می‌کنند. چند مسئله در ابعاد گوناگون که بیشتر آن‌ها بسیار بزرگ‌تر از مسائل واقعی مطرح در صنعت هستند، به‌طور تصادفی تولید و زمان حل آن‌ها ثبت شده است. در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود که اگر سباز مسئله، خیلی بیش از دنیای واقعی نیز باشد، مشکلی در روش حل، دقت عمل و زمان محاسبات به‌وجود نمی‌آید.

نتیجه آنکه حل مدل ریاضی حاصل از نظر زمان محاسبات با استفاده از نرم‌افزارهای حل‌کننده‌ی تجاری و روی یک کامپیوتر معمولی با لپ‌تاپ، چالش

جدول ۸ نشان می‌دهد که مقدار تابع هدف، یعنی مجموع انحراف‌های زگر اکسیدها از زگر موردنظر برای آن‌ها در روش رایج برابر ۰/۵۸ مول است و این مقدار در روش استفاده از مدل ریاضی برابر ۰/۰۴ مول است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دقت جواب در روش استفاده از مدل ریاضی نسبت به روش رایج، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بهتر شده است. همچنین جدول ۹ نشان می‌دهد که هزینه‌ی فرمول بچ حاصل از مدل ریاضی، از هزینه‌ی فرمول حاصل از روش رایج نیز کمتر بوده است.

۵. اندازه‌ی مدل ریاضی و ابعاد قابل حل برای آن

اگر n بیانگر تعداد مواد اولیه و m بیانگر تعداد اکسیدها باشند، آنگاه تعداد متغیرهای مسئله $3m+n+1$ و تعداد محدودیت‌های کارکردی (به‌جز محدودیت‌های غیرمنفی) برابر $2(m+n)+3$ خواهد شد. در مسائل دنیای

^۱ Solver

جدول ۶. جواب حاصل از روش رایج در صنعت.

Raw Material No.	Batch Formula (%)
1	10%
2	8%
3	20%
4	32%
5	18%
6	3%
7	6%
8	3%
Total	100%

جدول ۷. جواب حاصل از مدل ریاضی.

Raw Material No.	Batch Formula (%)
1	5%
2	12%
3	21%
4	33%
5	9%
6	16%
7	3%
8	1%
Total	100%

جدول ۸ (مقایسه زگرهای حاصل).

Oxide	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	BaO	ZnO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO
Target Seger	2.90	0.00	0.30	0.05	0.05	0.04	0.06	0.15	0.65
Seger from Traditional Method	2.82	0.00	0.30	0.09	0.11	0.05	0.04	0.28	0.41
Seger from Mathematical Model	2.90	0.00	0.30	0.05	0.05	0.06	0.04	0.15	0.65
Deviation (Traditional)	0.08	0.00	0.00	0.04	0.06	0.01	0.02	0.13	0.24
Deviation (Mathematical)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00
Total Deviation From Traditional Method	0.58								
Total Deviation From Mathematical Model	0.04								

اطلاعاتی مربوط به انواع لعاب‌ها، آنالیز شیمیایی، و فرمول زگر آن‌ها مشاهده می‌شود؛ که از طریق آن می‌توان به اطلاعات انواع لعاب‌ها دسترسی داشت و آن‌ها را مشاهده یا ویرایش کرد. همچنین لعاب‌های جدید را به برنامه معرفی کرد. در شکل ۴، اطلاعات مربوط به لعابی که قرار است فرمول بچ آن طراحی شود، به همراه اطلاعات مربوط به مواد اولیه موردنظر برای استفاده مشاهده می‌شود. با انتخاب کلید "شروع محاسبات"، ابتدا اطلاعات موردنیاز مدل ریاضی به صورت اتوماتیک به فرمت نرم‌افزار GAMS تنظیم می‌شود. سپس GAMS نرم‌افزار حل‌کننده CPLEX را برای حل مدل ریاضی فراخوانی می‌کند. در شکل ۵، روند پیشرفت محاسبات مشاهده می‌شود، که معمولاً کسری از ثانیه می‌شود. پس از اتمام محاسبات، نتایج حاصل از آن اخذ و به صورت اتوماتیک وارد فرم مخصوصی می‌شود که در شکل ۶ نتایج آن مشاهده می‌شود.

طراحان فرمول بچ با استفاده از فرم مذکور، مناسب‌ترین فرمول را، هم از نظر کیفیت و هم از نظر هزینه می‌توانند شناسایی کنند.

محاسباتی ندارد. این موضوع یکی از مزایای بزرگ مدل‌های خطی است، که نیاز به روش‌های ابتکاری یا فراابتکاری یا سایر روش‌های غیردقیق ندارند.

۶. طراحی و توسعه نرم‌افزار کاربردی

برای آنکه نتایج حاصل از پژوهش حاضر به صورت عملی در صنعت قابل استفاده باشد و کاربران به راحتی بتوانند از مزایای آن بهره‌مند شوند، یک نرم‌افزار کاربردی برای آن طراحی و ایجاد شده است. برای مدیریت داده‌ها و مشاهده گزارش‌ها از نرم‌افزار ACCESS، برای مدل‌سازی ریاضی از نرم‌افزار GAMS، و برای حل مدل از نرم‌افزار CPLEX استفاده شده است. تصویرهای صفحات اصلی نرم‌افزار در شکل‌های ۱ الی ۶ مشاهده می‌شوند. شکل ۱، جدول اطلاعاتی اکسیدها را نشان می‌دهد؛ که از طریق آن می‌توان اطلاعات هر یک از اکسیدها را مشاهده و ویرایش کرد و نیز در صورت نیاز، اکسیدهای جدید را تعریف کرد. در شکل ۲، فرم اطلاعاتی مواد اولیه مشاهده می‌شود؛ که از طریق آن می‌توان مواد اولیه مختلف و آنالیز شیمیایی آن‌ها را مشاهده و ویرایش کرد و در صورت لزوم، مواد اولیه جدیدی را به برنامه معرفی کرد. در شکل ۳، فرم

جدول ۹. مقایسه‌ی قیمت تمام‌شده‌ی فرمول بچ.

Raw Material No.	Unit Cost	Usage (%) – Traditional Method	Usage (%) – Mathematical Model
1	150	10%	5%
2	110	8%	12%
3	230	20%	21%
4	192	32%	33%
5	110	18%	9%
6	105	3%	16%
7	140	6%	3%
8	190	3%	1%
Total Cost		—	168.29

جدول ۱۰. شبیه‌سازی مسائل و حل با مدل طراحی‌شده.

Problem No.	No. of Raw Materials	No. of Oxides	No. of Variables	No. of Constraints	No. of Non-Zero Coefficients	Iterations	Solution Time (s)	Result
1	12	12	49	51	194	16	0.015	Global Optimum
2	20	12	57	67	329	16	0.015	Global Optimum
3	30	12	67	87	479	16	0.016	Global Optimum
4	40	12	77	107	629	19	0.016	Global Optimum
5	50	12	87	127	779	19	0.017	Global Optimum
6	60	12	97	147	929	19	0.017	Global Optimum
7	70	12	107	167	1079	19	0.017	Global Optimum
8	80	12	117	187	1229	20	0.018	Global Optimum
9	90	12	127	207	1379	20	0.018	Global Optimum
10	100	12	137	227	1529	20	0.018	Global Optimum
11	200	12	237	427	3029	20	0.018	Global Optimum
12	300	12	337	627	4529	20	0.019	Global Optimum
13	400	12	437	827	6029	21	0.019	Global Optimum
14	500	12	537	1027	7529	21	0.019	Global Optimum
15	600	12	637	1227	9029	21	0.019	Global Optimum

Glaze - [Oxides]

File Edit View Insert Format Records Tools Window Help

Type a question for help

Application temperature factor	Surface tension factor	Thermal Expansion Coefficient	Molecular weight	Chemical nature	Oxide
0.32	4.10	0.099	123.20	Acid	ZrO2
0.00	3.00	4.000	80.00	Acid	TiO2
1.00	0.80	0.029	69.60	Acid	B2O3
0.38	3.40	0.035	60.10	Acid	SiO2
0.00	4.50	4.000	160.00	Amphoteric	Fe2O3
0.32	6.20	0.061	101.90	Amphoteric	Al2O3
2.00	1.20	0.083	223.20	Base	PbO
0.60	3.70	0.129	153.40	Base	BaO
0.59	3.80	0.159	103.60	Base	SrO
0.88	0.10	0.331	94.20	Base	K2O
0.60	4.70	0.094	81.40	Base	ZnO
0.88	1.50	0.331	62.00	Base	Na2O
0.58	4.80	0.150	56.10	Base	CaO
0.54	6.60	0.026	40.30	Base	MgO
0.88	4.60	0.099	29.90	Base	Li2O

Record: 1 of 15

شکل ۱. معرفی اکسیدها و ویژگی‌های آن‌ها.

Glaze - [Glazes]

File Edit View Insert Format Records Tools Window Help

Type a question for help

Glazes and their properties

Weight % of oxygen	Mole formula	Molecular weight	Chemical nature	Oxide
7.56%	0.3280	69.60	Acid	B2O3
39.17%	1.9690	60.10	Acid	SiO2
4.79%	0.1420	101.90	Amphoteric	Al2O3
38.27%	0.5180	223.20	Base	PbO
2.34%	0.0750	94.20	Base	K2O
3.37%	0.1640	62.00	Base	Na2O
4.51%	0.2430	56.10	Base	CaO

100.00% Sum of percentages

Record: 1 of 7

241.78	(mN/m) Surface tension	1.00	(mol) Total moles
7.62	*10 ⁻⁶ /K Thermal expansion coefficient	905.69	(°C) Application temperature

Record: 1 of 10

Frit No.01 Glaze name

Glaze entry mode

Formula ☒

Chemical analysis ☐

Notes

☐ Select

Add new oxide

شکل ۲. معرفی مواد اولیه و آنالیز شیمیایی و هزینه‌ی آن‌ها.

Glaze - [Calculation of glaze from raw materials]

File Edit View Insert Format Records Tools Window Help

Type a question for help

Start calculations Frit No.06 Glaze name

K2O	PbO	Al2O3	SiO2	B2O3	Max	Min	% weight	Unit price	Raw material
16.90%	0.00%	18.30%	64.80%	0.00%	100.00%	0.00%	?	0	Orthoclase
0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	56.30%	100.00%	0.00%	?	0	Boric acid
0.00%	0.00%	28.30%	66.70%	0.00%	100.00%	0.00%	?	0	Pyrophyllite
0.00%	97.70%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	?	0	Red lead
68.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	?	0	Potassium carbonate
0.00%	0.00%	34.70%	40.90%	0.00%	100.00%	0.00%	?	0	Halloysite

K2O	PbO	Al2O3	SiO2	B2O3	
7.73%	25.30%	8.37%	29.49%	29.11%	Chemical analysis of desired glaze
0.4200	0.5800	0.4200	2.5100	2.1400	Mole formula of desired glaze
?	?	?	?	?	Chemical analysis of resulting glaze
?	?	?	?	?	Zahr formula of resulting glaze

?	Totale weigh % of raw materials		
?	Raw materials cost of final glaze		
Thermal expansion coefficient	Surface tension	Application temperature	
7.05	206.54	820.23	Disire analysis
?	?	?	Resulting glaze

شکل ۳. معرفی لعاب‌ها و خواص آن‌ها.

Glaze - [Calculation of glaze from raw materials]

File Edit View Insert Format Records Tools Window Help

Type a question for help

Start calculations Frit No.06 Glaze name

K2O	PbO	Al2O3	SiO2	B2O3	Max	Min	% weight	Unit price	Raw material
16.90%	0.00%	18.30%	64.80%	0.00%	100.00%	0.00%	45.08%	0	Orthoclase
0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	56.30%	100.00%	0.00%	51.71%	0	Boric acid
0.00%	0.00%	28.30%	66.70%	0.00%	100.00%	0.00%	0.41%	0	Pyrophyllite
0.00%	97.70%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	25.90%	0	Red lead
68.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.17%	0	Potassium carbonate
0.00%	0.00%	34.70%	40.90%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0	Halloysite

K2O	PbO	Al2O3	SiO2	B2O3	
7.73%	25.30%	8.37%	29.49%	29.11%	Chemical analysis of desired glaze
0.4200	0.5800	0.4200	2.5100	2.1400	Mole formula of desired glaze
7.73%	25.30%	8.37%	29.49%	29.11%	Chemical analysis of resulting glaze
0.4200	0.5800	0.4200	2.5100	2.1400	Zahr formula of resulting glaze

123.27%	Totale weigh % of raw materials		
0.00	Raw materials cost of final glaze		
Thermal expansion coefficient	Surface tension	Application temperature	
7.05	206.54	820.23	Disire analysis
7.05	206.54	820.23	Resulting glaze

شکل ۴. انتخاب لعاب موردنظر و مواد اولیه‌ی منتخب برای تولید آن.

Glaze - [Calculation of glaze from raw materials]

File Edit View Insert Format Records Tools Window Help

Type a question for help

Start calculations Frit No.06 Glaze name

K2O	PbO	Al2O3	SiO2	B2O3	Max	Min	% weight	Unit price	Raw material
16.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Orthoclase
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Boric acid
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Pyrophyllite
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Red lead
68.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Potassium carbonate
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Halloysite

Solve the model

End of calculations

Show answer

K2O	PbO	Al2O3	SiO2	B2O3	
7.73%	25.30%	8.37%	29.49%	29.11%	Chemical analysis of desired glaze
0.4200	0.5800	0.4200	2.5100	2.1400	Mole formula of desired glaze
?	?	?	?	?	Chemical analysis of resulting glaze
?	?	?	?	?	Zahr formula of resulting glaze

Totale weigh % of raw materials

Raw materials cost of final glaze

Thermal expansion coefficient

Surface tension

Application temperature

Disire analysis

Resulting glaze

شکل ۵. روند انجام محاسبات براساس برنامه‌ریزی ریاضی.

Glaze - [Calculation of glaze from raw materials]

File Edit View Insert Format Records Tools Window Help

Type a question for help

Start calculations Frit No.06 Glaze name

K2O	PbO	Al2O3	SiO2	B2O3	Max	Min	% weight	Unit price	Raw material
16.90%	0.00%	18.30%	64.80%	0.00%	100.00%	0.00%	45.08%	0	Orthoclase
0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	56.30%	100.00%	0.00%	51.71%	0	Boric acid
0.00%	0.00%	28.30%	66.70%	0.00%	100.00%	0.00%	0.41%	0	Pyrophyllite
0.00%	97.70%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	25.90%	0	Red lead
68.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.17%	0	Potassium carbonate
0.00%	0.00%	34.70%	40.90%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0	Halloysite

Totale weigh % of raw materials

Raw materials cost of final glaze

Thermal expansion coefficient

Surface tension

Application temperature

Disire analysis

Resulting glaze

شکل ۶. نتایج حاصل از اجرای مدل ریاضی.

۷. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

فرمولاسیون را با در نظر گرفتن معیارهای مختلف انجام دهند و اثر مواد اولیه‌ی مختلف در یکدیگر را بهتر بررسی کنند. علاوه بر این‌ها، ضمن اینکه نیازهای فنی خود را در چارچوب فرمولاسیون مناسب تأمین می‌کنند، هزینه‌ها را نیز محاسبه و کاهش می‌دهند. برای ایجاد برنامه‌ی کاربردی و مدیریت داده‌های مدل از بانک اطلاعاتی Access، برای مدل‌سازی ریاضی از نرم‌افزار GAMS و برای حل مدل از حل‌کننده‌ی Cplex استفاده شده است. کاربران از طریق یک سیستم کاربرپسند می‌توانند داده‌های لازم را وارد و تحلیل‌های مختلفی را انجام دهند. نتایج حاصل از پژوهش حاضر پس از آزمایش‌های اولیه و تولید نمونه‌های کوچک، وارد خط تولید و سبب افزایش کیفیت و نیز کاهش هزینه‌های تولید لعاب شده و در صنعت از آن استقبال شده است.

در صنعت سرامیک، طراحی فرمول بچ برای تولید لعاب براساس فرمول‌های "زگر" و با بهره‌برداری از تجربه‌ی متخصصان و روش‌های محاسباتی غیربهمینه انجام می‌شود. چنین روش‌هایی قادر به یافتن فرمول بهمینه از نظر کیفی و نیز از نظر هزینه نیستند. جواب‌هایی که از روش مذکور به دست می‌آیند، عمدتاً رضایت نسبی را بر آورده می‌سازند. در پژوهش حاضر، برای اولین بار در ایران و جهان، از رویکرد پژوهش در عملیات برای این موضوع استفاده و مشخص شده است که روش اخیر تحولی شگرف، هم از نظر کیفیت فرمول، هم از نظر کاهش هزینه‌ی تولید و هم از نظر زمان محاسبات به وجود می‌آورد. در پژوهش حاضر، اگر چه هدف اصلی بهینه‌سازی فرمولاسیون است، هدف‌های دیگر نیز تأمین شده است، مانند تهیه‌ی ابزاری کارآمد که کارشناسان بتوانند به راحتی

References – منابع

- Teodosiu, C.I., Sima, C., Croitoru, C. and Bode, F., 2022. Experimental investigation and optimization of a glazed transpired solar collector. *Applied Sciences*, 12(22), p.11392. <https://doi.org/10.3390/app122211392>
- Isaia, F., Fiorentini, M., Serra, V. and Capozzoli, A., 2021. Enhancing energy efficiency and comfort in buildings through model predictive control for dynamic façades with electrochromic glazing. *Journal of Building Engineering*, 43, p.102535. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102535>
- Krarti, M., 2022. Design optimization of smart glazing optical properties for office spaces. *Applied Energy*, 308, p.118411. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118411>
- Lantonio, N.A. and Krarti, M., 2022. Simultaneous design and control optimization of smart glazed windows. *Applied Energy*, 328, p.120239. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120239>
- Araújo, G.R., Teixeira, H., Gomes, M.G. and Rodrigues, A.M., 2023. Multi-objective optimization of thermochromic glazing properties to enhance building energy performance. *Solar Energy*, 249, pp.446-456. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.11.043>
- Yang, R., Li, D., Wei, W. and Wang, F., 2020. A Mie optimization model to determine optical properties of PCM based nanofluids for solar thermal applications of glazing window. *Optik*, 212, p.164664. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164664>
- Hong, X., Shi, F., Wang, S., Yang, X. and Yang, Y., 2021, December. Multi-objective optimization of thermochromic glazing based on daylight and energy performance evaluation. In *Building Simulation* (Vol. 14, No. 6, pp. 1685-1695). Beijing: Tsinghua University Press. <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0778-7>
- Zhou, Y. and Zheng, S., 2020. Stochastic uncertainty-based optimisation on an aerogel glazing building in China using supervised learning surrogate model and a heuristic optimisation algorithm. *Renewable Energy*, 155, pp.810-826. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.122>
- Zhou, Y. and Zheng, S., 2020. Climate adaptive optimal design of an aerogel glazing system with the integration of a heuristic teaching-learning-based algorithm in machine learning-based optimization. *Renewable Energy*, 153, pp.375-391. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.133>
- He, W., 2020. Fuzzy-PID Control Technology in Glaze Firing Process Control System of Roller Kiln for Bone China. In *Big Data Analytics for Cyber-Physical System in Smart City: BDCPS 2019, 28-29 December 2019, Shenyang, China* (pp. 1587-1593). Springer Singapore. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-2568-1_221
- Rosendahl, P.L., Staudt, Y., Schneider, A.P., Schneider, J. and Becker, W., 2019. Nonlinear elastic finite fracture mechanics: Modeling mixed-mode crack nucleation in structural glazing silicone sealants. *Materials & Design*, 182, p.108057. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108057>
- Yang, X., Li, D., Yang, R., Ma, Y., Duan, Y., Zhang, C., Hu, W. and Arıcı, M., 2023. Parameter global optimization and climatic adaptability analysis of PCM glazed system for long-term application. *Renewable Energy*, 217, p.119161. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119161>
- Zhou, Y., 2022. A multi-stage supervised learning optimisation approach on an aerogel glazing system

- with stochastic uncertainty. *Energy*, 258, p.124815.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124815>
14. Mirhadi, B., 2001. Glaze theory and technology, in: B. Mirhadi, ed., *Glaze Theory and Technology*, 1st edn., Amirkabir University of Technology Press, Tafresh, Iran, pp. 1–32. [In Persian]
15. Mirhadi, B., 2001. Glaze raw materials, coloring, and calculation, in: B. Mirhadi, ed., *Glaze Raw Materials, Coloring, and Calculation*, 1st edn., Amirkabir University of Technology Press, Tafresh, Iran, pp. 33–60. [In Persian]
16. Burleson, M., 2003. Glaze formulation and application techniques, in: *The Ceramic Glaze Handbook: Materials, Techniques, Formulas*, 1st edn., Lark Books, Asheville, NC, USA, pp. 1–176.