روشی نوین برای طراحی فرمولاسیون لعاب با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی‌ریاضی

نویسنده مسئول: حسین شمس شمیرانی[1]

Hossein Shams Shemirani[1]

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران h.shams@iut.ac.ir

حمیدرضا زاهدی نیستانی[2]

HamidReza Zahedi Neiestani[2]

دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران HamidRezaZahedi.Industrial@gmail.com

چکیده

لعاب یکی از اصلی‌ترین مواد در تهیه چینی‌آلات محسوب می‌شود و همواره روش فرمولاسیون آن از مهم‌ترین و چالش برانگیزترین 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 اهمیت دارد. در این پژوهش که بر اساس تجربیات عملی در یکی از کارخانه‌های کشور ایران انجام شده است، برای اولین بار در جهان، مسئله فرمولاسیون لعاب با رویکرد تحقیق در عملیات، مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از مدل طراحی شده، مورد آزمایش قرار گرفت و در خط تولید پیاده‌سازی شد. برای آنکه نتایج حاصل از این پژوهش بصورت عملی در صنعت قابل استفاده باشد و کاربران به راحتی بتوانند از مزایای آن بهره‌مند شوند یک نرم‌افزار کاربر پسند نیز برای آن طراحی و ایجاد شد.

کلمات کلیدی: فرمولاسیون لعاب، مدل‌سازی ریاضی، فرمول زگر، فرمول بچ، بهینه‌سازی کاربردی.

ویراستاری نشده

A novel method for designing glaze formulation using mathematical programming

Hossein Shams Shemirani, (corresponding author**),** h.shams@iut.ac.ir

Assistance Professor, Industrial Engineering Group, Golpayegan college of Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

HamidReza Zahedi Neiestani, HamidRezaZahedi.Industrial@gmail.com

B.S student, Industrial Engineering Group, Golpayegan college of Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

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.

Keywords: Glaze formulation, Mathematical modeling, Seger formula, Batch formula, Applied optimization.

1. مقدمه

صنایع چینی و سرامیک طی چند دهه اخیر رشد فزآینده‌ای هم از نظر کمیت و هم از نظر کیفیت داشته است. فروش کالاها در بازار جهانی، تحت تاثیر دو عامل قیمت و کیفیت قرار دارد. کیفیت محصول یک شاخص مهم رقابتی می‌باشد. لعاب قشر نازک شیشه مانندی است که بر سطح برخی از محصولات سرامیکی قرار می‌گیرد. برای ساخت لعاب، پودر مواد شیشه ساز 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 به صورت لایه‌ای نازک بر روی سطح بدنه اعمال می‌شود. هنگامی که بدنه در دمای صحیح پخت شود ذرات لعاب، ذوب شده و لایه‌ای پیوسته و شیشه‌ای مانند را بر سطح بدنه تشکیل می‌دهند. لعاب باید از ویژگی‌هایی نظیر ثبات در مقابل شرایط محیطی، مقاومت در مقابل اثر صابون‌ها، و سختی کافی برخوردار باشد آنچنان‌که به آسانی خراش برندارد. در ضمن باید در عین سرد شدن از انقباضی مساوی با انقباض سرد شدن بدنه برخوردار باشد تا از ترک خوردن لعاب جلوگیری شود. وجود لعاب به دلایل زیر سودمند است.

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

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

در فرآیند تولید لعاب، تعدادی ماده اولیه معدنی با یکدیگر ترکیب می‌شوند. اجزای تشکیل دهنده‌ی مواد اولیه، اکسیدهایی هستند که درصد وجود آن‌ها با دستگاه آنالایزر[1] شناسایی می‌شود. محققین صنعت سرامیک طی سال‌ها کوشش و پژوهش توانسته‌اند برای محصولات مختلف، فرمول‌های مناسبی را بر اساس میزان اکسیدهای مختلف، شناسایی نمایند که اصطلاحاً به این فرمول‌ها، فرمول زگر[2] آن لعاب گفته می‌شود.

زگر، پدر علم سرامیک، اولین کسی بود که لعاب‌ها را بر حسب اکسیدهای تشکیل دهنده‌ی آن‌ها فرمولبندی نمود [16]. او اکسیدها را به سه گروه اسیدی، خنثی، و قلیایی تقسیم‌بندی کرد و همچنین مجموع مولی اکسیدهای قلیایی را برابر واحد در نظر گرفت و دیگر اکسیدهای فرمول را بر مبنای آن محاسبه کرد.

مواد اولیه مختلف با توجه به اینکه از کدام معدن و نیز کدام قسمت معدن، تهیه شده‌اند، دارای آنالیز شیمیایی متفاوت هستند و درصد اکسیدهای موجود در آن‌ها متفاوت می‌باشد. بنابراین تعیین اینکه درصد استفاده از مواد اولیه تهیه شده یا 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 گردد. کارخانه‌های مختلف از مواد اولیه‌ی یکسان برای تولید لعاب استفاده نمی‌کنند. این امر ناشی از عواملی چون در دسترس نبودن بعضی از مواد اولیه، هزینه بالای برخی از مواد، و هزینه‌های حمل و نقل می‌باشد.

برای هر لعاب 2 گونه فرمول مطرح است.

1. فرمول بچ[3]: فرمولی که بر حسب مواد اولیه است و درصد استفاده از آن‌ها را مشخص می‌کند. از این فرمول در خط تولید، استفاده می‌شود و هر کارخانه، فرمول خاص خود را دارد.
2. فرمول زگر: فرمولی که بر اساس مقدار مولی اکسیدهای تشکیل دهنده‌ی آن لعاب است و برای تمام کارخانجات، یکسان است.

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

نوآوری اصلی این مسئله، بکارگیری دانش تحقیق در عملیات برای مدلسازی مسئله فرمولاسیون لعاب است که برای اولین بار در ایران و نیز جهان انجام شده است. با بررسی‌هایی که به

[1] Analyzer
[2] Seger
[3] Batch

عمل آمده است مشخص شد که متخصصان ایرانی و خارجی صنعت سرامیک به دلیل عدم آشنائی با دانش تحقیق در عملیات، از روش‌های مبتنی بر سعی و خطا و نیز مدل‌سازی‌های مقدماتی ریاضی برای این‌کار استفاده کرده و نیز همچنان استفاده می کنند [16 – 14]. در این پژوهش که بصورت عملیاتی با داده‌های واقعی و شناخت دقیق مسئله از طریق فرآیند تولید و نیز مطالعه کتاب‌ها و مقالات منتشر شده در این زمینه انجام شده است، مسئله فرمولاسیون لعاب با استفاده از دانش تحقیق در عملیات، مدلسازی و تحلیل می‌شود. این مقاله یک رویکرد جدید را برای فرمولاسیون لعاب، معرفی می‌کند و می‌تواند نقطه شروعی برای بسیاری از پژوهش‌های دیگر در این زمینه باشد.

گام‌های اجرای این پژوهش، مطابق زیر بوده است:

1- شناسایی و تعریف دقیق مسئله فرمولاسیون موجود در کارخانه.
2- بررسی دقیق روش‌های موجود برای حل مسئله فرمولاسیون لعاب.
3- طراحی مدل ریاضی فرمولاسیون لعاب با رویکرد تحقیق در عملیات.
4- تست عملی نتایج حاصل از مدل ریاضی.
5- طراحی و ایجاد نرم‌افزار کاربردی برای عملیاتی نمودن سیستم طراحی شده.

2. مرور پژوهش‌های مرتبط

با توجه به بررسی‌هایی که به‌عمل آمد، مشخص شد که کارشناسان و متخصصین صنعت سرامیک برای طراحی فرمول بچ در آزمایشگاه از یک روش ابتکاری[4] استفاده می‌کنند. به این صورت که درصد استفاده هر یک از مواد اولیه را با سعی و خطا افزایش یا کاهش می‌دهند تا به فرمول زگر مورد نظر نزدیک شوند. این روش علاوه بر اینکه وقت‌گیر زمان‌بر است، از دقت چندان بالایی نیز برخوردار نیست. همچنین با تغییر مواد اولیه یا تغییر آنالیز شیمیایی آن‌ها (موضوعی که بطور مکرر در عمل اتفاق می‌افتد) آزمایشگاه موظف است فرمول جدیدی را برای بچ، طراحی نماید که کاری طاقت فرسا و دشوار است.

الگوریتم رایج در صنعت و مطرح شده در کتب مرجع سرامیک [16 – 14] مطابق گام‌های زیر است:

1- ترسیم جدولی که در آن نسبت مولی هر اکسید براساس فرمول زگر در بالای آن درج گردد.
2- لحاظ نمودن ستونی به جدول که جرم معادل مواد تامین کننده اکسیدهای مورد نظر در آن درج شود. جرم معادلی که برای اولین ماده اولیه نوشته می‌شود باید به گونه‌ای انتخاب شود که اولین اکسید نوشته شده در بالای جدول را حذف نماید.
3- به ترتیب، جرم معادل موادی که به وسیله اولین ماده خام به ترکیب لعاب اضافه می‌شود به صورت افقی نوشته و از کل مقدار مورد نیاز آن که در بالای جدول مشخص شده است کم می‌گردد.
4- دومین ماده‌ای که در ستون مواد اولیه نوشته می‌شود باید به اندازه‌ای انتخاب شود که دومین اکسیدی که در بالای جدول مشخص گردیده است را حذف کند.
5- به همین ترتیب اکسیدهای حاصل از ماده اولیه، کم می‌شوند و تفاضل آن‌ها به دست می‌آید. این عملیات تا حذف کامل اکسیدهای بالای جدول ادامه می‌یابد.
6- سرانجام نسبت‌های جرمی مواد اولیه در جرم معادل آن‌ها ضرب می‌شود تا جرم هر ماده برحسب گرم به دست آید.

با بررسی‌هایی که به‌عمل آمد مشخص‌شد که اکثر پژوهش‌های انجام شده در سال‌های دور و نزدیک، بر روی بهبود خواص و ویژگی‌های فنی لعاب و طراحی فرمول زگر متمرکز هستند و تنها در کتاب‌های مرجع، یک روش ابتکاری برای طراحی فرمول بچ که مورد نیاز فرآیند تولید هست مطرح شده است. پژوهش حاضر اولین اقدامی بوده است که مسئله طراحی فرمول بچ لعاب را با رویکرد تحقیق در عملیات، مورد بررسی و تحلیل قرار داده است و روشی موثر و کارآمد را به‌جای استفاده از روش ابتکاری متداول در صنعت، برای این موضوع مطرح کرده است و ابزاری بسیار قدرتمند، سریع و انعطاف‌پذیر را در اختیار کارشناسان صنعت سرامیک قرار می‌دهد تا بتوانند طراحی فرمول بچ را به بهترین وجه ممکن انجام دهند.

[4] Heuristic method

جدول 1 روش‌های مطرح شده در مقالات و کتاب‌های مرتبط با موضوع را مورد مقایسه قرار می‌دهد.

جدول1: مرور ادبیات و پژوهش‌های مرتبط

ردیف	پژوهش	سال انتشار	ارائه روش برای		
			بهبود خواص لعاب	حل ابتکاری فرمولاسیون	حل بهینه فرمولاسیون
۱	[12]	202۳	*		
۲	[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	*		
١٤	[16]	2003	*	*	
١٥	[15]	2001	*	*	
١٦	[14]	2001	*	*	
١٧	پژوهش فعلی				*

مقالات [1] و [2] به بررسی بهینه‌سازی ترموکرومیک لعاب برای افزایش کارایی انرژی در ساختمان‌ها پرداخته است. این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با استفاده از مدل‌های ریاضی، خواص نوری و حرارتی لعاب را بهبود بخشید. همچنین، [3] مطالعه خود به بهینه‌سازی همزمان طراحی و کنترل پنجره‌های لعاب‌کاری هوشمند پرداخته‌است و نشان داده که بهینه‌سازی می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و بهبود کیفیت محیط زیست داخلی ساختمان کمک کند. مطالعه‌های [6 – 4] به بررسی بهینه‌سازی چندهدفه ویژگی‌های لعاب‌های ترموکرومیک پرداخته است که هدف آن بهبود کارایی انرژی ساختمان‌ها می‌باشد. نتایج این مطالعات نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه بهینه‌سازی چندهدفه در بهبود کیفیت و کاهش هزینه‌های تولید لعاب است. در مطالعه دیگری، [7] نویسندگان به بررسی بهینه‌سازی چندهدفه لعاب بر اساس ارزیابی عملکرد نوری و انرژی پرداخته‌است. این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه، کارایی لعاب را در شرایط مختلف بهبود بخشید. پیشرفت‌های اخیر در زمینه هوش مصنوعی و یادگیری ماشین[5]، فرصت‌های جدیدی را برای بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی از جمله فرمولاسیون لعاب فراهم کرده است. استفاده از این تکنیک‌ها می‌تواند به شناسایی الگوهای پیچیده و بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک کند. [8]، [9]، در مطالعه‌ای به بررسی بهینه‌سازی مبتنی بر عدم قطعیت تصادفی در سیستم‌های لعاب‌کاری پرداخته‌اند که از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی فرآیند استفاده می‌کنند. این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته، عدم قطعیت‌ها را مدیریت و کارایی فرآیند را افزایش داد. در تحقیق دیگری، [10] و [11]، از تکنیک‌های کنترل فازی برای بهینه‌سازی فرآیند پخت لعاب در کوره‌های رولری استفاده کرده است. این مطالعه نشان‌دهنده قابلیت‌های بالای کنترل پیشرفته در بهبود فرآیندهای صنعتی است. [12]، در مطالعه‌ای به بهینه‌سازی ترکیبی ویژگی‌های نوری لعاب پرداخته‌اند که از مدل‌های ترکیبی برای بهبود عملکرد لعاب استفاده می‌کنند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بهینه‌سازی ترکیبی می‌تواند به بهبود دقت و کارایی فرآیندهای تولیدی منجر شود. همچنین، [13]، در تحقیق خود از رویکرد بهینه‌سازی چندمرحله‌ای مبتنی بر یادگیری ماشین برای بهبود سیستم‌های لعاب‌کاری استفاده کرده است. این رویکرد نشان‌دهنده قدرت بالای بهینه‌سازی ترکیبی در مدیریت پیچیدگی‌های فرآیندهای صنعتی است. تنها در منابع [16 – 14]، که به صنعت تشریح سرامیک از گذشته تاکنون پرداخته‌اند، فعالیت‌های صورت گرفته در زمینه‌های ساخت و تولید لعاب بررسی شده است 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.

[5] Machine learning

در حالی‌که این موضوع یکی از مهم‌ترین چالش‌های صنعت سرامیک در دنیای واقعی است. در این پژوهش با طراحی و معرفی مدل ریاضی قابل استفاده و کاربردی برای فرمولاسیون لعاب، گام مهمی در جهت بهبود فرآیندهای تولید لعاب برداشته می‌شود.

۳. شرح مسئله و مدل‌سازی ریاضی

با استفاده از تکنیک‌های برنامه‌ریزی ریاضی می‌توان مسئله فرمولاسیون لعاب را در حداقل زمان ممکن و با در نظر گرفتن عوامل و ملاحظات فنی و نیز نکاتی دیگر از قبیل قیمت تمام شده لعاب، استفاده از مواد اولیه جدید، و حذف برخی از مواد اولیه از فرمولاسیون تعیین کرد. اجزای مدل ریاضی طراحی شده، مطابق زیر است:

مجموعه‌ها

I: مجموعه اکسیدها

J: مجموعه مواد اولیه

K: مجموعه اکسیدهای قلیایی

داده‌های عددی

A_{ij} : درصد وزنی اکسید i در ماده اولیه j

M_i : جرم مولکولی اکسید i

$SEGPARM_i$: مقدار زگر مورد نظر برای اکسید i

$Cost_j$: هزینه تامین ماده اولیه j

GlazeCost : حداکثر هزینه قابل قبول برای فرمول بچ

U_j : حد بالای مصرف برای درصد وزنی ماده اولیه j

L_j : حد پایین مصرف برای درصد وزنی ماده اولیه j

متغیرهای تصمیم

X_j : درصد استفاده از ماده اولیه j

SMOLG : مجموع مولی اکسیدهای قلیایی

MOL_i : مقدار مولی حاصل برای اکسید j

PS_i : انحراف بالای اکسید i از زگر مورد نظر

NS_i : انحراف پایین اکسید i از زگر مورد نظر

وزارت کشاورزی شده

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

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

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

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

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

$$\sum_j \text{Cost}_j * \text{X}_j \le \text{GlazeCost} \quad (6)$$

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

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

رابطه (1) بیانگر تابع هدف مسئله است و مجموع انحرافات از زگر مطلوب هر یک از اکسیدها را حداقل می‌کند. برای آنکه مجموع استفاده از مواد اولیه، برابر 100 شود رابطه (2) لحاظ می‌شود. برای محاسبه میزان مول هر یک از اکسیدها از رابطه (3) استفاده می‌شود. برای محاسبه مجموع مولی اکسیدهای قلیایی از رابطه (4) استفاده می‌شود. برای محاسبه انحراف بالا یا انحراف پایین از زگر مطلوب هر یک از اکسیدها از رابطه (5) استفاده می‌شود. به منظور بیشتر نشدن هزینه مواد اولیه از هزینه مورد نظر از رابطه (6) استفاده می‌شود. رابطه (7) حد بالا و حد پایین درصد استفاده از هر یک از مواد اولیه را مشخص می‌کند. رابطه (8) بیانگر غیر منفی بودن متغیرهای تصمیم مسئله است.

٤. حل عددی یک مسئله نمونه

برای طراحی فرمول بچ برای لعابی که فرمول زگر آن مطابق جدول (۲) است از ۸ نوع مواد اولیه که آنالیز شیمیایی آن‌ها مطابق جدول (۳) است باید استفاده شود.

جدول۲ : (فرمول زگر یک لعاب نمونه)

اکسیدها	SiO_2	TiO2	Al_2O_3	BaO	ZnO	K_2O	Na_2O	MgO	CaO
زگر مورد نظر	2.90	0.00	0.30	0.05	0.05	0.04	0.06	0.15	0.65

جدول ۳ : (مواد اولیه قابل دسترس و آنالیز شیمیایی آن‌ها)

شماره ماده اولیه	SiO_2	TiO2	Al_2O_3	BaO	ZnO	K_2O	Na_2O	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

هزینه تامین، حد پایین مصرف، و حد بالای مصرف مواد اولیه مطابق جدول (٤) می باشد.

جرم مولکولی اکسیدها، مطابق جدول (٥) می‌باشد.

اکسید	جرم مولکولی
SiO_2	60
TiO2	80
Al_2O_3	102
BaO	153
ZnO	81
K_2O	94
Na_2O	62
MgO	40
CaO	56

جدول ٥ : (جرم مولکولی اکسیدها)

شماره ماده اولیه	هزینه	حد پایین مصرف	حد بالای مصرف
1	۱۵۰	%۰	%۱۰۰
2	۱۱۰	%۰	%۱۰۰
3	230	%۰	%۱۰۰
4	192	%۰	%۱۰۰
5	110	%۰	%۱۰۰
6	۱۰۵	%۰	%۱۰۰
7	۱٤۰	%۰	%۱۰۰
8	۱۹۰	%۰	%۱۰۰

حداکثر هزینه قابل قبول برای فرمول بچ ۱۶۶ واحد پولی است.

جدول ٤ : (هزینه، حد پایین مصرف، و حد بالای مصرف مواد اولیه)

با استفاده از روش ابتکاری رایج در صنعت که قبلاً در قسمت مقدمه بیان شد فرمول بچ مطابق جدول (٦) بدست می‌آید.

جدول٦ : (جواب حاصل از روش رایج در صنعت)

شماره ماده اولیه	فرمول بچ
1	10%
2	8%
3	20%
4	32%
5	18%
6	3%
7	6%
8	3%
مجموع مواد	100%

طبق مدل برنامه ریزي ریاضی پیشنهادی، فرمول بچ مطابق جدول (٧) بدست می آید.

جدول ٧ : (جواب حاصل از مدل ریاضی)

شماره ماده	فرمول بچ
1	5%
2	12%
3	21%
4	33%
5	9%
6	16%
7	3%
8	1%
مجموع مواد	100%

جدول ٨ (مقایسه زگرهای حاصل)

اکسیدها	SiO_2	TiO2	Al_2O_3	BaO	ZnO	K_2O	Na_2O	MgO	CaO
زگر مورد نظر	2.90	0.00	0.30	0.05	0.05	0.04	0.06	0.15	0.65
زگر حاصل از روش رایج	2.82	0.00	0.30	0.09	0.11	0.05	0.04	0.28	0.41
زگر حاصل از مدل ریاضی	2.90	0.00	0.30	0.05	0.05	0.06	0.04	0.15	0.65
انحرافات روش کلاسیک	0.08	0.00	0.00	0.04	0.06	0.01	0.02	0.13	0.24
انحرافات مدل ریاضی	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00
مجموع انحرافات روش رایج	0.58								
مجموع انحرافات مدل ریاضی	0.04								

جدول [8] نشان می‌دهد که مقدار تابع هدف، یعنی مجموع انحرافات زگر اکسیدها از زگر مورد نظر 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، بطور قابل ملاحظه‌ای بهتر است. همچنین جدول [9] نشان می‌دهد که هزینه فرمول بچ حاصل از مدل ریاضی، از هزینه فرمول حاصل از روش رایج نیز کمتر می‌باشد.

جدول ۹ : (مقایسه قیمت تمام شده فرمول بچ)

شماره ماده اولیه	هزینه	روش رایج	مدل ریاضی
1	۱۵۰	10%	5%
2	۱۱۰	8%	12%
3	230	20%	21%
4	192	32%	33%
5	110	18%	9%
6	۱۰۵	3%	16%
7	۱۴۰	6%	3%
8	۱۹۰	3%	1%
هزینه فرمول بچ		۱۶۸,۲۹	۱۶۵,۱۶

۵. اندازه 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 می‌شود. در مسائل دنیای واقعی معمولاً تعداد مواد اولیه فرمولاسیون لعاب کمتر از ۲۰ ماده است و نیز تعداد اکسیدهای موجود در لعاب کمتر از ۱۵ اکسید است. بنابراین سایز مسئله در ابعاد بالای آن حدود 66 متغیر و حدود ۷۳ محدودیت کارکردی می‌شود. مسائل برنامه‌ریزی خطی در چنین ابعادی و حتی ابعادی بسیار بزرگتر از آن با نرم‌افزارهای حل‌کننده[6] تجاری و صنعتی مانند Gurobi و Cplex در کسری از ثانیه، جواب بهینه دقیق و سراسری چنین مسائلی را محاسبه و شناسایی می‌کنند. چندین مسئله در ابعاد گوناگون که اکثر آن‌ها بسیار بزرگتر از مسائل واقعی مطرح در صنعت هستند بطور تصادفی تولید و زمان حل آن‌ها ثبت شد. جدول (10) نشان می‌دهد که اگر سایز مسئله، خیلی بیش از دنیای واقعی نیز باشد مشکلی در روش حل، دقت عمل و زمان محاسبات بوجود نمی‌آید.

[6] Solver

جدول ۱۰ (شبیه سازی مسائل و حل با مدل طراحی شده)

	تعداد							
شماره مسئله	مواد اولیه	اکسیدها	متغیرها	محدودیت‌ها	ضرایب غیرصفر	تکرارها	زمان حل (ثانیه)	نتیجه حل
1	12	12	49	51	194	16	0.015	بهینه مطلق
2	20	12	57	67	329	16	0.015	بهینه مطلق
3	30	12	67	87	479	16	0.016	بهینه مطلق
4	40	12	77	107	629	19	0.016	بهینه مطلق
5	50	12	87	127	779	19	0.017	بهینه مطلق
6	60	12	97	147	929	19	0.017	بهینه مطلق
7	70	12	107	167	1079	19	0.017	بهینه مطلق
8	80	12	117	187	1229	20	0.018	بهینه مطلق
9	90	12	127	207	1379	20	0.018	بهینه مطلق
10	100	12	137	227	1529	20	0.018	بهینه مطلق
11	200	12	237	427	3029	20	0.018	بهینه مطلق
12	300	12	337	627	4529	20	0.019	بهینه مطلق
13	400	12	437	827	6029	21	0.019	بهینه مطلق
14	500	12	537	1027	7529	21	0.019	بهینه مطلق
15	600	12	637	1227	9029	21	0.019	بهینه مطلق

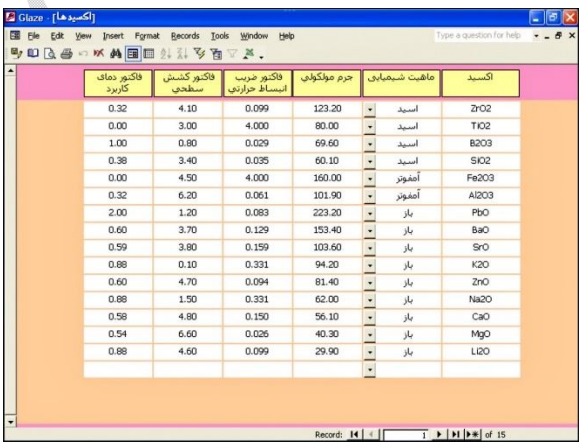
نتیجه آنکه حل مدل ریاضی حاصل از نظر زمان محاسبات با استفاده از نرم‌افزارهای حل‌کننده تجاری و روی یک کامپیوتر معمولی یا لپ تاپ، چالش محاسباتی ندارد. این موضوع یکی از مزایای بزرگ مدل‌های خطی است که نیاز به روش‌های ابتکاری یا فراابتکاری یا سایر روش‌های غیردقیق ندارند.

۶. طراحی و توسعه نرم‌افزار کاربردی

برای آنکه نتایج حاصل از این پژوهش بصورت عملی در صنعت قابل استفاده باشد و کاربران به‌راحتی بتوانند از مزایای آن بهره‌مند شوند یک نرم‌افزار کاربردی برای آن طراحی و ایجاد شد. برای مدیریت داده‌ها و مشاهده گزارشات از نرم‌افزار ACCESS، برای مدل‌سازی ریاضی از نرم‌افزار GAMS و برای حل مدل از نرم‌افزار CPLEX استفاده شد. تصویر صفحات اصلی نرم‌افزار مطابق در تصاویر ۱ تا ۶ قابل مشاهده است. تصویر ۱ جدول اطلاعاتی اکسیدها را نشان می‌دهد. از طریق این جدول می‌توان اطلاعات هر یک از اکسیدها را مشاهده و ویرایش نمود و نیز در صورت نیاز، اکسیدهای جدید را تعریف کرد. تصویر ۲ فرم اطلاعاتی مواد اولیه را نشان می‌دهد. از طریق این فرم می‌توان مواد اولیه مختلف و آنالیز

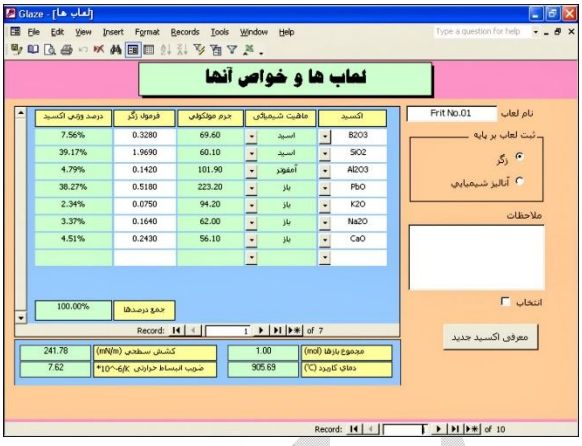
شیمیایی آن‌ها را مشاهده و ویرایش نمود و در صورت لزوم، مواد اولیه جدیدی را به برنامه معرفی کرد. تصویر ۳ فرم اطلاعاتی مربوط به انواع لعاب‌ها، آنالیز شیمیایی، و فرمول زگر آن‌ها را نشان می‌دهد. از طریق این فرم می‌توان به اطلاعات انواع لعاب‌ها دسترسی داشت و آن‌ها را مشاهده یا ویرایش نمود. همچنین لعاب‌های جدید را به برنامه معرفی کرد. تصویر ٤ اطلاعات مربوط به لعابی که قصد طراحی فرمول بچ آن‌را داریم به همراه اطلاعات مربوط به مواد اولیه مورد نظر برای استفاده را نشان می‌دهد. با انتخاب کلید "شروع محاسبات" ابتدا اطلاعات مورد نیاز مدل ریاضی بصورت اتوماتیک به فرمت نرم‌افزار GAMS تنظیم می‌شود. سپس GAMS نرم‌افزار حل‌کننده CPLEX را برای حل مدل ریاضی فراخوانی می‌کند. تصویر ٥ روند پیشرفت محاسبات را نشان می‌دهد که معمولاً کسری از ثانیه می‌شود. پس از اتمام محاسبات، نتایج حاصل از آن اخذ و بصورت اتوماتیک وارد این فرم می‌شود که تصویر ٦ نتایج حاصل را نشان می‌دهد. طراحان فرمول بچ با استفاده از این فرم، مناسب‌ترین فرمول را، هم از نظر کیفیت و هم از نظر هزینه می‌توانند شناسایی نمایند.

تصویر1: معرفی اکسیدها و ویژگی‌های آن‌ها



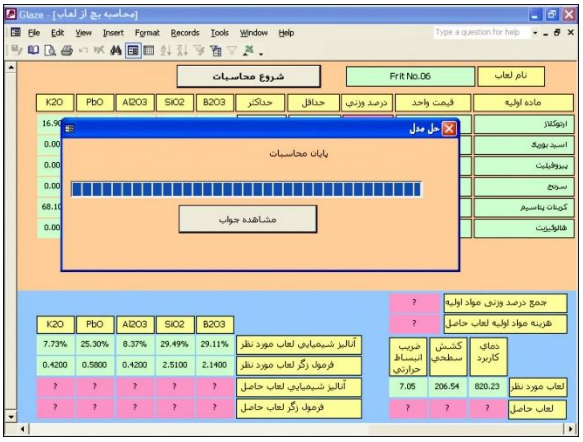
تصویر 2: معرفی مواد اولیه و آنالیز شیمیایی و هزینه آن‌ها

تصویر 3: معرفی لعاب‌ها و خواص آن‌ها

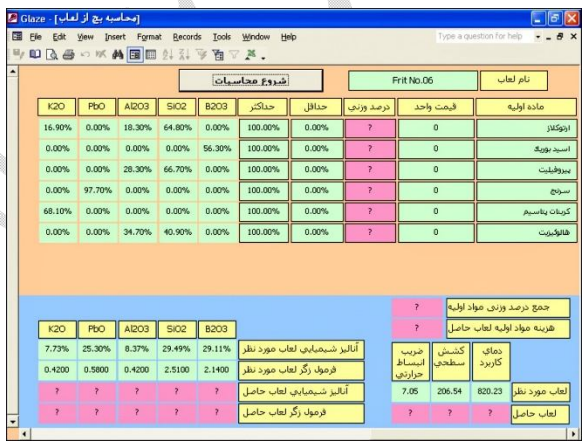


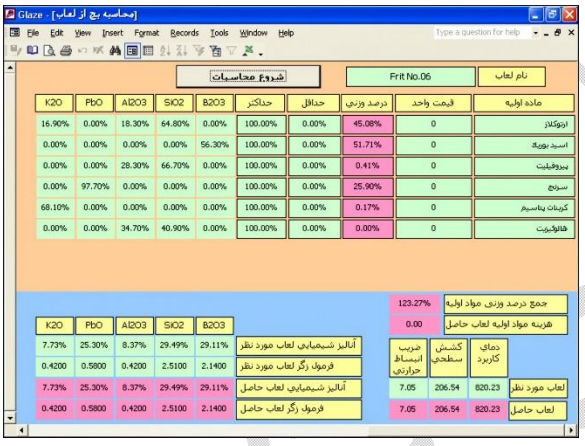
تصویر 4: انتخاب لعاب مورد نظر و مواد اولیه منتخب برای تولید آن

تصویر 5: روند انجام محاسبات بر اساس برنامه‌ریزی ریاضی



تصویر6: نتایج حاصل از اجرای مدل ریاضی





۷. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در صنعت سرامیک، طراحی فرمول بچ برای تولید لعاب بر اساس فرمول‌های "زگر" و با بهره برداری از تجربه متخصصین و روش‌های محاسباتی غیر بهینه انجام می‌شود. چنین روش‌هایی قادر به یافتن فرمول بهینه از نظر کیفی و نیز از نظر هزینه نیست. جواب‌هایی که از این روش بدست می آید عمدتاً رضایت نسبی را بر آورده می‌سازد. در این پژوهش برای اولین بار در ایران و جهان، از رویکرد تحقیق در عملیات برای این موضوع استفاده شد و مشخص شد که این روش تحولی شگرف را، هم از نظر کیفیت فرمول، هم از نظر کاهش هزینه تولید و هم از نظر زمان محاسبات، بوجود می‌آورد. در این تحقیق، اگر چه هدف اصلی بهینه‌سازی فرمولاسیون است، هدف‌های دیگر نیز تامین می‌شود که از آن جمله تهیه ابزاری کار آمد است که کارشناسان بتوانند به راحتی فرمولاسیون را با درنظر گرفتن معیارهای مختلف انجام دهند و اثر مواد اولیه مختلف روی یکدیگر را بهتر بررسی

کنند. علاوه بر این‌ها، ضمن این‌که نیازهای فنی خود را در چهارچوب فرمولاسیون مناسب تامین می‌نمایند هزینه‌ها را نیز محاسبه و کاهش دهند. برای ایجاد برنامه کاربردی و مدیریت داده‌های مدل از بانک‌اطلاعاتی Access، برای مدل‌سازی ریاضی از نرم‌افزار GAMS و برای حل مدل از حل‌کننده Cplex استفاده شد. کاربران از طریق یک سیستم کاربرپسند می‌توانند داده‌های لازم را وارد و تحلیل‌های مختلفی را انجام دهند. نتایج حاصل از این پژوهش پس از آزمایشات اولیه و تولید نمونه‌های کوچک، وارد خط تولید شد و باعث افزایش کیفیت و نیز کاهش هزینه‌های تولید لعاب گردید و مورد استقبال صنعت قرار گرفت.

8. مراجع (References)

1. 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
2. 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
3. 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
4. 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
5. 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
6. 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
7. 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

8. 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
9. 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
10. 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
11. 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
12. 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
13. 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. Tafresh: Amirkabir University of Technology. [In Persian]
15. Mirhadi, B. (2001). Glaze raw material, color, calculation. Tafresh: Amirkabir University of Technology. [In Persian]
16. Burleson, M., 2003. The ceramic glaze handbook: Materials, techniques, formulas. Lark Books

موارد 14، 15، 16 کتاب هستند و به این علت DOI ندارند.

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

ویراستاری نشده