

## کاربرد روش شناسی سطح پاسخ برای تعیین عوامل موثر بر فرایند تولید بطری شیشه ای

مقصود امیری \*

چکیده

برخی مسائل دنیای واقعی مستلزم شناسایی و تحلیل تأثیر متغیرهای ورودی بر متغیر پاسخ است. یکی از روش‌های کاربردی برای مدل سازی و حل این مسائل روش شناسی سطح پاسخ است. در این مقاله با استفاده از طراحی آزمایش‌ها تأثیر پنج عامل ورودی قابل کنترل شامل مواد اولیه، سرعت الکتروموتور، دمای گرمخانه، دمای کوره و فشار هوا بر سطح پاسخ مورد نظر یعنی مقاومت بطری شیشه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از اجرای آزمایش‌ها و شناسایی عوامل موثر، با توجه به کاربرد روش شناسی سطح پاسخ، رابطه بین متغیرهای مربوط به عوامل موثر ورودی و متغیر سطح پاسخ با استفاده از مدل رگرسیون غیر خطی تعیین می‌شود. سپس مقدار بهینه هر یک از متغیرهای مدل غیر خطی برآورده شده با استفاده روش برنامه‌ریزی آرمانی به دست می‌آید.

کلمات کلیدی: روش شناسی سطح پاسخ، طراحی آزمایش‌ها، رگرسیون، برنامه‌ریزی آرمانی.

## مقدمه

کیفیت یکی از قدیمی‌ترین مباحث در جوامع مختلف است که سابقه آن به عصر انسان نخستین باز می‌گردد. در عصر حاضر کیفیت مترادف با رضایت مشتری از محصول یا خدمت مورد نظر است. بهبود کیفیت و بهره‌وری زمانی به بهترین نحو مؤثر واقع می‌گردد که بخشی از چرخه طراحی و توسعه فرایند و محصول باشد. استفاده از روش‌های طراحی آزمایش‌ها<sup>۱</sup> (DOE) در مراحل اولیه چرخه توسعه محصولات جدید، بهبود محصولات موجود و بهینه‌سازی فرایندهای تولیدی بهینه، می‌تواند راز موفقیت محصول را به دنبال داشته باشد. این اصول در اغلب صنایع نظیر صنایع الکترونیک و نیمه هادی، هوا فضا، اتومبیل، تجهیزات پزشکی، غذایی، دارو سازی و صنایع شیمیایی و فرایندی به کار گرفته شده‌اند. استفاده صحیح از روش‌های طراحی آزمایش‌های آماری می‌تواند باعث سهولت در مراحل طراحی و تولید محصولات گردد. همچنین استفاده از این روش‌ها باعث ارتقاء سطح قابلیت اطمینان و بهبود عملکرد محصولات تولید شده می‌گردد.

روش‌های DOE می‌تواند طراحی و توسعه محصولات و فعالیت‌های مرتبط با حل مسئله را به میزان قابل توجهی بهبود می‌دهند. در دنیای امروز تولید کنندگان برای بقا و استمرار حضور در بازارها مجبورند به استفاده از فنون و روش‌های مورد استفاده خود را به روز کنند. خصوصاً روش‌های کنترل و بهبود کیفیت در این مورد از اهمیت خاصی برخوردارند. روش DOE نیز یکی از روش‌های بهبود کیفیت است که در دهه‌های ۱۹۹۰، ۱۹۸۰ به عنوان یک مزیت رقابتی در کشورهای غربی و ژاپن مطرح شد، به طوری که به عنوان یکی از الزامات گواهینامه QS 9000 پذیرفته شده است. در کشور ما نیز طی سال‌های اخیر گام‌هایی در راستای اجرای DOE برداشته شده است.

در واقع DOE شامل یک برنامه منظم در انجام بررسی‌هایی است که با استفاده از روش‌های آماری انجام می‌شود. در این آزمون‌ها فاکتورها یا عواملی که در یک فرایند در شرایط مختلف به کار گرفته شده و از وضعیت نهایی محصول یا اثر آن در محصول نهایی و یا فرایند، اطلاعاتی جمع آوری می‌شود. روش DOE یکی از روش‌های آماری بهبود کیفیت است که به وسیله آن می‌توان متغیرهای کلیدی موثر بر مشخصه کیفی مورد نظر فرایند را شناسایی نمود. با به کارگیری این روش می‌توان عوامل ورودی قابل کنترل را به طور سیستماتیک تغییر داد و اثر آنها بر پارامترهای محصول خروجی را ارزیابی نمود.

آزمایش‌های آماری می‌توانند به میزان قابل توجهی از میزان تغییرات در مشخصات کیفی بکاهند. همچنین سطوح متغیرهای قابل کنترل که باعث بهیngی عملکرد فرایند می‌شوند را تعیین نمایند. طراحی آزمایش‌ها یکی از عمده‌ترین روش‌های کنترل کیفیت قبل از تولید است که غالباً در فعالیتهای توسعه و مراحل اولیه تولید بکار می‌روند.

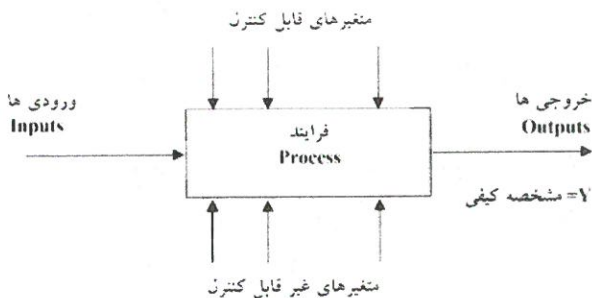
روش‌های DOE در طرح فعالیتهای مهندسی، که در آن فرآورده‌های جدید تکامل یافته و فرآورده‌های فعلی اصلاح می‌شوند نیز نقش عمده‌ای دارند. بعضی کاربردهای DOE در طراحی مهندسی عبارتند از:

- ۱- ارزیابی و مقایسه پیکر بندی طرح پایه‌های.
- ۲- ارزیابی دگرگونی‌های مواد.
- ۳- انتخاب پارامترهای طرح به طوری که فرآورده‌ها به خوبی در شرایط محیطی مختلف کار کنند.

۴- تعیین پارامترهای کلیدی طرح فرآورده که بر عملکرد محصول اثر می‌گذارند. استفاده از DOE در این زمینه‌ها می‌تواند فرآورده‌هایی به وجود آورد که تولید آنها ساده‌تر زمینه‌های عملکردی و قابلیت اعتماد آنها بیشتر و هزینه و زمان تولید آنها کوتاهتر است. فرایند یا سیستم تحت مطالعه DOE را می‌توان به وسیله مدلی که در شکل (۱) نشان داده شده است، معرفی کرد. معمولاً می‌توان فرایند را به صورت ترکیبی از ماشین‌ها، روش‌ها، اشخاص و منابع دیگر تصور کرد که

اهداف آزمون می تواند شامل موارد زیر باشد:

- ۱- تعیین متغیرهایی که بیشترین تأثیر را بر متغیر پاسخ  $y$  دارند.
- ۲- تعیین موقعیت متغیرهای مؤثر  $x$  به طوری که تقریباً  $y$  همیشه به مقدار اسمی یا هدف نزدیک باشد.
- ۳- تعیین موقعیت متغیرهای مؤثر  $x$  به طوری که تغییرپذیری  $y$  کوچک باشد.
- ۴- تعیین موقعیت متغیرهای قابل کنترل به نحوی که اثر عوامل کنترل ناپذیر حداقل شود.



شکل ۱. فرایند طراحی آزمایش ها (DOE).

در فرایندهای صنعتی عوامل ورودی متعددی با سطوح مختلف وجود دارند که هر کدام می تواند بر روی مشخصات محصول نهایی تأثیرگذار باشند. در بسیاری از این فرایندها از روش سعی و خطا برای شناسایی عوامل ورودی موثر استفاده می شود. اما اجرای روش سعی و خطا به تعداد آزمایش های زیادی نیاز دارد. بنابراین و زمان بالایی برای شرکت ها به همراه دارد. روش شناسی سطح پاسخ<sup>۱</sup> (RSM) ترکیبی از روش های ریاضی و آماری برای مدل سازی و تحلیل مسائلی است که متغیر پاسخ مورد نظر تحت تأثیر چندین متغیر ورودی قرار می گیرد و هدف آن بهینه سازی این پاسخ است [۸]. این روش می تواند به شرکت ها کمک کند تا بهترین

ترکیب عوامل مربوط به فرایند تولید محصول را با صرف هزینه و زمان کمتر شناسایی کنند و در نتیجه بازدهی و کارایی سیستم افزایش دهند. از RSM تاکنون در صنایع مختلفی استفاده شده است. برای مثال گرابائو و دیگران [۶] فرایندی تحلیلی بر اساس RSM ارائه نموده‌اند که به کمینه سازی ضایعات ایجاد شده در مسایل مربوط به تعادل خط مونتاژ می‌پردازد. موروگان و پارمار [۷] با استفاده از RSM مدلی ریاضی برای بررسی اثرات اصلی و متقابل پارامترهای جوش کاری قوسی غوطه ور شامل ولتاژ مدار باز، نرخ تغذیه کابل، سرعت جوش و فاصله نازل تا قطعه بر روی عمق نفوذ، استحکام، ضخامت و دقت جوش ارائه دادند. علیزاده و دیگران [۱] برای بررسی همزمان تأثیر چهار عامل دما، زمان عمل آوری، مایه پنیر و آب نمک بر کیفیت پنیر فتای ایران و تعیین مقادیر بهینه این پارامترها از RSM استفاده کرده‌اند. بهلول و دیگران [۲] برای کمینه یا بیشینه سازی حجم بار سوراخ کاری در طول فرایند خم کاری ورق های آهنی، از مدل های RSM بر پایه DOE استفاده کردند. هو و دیگران [۴] برای تنظیم ترکیبات روی - قلع رسوب داده شده در فرایند آبکاری الکتریکی، RSM را به کار گرفتند. دومینگوئز و دیگران [۵] برای بررسی تأثیر عوامل دما، زمان و غلظت جریان بر فرایند آبکاری الکتریکی برنج فولاد از DOE بهره گرفته و سپس مقادیر بهینه برای این عوامل را بر آورد کرده‌اند. هراندز - لونا و کاردیناز - فرانکوآ [۳] یک روش شناسی را برای طراحی بهینه مواد مذاب شیشه با استفاده از CAD/CAE و RSM ارائه کردند. یائو و دیگران [۹] نیز با استفاده از RSM به طراحی آزمایشی برای تولید سرامیک‌های شیشه‌ای پرداختند. هدف از این مقاله استفاده از RSM برای بهبود یکی از فرایندهای مهم صنعتی تحت عنوان تولید بطری شیشه‌ای است. بنابراین ابتدا عوامل ورودی موثر با استفاده از روش DOE و تشکیل جدول تحلیل واریانس تعیین شده و سپس با تشکیل مدل رگرسیون یک رابطه غیر خطی بین متغیر سطح پاسخ و متغیرهای مربوط به عوامل ورودی موثر برقرار می‌شود. در ادامه مقدار بهینه هر یک از متغیرهای مدل به کمک روش برنامه ریزی آرمانی<sup>۱</sup> به دست می‌آید.

## طراحی آزمایش‌ها

### تعریف مسأله

شرکت سهامی عام شیشه و گاز در فروردین ماه ۱۳۳۹ با هدف اولیه تولید بطری‌های نوشابه و گاز CO<sub>2</sub> جهت مصارف کارخانه‌های نوشابه سازی تأسیس گردید و اولین کوره این شرکت در سال ۱۳۴۱ مورد بهره برداری قرار گرفت. با توجه به نیاز روز افزون کشور به بطری و انواع ظروف شیشه‌ای در سال‌های بعد به تدریج کوره‌ها و خطوط تولیدی دیگری نیز افزوده شد، به نحوی که این شرکت در حال حاضر با ۵ کوره ذوب و ۱۵ خط تولید و ۱ کوره جهت تولید ظروف کریستال و کارگاه تراش کریستال به فعالیت مشغول است. از ۱۵ خط تولید شیشه معمولی ۸ خط مختص تولید انواع بطری و ۷ خط مخصوص تولید انواع بلور است. بلورهای این شرکت از سال ۱۳۷۹ با نام شوگا<sup>۱</sup> به بازارهای داخلی و خارجی عرضه می‌شود. هدف از این مقاله شناسایی عوامل مستقل تأثیرگذار بر تولید محصول نهایی بطری دلستر سبز رنگ و افزایش میزان استحکام و مقاومت محصول تولیدی است. در بخش بعدی ابتدا عوامل مستقل اثرگذار را به همراه مروری کلی بر نحوه انجام کار هر قسمت بیان کرده و سپس عوامل شناسایی شده وابسته را عنوان می‌شود. در نهایت با توجه به عوامل مستقل مراحل جزء به جزء DOE اجرا و از طریق نمودارها به نتیجه گیری از اجرای آزمایش پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که عوامل مستقل اثرگذار بر اساس بررسی نقشه فرایند محصول و بهره‌گیری از نظرات خبرگان و متخصصین خط تولید شناسایی شده‌اند.

### تعیین عوامل مستقل در طراحی آزمایش‌ها

#### ۱) عامل مستقل مواد اولیه

مواد اولیه اصلی متشکل از سیلیس، کربنات سدیم، آهک، دولومیت، فلدسپات و مواد افزودنی دیگر نظیر سولفات سدیم بوراکس (جهت حباب زدایی)، مواد رنگ

دهنده بطری‌ها به رنگ سبز (بطری‌های دلستر) نظیر اکسید آهن، بیکرومات سدیم، ذغال و کک است که از دو مورد ذغال و کک برای احیای محیط استفاده می‌شود. همچنین از مواد اولیه و خرده شیشه به دلیل قیمت ارزان تر و سرعت دادن به دمای ذوب مواد، برای ترکیب با مواد بالا استفاده می‌شود. البته باید افزود که عملاً در فرایند تولید هیچگونه ضایعاتی را وجود ندارد.

از میان مواد فوق ماده فلدسپات نسبت به مواد دیگر از لحاظ افزایش استحکام بطری دلستر ارجحیت بالاتری دارد. البته این موضوع نیز حائز اهمیت است که اگر میزان فلدسپات موجود در مواد مخلوط شده بیش از مقدار طبیعی باشد باعث ترد شدن بطری می‌شود. وجود فلدسپات در میان مواد دیگر به دلیل آن است که این ماده در ترکیب با مواد دیگر در کوره باعث آزاد شدن اکسید سدیم و اکسید آلومینیوم می‌شود. لذا از میان مواد بالا تنها ماده اولیه فلدسپات به عنوان یک عامل تأثیرگذار روی استحکام بطری دلستر در نظر گرفته شده است. در حال حاضر آنچه به شکل تجربی استفاده می‌شود این است که ماده فلدسپات در ترکیب مواد اولیه برای تولید بطری دلستر به میزان ۷۰ کیلوگرم استفاده می‌شود. لذا در این مقاله عامل مقدار فلدسپات در دوسطح ۶۹/۵ و ۷۰/۵ کیلوگرم مورد آزمایش قرار می‌گیرد. جدول (۱) حداکثر ظرفیت مواد اولیه و مقدار خروجی کوره‌های شرکت طی یک روز کاری ارائه می‌کند.

جدول ۱. حداکثر ظرفیت مواد اولیه و مقدار خروجی هر کوره

مذاب خروجی (کیلوگرم)	حداکثر مواد (تن)	کوره
۸۴۸	۶۰	۱
۲۲۱	۱۹	۲
۳۳۸	۶۲	۳
۷۸۰	۱۲۲	۴
۱۳۸	۲۳	۵

## ۲) عامل مستقل سرعت حرکت الکتروموتور اصلی

سرعت کل دستگاه‌ها (فیدر - نوار نقاله) و نوار نقاله موجود در خط تولید بطری‌های دلستر توسط یک الکتروموتور اصلی به نام ترانس‌میترا<sup>۱</sup> تنظیم و کنترل می‌شود. طرز کار این الکتروموتور این گونه است که اگر سرعت براساس دور بر دقیقه تغییر یابد، سنسورهایی که در کنار دینام‌های اجزای دستگاه‌ها وجود دارند این تغییر در سرعت را اعلام کرده و دستگاه‌ها سرعت خود را با الکتروموتور اصلی تنظیم می‌کند.

لذا در این مقاله تنها سرعت الکتروموتور اصلی به عنوان یک عامل مستقل در نظر گرفته می‌شود. در حال حاضر آن چه که به طور تجربی سرعت الکتروموتور برای تولید بطری دلستر به میزان ۹۰ دور بر دقیقه تنظیم می‌شود. لذا در این مقاله، عامل سرعت الکتروموتور اصلی در دو سطح ۸۹ و ۹۱ دور بر دقیقه مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

## ۳) عامل مستقل شعله پایانی (گرمخانه)

پس از آنکه بطری‌ها از دستگاه خارج می‌شوند، روی نوار نقاله قرار گرفته و به سمت گرمخانه، که آخرین ایستگاه خط تولید است، حرکت می‌کند. این ایستگاه برای تنش زدایی تنش‌های موجود بر روی بطری‌ها است. به طوری که در آزمایشگاه این تنش‌ها به صورت رگه‌هایی بنفش رنگ دیده می‌شوند. تنش موجود در بطری‌ها باعث کاهش استحکام و مقاومت بطری می‌شود. دمای شعله گرمخانه متأثر از آخرین درجه شیشه ورودی به محیط گرمخانه است. دمای تجربی موجود بطری ورودی به گرمخانه تقریباً ۵۰۰ درجه سانتی گراد است و محیط گرمخانه به تدریج بر اساس یک نمودار نرمال شکل دما را در ابتدا افزایش داده و با کاهش تدریجی دمای محیط گرمخانه، دمای بطری را به دمای محیط خارج نزدیک می‌کنند.

لذا عامل حداکثر دمای موجود در محیط گرمخانه که قابل تنظیم و کنترل است



به عنوان یک عامل تأثیرگذار بر استحکام و مقاومت محصول تولیدی در نظر گرفته می‌شود. در حال حاضر به شکل تجربی حداکثر دمای محیط گرمخانه جهت تولید بطری دلستر به میزان ۶۵۰ درجه سانتی گراد است. لذا در این مقاله عامل حداکثر دمای محیط گرمخانه در دو سطح ۶۴۰ و ۶۶۰ درجه سانتی گراد مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

#### ۴) عامل مستقل دمای کوره اصلی

در حال حاضر دمای کوره اصلی که مواد ترکیبی در آن ذوب می‌شوند، به شکل تجربی در حدود ۱۴۵۰ درجه سانتی گراد تنظیم می‌شود. بعد از ذوب مواد در کوره اصلی، مواد ذوب شده وارد قسمت تصفیه خانه می‌شود. در این قسمت عملیات یکنواخت سازی مواد مذاب صورت خواهد گرفت. پس مواد ذوب شده وارد کانالی می‌شوند که بر اساس فواصل معین به سه ناحیه تقسیم‌بندی می‌گردد. دستگاهی به نام فیدرمن به وسیله پایرومتر و روزنه‌هایی که روی این مسیر تعبیه شده‌اند، می‌تواند دمای نزولی از قبل تعیین شده این سه ناحیه را اندازه‌گیری و کنترل می‌کند. با توجه به دمای کوره اصلی (۱۴۵۰ درجه سانتی گراد) دمای این سه ناحیه باید به ترتیب ۱۱۹۰، ۱۱۵۴ و ۱۰۴۳ باشد. در قسمت انتهایی کانال مکانی به نام فیدر وجود دارد که مواد مذاب در آنجا قیچی شده و به صورت لقمه در می‌آیند. در این مکان نیز دمای موجود بر اساس دمای کوره اصلی قابل تنظیم و کنترل است که حدود ۹۶۰ درجه سانتی گراد برای آن مناسب است. باید افزود که تغییر دمای ذوب کوره اصلی بسیار حساس است، به طوری که افزایش بیش از حد دمای کوره باعث خروج بیشتر گازهای خروجی حاصل از واکنش شده و این امر باعث خوردگی سطوح دیوارهای داخلی کوره و یا ایجاد رسوبات در دیواره‌ها می‌گردد. بنابراین به طور کلی افزایش دمای درونی کوره موجب افزایش فشار درون کوره و کاهش بیش از حد دما نیز موجب عدم ذوب دقیق مواد می‌گردد. لذا با توجه به این مطالب به نظر می‌رسد دمای کوره اصلی می‌تواند به عنوان یک عامل مستقل در نظر گرفته شود و دمای ۴ ناحیه ذکر شده وابسته به دمای کوره اصلی می‌باشند.

در حال حاضر به شکل تجربی دمای ذوب مواد در محیط کوره اصلی برای تولید

بطری دلستر به میزان ۱۴۵۰ درجه سانتی گراد تنظیم می‌شود. لذا در این مقاله عامل دمای ذوب مواد در کوره اصلی در دو سطح ۱۴۵۱ و ۱۴۴۹ درجه سانتی گراد مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

#### ۵) عامل مستقل فشار هوای دمنده بر مواد مذاب درون قالب

پس از آنکه مواد مذاب در قسمت فیدر توسط قیچی برش داده شد (اصطلاحاً لقمه‌ها به وجود آمدند)، این لقمه‌ها توسط دو ناودانی که بر روی دو قالب با ارتفاع مشخصی تعبیه شده‌اند وارد قالب‌ها می‌شوند. در کنار هر قالب یک دمنده هوا نیز وجود دارد که از زیر با فشار تقریباً ۴۰ psi هوا را برای شکل دهی مذاب در قالب می‌دمد.

عدم دمش مناسب هوا به درون قالب موجب عدم یکنواختی ضخامت کل بطری می‌گردد. عدم ضخامت کامل بطری نیز موجب ضخامت و نازکی جداره بطری می‌شود که بر میزان مقاومت و استحکام محصول نهایی اثرگذار خواهد بود. لذا با توجه به مطالب مذکور به نظر می‌رسد که میزان فشار هوای دمیده شده به درون قالب خود می‌تواند عاملی جهت میزان استحکام بطری محسوب می‌گردد.

در حال حاضر میزان هوای دمیده شده به درون قالب به شکل تجربی به میزان ۴۰ psi است. لذا در این مقاله عامل فشار هوا را در دو سطح ۳۸ و ۴۲ psi مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

### تعیین عوامل وابسته در طراحی آزمایش‌ها

#### ۱) عامل وابسته وزن لقمه

وزن هر لقمه (مواد مذاب قیچی شده در مکان فیدر) تابعی از دو عامل مستقل زیر است: الف) دمای کوره اصلی: هر قدر دمای کوره اصلی بیشتر گردد، مذاب به صورت وارفته تر خواهد شد و ممکن است در زمان برش مقدار بیشتری از مذاب به صورت لقمه در آید و بالطبع وزن لقمه افزایش خواهد یافت. بر عکس هر چه دمای کوره اصلی کمتر گردد مذاب به سردتر خواهد شد و ممکن است در زمان برش مقدار

کمتری از مذاب به صورت لقمه در آید و بالطبع وزن لقمه نیز کاهش خواهد یافت. همچنین کاهش دمای ذوب کوره خود می‌تواند بر میزان ضخامت و یا کج بودن بطری در زمان شکل دهی درون قالب تأثیر گذار باشد.

ب) سرعت حرکت دستگاه‌ها: چنانچه سرعت حرکت دستگاه‌ها توسط الکتروموتور اصلی تغییر یابد، بر سرعت حرکت رفت و برگشتی قیچی نیز اثر گذار خواهد بود. به طوری که با کاهش سرعت حرکت هر برش وزن هر لقمه بیشتر شده و با افزایش سرعت حرکت هر برش وزن هر لقمه کاهش خواهد یافت. خاطر نشان می‌شود که در هر دقیقه ۹۰ لقمه برای دو قالب بطری دلستر سبز رنگ ایجاد می‌شود.

## ۲) عامل وابسته دمای ۳ ناحیه کانال و مکان فیدر

دمای ۳ ناحیه کانال و مکان فیدر که در بالا بدان اشاره شد، تابعی از عامل مستقل دمای کوره اصلی است. هدف از قرارگیری این ۳ ناحیه و مکان فیدر کاهش دمای مواد مذاب خروجی از تصفیه خانه و آماده سازی مواد جهت عملیات برش است. لذا بر اساس دمای کوره اصلی، دمای این ۳ ناحیه و مکان فیدر باید روندی نزولی را طی نمایند. وظیفه اپراتور در این نواحی صرفاً اندازه‌گیری و کنترل دمای از پیش تعیین شده است. برای مثال اگر در ناحیه ۲ دما کمتر از مقدار تعیین شده باشد، اپراتور دما را به میزان مشخص شده خواهد رساند.

البته باید در نظر داشت که عوامل دیگری نیز می‌توانند بر میزان مقاومت بطری تأثیر گذار باشند. ولی این عوامل بیشتر ابعاد کیفی دارند و نمی‌توان آنها را به صورت کمی بیان نمود. لذا در تحقیق حاضر، این عوامل در حالت ایده آل فرض شده‌اند. از جمله این عوامل می‌توان موارد زیر را برشمرد:

الف) نوع قالب و عدم وجود مواد اضافی در دیواره‌های قالب.  
ب) عملیات گریس کاری و روغنکاری درون قالب‌ها، به گونه‌ای که مواد مذاب درون قالب نچسبد.

ج) فرایند تولید و انتخاب ماشین آلات مناسب با فناوری روز دنیا.

د) ضریب عملکرد بالای اپراتور.

ه) شرایط محیطی درون کارخانه.

## مطالعه موردی

### معرفی طرح

طرح آزمایش مورد نظر آید، طرح عاملی<sup>۵۲</sup> است. به طوری که تعداد عوامل  $K=5$ ، تعداد تکرارها  $n=1$  و تعداد سطوح هر عامل (اثر) برابر ۲ می باشد. به دلیل دشواری عملیات و حساسیت فرایند، تعداد تکرارهای استفاده شده برای اجرای آزمایش یک بار در نظر گرفته شده است. هدف از اجرای طرح پیشینه کردن میزان مقاومت و استحکام شیشه و متغیر پاسخ میزان مقاومت و استحکام شیشه تولیدی می باشد.

در جدول (۲) عوامل موثر به همراه سطوح عوامل نشان داده  $N = n2^K = 2^5 = 32$  شده است:

جدول ۲. نمایش عوامل موثر به همراه سطوح هر عامل

		سطوح عوامل									
		a(-1)	a(+1)	b(-1)	b(+1)	c(-1)	c(+1)	d(-1)	d(+1)	e(-1)	e(+1)
عامل (اثر)	A (kg)	۶۹/۵	۷۰/۵								
	B (rpm)			۸۹	۹۱						
	C (c)					۶۴۰	۶۶۰				
	D (c)							۱۴۴۹	۱۴۵۱		
	E (psi)									۳۸	۴۲

عامل (اثر) A: ماده اولیه فلدسیات،

عامل (اثر) B: سرعت الکتروموتور اصلی،

عامل (اثر) C: ماکزیمم دمای شعله گرمخانه،

عامل (اثر) D: دمای ذوب مواد اولیه در کوره اصلی،

عامل (اثر) E: فشار هوای دمنده به درون قالب حاوی مذاب.

### نتایج آزمایش های صورت گرفته

در جدول (۳) نتایج آزمایش های صورت گرفته در مورد همه عوامل و سطوح آنها نشان داده شده است:





نتایج بدست آمده از جدول (۳) به صورت زیر است:

$$y_{000000} = 723$$

$$\bar{y}_{000000} = \frac{y_{000000}}{N} = 22.59375$$

برآورد هر عامل (اثر) با استفاده از رابطه (۱) را محاسبه می‌شود:

$$\text{برآورد اثر} = \frac{\text{کانتراست اثر}}{n2^{k-1}} \quad (۱)$$

$$n2^{k-1} = 16$$

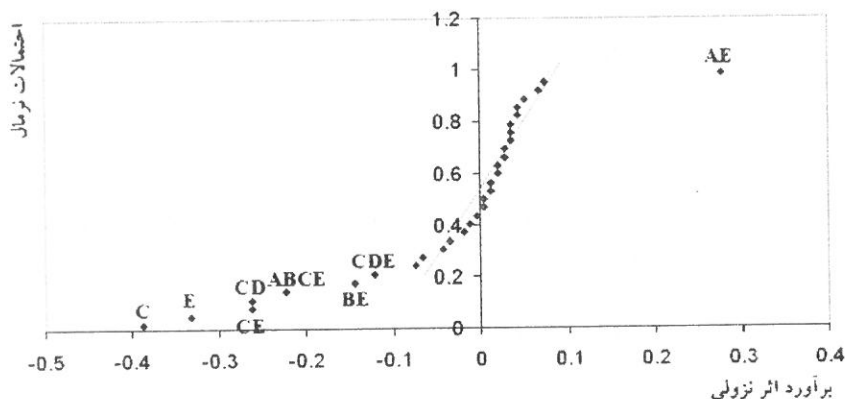
در جدول (۴) علاوه بر محاسبه برآورد هر اثر، احتمالات نرمال شده برآورد اثرهای مرتب شده نیز به صورت نزولی ارائه شده است:

جدول ۴. برآورد اثرها و احتمالات نرمال شده آنها

عامل (اثر)	کانتراست اثر	برآورد اثر	$j$	برآورد اثر نزولی شده	اثر منطبق با مقادیر نزولی شده	$P(j)$
A	11	0.6875	31	4.4375	AE	0.983870968
B	5	0.3125	30	1.1875	ACD	0.951612903
AB	-3	-0.1875	29	1.0625	ACE	0.919354839
C	-99	-6.1875	28	0.8125	D	0.887096774
AC	-19	-1.1875	27	0.6875	A	0.85483871
BC	-9	-0.5625	26	0.6875	BD	0.822580645
ABC	7	0.4375	25	0.5625	ADE	0.790322581
D	13	0.8125	24	0.5625	ABCDE	0.758064516
AD	1	0.0625	23	0.5625	ABCD	0.725806452
BD	1	0.6875	22	0.4375	ACDE	0.693548387
ABD	3	0.1875	21	0.4375	ABC	0.661290323
CD	-67	-4.1875	20	0.3125	B	0.629032258
ACD	19	1.1875	19	0.3125	BCDE	0.596774194
BCD	1	0.0625	18	0.1875	ABD	0.564516129
ABCD	9	0.5625	17	0.1875	BCE	0.532258065
E	-85	-5.3125	16	0.0625	BCD	0.5
AE	71	4.4375	15	0.0625	AD	0.467741935
BE	-37	-2.3125	14	-0.0625	BDE	0.435483871
CE	-67	-4.1875	13	-0.1875	AB	0.403225806
DE	-11	-0.6875	12	-0.3125	ABDE	0.370967742
ABE	-17	-1.0625	11	-0.5625	BC	0.338709677
ACE	17	1.0625	10	-0.6875	DE	0.306451613
ADE	9	0.5625	9	-1.0625	ABE	0.274193548
BCE	3	0.1875	8	-1.1875	AC	0.241935484
BDE	-1	-0.0625	7	-1.9375	CDE	0.209677419
CDE	-31	-1.9375	6	-2.3125	BE	0.177419355
ABCE	-57	-3.5625	5	-3.5625	ABCE	0.14516129
ABDE	-5	-0.3125	4	-4.1875	CD	0.112903226
ACDE	7	0.4375	3	-4.1875	CE	0.080645161
BCDE	5	0.3125	2	-5.3125	E	0.048387097
ABCDE	9	0.5625	1	-6.1875	C	0.016129032

نمودار احتمالات نرمال شده برآورد اثرهای مرتب شده نزولی در شکل (۲) به نمایش درآمده است:

نمودار احتمالات نرمال برآورد اثر



شکل ۲. نمودار احتمالات نرمال شده برآورد اثرهای مرتب شده.

### طرح تصویر شده

با توجه نمودار شکل (۲) اثرهای C، E، CDE، BE، ABCE، CD، CE، E، C و AE در طول خط مستقیم قرمز رنگ ترسیمی قرار نگرفته‌اند. لذا اثرهای ذکر شده به عنوان اثرهای معنی دار خواهند بود. بقیه اثرها به دلیل قرارگیری در طول خط مستقیم از جمله اثرهای ناچیز به شمار می‌روند. با توجه به اثرهای معنی دار بالا، چون اثرهای A، B و D ناچیز می‌باشند یا لذا هر اثر متقابل حاصل از ترکیب این اثرها نیز ناچیز به شمار می‌رود. بنابراین از میان اثرهای معنی دار بالا تنها اثرهای C و E و اثر متقابل CE را در نظر گرفته و طرح اجرا می‌شود.

قضیه [۸]: در یک طرح تک تکراری  $2^k$ ، اگر  $h$  عامل  $(h < k)$  ناچیز باشند و بتوان آنها را حذف کرد، آنگاه داده‌های اصلی متناظر با یک طرح عاملی دو سطحی با  $k-h$  عامل باقیمانده و  $2^h$  تکرار خواهد بود.

با توجه به قضیه بالا، طرح تصویر شده عبارت است از:



$h =$  تعداد عوامل ناچیز  $= ۳$

$k-h =$  تعداد عوامل باقیمانده  $= ۲$

$2^h =$  تعداد تکرارها  $= ۸$

### جدول تحلیل واریانس (ANOVA)

با توجه به طرح تصویر شده، جدول تحلیل واریانس این طرح در جدول (۵) ارائه شده است:

جدول ۵. جدول تحلیل واریانس نتایج به دست آمده

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مربعات	آماره آزمون F
C	۳۰۶,۲۸۱۳	۱	۳۰۶,۲۸۱۲۵	۷۷
E	۲۲۵,۷۸۱۳	۱	۲۲۵,۷۸۱۲۵	۵۶,۷۶۲۰۶۵۱
CE	۱۴۰,۲۸۱۳	۱	۱۴۰,۲۸۱۲۵	۳۵,۲۶۷۱۱۵۶
خطا	۱۱۱,۳۷۵	۲۸	۳,۹۷۷۶۷۸۵۷۱	
مجموع	۷۸۳,۷۱۸۸	۳۱		

$$SST = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m \sum_p y_{ijklmp}^2 - \frac{y_{000000}^2}{N} \quad (۲)$$

$$SS(\text{اثر}) = \frac{(\text{کانتراست اثر})^2}{2^h 2^{k-h}} \quad (۳)$$

$$SSE = SST - \sum SS(\text{اثرها}) \quad (۴)$$

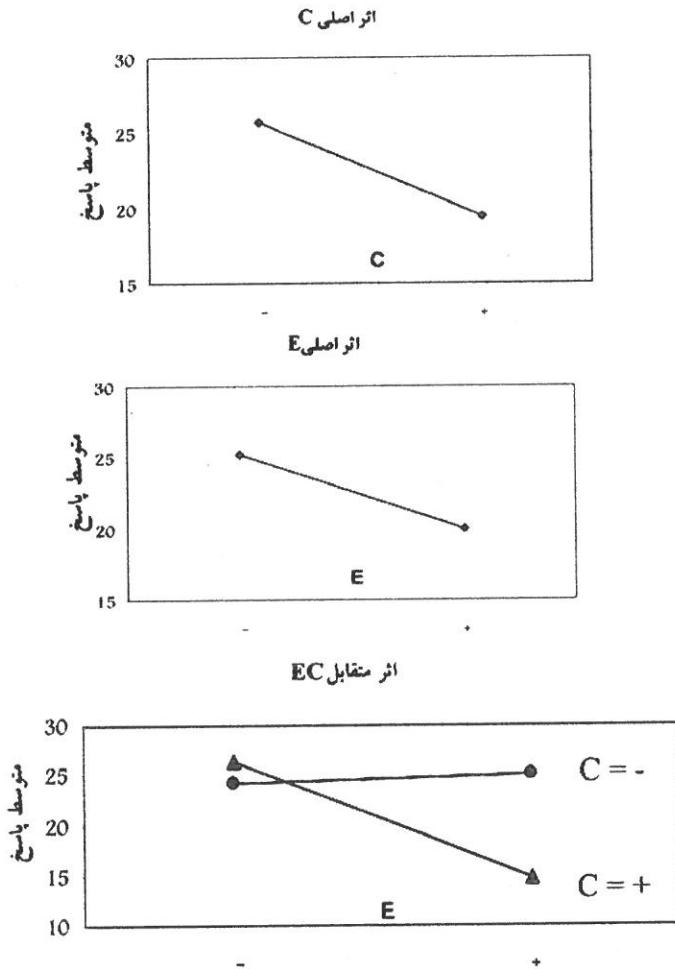
$$MS(\text{اثر}) = \frac{SS(\text{اثر})}{(\text{درجه آزادی اثر})} \quad (۵)$$

$$MSE = \frac{SSE}{(\text{درجه آزادی خطا})} \quad (۶)$$

در سطح  $\alpha = 0.05$  مقدار  $F_{\alpha,1,28} = 4.2$  خواهد بود. لذا با توجه به جدول (۵) کلیه عوامل C، E و CE موثر می‌باشند به دلیل این که آماره آزمون F هر یک از عوامل C، E و CE بزرگ تر از مقدار  $F_{\alpha,1,28} = 4.2$  است، بنابراین عوامل C، E و CE در سطح  $\alpha = 0.05$  معنی دار و موثر هستند.

با توجه به اثرهای C، E و CE نمودارهای هر اثر در شکل (۳) به نمایش درآمده

است:



شکل ۳. نمودارهای اثرهای مستقل C، E، CE.

همان طور که نمودار اثر متقابل CE نیز نمایش می‌دهد، تقاطع دو سطح اثر C براساس اثر E بیانگر وجود یک اثر متقابل بین دو اثر C و E می‌باشد.

### تحلیل رگرسیونی

برای طرح تصویر شده، که شامل عوامل C، E و اثر متقابل CE می‌باشد، مدل برازنده رگرسیون به صورت زیر خواهد بود:

برآورد اثر C = ۰/۵۶۲۵

برآورد اثر E = ۰/۳۱۲۵

برآورد اثر متقابل CE = ۰/۴۳۷۵

C اثر =  $X_3$

E اثر =  $X_5$

CE اثر متقابل =  $X_3X_5$

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_3 X_3 + \hat{\beta}_5 X_5 + \hat{\beta}_{35} X_3 X_5$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{Y}_{000000} = \frac{Y_{000000}}{N} = 22.59375$$

$$\hat{\beta}_3 = \frac{\text{برآورد اثر C}}{\text{تعداد سطوح اثر C}} = 0.28125$$

$$\hat{\beta}_5 = \frac{\text{برآورد اثر E}}{\text{تعداد سطوح اثر E}} = 0.15625$$

$$\hat{\beta}_{35} = \frac{\text{برآورد اثر CE}}{\text{تعداد سطوح اثر CE}} = 0.21875$$

$$\hat{Y} = 22.59375 + 0.28125X_3 + 0.15625X_5 + 0.21875X_3X_5$$

حال با توجه به این که هر اثر دارای دو سطح کد شده پایین (-۱) و بالا (+۱) است و با توجه به مدل برازنده رگرسیون به دست آمده، می توان مقادیر  $\hat{Y}$  را به دست آورد. نتایج در جدول (۶) ارائه شده است:

جدول ۶. نتایج مدل برازنده رگرسیون بر اساس سطوح کد شده

$X_3$	$X_5$	$X_3X_5$	$\hat{Y}$
-1	-1	1	22.375
-1	1	-1	22.25
1	-1	-1	22.5
1	1	1	23.25

تحلیل مانده ای

در جدول (۷) مقادیر برازش شده (پیش بینی شده) و مانده ها برای هر ترکیب

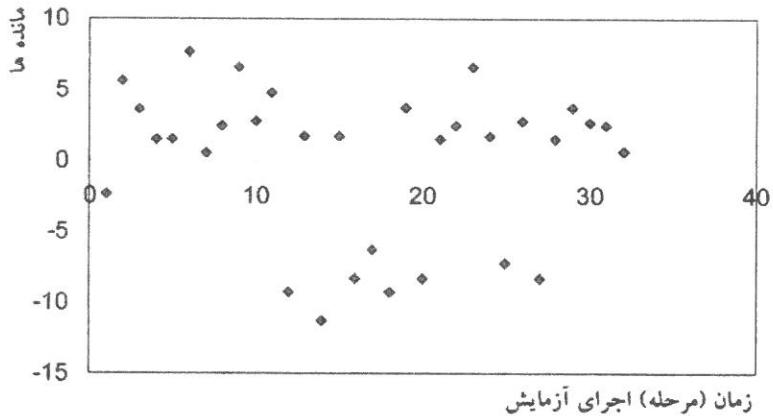
تیماری ارائه شده است:

جدول ۷. مقادیر پرازش شده و مانده‌ها برای هر ترکیب تیماری

ترکیب تیماری	زمان (مرحله) اجرای آزمایش در هر ترکیب	Y	$\hat{Y}$	$e = Y - \hat{Y}$
1	1	20	22.375	-2.375
a	2	28	22.375	5.625
b	32	23	22.375	0.625
ab	3	26	22.375	3.625
c	31	25	22.5	2.5
ac	8	25	22.5	2.5
bc	22	25	22.5	2.5
abc	4	24	22.5	1.5
d	30	25	22.375	2.625
ad	9	29	22.375	6.625
bd	23	29	22.375	6.625
abd	6	30	22.375	7.625
cd	28	24	22.5	1.5
acd	7	23	22.5	0.5
bcd	21	24	22.5	1.5
abcd	5	24	22.5	1.5
e	29	26	22.25	3.75
ae	10	25	22.25	2.75
be	24	24	22.25	1.75
ce	25	16	23.25	-7.25
de	26	25	22.25	2.75
abe	11	27	22.25	4.75
ace	12	14	23.25	-9.25
ade	13	24	22.25	1.75
bce	20	15	23.25	-8.25
bde	19	26	22.25	3.75
cde	27	15	23.25	-8.25
abce	14	12	23.25	-11.25
abde	15	24	22.25	1.75
acde	16	15	23.25	-8.25
bcde	18	14	23.25	-9.25
abcde	17	17	23.25	-6.25

### تست استقلال $\epsilon_{ij}$ ها

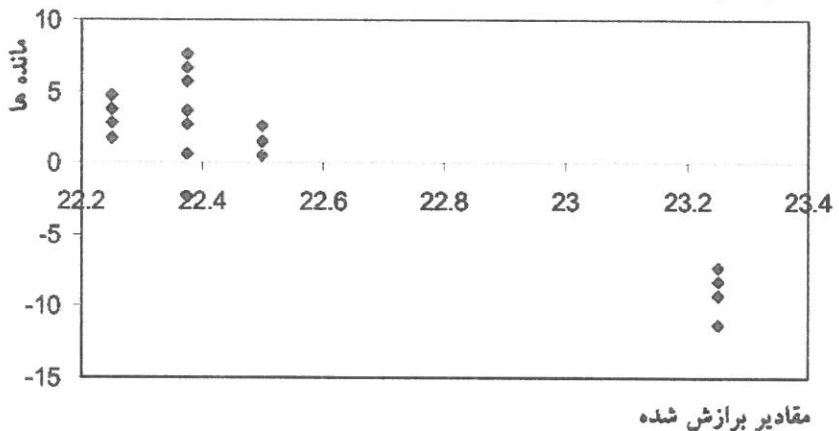
اگر پراکنندگی نقاط مشاهده شده نسبت به محور افقی برابر و متعادل باشد، آنگاه  $\epsilon_{ij}$  ها مستقل از هم هستند [۸]. مطابق آنچه در نمودار شکل (۴) مشاهده می‌شود، به نظر می‌آید که هیچگونه روند غیر معمولی که نشانگر عدم استقلال  $\epsilon_{ij}$  ها باشد، آشکار نیست.



شکل ۴. نمودار مانده‌ها نسبت به مقادیر برازش شده.

تست ثابت بودن  $\sigma^2$  ها

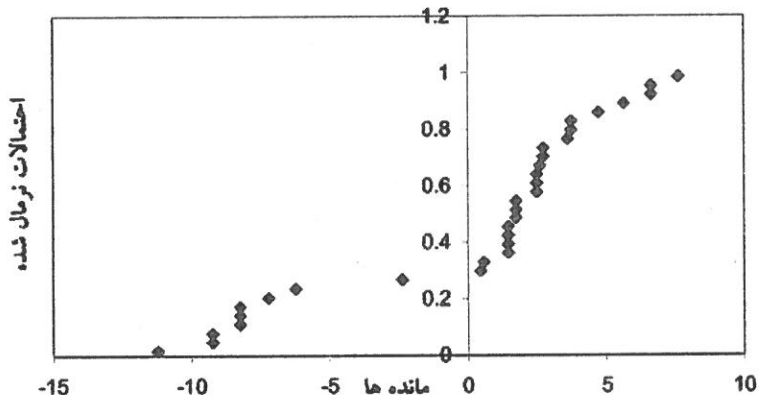
اگر شکل کلی نمودار بر اساس نقاط مشاهده شده به صورت یک قیف (یا برعکس آن) باشد، نشانگر آن است که  $\sigma^2$  ثابت بوده و تغییر کرده‌اند [۸]. مطابق آنچه که در نمودار شکل (۵) نیز مشاهده می‌شود به نظر می‌آید که هیچگونه روند غیر معمولی که نشانگر عدم ثابت  $\sigma^2$  ها باشد، آشکار نیست.



شکل ۵. نمودار مانده‌ها نسبت به مقادیر برازش شده.

## تست نرمال بودن توزیع $\varepsilon_{it}$ ها

برای تست نرمال بودن مانده‌ها ابتدا احتمالات نرمال شده مانده‌ها به دست آمده و مانده‌ها در مقابل این احتمالات مطابق شکل (۶) ترسیم می‌شوند.



شکل ۶. نمودار مانده‌ها نسبت به احتمالات نرمال شده آنها.

آنچه که از نمودار شکل (۶) می‌توان دریافت این است که توزیع خطا می‌تواند جزئی چولگی، در دنباله راست که طولانی تر از دنباله چپ است داشته باشد. گرایش نمودار احتمال نرمال که کمی به طرف چپ خمیده شده دلالت بر آن دارد که دنباله چپ توزیع خطا کمی باریک تر از توزیع نرمال است. یعنی مانده‌های منفی، آنطور که انتظار می‌رفته است، بزرگ (بر حسب قدرمطلق) نبوده‌اند. به هر حال، این نمودار زیاده از حد غیر نرمال نمی‌باشد. به طور کلی چنانچه خطی مستقیم بر این مجموعه نقاط ترسیم گردد تقریباً تمامی نقاط فاصله کمی را با این خط خواهند داشت.

## بهینه سازی مدل رگرسیون

با توجه به مدل رگرسیون غیر خطی به دست آمده می‌توان مقادیر بهینه متغیرهای ورودی موثر را محاسبه کرد. شرکت مورد مطالعه هدف فرایند خود را مقاومت ۲۳ psi در تولید بطری قرار داده است و مقاومت بیش از این مقدار برای شرکت هزینه زا بوده و مقرون به صرفه نیست. از سوی دیگر مقاومت کمتر از ۲۳ psi نیز موجب

کاهش کیفیت محصول نهایی شده و از سوی مشتریان قابل قبول نیست. بنابراین با توجه به محدودیت‌های موجود برای بهینه سازی مقادیر متغیرهای مربوط به مدل رگرسیون به دست آمده، از روش برنامه ریزی آرمانی استفاده شده است. مدل برنامه ریزی آرمانی مذکور مطابق با مدل (۱) است:

$$\min (n + p)$$

s.t:

$$22.59375 + 0.28125X_3 + 0.15625X_5 + 0.21875X_3X_5 + n - p = 23$$

مدل (۱)

$$-1 \leq X_3 \leq 1$$

$$-1 \leq X_5 \leq 1$$

$$n, p \geq 0.$$

به طوری که  $X_3$  و  $X_5$  به ترتیب متغیرهای‌های کدگذاری شده مربوط به عوامل دمای شعله (گرمخانه) و فشار هوای دمنده بوده و  $n$  و  $p$  نیز به ترتیب انحرافات منفی و مثبت میان مدل رگرسیون برازش شده و مقدار آرمانی متناظر با آن هستند.

مدل (۱) توسط بسته نرم افزاری Lingo حل شده و نتایج در جدول (۸) آورده شده است. مقادیر بهینه متغیرهای کدگذاری شده (یعنی  $X_3$  و  $X_5$ ) در این جدول نشان داده است. برای به دست آوردن مقادیر واقعی، این متغیرها از حالت کدگذاری (+۱ و -۱) خارج می‌شوند. در این صورت مقدار بهینه برای متغیر دمای شعله (گرمخانه) برابر  $۶۵۶/۸۷۳$  درجه سانتی گراد و برای متغیر فشار هوا برابر با  $۴۱/۳۸۹$  psi به دست می‌آید.

جدول ۸. نتایج بهینه سازی مدل رگرسیون با استفاده از نرم افزار Lingo

متغیر	مقدار بهینه	هزینه تقلیل یافته
$n$	۰	۱
$p$	۰	۱
$X_3$	۰/۶۸۷۳	۰
$X_5$	۰/۶۹۴۵	۰

نتیجه گیری و پیشنهادات آتی

در این مقاله یک طرح آزمایشی<sup>۵۲</sup> عاملی مورد مطالعه قرار گرفت که متغیر پاسخ،

میزان مقاومت و استحکام شیشه تولیدی و هدف از طراحی و اجرای آزمایش افزایش میزان مقاومت شیشه بود. عوامل موثر مستقلاً که تشخیص داده شدند، عبارت بودند از: ماده اولیه فلدسپات، سرعت الکتروموتور اصلی، ماکریمم دمای شعله گرمخانه، دمای ذوب مواد اولیه در کوره اصلی و فشار هوای دمنده به درون قالب حاوی مذاب. دلیل انتخاب این عوامل نیز بر اساس اهمیتی که هر یک می‌تواند بر افزایش مقاومت شیشه داشته باشند، ذکر گردید. سطوح هر عامل نیز به صورت یک سطح بالا و یک سطح پایین تعریف شدند.

آزمایش‌ها در ۳۲ ترکیب تیماری برای هر اثر و اثرهای متقابل عوامل اجرا شد. با استفاده از نتایج آزمایش‌ها برآورد هر اثر محاسبه و بر اساس آن نمودار احتمالات نرمال شده برآورد آثار ترسیم شد. با توجه به این نمودار مشخص شد که تنها آثار C و E و CE در طول خط مستقیم نمودار قرار داشته و بقیه آثار ناچیز به شمار می‌آیند. بنابراین آثار C و E و اثر متقابل آنها یعنی CE به عنوان آثار اصلی طرح آزمایشی تعیین شدند. براساس طرح تصویر شده، جدول آنالیز واریانس ارائه شد و در سطح  $\alpha = 0.05$  مشخص گردید که عوامل موثر و معنی دار طرح آزمایشی، عوامل C و E و CE هستند. نمودار اثر متقابل CE نیز مبین این موضوع بود. براساس تحلیل رگرسیونی، مدل رگرسیون حاصل از عوامل معنی دار به دست آمد و مقادیر برآورد شده (برازش شده) متغیر پاسخ در دو سطح پایین (-۱) و بالا (+۱) برای هر عامل شناسایی و به دست آمدند. در تحلیل مانده ای، مانده‌ها (خطاها) بر اساس اختلاف مقادیر متغیر پاسخ از مقادیر پیش‌بینی شده رگرسیون به دست آمدند. تست استقلال  $\epsilon_{ij}$ ها (خطاها) نیز بیانگر استقلال  $\epsilon_{ij}$ ها بود. در ادامه تست ثابت ماندن  $\sigma^2$  بررسی شد که این موضوع نیز به ثابت ماندن  $\sigma^2$  انجامید تست نرمال بودن  $\epsilon_{ij}$ ها نیز بررسی شد که روندی غیر معمول که بیانگر غیر نرمال بودن  $\epsilon_{ij}$ ها شود، مشاهده نشد. مدل رگرسیون غیر خطی به دست آمده با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی بهینه‌سازی شد و بهترین سطوح برای اجرا تعیین شدند. وزن کم بطری‌های شیشه‌ای همواره مورد توجه مشتریان و مصرف کنندگان قرار دارد. کاهش وزن به همراه افزایش مقاومت بطری شیشه‌ای می‌تواند به عنوان زمینه‌ای برای تحقیق آتی پیشنهاد شود.



- [1] Alizadeh, M., Hamed, M., and Khosroshahi, A.(2005). **Optimizing Sensorial Quality of Iranian White Brine Cheese Using Response Surface Methodology**. Journal of Food Science. 70, 4, 299-303.
- [2] Bahloul, R., Mkaddem, A., Dal Santo, Ph., and Potiron, A.(2006). **Sheet metal bending optimization using response surface method, numerical simulation and design of experiments**. International Journal of Mechanical Sciences. 48, 9, 991-1003.
- [3] Hernández-Lunaa, A. A., and Cárdenas-Franco, L.(2003). **Optimal design of glass molds using CAD/CAE and response surface methodology techniques**. 12, 3-4, 391-399.
- [4] Hu, C-C., Wang, C.K., and Lee, G.L.(2005). **Composition control of tin-zinc deposits using experimental strategies**. Electrochimica Acta. 51, 18, 3692-3698.
- [5] Dominguez-Ríos, C., Torres-Sánchez, R., and Aguilar-Elguezabal, A.(2006). **Effect of Zinc Flash on the Brass Plating Electroless in Steel AISI**. <http://www.electrochem.org/dl/ma/206/pdfs/2245.pdf>.
- [6] Grabau, M., Maurer, R., and Ott, D.P.(1997). **Optimizing a simulation to generate the data to balance an assembly line**. Proceedings of the IEEE Winter Simulation Conference, Piscataway, NJ, USA , Pages 733-738.
- [7] Murugan, N., and Parmar, R.S.(1997). **Effect of welding conditions on microstructure and properties of tupe 316L stainless steel submerged arc cladding**. Welding Journal. 76, 5, 210-220.
- [8] Montgomery, D.C.(2005). **Design and analysis of experiments**. 6th Ed, John Wiley and sons, New York.
- [9] Yao, C., Aibing, Y., Dawei, J., and Nan, Z.(2007). **Cutting force model of glass ceramics based on response surface methodology**. Journal of Rare Earths 25, 2, 337-339.