

Paper Type: Original Article



Multi-Objective Optimization of Needle-Punched Impregnation Process Using Design of Experiments Technique and Response Procedure Methodology

Hamidreza Jafari*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Islamic Azad University, Abhar, Iran;
hr.ariyayee2009@gmail.com.

Citation:



Jafari, H. (2025). Multi-objective optimization of needle-punched impregnation process using design of experiments technique and response procedure methodology. *Management sciences and decision analysis*, 3(1), 50-58.

Received: 16/07/2024

Reviewed: 22/08/2024

Revised: 20/10/2024

Accepted: 04/01/2025

Abstract

Purpose: This study aims to simultaneously optimize the time and cost of impregnating needle-punched mats with resin in the production of composite corrugated sheets at Diba Fiberglass Company. As this stage forms a bottleneck in the production process, the research seeks to identify the most influential factors and determine the optimal combination of process variables.

Methodology: Design of experiments (DOE) using a full factorial 2^2 design with four replications was employed. Three resin types were considered as a qualitative factor, while two quantitative factors—resin-to-glass fiber ratio and catalyst-to-fiber ratio—were selected as independent variables. Data from 48 experiments were analyzed using Minitab, and regression models were developed for both time and cost responses. The LP-metric method was then used for multi-objective optimization to identify the optimal point.

Findings: The regression models for all three resin types showed statistical significance and model adequacy (High R^2 and significant P-values). The results revealed that using resin type A with 80% resin and 10% catalyst yields the closest response to the ideal targets (12 seconds and 12000 Rials). Hence, when the importance of time and cost is considered equal, this combination represents the optimal decision.

Originality / Value: Unlike conventional approaches, this research integrates experimental design, regression modeling, and multi-objective optimization using the LP-metric method—an approach rarely applied to impregnation processes in the composite industry. The study also suggests extending the model to fuzzy environments for future research, addressing real-world uncertainty in process parameter importance.

Keywords: Design of experiments, Multi-objective optimization, Response surface methodology, Resin, Impregnation, Needle-punched mat.



Corresponding Author: hr.ariyayee2009@gmail.com



10.22105/msda.v3i1.85



Licensee. **Management Sciences and Decision Analysis**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



بهینه‌سازی چندهدفه فرایند آغشته‌پذیری مت سوزنی با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش‌ها و متدولوژی روبه پاسخ

حمیدرضا جعفری*

گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران.

چکیده

هدف: این پژوهش با هدف بهینه‌سازی هم‌زمان زمان و هزینه آغشته‌پذیری مت سوزنی با رزین در تولید ایرانیت کامپوزیتی در شرکت دیبا فایبرگلاس انجام شده است. با توجه به نقش این مرحله به‌عنوان گلوگاه در فرایند تولید، تحقیق حاضر درصدد شناسایی عوامل موثر و ارایه ترکیب بهینه‌ای از متغیرهای فرایند تولید است.

روش‌شناسی پژوهش: از تکنیک طراحی آزمایش‌ها^۱ در قالب طرح عاملی ۲^۲ با چهار تکرار استفاده شده است. سه نوع رزین به‌عنوان متغیر کیفی و دو عامل کمی شامل نسبت وزنی رزین به الیاف شیشه و نسبت وزنی کاتالیزور به‌عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شدند. داده‌های حاصل از ۴۸ آزمایش با نرم‌افزار Minitab تحلیل و مدل‌های رگرسیونی برای زمان و هزینه آغشته‌پذیری استخراج شدند. سپس، برای دستیابی به نقطه بهینه، از روش LP-متریک به‌منظور حل مساله بهینه‌سازی چندهدفه استفاده گردید.

یافته‌ها: مدل‌های برازش‌یافته در هر سه نوع رزین دارای کفایت آماری بودند (R^2 بالا و P -Value معنادار). نتایج نشان داد که رزین نوع A در ترکیب با ۸۰٪ رزین و ۱۰٪ کاتالیزور کم‌ترین فاصله را با مقدار ایده‌آل دارد (۱۲ ثانیه زمان و ۱۲۰۰۰ ریال هزینه)؛ بنابراین، انتخاب این ترکیب در شرایط برابر بودن اهمیت زمان و هزینه، بهترین تصمیم خواهد بود.

اصالت/ارزش افزوده علمی: در این تحقیق، برخلاف رویکردهای معمول، از تلفیق طراحی آزمایش‌ها، مدل‌سازی رگرسیونی و حل مساله بهینه‌سازی چندهدفه با روش LP-متریک استفاده شده است که در حوزه فرایندهای آغشته‌سازی در صنعت کامپوزیت کم‌تر به آن پرداخته شده است. همچنین، تحقیق حاضر پیشنهادهایی برای توسعه مدل در شرایط عدم قطعیت فازی در تحقیقات آتی ارایه می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: طراحی آزمایش‌ها، بهینه‌سازی چندهدفه، متدولوژی روبه پاسخ، رزین، آغشته‌پذیری، مت سوزنی.

۱- مقدمه

صنعت کامپوزیت یکی از صنایع رو به رشد در تولید محصولات پلیمری است. امروزه به خاطر مزایایی که کامپوزیت‌ها نسبت به فلزات دارند، این صنعت توسعه زیادی پیدا کرده است که از آن جمله می‌توان به کاربرد قطعات کامپوزیتی در صنعت خودرو اشاره کرد. اکثر قطعات صنعتی که در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند فلزی هستند، اما فلزات محدودیت‌هایی دارند که راه را برای استفاده از قطعات کامپوزیت در صنعت باز کرده است. کامپوزیت‌های مورد استفاده در صنعت خودرو بیش‌تر از نوع کامپوزیت‌ها زمینه پلیمری هستند. این کامپوزیت‌ها از مواد ترموست

^۱ Design of Experiments (DOE)

(گرماسخت) و ترموپلاستیک (گرمانرم) تشکیل شده‌اند که توسط الیاف شیشه تقویت می‌شوند. گستره کاربرد قطعات کامپوزیت تقویت شده توسط الیاف فایبرگلاس بسیار وسیع بوده به‌طوری که امروزه این طیف از قطعات به‌طور فزاینده‌ای در صنایع خودروسازی، صنایع دریایی، هواپیماسازی مورد کاربرد قرار گرفته‌اند. از جمله مزایای استفاده از این قطعات می‌توان به سبکی، سهولت تولید، مقاومت در برابر خوردگی، سرمایه‌گذاری کم و خواص مکانیکی بالا اشاره نمود [1].

شرکت دیبا فایبرگلاس در راستای توسعه محصولات و ایجاد صنایع پایین دستی نوعی ایرانیست کامپوزیتی با تقویت‌کننده مت سوزنی با دانسیته ۴۵۰ گرم بر متر مربع را در ردیف محصولات تولیدی خود قرار داده است. به همین جهت پس از گذشت چند ماه از شروع تولید، و طی مراحل تولید آزمایشی و اجرای کالیبراسیون و پیاده‌سازی سیستم‌های تجزیه و تحلیل اندازه‌گیری^۱ و کنترل آماری فرایند^۲، برخی مشکلات در فرایند تولید این قطعه مشهود است که مهم‌ترین آن بالا بودن زمان عملیات آغشته‌پذیری مت سوزنی به رزین می‌باشد که سبب ایجاد گلوگاه در فرایند تولید این محصول شده است [2].

در بخش اول، این تحقیق ابتدا با استفاده از مراحل تکنیک طراحی آزمایش‌ها عوامل موثر بر بالا رفتن زمان آغشته‌پذیری مت سوزنی به رزین شناسایی خواهد شد. با توجه به هزینه‌های مختلف ترکیب در کامپوزیت علاوه بر زمان، هزینه نیز در پاسخ آزمایشات در نظر گرفته شده است. از جدول‌ها تحلیل واریانس توابع مناسب استخراج و اعتبار مدل‌های به‌دست آمده بررسی می‌گردند. سپس با یکی از روش‌های حل مسایل چند هدفه یعنی روش LP-متریک، توابع هدف زمان و هزینه ترکیب مواد و جواب بهینه مدل نهایی با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی لینگو به‌دست خواهد آمد. این مرحله همان روش شناسی سطح پاسخ است که سطوح بهینه هر یک از این عوامل جهت دستیابی به شرایط بهینه با در نظرگیری توام دو هدف کمینه‌سازی زمان آغشته‌پذیری و هزینه تولید (هزینه مواد اولیه مصرفی و هزینه فرصت از دست رفته ماشین) تعیین می‌گردد. با توجه به در نظر گرفتن دو هدف جهت سهولت تصمیم‌گیری، در پایان تحقیق، تحلیل حساسیت بر روی درجه اهمیت اهداف نسبت به یکدیگر انجام و نتایج در نموداری ترسیم می‌شود.

روش‌های طرح آزمایش در بسیاری از نظام‌ها کاربرد وسیع دارند. در واقع عمل آزمایش را می‌توان به‌صورت بخشی از فرایند علمی و به‌صورت یکی از راه‌های فراگیری چگونگی کار سیستم‌ها یا فرایندها در نظر گرفت. هدف کلی در تکنیک رگرسیون و طراحی آزمایش‌ها، ساختن مدلی برای سیستم مورد ارزیابی می‌باشد. در این بین مبحث طراحی آزمایش‌ها بسیار حایز اهمیت است و در واقع یکی از ارکان حل مساله و مدل‌سازی آن می‌باشد. به بیان ساده و مختصر انتخاب نقاطی که در بین آن‌ها سطوح عوامل می‌بایست تنظیم شوند. پایه‌های نخستین این شاخه از آمار توسط فیشر ایجاد شد. وی که از پژوهشگران موسسه آمار دانشگاه کمبریج بود به استفاده از روش‌های آماری در آزمایش‌های کشاورزی علاقه‌مند شد. هدف اصلی او این بود که میزان بهینه آب، آفتاب، کود، بارش و شرایط زمین مورد نیاز جهت تولید بهترین محصول را با استفاده از این روش تخمین بزند. شاخه‌ای از این علم که به بررسی فاکتورهای مهم در کنترل مشخصه‌های کیفیت محصول تولید شده و تعیین بهترین ترکیب از این فاکتورها جهت بهینه‌کردن محصول یا فرایند می‌پردازد طرح‌های عاملی نام دارد. در این طرح کلیه اثرات اصلی و متقابل عامل‌ها در نظر گرفته می‌شود و می‌توان کلیه عوامل و سطوح را دقیقاً مورد ارزیابی قرار داد. اما زمان انجام و تعداد مشاهدات لازم برای تجزیه و تحلیل نهایی افزایش پیدا می‌کند [1].

در اغلب صنایع، کاربرد صحیح و مؤثر طراحی آزمایش‌های آماری کلید افزایش بازدهی، کاهش تغییر پذیری، کاهش زمان‌های تاخیر در طراحی و توسعه محصولات و در نتیجه رضایت مشتری محسوب می‌شود. به عبارت دیگر با به‌کارگیری صحیح طراحی آزمایش‌ها در توسعه فرایند تولید می‌توان زمان تولید و هزینه‌ها را تقلیل داده و به فرایندها و فرآورده‌هایی رسید که در نوع خود عملکرد بهتر و اعتمادپذیری بالاتری دارند [2]. در سال‌های اخیر استفاده از تکنیک‌های طراحی آزمایش‌ها و بهینه‌سازی روش رویه پاسخ به‌طور گسترده افزایش یافته است. پژوهش‌های انجام شده قبلی در بهینه‌سازی فرایند جوشکاری [3]، بهینه‌سازی مسایل چندپاسخ آماری [2] و شبیه‌سازی حل مسایل آماری چندپاسخ سعی در به‌کارگیری روش‌های شبیه‌سازی و استفاده از روش توابع مطلوبیت کرده‌اند اما در این تحقیق از روش وزن‌دهی به تابع هدف و تشکیل یک تابع هدف واحد از مجموعه پاسخ‌ها شده است به‌طوری که هنگام بهینه‌سازی با تلفیق چند تابع هدف که هر کدام می‌بایست مینیمم یا ماکزیمم شود یک تابع هدف واحد به دست می‌آید که به‌وسیله روش وزن‌دهی و ایجاد تابع ال‌پی-متریک می‌بایست کمینه شود این روش قبلاً کم‌تر مورد توجه قرار گرفته، در

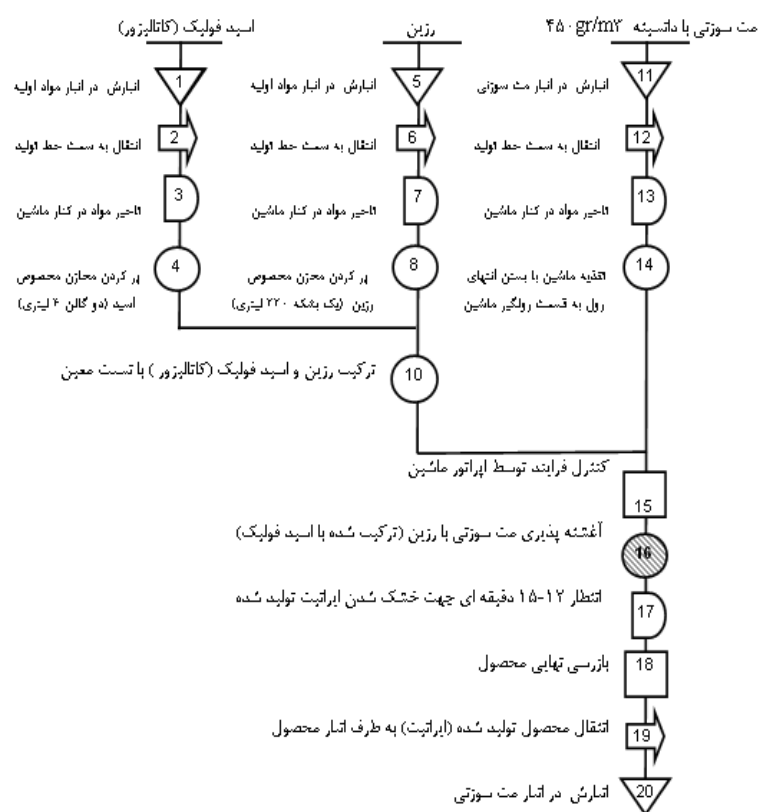
¹ Measurement System Analysis² Statistical Process Control

مقالات گذشته با استفاده از روش‌های آماری و استفاده از خصوصیات توابع، بهینه‌سازی انجام شده است که این خود مزیتی برای این پژوهش به حساب می‌آید.

درخصوص پیشینه موضوع در مجلات معتبر داخلی همچنین مجلات الکترونیکی قابل دسترس خارجی مقاله‌ای مرتبط با کار انجام‌شده در این تحقیق یافت، نگردید. البته در سایر مسایل همچون بهینه‌سازی فرایندها در ترکیبات کامپوزیتی، چانو و هوانگ روش تاگوچی را جهت بهینه‌کردن ترکیبات به‌کار گرفتند [4]. لین و کانادا جهت بهبود کیفیت محصولات تزریقی، از روش طراحی استفاده کردند [5]. الاگومورتی و پالانیراجا روش طراحی آزمایش‌ها را جهت یافتن عوامل موثر بر آسیب‌کردن مواد ترکیبی به‌کار گرفتند [6] و در نهایت یانگ کوانگ یانگ بهینه‌سازی فرآیند تزریق قالب را با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها ارائه دادند [7]. در مقاله اخیر بهینه‌سازی فرآیند قالب‌گیری تزریقی الیاف شیشه و ترکیب پلی کربنات تقویت شده با روش تاگوچی انجام شده است. در مقالات اشاره شده عمدتاً کیفیت ترکیب مدنظر بوده و سطوح بهینه ترکیب مواد با استفاده از طراحی آزمایش‌ها به‌دست آمده است.

۱-۱- تعریف مساله

مساله اساسی در تولید محصول ایرانیت کامپوزیتی با تقویت کننده مت سوزنی، پروسه زمانبر آغشته‌پذیری مت سوزنی به رزین مرکب با کاتالیزور می‌باشد، که سبب ایجاد گلوگاه در پروسه تولید محصول شده است، که طبق نمودار جریان فرایند (شکل ۱) فرایند تولید محصول، این عملیات با عنصر شماره ۱۶ شماره‌گذاری شده است. در این تحقیق سعی می‌گردد عوامل موثر بر بالا رفتن زمان عملیات آغشته‌پذیری مت سوزنی به رزین شناسایی و با طراحی آزمایش‌ها برای سطوح مختلف، تاثیر هر یک از عوامل بر روی زمان آغشته‌پذیری محصول و هزینه ترکیب مواد (به عنوان متغیرهای پاسخ) سطح بهینه هر یک از عوامل موثر جهت بهینه شدن توأم هر دو متغیر پاسخ تعیین گردد.



شکل ۱- نمودار فرایند جریان تولید مت سوزنی.

Figure 1- Needle mat production process flow chart.

۱-۲- تعیین سطوح عوامل

عامل اول (نوع رزین) یک متغیر کیفی بوده و در سه سطح (نوع) ۱، ۲ و ۳ در فرایند تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد، عامل دوم (درصد ترکیب وزنی رزین نسبت به الیاف شیشه) به عنوان یک متغیر کمی در دو سطح ۶۰٪ و ۸۰٪ نهایتاً عامل سوم، درصد ترکیب وزنی کاتالیزور (اسید فولیک) نسبت به الیاف شیشه به عنوان متغیر کمی دوم در دو سطح ۱٪ و ۳٪ آزمایش می‌شود. به اختصار سطوح عوامل کمی در جدول ۱ آورده شده است.

۱-۱-۱- تعیین متغیر پاسخ (متغیرهای وابسته)

طبق نظر سنجی انجام شده از کارشناسان و افراد خبره تولید شرایط بهینه شرایطی است که دو هدف زیر تا حد امکان ارضا گردد:

۱. حداقل زمان آغشته‌پذیری مت سوزنی به رزین
۲. حداقل هزینه تولید (مواد اولیه مصرفی + هزینه فرصت از دست رفته ماشین آلات)

۱-۱-۲- عوامل موثر (متغیرهای مستقل)

مهم‌ترین عوامل موثر و قابل کنترل بر متغیرهای پاسخ عبارت‌اند از:

۱. نوع رزین مورد استفاده (x_1) (A)
۲. نسبت وزنی رزین به الیاف شیشه (x_2) (B)
۳. نسبت وزنی کاتالیزور (اسید فولیک) به الیاف شیشه (x_3) (C)

جدول ۱- سطوح عوامل کمی آزمایش.

Table 1- Levels of quantitative test factors.

متغیر مستقل	حد پایین	حد بالا
نسبت وزنی رزین (B)	30% (-1)	60% (+1)
نسبت وزنی کاتالیزور (C)	1% (-1)	3% (+1)

۱-۳- تعیین طرح آزمایش‌ها

با توجه به این‌که عامل اول یک متغیر کیفی می‌باشد؛ جهت استفاده از مدل‌های ریاضی (توابع خطی یا غیر خطی) با از بین بردن این عامل (نوع رزین) مساله را به سه مساله طرح آزمایشات که هر مساله شامل ۲ عامل کمی با دوسطح است، تبدیل می‌کنیم (تعریف یک مساله برای هر یک از انواع رزین)؛ بنابراین، برای هر یک از سه مساله مذکور، طرح عاملی ۲۲ با ۴ تکرار جهت اجرای آزمایش‌ها انتخاب می‌شود. قابل ذکر است که جهت کمینه شدن اثرات غیر قابل کنترل، آزمایش‌ها به طور کاملاً تصادفی انجام می‌شود. مجموعاً ۴۸ آزمایش در محیط آزمایشگاهی با توالی به‌دست آمده از تولید اعداد تصادفی صورت گرفته و نتایج متغیرهای پاسخ زمان آغشته‌پذیری و هزینه تولید در جداول ثبت گردید. برای نمونه، جدول ۲ پاسخ آزمایشات در حالت استفاده از رزین نوع اول را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقادیر متغیرهای پاسخ به ازای آزمایش‌های مختلف در صورت استفاده از رزین نوع A.

Table 2- Various tests response to various tests when using type A resin.

پاسخ هزینه (ریال)	پاسخ زمان (ثانیه)	نسبت وزنی کاتالیزور	نسبت وزنی رزین	ترتیب آزمایش	شماره آزمایش
13063	17.55	-1	-1	9	1
13068	17.86	-1	-1	1	2
13627	15.11	-1	1	6	3
13624	14.94	-1	1	10	4

جدول ۲- ادامه.

Table 2- Continued.

شماره آزمایش	ترتیب آزمایش	نسبت وزنی رزین	نسبت وزنی کاتالیزور	پاسخ زمان (ثانیه)	پاسخ هزینه (ریال)
5	12	1	1	13.65	17605
6	2	1	-1	14.36	13615
7	15	-1	1	15.84	17046
8	5	-1	-1	17.42	13061
9	13	-1	-1	18.23	13073
10	14	1	-1	15.16	13627
11	16	1	1	13.89	17608
12	7	-1	1	16.42	17038
13	3	-1	1	16.03	17039
14	8	1	1	14.01	17610
15	11	-1	1	15.91	17040
16	4	1	1	14.44	17617

لازم به ذکر است جهت محاسبه هزینه از رابطه زیر بهره گرفته شده است:

$$(a + (b \times 15)) = \text{هزینه عملیات به ازای یک واحد (ریال)}$$

a: هزینه مواد مصرفی برای آغشته کردن یک واحد محصول (ریال).

b: زمان انجام عملیات به ازای یک واحد محصول (برحسب ثانیه).

۱۵: ارزش ریالی هر ثانیه از زمان ماشین مورد نظر.

تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم افزار *Minitab16* انجام شده است. کلیه محاسبات مربوط به تخمین اثرات مختلف، مجموع مربعات و درجه آزادی برای دو پاسخ زمان و هزینه برای سطوح مختلف عامل کیفی (انوع رزین) انجام شده است. در این مقاله، روند مراحل طی شده برای یکی از سطوح عامل کیفی (رزین نوع A) انجام شده و در ادامه آمده است، و برای سایر سطوح به صورت مشابه انجام گرفته است.

۱-۳-۱- مدل های رگرسیون برازش شده برای متغیرهای پاسخ در حالت استفاده از رزین نوع A

نمودار اثرات اصلی در متغیر پاسخ زمان آغشته پذیری (پیوست) نشان می دهد که با افزایش میزان درصد وزنی رزین و درصد کاتالیزور زمان آغشته پذیری کاهش می یابد و تغییرات کاهش در مورد درصد وزنی رزین نسبت به درصد کاتالیزور بیش تر است. بررسی این نمودار در متغیر پاسخ هزینه عکس نتایج زمان را نشان می دهد و در حالت کلی می توان گفت که نتایج دو متغیر پاسخ زمان و هزینه نسبت به یکدیگر در جهت مخالف قرار دارند. یعنی به نوعی پاسخ ها در تعارض با هم هستند. با توجه به جدول های تحلیل آنالیز واریانس به دست آمده (جدول های ۳ و ۴) با خطای ۵٪ هر دو عامل و اثرات متقابل بین دو عامل موثر شناخته شده؛ بنابراین، مدل به دست آمده برای متغیر پاسخ زمان آغشته پذیری به صورت زیر است:

$$T_1(X) = -1.231x_2 - 0.625x_3 + 0.205x_2x_3 + 15.676.$$

و مدل رگرسیون بدست آمده برای متغیر پاسخ هزینه ترکیب مواد یک واحد محصول به صورت زیر است:

$$C_1(X) = 281.6x_2 + 1990.3x_3 + 3.1x_2x_3 + 15335.1.$$

جدول ۲ (که فرض صفر بودن هر یک از ضریب ها را جداگانه تست می کند) نسبت P و T نظیر آن را برای هر یک از ضریب ها نشان می دهد. از آن چه در جدول، در مورد متغیرها مشاهده می شود در می یابیم که ضریب های x_2 ، x_3 و x_2x_3 متفاوت از صفر است؛ بنابراین، همه ضریب ها در سطح معنی دار حایز اهمیت هستند. **جدول ۳** (که فرضیه صفر بودن همه ضریب ها را تست می کند) نسبت F را معادل ۱۰۱/۱۳ گزارش

می‌دهد. مقدار P نظیر آن برابر با $0/000$ است، که می‌توانیم نتیجه بگیریم که حداقل یکی از ضریب‌ها در سطح معنی‌دار مطلوب مخالف صفر است؛ بنابراین، این دو جدول تناقضی با یکدیگر ندارند. این مدل 94% از نوسان متغیرها را تشریح می‌کند. نظر به این‌که در آزمایش تکرار به کار رفته است، می‌توان آزمون مطلوبیت تابع پاسخ را اجرا کرد که با توجه به نتایج تجزیه واریانس برای فقدان آزمون برازش نتیجه می‌گیریم که تابع پاسخ مناسب است ($P\text{-value}=0$)؛ بنابراین، نیازی به در نظر گرفتن اثر درجه دوم درصد رزین و درصد کاتالیزور برای مدل و پیچیده کردن ماهیت تابع پاسخ برای تجزیه و تحلیل نیست.

در سایر موارد آزمایش نیز این تحلیل انجام گرفته شده است و با توجه به مناسب بودن مدل‌های به‌دست آمده اثر درجه دوم عوامل کمی به مدل افزوده نشده است.

جدول ۳- تحلیل واریانس عوامل برای متغیر پاسخ زمان آغشته‌پذیری رزین نوع A.

Table 3- Analysis of variance of factors for the response variable of impregnation time of type A resin.

معناداری	آماره‌ی F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع تغییرات
بلی	4.27	3.4	1	3.4	$(X_2)^*$
بلی	52.47	41.86	1	41.86	$(X_3)^{**}$
بلی	125.22	125.22	1	125.22	$(X_2 * X_3)$
--	--	0.8	12	9.57	خطا (E)
--	--	--	15	180.5	کل (T)

* X_2 : نسبت ترکیب وزنی رزین به الیاف شیشه.

** X_3 : نسبت ترکیب وزنی کاتالیزور به الیاف شیشه.

جدول ۴- تحلیل واریانس عوامل برای متغیر پاسخ هزینه ترکیب مواد در رزین A.

Table 4- Analysis of variance of factors for the response variable cost of material composition in resin A.

معناداری	آماره‌ی F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع تغییرات
بلی	52759	1267313	1	1267313	$(X_2)^*$
بلی	2638937	63389463	1	63389463	$(X_3)^{**}$
بلی	6.77	162	1	162	$(X_2 * X_3)$
--	--	24	12	288	خطا (E)
--	--	--	15	64657227	کل (T)

* X_2 : نسبت ترکیب وزنی رزین به الیاف شیشه.

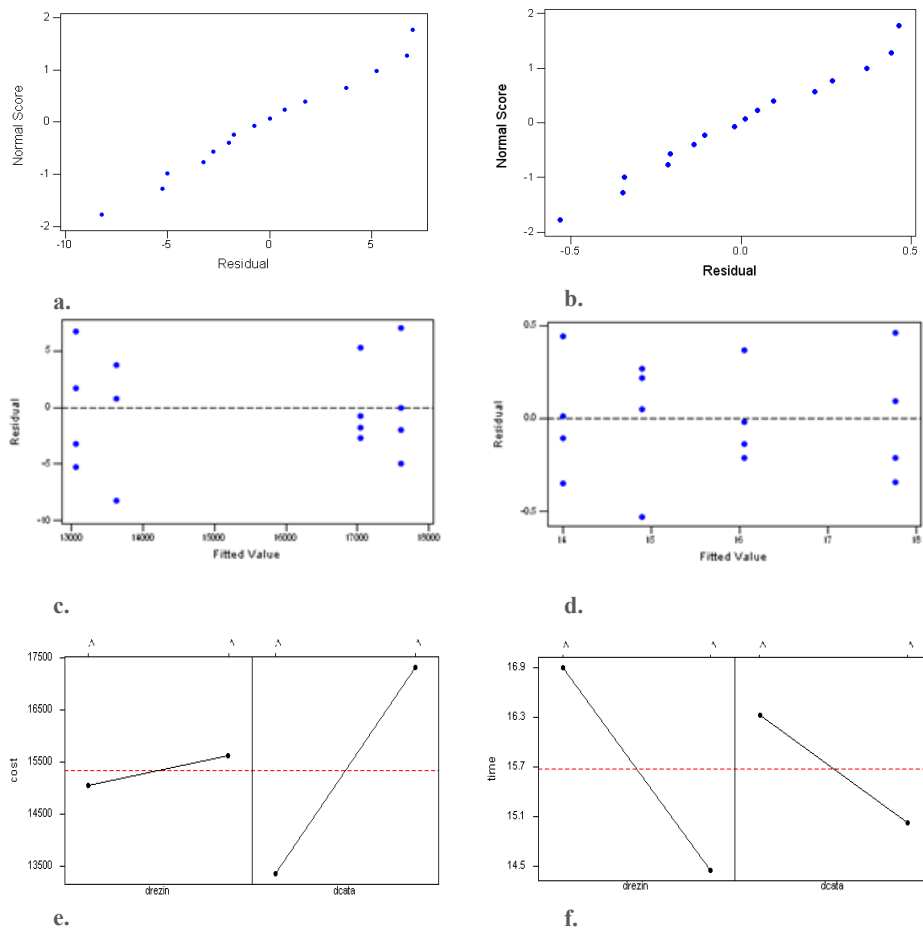
** X_3 : نسبت ترکیب وزنی کاتالیزور به الیاف شیشه.

۲-۳-۱- بررسی کفایت مدل

با فرض این‌که خطاها دارای توزیع نرمال با میانگین صفر باشد با رسم نمودار احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها در صورتی که این نمودار به خط راست متمایل باشد، می‌توان کفایت مدل را سنجید [2]؛ بنابراین، با توجه به نمودارهای شکل ۲ ضمیمه، می‌توانه کفایت مدل برازش شده پی‌برد. در تمام آزمایش‌های انجام شده (سه نوع رزین) نمودارهای مذکور کفایت مدل را نشان می‌دهند. ما به شیوه مشابه مدل‌های رگرسیون توابع زمان آغشته‌پذیری و هزینه آغشته‌پذیری را در صورت استفاده از رزین نوع B ($C_2(x)$, $T_2(x)$) و رزین نوع C ($C_3(x)$, $T_3(x)$) انجام داده و به کفایت مدل را صحت‌گذاری نموده‌ایم، البته در این مقاله به دلیل محدودیت تعداد صفحات و جلوگیری از افزایش بی‌مورد حجم محاسبات از نگارش محاسبات و نمودارهای مربوطه صرف نظر می‌کنیم.

۴-۱- بررسی واریانس خطا

در صورت بی ساختار بودن نمودار پراکنش مشاهده شده (ei) در مقابل مقادیر پاسخ اول (زمان) و پاسخ دوم (هزینه) می‌پذیریم (شکل ۱) مدل صحیح است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نمودارهای پراکنش مشاهده شده در هر سه نوع رزین روند خاصی را نشان نمی‌دهند در نتیجه مدل‌های به‌دست آمده معتبر می‌باشند. منظور از بی ساختار بودن این است که مقادیر مانده‌ها با افزایش مقادیر $\bar{Y}_i$ به‌گونه قابل توجهی افزایش نیابد، در غیر این صورت واریانس خطا ثابت نیست و نسبت به اعتبار فرض ثابت بودن واریانس در مدل تردید وجود خواهد داشت.



شکل ۳- نمودارهای ترسیم شده جهت بررسی کفایت مدل در حالت استفاده از رزین نوع A؛ الف. نمودار نقطه‌ای احتمال نرمال برای متغیر پاسخ زمان آغشته‌پذیری ($T1(x)$)، ب. نمودار نقطه‌ای احتمال نرمال برای متغیر پاسخ هزینه تولید یک واحد محصول ($C1(x)$)، پ. نمودار پراکنش مشاهده شده (ei) در مقابل مقادیر پاسخ دوم (هزینه)، ت. نمودار پراکنش مشاهده شده (ei) در مقابل مقادیر پاسخ اول (زمان)، ث. نمودار اثرات اصلی و متقابل بر هزینه، ج. نمودار اثرات اصلی و متقابل بر زمان.

Figure 3- Graphs drawn to check the adequacy of the model in the case of using type A resin; a. Normal probability scatter plot for the response variable of impregnation time ($T1(x)$), b. Normal probability scatter plot for the response variable of the cost of producing a unit of product ($C1(x)$), c. Observed scatter plot (ei) versus the values of the second response (cost), d. Observed scatter plot (ei) versus the values of the first response (time), e. Main and interaction effects plot on cost, f. Main and interaction effects plot on time.

۲- مدل‌سازی و بهینه‌سازی مساله

با توجه به مدل‌های رگرسیون برازش شده و هدف مساله که مینیمم کردن توابع هزینه و زمان آغشته‌پذیری می‌باشد، مساله را می‌توان نسبت به سطوح مختلف عامل اول (نوع رزین) که یک عامل کیفی می‌باشد به سه مساله دو هدفه غیرخطی تبدیل کرد، که جواب بهینه مساله اصلی برابر با بهترین جواب حاصل از حل سه مساله فرعی خواهد بود ممکن لازم به دنبال کاهش و کمینه کردن دو تابع هدف هستیم. در این صورت به ازای $i=1,2,3$ خواهیم داشت:

که در مساله (۱) $i=1,2,3$ به ترتیب نمایانگر توابع هدف در صورت استفاده از رزین نوع A, B, C می‌باشد. با استفاده از روش LP -متریک [8] مساله دو هدفه غیرخطی بالا به مساله زیر قابل تبدیل است.

$$\begin{aligned} \text{Min } z &= T_i(x), \\ i &= 1, 2, 3, \\ \text{Min } z &= C_i(x), \\ \text{s. t.} \\ 0 &\leq x_1 \leq 1, \\ 0 &\leq x_2 \leq 1, \\ x_1 &\geq 0, x_2 \geq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

W_1 و W_2 وزن اهمیت نسبی معیارها نسبت به هم است که در مرحله اول برابر در نظر گرفته شده است، T^* و C^* مقادیر مطلوب و ایده‌آل مقادیر توابع هدف زمان آغشته‌پذیری و هزینه آغشته‌پذیری می‌باشند با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از مقایسات انجام شده توسط مصرف‌کننده‌های محصول و همچنین استانداردهای موجود در این زمینه و نظر کارشناسان خبره مقادیر مطلوب برای پارامترهای T^* و C^* عبارت‌اند از: مقدار ۱۲ ثانیه برای زمان و برای هزینه مبلغ ۱۲۰۰۰ ریال می‌باشد؛ بنابراین، مدل (۲) به مدل زیر تبدیل خواهد شد.

$$\begin{aligned} \text{Min } z &= W_1 \left(\frac{T^* - T_i(x)}{T^*} \right)^2 + W_2 \left(\frac{C^* - C_i(x)}{C^*} \right)^2, \\ \text{s. t.} \\ 0 &\leq x_1 \leq 1, \\ 0 &\leq x_2 \leq 1, \\ x_1 &\geq 0, x_2 \geq 0, i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (2)$$

در صورتی که بتوانیم تابع هدف فوق را مینیمم نماییم یعنی توانسته‌ایم فاصله مقادیر مطلوب را از مقادیر پیش‌بینی شده تحت آزمایش i ام به حداقل برسانیم. با حل مدل (۳) با استفاده از نرم افزار $LINGO$ در صورتی که اهمیت نسبی توابع هدف زمان آغشته‌پذیری و هزینه آغشته‌پذیری برابر فرض شود. مقدار تابع هدف مربوط به رزین نوع A نسبت به رزین نوع B و C بهتر خواهد بود ($i=I$)؛ بنابراین، جواب بهینه مساله به‌صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} \text{Min } z &= W_1 \left(\frac{12 - T_i(x)}{12} \right)^2 + W_2 \left(\frac{12000 - C_i(x)}{12000} \right)^2, \\ \text{s. t.} \\ 0 &\leq x_1 \leq 1, \\ 0 &\leq x_2 \leq 1, \\ x_1 &\geq 0, x_2 \geq 0, i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (3)$$

به‌عبارت دیگر در صورتی معیارهای هزینه آغشته‌پذیری و زمان آغشته‌پذیری دارای وزن یکسانی باشند بهتر است از رزین نوع A با درصد ترکیب وزنی رزین ۸۰٪ و درصد کاتالیزور ۱۰٪ استفاده نمود.

$$X_1^* = 1, X_2^* = 0.8, X_3^* = 0.1.$$

۳- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله جهت تعیین نوع رابطه بین سه متغیر مستقل (عامل) با متغیرهای پاسخ زمان آغشته‌پذیری و هزینه آغشته‌پذیری مت سوزنی با رزین، ابتدا از تکنیک طراحی آزمایش‌ها استفاده گردید. (نوع طرح به کار گرفته شده طرح عاملی 2^2 با چهار تکرار) که در سه سطح عامل اول که از نوع وصفی بود (سه نوع رزین) آزمایش گردید. سپس با استفاده از جدول تحلیل واریانس در سطح $\alpha=0.05$ تابع رگرسیون مناسب برای دو متغیر پاسخ

زمان و هزینه برآزش گردید، با توجه به در نظر گرفتن همزمان دو متغیر پاسخ از روش LP -متریک حل مدل چند هدفه استفاده شد. نتیجه به دست آمده از حل سه تابع مدل (به ازای رزین نوع A, B, C) نشان می‌دهد در صورتی که در صورتی که اهمیت نسبی توابع معیارهای زمان آغشته‌پذیری و هزینه آغشته‌پذیری برابر فرض شود، استفاده از رزین نوع A با درصد ترکیب وزنی رزین ۸۰٪ و درصد کاتالیزور ۱۰٪ استفاده بهترین تصمیم خواهد بود.

برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود با توجه مبهم بودن وزن‌های نسبی در شرایط واقعی مساله را در شرایطی که این پارامتر فازی در نظر گرفته شده باشد توسعه داد و نتیجه را در شرایط مختلف (به ازای وزن‌های نسبی فازی مختلف) تحلیل حساسیت نمود.

منابع

- [1] Rahimi, M., & Hosseini, A. (2022). Application of polymer composites in automotive industry. *Journal of polymer engineering*, 42(5), 123–135. (In Persian). <https://doi.org/10.1002/poly.12345>
- [2] Gassan, J., & Bledzki, A. K. (1999). Possibilities for improving the mechanical properties of jute/epoxy composites by alkali treatment of fibres. *Composites science and technology*, 59(9), 1303–1309. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00042-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00042-1)
- [3] Alireza Jabbari, A. K. (2017). *Design and analysis of experiments*. Academic publishing center.
- [4] Likedideh, S. H. R., & Akhavan Niaki, S. T. (2003). Application of genetic algorithm in optimization of multiple-answer statistical problems. *The third national industrial engineering conference*. (In Persian). Tehran, Iran. Civilica. <https://civilica.com/doc/17763>
- [5] Ferraresi, V. A. (2009). Comparison between genetic algorithms and response surface methodology in GMAW welding optimization. *Journal of materials processing technology*, 209(6), 2907–2917. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782004000100005>
- [6] Chao, P. Y., & Hwang, Y. D. (1997). An improved Taguchi's method in design of experiments for milling CFRP composite. *International journal of production research*, 35(1), 51–66. <https://doi.org/10.1080/002075497195975>
- [7] Lin, T., & Chananda, B. (2003). Quality improvement of an injection-molded product using design of experiments: A case study. *Quality engineering*, 16(1), 99–104. <https://doi.org/10.1081/QEN-120020776>
- [8] Alagumurthi, N., Palaniradja, K., & Soundararajan, V. (2006). Optimization of grinding process through design of experiment (DOE)—A comparative study. *Materials and manufacturing processes*, 21(1), 19–21. <https://doi.org/10.1080/AMP-200060605>
- [9] Yang, Y.-K. (2006). Optimization of injection-molding process of short glass fiber and polytetrafluoroethylene reinforced polycarbonate composites via design of experiments method: A case study. *Materials and manufacturing processes*, 21(8), 915–921. <https://doi.org/10.1080/10426910600837822>
- [10] Amiri, Maghsood, Gheshlaghi, K., Kioumars, H., Rashidi, R., and Haji Abednayini, M. (2007). Application of design of experiments, response procedure methodology and multi-objective decision making in improving effective quality characteristics: Case studies on the rear fender sheet stretching process of pride 141 and plastic injection molding pR. *Faculty of engineering, university of tehran*, 41(7), 835–848. (In Persian). <https://sid.ir/paper/14290/fa>