مجله علوم و تکنولوژی پلیمر ، سال هجدهم،
شماره ۳، صفحه ۱۴۲-۱۳۵، ۱۳۸۴
ISSN : 1016-3255

بهینه سازی قیمت - کیفیت در تولید تسمه نقاله دارای کاربرد عمومی با استفاده از روش تاگوچی همراه با روش OEC

Optimization of Cost-properties in Production of a General Purpose Conveyer Belt Using Taguchi Method with Overall Evaluation Criteria Method

احمد رمضانی سعادت آبادی*، زهرا کماکانی
تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، گروه مهندسی پلیمر،
صندوق پستی ۱۱۳۶۵/۹۳۱۳

دریافت: ۸۲/۱۰/۸، پذیرش: ۸۴/۲/۲۵

چکیده

برای بهینه‌سازی چهار ویژگی زمان پخت، قیمت، مقاومت سایشی و مقاومت کششی آمیزه رویه تسمه نقاله‌هایی که دارای کاربرد عمومی هستند از روش آماری طراحی آزمایش (روش تاگوچی) همراه با روش ملاک ارزیابی کلی (OEC) استفاده شد. برای انجام این امر با توجه به وجود ۱۴ عامل اصلی و ۱۲ اثر متقابل انتخابی قابل پیش‌بینی انجام کار با استفاده از آرایه متعامد L۳۲ (هرکدام از عوامل در دو سطح در نظر گرفته شدند) انجام شد. چهار ویژگی ذکر شده برای تمام نمونه های ساخته شده در این مرحله اندازه گیری شدند و با انجام عملیات آماری لازم روی آنها مشخص شد که آثار متقابل در نظرگرفته شده ناچیز است. بدین ترتیب، در مرحله اول از ۱۴ عامل اصلی، ۹ عامل بهینه شدند و ۵ عامل نیز برای کار بیشتر روی آنها به مرحله بعدی که استفاده از آرایه متعامد L۱۶ بود، منتقل شدند. در مرحله دوم با استفاده از عملیات آماری لازم از ۵ عامل باقیمانده، ۱ عامل بهینه و ۴ عامل دیگر نیز برای بررسی بیشتر به مرحله بعدی که استفاده از آرایه متعامد L۹ بود، ارسال شدند. در نهایت، فرمولبندی بهینه‌ای بدست آمد که ضمن دارا بودن خواص فیزیکی و مکانیکی قابل توجهی بهتر از نمونه مبنا، قیمت تسمه نقاله را نیز بیش از ۵۰ درصد کاهش داد که بخشی از این امر ناشی از کاهش قیمت مواد اولیه آمیزه رویه و عمده آن ناشی از افزایش سرعت پخت است که هزینه‌های جاری را بشدت کاهش و تولید را به بیش از دو برابر افزایش می‌دهد. شایان ذکر است که با توجه به محدودیت اعمالی در شرکت تولیدی، در نوع مواد اولیه هیچ تغییری داده نشد و تنها ترکیب درصد اجزا تغییر کردند. در ضمن، برای افزایش دقت، هر کدام از آزمایشها حداقل دو مرتبه تکرار شدند. بنابراین، برای سه مرحله حداقل ۱۱۴ نمونه ساخته و تمام آزمایشها مورد نظر روی آنها انجام شد.

واژه‌های کلیدی

آمیزه، تسمه نقاله، زمان پخت، قیمت، تاگوچی

Key Words

compound, conveyer belt, curing time, cost, taguchi,

مقدمه

مسائل اقتصادی و به عبارتی دیگر مسأله کاهش قیمت در صنایع لاستیک سازی با توجه به وجود رقابت شدید در این صنایع از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به اینکه در فرایندهای متداول بیشتر هزینه تمام شده محصول، مربوط به هزینه مواد اولیه و فرایند تولید است و در فرایند تولید تسمه نقاله، گلوگاه خط تولید برای افزایش تولید و کاهش هزینه ها سرعت پخت آمیزه رویه تسمه نقاله است. از این رو، باید زمان پخت آمیزه تا حد ممکن کاهش داده شود تا سرعت پخت افزایش یابد. از آنجا که تسمه نقاله دارای لایه های زیره، رویه

* مسئول مکاتبات، پیام نگار : Ramazani@sharif.edu

(جنس آمیزه رویه و زیره معمولاً یکسان است) و لایه های میانی به نام آستر است و با توجه به اینکه معمولا ضخامت رویه بیشتر از لایه های دیگر است (ضخامت رویه در نمونه مورد بحث در حد mm ۵ و زیره و آستر هر کدام mm ۲/۵ است) زمان پخت این لایه تعیین کننده اصلی زمان پخت تسمه نقاله است. پس، اگر بتوان با حفظ کیفیت این لایه سرعت پخت آن را افزایش داد، می توان گامی اساسی برای افزایش تولید و کاهش هزینه ها برداشت.

کاربرد تسمه نقاله ها می تواند متفاوت باشد. گاهی موادی که روی تسمه نقاله قرار می گیرند دارای دمای نسبتاً زیادی هستند که باید از لاستیکهای مقاوم در برابر گرما مانند لاستیکهای فلوئوردار یا کلردار (هایپالون) یا در موارد غیرحاد اتیلن - پروپیلن - دی ان مونومر (EPDM) استفاده کرد [۱]. در مواردی که رویه تسمه در تماس با مواد روغنی قرار می گیرد جنس رویه از آمیزه ای با پایه لاستیکهای مقاوم در برابر روغن مثل وایتون یا NBR انتخاب می شود [۱]. تسمه نقاله ای که در این پژوهش مورد توجه بوده است با توجه به محیط بکارگیری آن می تواند جزء تسمه نقاله هایی با کاربری عمومی بشمار آید. چون عمده کاربری آن در محیطهای با تنش مکانیکی زیاد است، این تسمه باید خواص فیزیکی و مکانیکی نسبتاً خوبی داشته باشد. با توجه به ویژگیهای مورد نیاز برای تسمه و نیز قیمت مواد و سرعت پخت آمیزه رویه تسمه از آلیاژ کائوچوهای بوتادی ان، (BR) طبیعی (NR) و استیرن بوتادی ان (SBR) استفاده می شود [۱].

شایان ذکر است، اگر چه صنعت ساخت تسمه نقاله صنعت نسبتاً وسیع و با ارزش افزوده زیاد است. اما، با توجه به اینکه کارهای پژوهشی که معمولاً در زمینه بهینه سازی آمیزه انجام می شود مربوط به مراکز و شرکتهای لاستیک سازی است و به دلیل مسائل رقابتی که وجود دارد معمولاً از انتشار نتایج آن جلوگیری می شود، بهینه سازی فرمولبندی لاستیک در مراجع کمتری چاپ شده است. بنابراین، یافتن مراجع قابل دسترس در مورد کارهای مشابه با وجود تلاش زیاد امکان پذیر نبوده است.

در این پروژه، در مرحله اول از فرمول پایه ای که قبلاً با روش سعی و خطا بهینه سازی شده بود و در شروع طرح در یکی از مراکز تولید تسمه در حجم زیاد مصرف می شد به عنوان آمیزه پایه رویه استفاده شد. برای بهینه سازی فرمولبندی بکار رفته به شکلی که حین بهبود خواص مکانیکی یا حفظ آن در سطح کنونی قیمت محصول را تا حد ممکن کاهش دهد، ابتدا روشهای مختلف آماری موجود بررسی شد و از میان آنها روش تاگوچی [۲،۳] که هم از نظر قابلیت و هم از نظر تعداد آزمایشهای مورد نیاز به سایر روشهای بهینه سازی طراحی آزمایش مانند تک فاکتوریل و فاکتوریل کامل برتری دارد، استفاده شد [۳]. در جدول ۱ مقایسه ای بین تعداد آزمایشها در دو روش تاگوچی و فاکتوریل کامل انجام شده است و نشان دهنده آن است که تعداد آزمایشها در روش فاکتوریل کامل و تاگوچی بویژه با زیاد شدن متغیرها قابل مقایسه نیست. چنان که وقتی تعداد متغیرها برابر ۱۴ است، تعداد آزمایشها در روش فاکتوریل کامل ۵۱۲ برابر تعداد آزمایشها در روش تاگوچی است که نشانگر برتری روش تاگوچی از نظر کاهش تعداد آزمایشها و در نتیجه کاهش هزینه انجام آزمایشهاست. روش تاگوچی همان روش طراحی آزمایش است که توسط دکتر تاگوچی مطرح شده است [۲]. این روش اثر همزمان چند متغیر را روی بازدهی بررسی می کند. با این روش می توان طراحی طرحهای بهینه سازی فرایند یا تولید را انجام داد. این روش نیاز به برنامه ریزی دقیق، تنظیم با احتیاط آزمایش و مهارت در تحلیل نتایج دارد. از طرف دیگر با توجه به اینکه روش تاگوچی در یک بار انجام کل روش فقط قابلیت بهینه سازی یک ویژگی را دارد، بنابراین برای بهینه سازیی چهار ویژگی مورد نظر ابتدا از روش OEC (overall evaluation criteria) [۴] که این چهار ویژگی را تبدیل به یک ویژگی بدون بعد می کند، استفاده شد. سپس، روش تاگوچی روی عامل حاصل پیاده شد.

تجربی

مواد و دستگاهها

مشخصات موادی که در این طرح برای ساخت آمیزه رویه تسمه نقاله استفاده شد با نام کشور سازنده آن در جدول ۲ آورده شده است. برای اختلاط مواد از غلتک آزمایشگاهی و برای تعیین زمان پخت از منحنی رئومتر تجاری استفاده شد.

طرح آزمایشهای آماری به روش تاگوچی

همان طور که قبلاً ذکر شد برای روش تاگوچی تعداد آزمایشها نسبت به سایر روشهای آماری متداول کمتر بوده و آثار متقابل بین عوامل نیز

جدول ۱ مقایسه بین تعداد آزمایشها در دو روش تاگوچی و فاکتوریل کامل.

تعداد عوامل	تعداد سطوح	تعداد آزمایشها در تاگوچی	تعداد آزمایشها در فاکتوریل کامل
۱۴	۲	۳۲	$۲^{۱۴} = ۱۶۳۸۴$
۵	۴	۱۶	$۴^{۵} = ۱۰۲۴$
۴	۳	۹	$۳^{۴} = ۸۱$

جدول ۲ مواد استفاده شده در این پژوهش.

مواد	نوع	کشور و شرکت سازنده
SBR	۱۵۰۲	ایران (پتروشیمی اراک)
BR	۱۲۲۰	ایران (پتروشیمی اراک)
کائوچوی SMR	۲۰	مالزی
دوده N-۳۳۰	۳۳۰	کربن ایران
روی اکسید (ZnO)	-	ایران
استئاریک اسید (SA)	-	ایران
ضد اکسنده	۴۰۱۰	بایر آلمان
ضد اکسنده	HS	بایر آلمان
گوگرد (S)	-	ایران
شتاب دهنده CBS*	-	بایر آلمان
شتاب دهنده DPG*	-	بایر آلمان
تاخیر انداز PVI	-	بایر آلمان
روغن	۲۵۰	ایران (نفت بهران)
موم	-	ایران

* CBS: سیکلو بنزو سولفونامید و DPG: دی فنیل گوانیدین.

جدول ۳ فرمولبندی پایه برای تولید رویه تسمه نقاله در L ۳۲.

ردیف	نشانه	عامل	L۱ (g)	L۱ (phr)
۱	A	SBR	۱۸۳/۰۲	۶۴/۹
۲	B	SMR	۴۰/۱۱	۱۴/۲
۳	C	BR	۵۹/۰۳	۲۰/۹
۴	D	N-۳۳۰	۱۳۷/۲۶	۴۸/۶
۵	E	ZnO	۱۳/۳۹	۴/۷۴
۶	F	SA	۳/۳	۱/۱۷
۷	G	روغن	۴۲/۳۷	۱۵
۸	H	ضد اکسنده ۴۰۱۰	۲/۸۲	۱
۹	I	موم	۵/۶۵	۲
۱۰	J	ضد اکسنده HS	۱/۴۱	۰/۵
۱۱	K	S	۴/۸	۱/۷
۱۲	L	CBS	۵/۰۸	۱/۸
۱۳	M	DPG	۰/۳۴	۰/۱۲
۱۴	N	PVI	۱/۴۱	۰/۵

براحتی قابل مطالعه است. این روش با استفاده از آرایه‌های متعامد (orthogonal arrays) و اثری که سطح هر عامل روی پاسخ از خود به جا می‌گذارد، شکل گرفته است. نکته قابل توجه اینکه لزوماً نقطه بهینه سامانه که هدف مطالعه است، در میان آزمایشهای پیشنهادی در سیر انجام این روش قرار ندارد، بلکه با مطالعه نتایج آزمایشهای پیشنهاد شده می‌توان سطح بهینه را برای اجزا پیش‌بینی کرد و فرمولبندی مربوط به آن را پیشنهاد داد [۲،۵].

روشها و نتایج و بحث

با توجه به تعداد متغیرهای انتخابی سامانه، در مرحله ابتدایی باید از آرایه متعامد L ۳۲ استفاده شود و برای هر عامل دو سطح انتخابی از آنها مورد نیاز بود. یکی از سطوح انتخابی برای بکارگیری در این مرحله از روش تاگوچی، فرمول آرایه شده در جدول ۳ است که هم اکنون به عنوان فرمولبندی مناسب است که با روش سعی و خطا بهینه شده است و در یک شرکت داخلی سازنده تسمه نقاله استفاده می‌شود. هدف از این طرح بهینه سازی کامل آن است. سطح دیگر اجزای فرمول، با توجه به شناخت اجمالی از رفتار هر یک از اجزای آن با توجه به تغییراتی که هر کدام از مواد ممکن بود در نتیجه آزمایشها بگذارند، انتخاب شدند. لازم به ذکر است که امکان انتخاب سطوح بطور آزاد در مرحله ابتدایی وجود داشت، اما با توجه به اینکه از قبل فرمولبندی در دسترس بود که مورد بهینه‌سازی اولیه قرارگرفته و در خط تولید قرار داشت، انتخاب آن به عنوان یکی از سطوح، کاملاً مقعول بنظر می‌رسید و می‌توانست در رسیدن به شرایط بهینه، مراحل کار را کاهش دهد.

نکته دیگری که باید به آن توجه شود، این است که معمولاً روشهای مختلف بهینه‌سازی آزمایشها، تنها می‌توانند یک ویژگی را به عنوان ویژگی هدف بهینه کنند. با توجه به اینکه اهداف جداگانه و متضادی مدنظر است باید به طوری این اهداف درهم ادغام شود. برای این منظور همان‌طور که در مقدمه نیز ذکر شد از روش OEC برای انجام این مهم استفاده شد. در روش OEC برای تبدیل عوامل مختلف هدف، به یک عامل، به هریک از عوامل مورد نظر بسته به مقدار اهمیت آنها ضریب خاصی داده می‌شود. در این پژوهش، چهار ویژگی مورد نظر برای بهینه‌سازی و درجه اهمیتی که برای آنها منظور شده است عبارتند از زمان پخت ۳۵ درصد، قیمت ۳۵ درصد، سایش ۱۵ درصد و مقاومت کششی ۱۵ درصد. بدیهی است امکان تغییر ضرایب یاد شده با توجه به اهمیتی که برای پژوهشگر وجود خواهد داشت، امکانپذیر است. اما، آنچه مسلم است نتایج نهایی تحلیل تنها مشخص خواهد کرد که ضرایب اهمیت عوامل یاد شده بخوبی انتخاب شده‌اند یا نه که در حالت برآورده نشدن تمام انتظارات پژوهشگر، باید درجه اهمیت عوامل تغییر داده شده و آزمایشها تکرار شوند. با توجه به ماهیت دو ویژگی اول این دو ویژگی

باید تا حد امکان کاهش داده شوند در جایی که دو خاصیت دیگر می‌توانند در حد موجود باقیمانده یا در حالت ایده‌آل افزایش داده شوند.

با دقت در فرمولبندی مربوط به آمیزه رویه تسمه نقاله می‌توان در آن ۱۴ عامل مهم و ۱۲ اثر متقابل قابل پیش‌بینی را مشخص کرد که برای بررسی آنها بر اساس روش تاگوچی در دو سطح از آرایه متعامد L۳۲ باید استفاده شود. لازم به ذکر است که به علت حجم زیاد آرایه متعامد L۳۲ که بیش از یک صفحه است از آوردن آن و نتایج کلی حاصل از آن خوداری شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد باید چهار ویژگی مورد نظر به طوری تبدیل به یک ویژگی شوند. افزون بر این با توجه به عدم یکسان بودن این چهار ویژگی از نظر ابعادی، آنها باید به نوعی با هم ادغام شوند که نتیجه یک عدد بدون بعد باشد تا امکان مقایسه نتایج آزمونهای گوناگون با هم فراهم شود. پس، اولین مرحله محاسبات باید بدست آوردن مقدار OEC باشد که بر حسب درصد بیان می‌شود. مقدار OEC با توجه به مرجع [۵] از معادله (۱) قابل محاسبه است:

$$OEC = \sum W_i[\frac{y_i - m}{y_b - y_s}] \qquad (۱)$$

که در این معادله Y_i مقدار عددی حاصل از هر آزمایش برای هر آزمون در کل آزمایشها، y_b و y_s به ترتیب بزرگترین و کوچکترین مقدار پاسخ اندازه‌گیری شده برای هر آزمون در کل آزمایشها، m مقدار نامطلوب پاسخ اندازه‌گیری شده برای هر آزمون و W_i درصد اهمیت در نظر گرفته شده برای هریک از پاسخهای اندازه‌گیری شده در کل آزمایشهاست.

شایان ذکر است که معادله (۱) زمانی صحیح است که بازدهی هرچه بیشتر یا به عبارت دیگر کمیت بزرگتر مورد نظر باشد. در غیر این حالت جمله‌ای که برای آن کمیت کوچکتر، مطلوبتر است باید قبل از ضرب آن در درصد اهمیت از ۱ کم شود. حال با توجه به اینکه آزمایشها دو بار تکرار شده است باید نسبت S/N (signal to noise ratio) که نتایج آن نشانگر پاسخ سامانه به عوامل غیر قابل کنترل است و معیاری مناسب برای مشخص کردن شرایط بهینه‌ای است که بهترین پاسخ را با کمترین واریانس می‌دهد، محاسبه شود. برای محاسبه S/N باید ابتدا میانگین مربع انحرافها (mean square deviation, MSD) را به کمک معادله (۲) محاسبه کرد، سپس نسبت S/N را با معادله (۳) برای بکارگیری در روش تاگوچی بدست آورد [۵]:

$$MSD = \frac{\sum_{i=1}^{r}(\frac{1}{OEC})_i^2}{2} \qquad (۲)$$

$$S/N = -10\log(MSD) \qquad (۳)$$

پس از اینکه با توجه به آزمایشهای انجام شده با دو بار تکرار مقدار S/N محاسبه شد، امکان محاسبه آثار اصلی عوامل که بیانگر آن است که زمانی که سطوح عاملی تغییر می‌کند به چه مقدار روی بازدهی مؤثر است با استفاده از معادله (۴) امکان پذیر می‌شود [۵]:

$$\text{اثر اصلی} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(S/N)_i}{n} \qquad (۴)$$

که در این معادله n تعداد سطوح عوامل است و محاسبه آثار اصلی با توجه به آرایه L۳۲ انجام می‌شود.

برای تسریع در تجزیه و تحلیل آماری از نرم افزار QUALITE-۴ که علاوه بر محاسبه مقادیر S/N، اثر اصلی را نیز محاسبه می‌کند، استفاده شد [۶]. شرایط بهینه مسأله با توجه به اینکه مقدار بیشتر، بهتر است، به کمک نرم‌افزار یاد شده معین و در جدول ۴ آورده شده‌است. لازم به تذکر است که اگر چه متغیرهای پاسخ دارای رفتاری متفاوت هستند و برای بعضی از آنها مقدار بیشینه و برای بعضی مقدار کمینه و برای مابقی مقدار هدف مدنظر است، اما برای همه آنها با استفاده از روش OEC همان‌طور که در قبل توضیح داده شد، شرایطی فراهم شده که یکسان عمل کنند.

در جدول ۴ مشاهده می‌شود که سهم بعضی از عوامل چون B، H، N، J و O قابل توجه بوده، برای بقیه عوامل اندک است. بنابراین می‌توان گفت که عوامل یاد شده در سطح حاصل بهینه شده‌اند و ۹ عامل باقیمانده باید در محاسبات بعدی منظور شوند. حال با استفاده از اعداد جدول ۴ مقدار متوسط S/N و به کمک معادله (۵) مقدار S/N بهینه یعنی $(S/N)_{exp}$ محاسبه می شود [۵]:

$$(S/N)_{exp} = \overline{S/N} + \sum_i [Y_i - \overline{S/N}] \qquad (۵)$$

در این معادله منظور از Y_i آن پاسخهایی است که مقدار بهینه آنها در L۳۲ مشخص شده است و عوامل با اهمیت هستند (خارج نشده‌اند) [۵]. بدین ترتیب جدول ۵ با توجه به محاسبات ذکر شده شکل می‌گیرد. حال با استفاده از مقادیر جدول ۵ و به کمک نرم افزار QUALITE-۴ با استفاده از معادلات ذکر شده برای OEC، مقدار OEC را که در این حالت OEC_{exp} نامیده می‌شود، محاسبه می‌شود [۵]. سه مقدار محاسبه شده در این حالت به شکل زیر هستند:

$(N/S)_{exp} = ۳۶/۹۳۴$

$MSD = ۰/۰۰۰۲۰۳$

$(OEC)_{exp} = ۷۰/۲۶$

جدول ۴ شرایط بهینه عوامل و سهم هر عامل در تأمین شرایط مورد نظر.

ردیف	نشانه	سطح بهینه	سهم
۱	D	۲	۰/۲۸۷
۲	B	۱	۰/۲۲۴
۳	D*B	۱	-
۴	C	۲	۰/۰۵
۵	C*D	۲	۰/۰۹۹
۶	B*C	۲	-
۷	K*L	۲	۰/۰۲۱
۸	K	۲	۰/۰۱۸
۹	M*E	۲	۰/۰۳۱
۱۰	G	۲	۰/۱۳
۱۱	H	۱	۰/۳۲۴
۱۲	F	۱	۰/۱۰۴
۱۳	L	۲	۰/۱۰۷
۱۴	E	۲	۰/۰۸۲
۱۵	K*M	۲	۰/۱۱۷
۱۶	A	۱	۰/۱۰۸
۱۷	A*D	۱	۰/۱۶
۱۸	I	۲	۰/۰۵۷
۱۹	M*L	۲	۰/۰۸۴
۲۰	N	۲	۰/۷۴۲
۲۱	K*E	۲	۰/۰۶۹
۲۲	M	۲	۰/۰۷۹
۲۳	A*K	۱	۰/۰۳۱
۲۴	J	۱	۰/۱۳۱
۲۵	E*F	۲	۰/۰۷۶
۲۶	L*E	۲	۰/۰۴۷
سهم کل بدست آمده از همه عوامل			۳/۱۷۸
میانگین عملکرد			۳۲/۶۱
نتیجه مورد انتظار در شرایط بهینه بر مبنای S/N			۳۶/۹۳۴

حال مرحله محاسبه C.I. (confidence interval) یعنی تعیین فاصله اطمینان حول این نقطه است که با استفاده از معادله‌های (۶) و (۷) محاسبه می‌شود [۵]:

$$C.I. = \pm \sqrt{\frac{F(1, n) * V_e}{N_e}} \qquad (۶)$$

جدول ۵ ترکیب مواد اولیه در آزمون تأییدیه مربوط به L ۳۲.

ردیف	مواد اولیه	وزن (g)
۱	A	۱۸۳/۰۲
۲	B	۴۰/۱۱
۳	C	۵۶/۳۵
۴	D	۱۵۳/۶۹
۵	E	۱۰/۲۴
۶	F	۳/۳
۷	G	۵۱/۲۳
۸	H	۲/۸۲
۹	I	۲/۵۶
۱۰	J	۷۴۱
۱۱	K	۶/۴
۱۲	L	۵/۶۴
۱۳	M	۰/۷۷
۱۴	N	۰/۵۱۲

که N_e با معادله (۷) قابل محاسبه است [۵]:

$$N_e = \frac{N}{1 + V_T} \qquad (۷)$$

در معادله‌های بالا $F(1,n)$ عدد فیشر، n درجه آزادی خطا بعد از عملیات پولینگ (خارج کردن عواملی که اثرشان از حد مورد نظر کمتر است)، V_T کل درجه آزادی اجزای بکار رفته در تخمین، N_e تعداد کل آزمایشها، V_e واریانس خطا، و N درجه آزادی خطاست.

لازم به ذکر است $F(1,n)$ که آن را با F_i برای هر عامل نمایش می‌دهند که i نشان‌دهنده عامل iام است، بیانگر نسبت واریانس هر عامل به واریانس عامل کلی خطاست. نسبت یاد شده برای تعیین مقدار اهمیت عامل مورد نظر با توجه به واریانس تمام عوامل دخیل در جمله (ترم) خطا بکار برده می‌شود و نشان دهنده اثر تغییرات سطوح یک عامل در نتیجه کلی است. در نهایت مقادیر حاصل برای آنها با مقادیر جداول استاندارد موجود در مراجع مقایسه و با توجه به آن نتیجه گیری می‌شود. حال با توجه به مقادیر بدست آمده در قبل و نیز با توجه به اینکه حداقل اطمینان درمورد مسائل فنی ۹۰ درصد است، مقادیر N_e و C.I برای این مرحله محاسبه می‌شود [۵]:

$$N_e = \frac{۳۲}{۱ + ۲۴} = ۱/۲۸$$

$$C.I=\pm\sqrt{\frac{۳/۰۰۳\times۰/۵۶}{۱/۲۸}}=\pm۱/۱۴۶۲۴$$

با استفاده از فاصله اطمینان حاصل شده برای S/N و مقدار حاصل برای S/N (S/N=۳۶/۹۳۴±C.I) فاصله قابل قبول برای OEC برابر ۶۱/۵۵ و ۸۰/۱۷ محاسبه شد (معادلات ۳ و ۶).

حال اگر بتوان نمونه‌ای ساخت که OEC حاصل برای آن در فاصله اطمینان بالا قرار داشته باشد، صحت مجموعه عملیات انجام شده تأیید می‌شود. با استفاده از سطوحی که در مرحله شرایط بهینه (اعداد جدول ۵) برای هر عامل بدست آمده است، نمونه‌ای ساخته شد و محاسبات لازم با توجه به نتایج حاصل از آزمونهای مختلف روی نمونه‌ها، انجام شد. با استفاده از اعداد جدول ۵ و محاسبات مربوط، OEC مربوط به نمونه آزمون تأییدیه برابر ۶۲/۶۰۳۵ بدست می‌آید که در محدوده قابل قبول است. در ضمن برای افزایش دقت و اطمینان از نتایج نهایی، آزمون تأییدیه ۵ بار انجام و مقدار متوسط آن در جدول ۶ ارائه شد.

با توجه به مقادیر حاصل می‌توان مشاهده کرد که در این مرحله تغییر سطوح برای ۹ عامل قابل توجه نیست، بنابراین در این مرحله، ۹ عامل بهینه شدند و ۵ عامل برای بررسی بیشتر، با آرایه متعامد L۱۶ به مرحله دوم منتقل شدند. در این مرحله نیز هر کدام از آزمایشها دو بار انجام شد. ۵ عامل مورد مطالعه در این مرحله شامل دوده، کائوچو، ضد اکسنده ۴۰۱۰، SMR، ضد اکسنده HS و PVI بود که باید طبق نتایج قبلی بیشتر بررسی شوند. تغییرات سطوح این ۵ عامل در جدول ۷ آمده است. در جدول ۸ مقدار بهینه و میانگین S/N حاصل ازمرحله L۱۶ آورده شده است.

جدول ۶ میانگین خواص بدست آمده برای آزمون تأییدیه ۳۲ L.

قیمت (ریال)	ABR	F_{max} (MPa)	زمان پخت (min)
۵۳۳۰/۶۴	۱۲۴/۶۷۴	۱۴/۲۰۲	۳/۸۳۶

جدول ۷ سطوح عوامل بهینه نشده مربوط به ۱۶ L.

عامل	L۱	L۲	L۳	L۴
دوده	۱۳۷/۲۶	۱۴۵/۴۷۵	۱۵۳/۶۹	۱۶۱/۹۰۵
SMR	۳۴/۵۵	۴۰/۱۱	۴۵/۶۷	۵۱/۲۳
ضد اکسنده ۴۰۱۰	۱/۶۷	۲/۸۲	۳/۹۷	۵/۱۲
PVI	۰/۰۶۳	۰/۵۱۲	۰/۹۶۱	۱/۴۱
HS	۱/۴۱	۲/۶۵	۳/۸۹	۵/۱۳

جدول ۸ شرایط بهینه و سهم هر عامل در پاسخ برای آرایه متعامد L ۱۶ اصلاح شده.

ردیف	عامل	توزیع سطح	سطح	توزیع
۱	دوده	۱۵۳/۶۹	۳	۰/۴۹۴
۲	SMR	۳۴/۵۵	۱	۰/۴۰۸
۳	ضد اکسنده ۴۰۱۰	۱/۶۷	۱	۰/۳۸۶
۴	PVI	۰/۰۶۳	۱	۱/۰۱۲
۵	ضد اکسنده HS	۱/۴۱	۱	۰/۳۱۲
سهم کل بدست آمده از همه عوامل				۲/۶۱۱
میانگین عملکرد				۳۲/۶۱
نتیجه مورد انتظار در شرایط بهینه بر مبنای S/N				۳۵/۲۲۲

برای L۱۶ نیز حداقل اطمینان ۹۰ درصد در نظر گرفته شد و مقادیر مورد نظر با توجه به روش بیان شده در قبل مطابق زیر محاسبه شد:

$$N_e=\frac{۱۶}{۱+۱۲}=۱/۲۳$$

$$C.I=\pm\sum\frac{۳/۵۰۴۳\times۰/۳۲۳}{۱/۲۳}=\pm۰/۹۵۹۲۹$$

و به این ترتیب با استفاده از فاصله اطمینان حاصل برای S/N فاصله قابل قبول برای OEC برابر ۶۲/۱۵ و ۴۹/۸۱ بدست آمد.

در این مرحله با توجه به مقادیر حاصل برای نمونه آزمون ذکر شده در جدول ۹، نمونه تأییدیه ساخته شد و مورد آزمون قرار گرفت. سپس، با توجه به پاسخ نمونه به آزمونهای مورد نظر و اعداد جدول ۹ محاسبات مربوط به OEC انجام شد که مقدار ۶۰/۵۱ حاصل شد که نه تنها در محدوده است بلکه کاملاً نزدیک به حد بالا یعنی ۶۲/۱۵ است. در ضمن، آزمون تأییدیه ۵ مرتبه تکرار شد که نتایج آن در جدول ۱۰ آورده شده است.

در مرحله بعد کار را با L۹ ادامه داده، حداقل اطمینان نیز ۹۰ درصد در نظر گرفته شد. چهار عامل دوده، SMR، ضد اکسنده ۴۰۱۰ و PVI که در این مرحله از بهینه شدن آنها اطمینان حاصل نشد، برای بررسی بیشتر به مرحله بعد منتقل شدند. تغییرات سطوح این ۴ عامل در مرحله جدید در جدول ۱۱ آورده شده است. در جدول ۱۲ مقدار بهینه و میانگین S/N حاصل از این مرحله آورده شده است.

حال با توجه به مقادیر موجود، OEC و فاصله قابل قبول برای آن

جدول ۹ ترکیب مواد در آزمون تأییدیه مربوط به L ۱۶.

ردیف	مواد اولیه	وزن (g)
۱	A	۱۸۳/۰۲
۲	B	طبق جدول ۷
۳	C	۵۶/۳۵
۴	D	طبق جدول ۷
۵	E	۱۰/۲۴
۶	F	۳/۳
۷	G	۵۷/۲۳
۸	H	طبق جدول ۷
۹	I	۲/۵۶
۱۰	J	طبق جدول ۷
۱۱	K	۶/۴
۱۲	L	۵/۶۴
۱۳	M	۰/۷۷
۱۴	N	طبق جدول ۷

جدول ۱۰ میانگین خواص بدست آمده برای آزمون تأییدیه L ۱۶.

قیمت (ریال)	ABR	F_{max} (MPa)	زمان پخت (min)
۵۱۷۵/۴۴	۱۲۶/۸۸۲	۱۴/۴۷	۳/۲۳

جدول ۱۱ سطوح عوامل بهینه نشده مربوط به L ۹.

عامل	L۱	L۲	L۳
دوده	۱۴۹/۵۸	۱۵۳/۶۹	۱۵۷/۸
SMR	۲۹	۳۴/۵۵	۴۰/۱۱
ضد اکسنده ۴۰۱۰	۰/۵۲	۱/۶۷	۲/۸۲
PVI	۰	۰/۰۶۳	۰/۱۲۶

محاسبه می شود که در زیر خلاصه آن آورده شده است:

$$N_e = \frac{۱۶}{۱+۱۲} = ۱/۲۳$$

$$C.I = \pm \sum \frac{۳/۵۸۳۶ \times ۰/۰۱۹}{۱/۲۸۶} = \pm ۰/۲۳۰۱$$

با استفاده از فاصله اطمینان حاصل برای S/N فاصله قابل قبول برای OEC برابر ۶۷/۱۸۲ و ۶۳/۷۶ محاسبه شد.

پس از ساخت نمونه مطابق جدول ۱۳ و استخراج نتایج لازم و انجام محاسبات، مقدار OEC مربوط به آزمون تأییدیه L۹ برابر ۶۵/۶ است که در محدوده پیش بینی شده قرار دارد و مورد تأیید است. درضمن، آزمون تأییدیه مربوط به این مرحله که در واقع مرحله آخر است برای کسب اطمینان کامل ۵ بار تکرار شد و نتایج آن در جدول ۱۴ خلاصه شده است. همان طور که مشاهده می شود اعداد حاصل از آزمونهای تأییدیه در محدوده پیش بینی شده قرار دارند. بنابراین، فرمولبندی پیشنهادی خواص مورد نظر را ایجاد می کند، افزون بر این، راه حل ارائه شده نیز صحیح است.

جدول ۱۲ شرایط بهینه و سهم هر عامل در پاسخ در شرایط نهایی.

ردیف	عامل	توزیع سطح	سطح	توزیع
۱	دوده	۱۵۳/۶۹	۲	۰/۱۱۴
۲	SMR	۴۰/۱۱	۳	۰/۲۸۵
۳	ضد اکسنده ۴۰۱۰	۰/۵۲	۱	۰/۰۶۶
۴	PVI	۰	۱	۰/۱۲۷
	سهم کل بدست آمده از همه عوامل			۰/۵۲۶
	میانگین عملکرد			۳۵/۷۸۹
	نتیجه مورد انتظار در شرایط بهینه بر مبنای S/N			۳۶/۳۱۵

جدول ۱۳ ترکیب مواد در آزمون تأییدیه مربوط به مرحله نهایی L ۹.

ردیف	مواد اولیه	وزن (g)
۱	A	۱۸۳/۰۲
۲	B	طبق جدول ۱۱
۳	C	۵۶/۳۵
۴	D	طبق جدول ۱۱
۵	E	۱۰/۲۴
۶	F	۳/۳
۷	G	۵۷/۲۳
۸	H	طبق جدول ۱۱
۹	I	۲/۵۶
۱۰	J	۱/۴۱
۱۱	K	۶/۴
۱۲	L	۵/۶۴
۱۳	M	۰/۷۷
۱۴	N	طبق جدول ۱۱

جدول ۱۴ میانگین خواص بدست آمده برای آزمون تأییدیه L ۹.

قیمت (ریال)	ABR	F_{max} (MPa)	زمان پخت (min)
۵۱۲۱/۴۲	۱۲۰/۶۶	۱۴/۵۵	۲/۹۸

جدول ۱۵ میانگین خواص بدست آمده برای فرمول مبنا.

قیمت (ریال)	ABR	F_{max} (MPa)	زمان پخت (min)
۵۵۰۱/۲۴	۱۳۰/۵۲	۱۲/۸۱	۶/۷۳۲

نتیجه گیری

با بکارگیری روش OEC همراه با روش تاگوچی که یکی از بهترین روشهای طراحی آزمایشهاست، امکان بررسی بیش از یک هدف بهینه سازی امکان پذیر شد. با استفاده از روش یاد شده بهینه سازی قیمت همراه با حفظ کیفیت مطلوب محصول مورد توجه قرار گرفت. اگر چه در ظاهر در ابتدای طرح بنظر می آید که باید افزون بر مواد سازنده سامانه لاستیکی، کنشهای بین اجزای سامانه نیز اثر زیادی در رفتار آن داشته باشد. اما، نتایج اولیه نشانگر آن است که هیچ کدام از آثار متقابلی که برای عوامل مختلف در نظر گرفته شده بودند، اثر قابل توجهی بر رفتار سامانه ندارد که این نتیجه می تواند برای کسانی که در زمینه طراحی فرمولبندیهای لاستیکی مشابه کار می کنند، راه گشا باشد. نتایج حاصل نشانگر آن است که اگرچه برای بهینه سازی نهایی سه مرحله باید انجام گیرد. اما، عمده بهبود در عوامل بویژه برای زمان پخت و مقاومت کششی نمونه ها در مرحله اول حاصل شده است. در نهایت با تکمیل مراحل ۲ و ۳ و مقایسه بین ویژگیهای نمونه مبنا (جدول ۱۵) و نتایج حاصل از انجام آزمایشها روی نمونه تأییدیه نهایی (جدول ۱۴)، می توان مشاهده کرد که در نمونه نهایی کاهش ۵۶ درصدی در زمان پخت مشاهده می شود. همچنین، با توجه به کاهشی که در قیمت مواد اولیه و زمان پخت حاصل شده است بیش از ۵۰ درصد کاهش در قیمت تسمه نقاله محاسبه می شود. در همین حال، نمونه نهایی مقاومت کششی ۱۴ درصد و مقاومت سایشی حدود ۸ درصد بهتر از نمونه اولیه دارد. لازم به ذکر است که به علت محدودیت اعمال شده توسط شرکت درخواست کننده طرح، کلیه آزمایشها بر اساس مواد و فرمولبندی بکار گرفته شده در نمونه در حال تولید (نمونه مبنا) بوده است و واضح است که با آزاد گذاشتن مواد، امکان دستیابی به فرمولبندیهای بهینه شده دیگر برای کاهش بیشتر قیمت و افزایش بیشتر کیفیت وجود خواهد داشت.

علائم و نشانه ها

W_i درصد اهمیت هر کدام از آزمونها، y_i مقدار عددی حاصل از هرآزمایش برای هر آزمون در کل آزمایشها، m مقدار نامطلوب برای هر آزمون، ABR عدد سایش (سانتیمتر مکعب)، ANOVA تحلیل واریانس، F_{max} بیشترین نیرویی که وارد می شود تا رویه تسمه دمبلی شکل پاره شود(مگاپاسکال)، n درجه آزادی خطا، N تعداد کل آزمایشهای انجام شده، y_s و y_b به ترتیب بزرگترین و کوچکترین مقدار برای هر آزمون در کل آزمایشها، V_e واریانس خطا، V_T درجه آزادی کل اجزای بکار رفته که خارج نشده اند و F مقدار عدد فیشر.

مراجع

1. Hofman W., *Rubber Technology Handbook*, Chap. 2 and 5, 1989.
2. Ranjit K.R., *Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 6 Steps to Product and Process Improvement*, John Wiley and Sons, Chap. 5, 2001.
3. Logothetis N., *Managing for Total Quality*, Prentice Hall International, UK, Chap. 4, 1992.
4. www.rkroy.com/wp-oec.html
5. Ranjit. K.R., *A Primer on the Taguchi Method*, Van Nostrand Reinhold (VNR), Chap. 6, 1998.
6. Ranjit K.R., Qualitek-4 (for windows): Software for Automatic Design of Experiments Using Taguchi Approach, Bloomfield Hills, MI: NUTEK, Download free DEMO from: http://www.rkroy.com, 1996.