

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 Conveyor Belt Using Taguchi Method with Overall Evaluation Criteria Method

احمد رضانی سعادت آبادی*، زهرا کامکانی

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 پیش بینی 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 نمونه‌های ساخته شده در این مرحله اندازه‌گیری شدند و با انجام عملیات آماری لازم روی آنها مشخص شد که آثار متقابل در نظر گرفته 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 عملی 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

مقدمه

تولید است و در فرایند تولید تسمه نقاله، گلوگاه خط تولید برای افزایش تولید و کاهش هزینه‌ها 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 لایه‌های زیره، رویه

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

Key Words

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

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 سازی 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 رثومتر 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	$2^{14} = 16384$
۵	۴	۱۶	$4^5 = 1024$
۴	۳	۹	$3^4 = 81$

(جنس آمیزه رویه و زیره معمولاً یکسان است) و لایه های میانی به نام آستر است و با توجه به اینکه معمولاً ضخامت رویه بیشتر از لایه های دیگر است (ضخامت رویه در نمونه مورد بحث در حد ۵ mm و زیره و آستر هر کدام ۲/۵ mm 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 فلئوردار 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

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
استتاریک 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 ۳۲ L.

ردیف	نشانه	عامل	L _۱ (g)	L _۱ (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	۷/۷
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	۷/۴۱	۰/۵
۱۱	K	S	۴/۸	۷/۷
۱۲	L	CBS	۵/۰۸	۷/۸
۱۳	M	DPG	۰/۳۴	۰/۱۲
۱۴	N	PVI	۷/۴۱	۰/۵

داشت، اما با توجه به اینکه از قبل فرمولبندی در دسترس بود که مورد بهینه سازی اولیه قرار گرفته و در خط تولید قرار داشت، انتخاب آن به عنوان یکی از سطوح، کاملاً معقول بنظر می رسید و می توانست در رسیدن به شرایط بهینه، مراحل کار را کاهش دهد.

نکته دیگری که باید به آن توجه شود، این است که معمولاً روشهای مختلف بهینه سازی آزمایشها، تنها می توانند یک ویژگی را به عنوان ویژگی هدف بهینه کنند. با توجه به اینکه اهداف جداگانه و متضادی مدنظر است باید به طوری این اهداف در هم ادغام شود. برای این منظور همان طور 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 هر یک از عوامل مورد نظر بسته به مقدار اهمیت آنها ضریب خاصی داده می شود. در این پژوهش، چهار ویژگی مورد نظر برای بهینه سازی 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 آنها مشخص خواهد کرد که ضرایب اهمیت عوامل یاد شده بخوبی انتخاب شده اند یا نه که در حالت بر آورده 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

براحتی قابل مطالعه است. این روش با استفاده از آرایه های متعامد (orthogonal arrays) و اثری که سطح هر عامل روی پاسخ از خود به جا می گذارد، 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 می توان سطح بهینه را برای اجزا پیش بینی 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 می شود. 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

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 می کند به چه مقدار روی بازدهی مؤثر است با استفاده از معادله (۴) امکان پذیر می شود [۵]:

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

که در این معادله n تعداد سطوح عوامل است و محاسبه آثار اصلی با توجه به آرایه L₃₂ انجام می شود.

برای تسریع در تجزیه و تحلیل آماری از نرم افزار ۴-QUALITE علاوه بر محاسبه مقادیر S/N، اثر اصلی را نیز محاسبه می کند، استفاده شد [۶]. شرایط بهینه مسأله با توجه به اینکه مقدار بیشتر، بهتر است، به کمک نرم افزار یاد شده معین و در جدول ۴ آورده شده است. 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 همان طور که در قبل توضیح داده شد، شرایطی فراهم شده که یکسان عمل کنند.

در جدول ۴ مشاهده می شود که سهم بعضی از عوامل چون B، H، N، J و O قابل توجه بوده، برای بقیه عوامل اندک است. بنابراین می توان گفت که عوامل یاد شده در سطح حاصل بهینه شده اند 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]:

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

در این معادله منظور از Y_i آن پاسخهایی است که مقدار بهینه آنها در L₃₂ مشخص شده است و عوامل با اهمیت هستند (خارج نشده اند) [۵]. بدین ترتیب جدول ۵ با توجه به محاسبات ذکر شده شکل می گیرد. حال با استفاده از مقادیر جدول ۵ و به کمک نرم افزار ۴-QUALITE با استفاده از معادلات ذکر شده برای OEC، مقدار OEC را که در این حالت OEC_{exp} نامیده می شود، محاسبه می شود [۵]. سه مقدار محاسبه شده در این حالت به شکل زیر هستند:

$$(N/S)_{\text{exp}} = ۳۶/۹۳۴$$

$$\text{MSD} = ۰/۰۰۰۲۰۳$$

$$(OEC)_{\text{exp}} = ۷۰/۲۶$$

باید تا حد امکان کاهش داده شوند در جایی که دو خاصیت دیگر می توانند در حد موجود باقیمانده یا در حالت ایده آل افزایش داده شوند. با دقت در فرمولبندی مربوط به آمیزه رویه تسمه نقاله می توان در آن ۱۴ عامل مهم و ۱۲ اثر متقابل قابل پیش بینی را مشخص کرد که برای بررسی آنها بر اساس روش تاگوچی در دو سطح از آرایه متعامد L₃₂ باید استفاده شود. لازم به ذکر است که به علت حجم زیاد آرایه متعامد L₃₂ که بیش از یک صفحه است از آوردن آن و نتایج کلی حاصل از آن خوداری شده است. همان طور 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 می شود. مقدار OEC با توجه به مرجع [۵] از معادله (۱) قابل محاسبه است:

$$\text{OEC} = \sum W_i \left[\frac{y_i - m}{y_b - y_s} \right] \quad (۱)$$

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 اندازه گیری شده برای هر آزمون در کل آزمایشها، m مقدار نامطلوب پاسخ اندازه گیری شده برای هر آزمون و W_i درصد اهمیت در نظر گرفته شده برای هر یک از پاسخهای اندازه گیری شده در کل آزمایشهاست.

شایان ذکر است که معادله (۱) زمانی صحیح است که بازدهی هر چه بیشتر یا به عبارت دیگر کمیت بزرگتر مورد نظر باشد. در غیر این حالت جمله ای 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 بهینه ای است که بهترین پاسخ را با کمترین واریانس می دهد، 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]:

$$\text{MSD} = \frac{\sum_{i=1}^r \left(\frac{1}{\text{OEC}} \right)_i^2}{r} \quad (۲)$$

$$S/N = -۱۰ \log(\text{MSD}) \quad (۳)$$

جدول ۵ تركيب مواد اوليه در آزمون تأييديه مربوط به ۳۲.L.

وزن (g)	مواد اوليه	رديف
۱۸۳/۰۲	A	۱
۴۰/۱۱	B	۲
۵۶/۳۵	C	۳
۱۵۳/۶۹	D	۴
۱۰/۲۴	E	۵
۳/۳	F	۶
۵۱/۲۳	G	۷
۲/۸۲	H	۸
۲/۵۶	I	۹
۷/۴۱	J	۱۰
۶/۴	K	۱۱
۵/۶۴	L	۱۲
۰/۸۷	M	۱۳
۰/۵۱۲	N	۱۴

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

$$N_e = \frac{N}{1 + V_T} \quad (۷)$$

در معادله های بالا $F(1, n)$ عدد فيشر، n درجه آزادي خطا بعد از عمليات پولينگ (خارج کردن عواملی که اثرشان از حد مورد نظر کمتر است)، V_T کل درجه آزادي اجزای بکار رفته در تخمین، N_e تعداد کل آزمایشها، V_e واریانس خطا، و N درجه آزادي خطاست.

لازم به ذکر است $F(1, n)$ که آن را با F_1 برای هر عامل نمایش می دهند که i نشان دهنده عامل i ام 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 می شود و نشان دهنده اثر تغییرات سطوح یک عامل در نتیجه کلی است. در نهایت مقادیر حاصل برای آنها با مقادیر جدول استاندارد موجود در مراجع مقایسه و با توجه به آن نتیجه گیری می شود. حال با توجه به مقادیر بدست آمده در قبل و نیز با توجه به اینکه حداقل اطمینان در مورد مسائل فنی ۹۰ درصد است، مقادیر N_e و C.I. برای این مرحله محاسبه می شود [۵]:

$$N_e = \frac{۳۲}{۱ + ۲۴} = ۱/۲۸$$

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 معادله های (۶) و (۷) محاسبه می شود [۵]:

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

جدول ۸ شرایط بهینه و سهم هر عامل در پاسخ برای آرایه متعامد L۱۶ اصلاح شده.

ردیف	عامل	توزیع سطح	سطح	توزیع
۱	دوده	۱۵۳/۶۹	۳	۰/۴۹۴
۲	SMR	۳۴/۵۵	۱	۰/۴۰۸
۳	ضد اکسند ۴۰۱۰	۷۶۷	۱	۰/۳۸۶
۴	PVI	۰/۰۶۳	۱	۷۰/۱۲
۵	ضد اکسند HS	۷۴۱	۱	۰/۳۱۲
سهم کل بدست آمده از همه عوامل				
میانگین عملکرد				
نتیجه مورد انتظار در شرایط بهینه بر مبنای S/N				
				۲/۶۱۱
				۳۲/۶۱
				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:

$$N_e = \frac{16}{1+12} = 1/23$$

$$C.I = \pm \sum \frac{3/50.43 \times 0/323}{1/23} = \pm 0/95929$$

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 اکسند 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

$$C.I = \pm \sqrt{\frac{3/0.03 \times 0/56}{1/28}} = \pm 1/14624$$

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 اکسند ۴۰۱۰، SMR، ضد اکسند 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 از مرحله L۱۶ آورده شده است.

جدول ۶ میانگین خواص بدست آمده برای آزمون تأییدیه L۳۲.

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 L۱۶.

عامل	L۱	L۲	L۳	L۴
دوده	۱۳۷/۲۶	۱۴۵/۴۷۵	۱۵۳/۶۹	۱۶۷۹/۰۵
SMR	۳۴/۵۵	۴۰/۱۱	۴۵/۶۷	۵۷/۲۳
ضد اکسند ۴۰۱۰	۷۶۷	۲/۸۲	۳/۹۷	۵/۱۲
PVI	۰/۰۶۳	۰/۵۱۲	۰/۹۶۱	۷۴۱
HS	۷۴۱	۲/۶۵	۳/۸۹	۵/۱۳

جدول ۹ ترکیب مواد در آزمون تأییدیه مربوط به L۱۶.

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	۵۱/۲۳
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

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. در ضمن، 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				
میانگین عملکرد				
نتیجه مورد انتظار در شرایط بهینه بر مبنای S/N				
				۰/۵۲۶
				۳۵/۷۱۹
				۳۶/۳۱۵

جدول ۱۰ میانگین خواص بدست آمده برای آزمون تأییدیه L۱۶.

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

جدول ۱۳ ترکیب مواد در آزمون تأییدیه مربوط به مرحله نهایی L۹.

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	۵۱/۲۳
۸	H	طبق جدول ۱۱
۹	I	۲/۵۶
۱۰	J	۷/۴۱
۱۱	K	۶/۴
۱۲	L	۵/۶۴
۱۳	M	۰/۷۷
۱۴	N	طبق جدول ۱۱

جدول ۱۱ سطوح عوامل بهینه نشده مربوط به L۹.

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:

$$N_e = \frac{16}{1+12} = 1/23$$

$$C.I = \pm \sum \frac{3/5836 \times 0/19}{1/286} = \pm 0/2301$$

با استفاده از فاصله اطمینان حاصل برای S/N فاصله قابل قبول برای

کشتی نمونه‌ها در مرحله اول حاصل شده است. در نهایت با تکمیل مراحل ۲ و ۳ و مقایسه بین ویژگیهای نمونه مینا (جدول ۱۵) و نتایج حاصل از انجام آزمایشها روی نمونه تأییدیه نهایی (جدول ۱۴)، می‌توان مشاهده کرد که در نمونه نهایی کاهش ۵۶ درصدی در زمان پخت مشاهده می‌شود. همچنین، با توجه به کاهش که در قیمت مواد اولیه و زمان پخت حاصل شده است بیش از ۵۰ درصد کاهش در قیمت تسمه نقاله محاسبه می‌شود. 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 مینا) 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 نشانه‌ها

W_i درصد اهمیت هر کدام از آزمونها، y_i مقدار عددی حاصل از هر آزمایش 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 می‌شود تا رویه تسمه دمبلی شکل پاره شود (مگاپاسکال)، n درجه آزادی خطا، N تعداد کل آزمایشهای انجام شده، y_b و y_s 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 نشده‌اند و F مقدار عدد فیشر.

مراجع

- Hofman W., *Rubber Technology Handbook*, Chap. 2 and 5, 1989.
- Ranjit K.R., *Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 6 Steps to Product and Process Improvement*, John Wiley and Sons, Chap. 5, 2001.
- Logothetis N., *Managing for Total Quality*, Prentice Hall International, UK, Chap. 4, 1992.
- www.rkroy.com/wp-oec.html

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

زمان پخت (min)	F_{max} (MPa)	ABR	قیمت (ریال)
۲/۹۸	۱۴/۵۵	۱۲۰/۶۶	۵۱۲۷۴۲

جدول ۱۵ میانگین خواص بدست آمده برای فرمول مینا.

زمان پخت (min)	F_{max} (MPa)	ABR	قیمت (ریال)
۶/۷۳۲	۱۲/۸۱	۱۳۰/۵۲	۵۵۰/۷۲۴

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 می‌آید 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 می‌تواند برای کسانی که در زمینه طراحی فرمولبندیهای لاستیکی مشابه کار می‌کنند، راه گشا باشد. نتایج حاصل نشانگر آن است که اگر چه برای بهینه سازی نهایی سه مرحله باید انجام گیرد. اما، عمده بهبود در عوامل بویژه برای زمان پخت و مقاومت

- Ranjit. K.R., *A Primer on the Taguchi Method*, Van Nostrand Reinhold (VNR), Chap. 6, 1998.
- 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.