

بهینه سازی فرمولاسیون بلادر با استفاده از روش D-OPTIMAL: تأثیر شاخص های ساختاری و افزودنی ها بر خواص مکانیکی، جهت افزایش طول عمر بلادر

الهام رضایی نژاد^{۱*} و مهدی نماینده^۲

۱- رئیس تحقیقات، مجتمع صنایع لاستیک یزد

۲- مدیر تحقیق و توسعه، مجتمع صنایع لاستیک یزد

elham.rezaeenezhad@gmail.com

چکیده: این پژوهش باهدف بهینه سازی خواص مکانیکی آمیزه های لاستیکی و افزایش دوام بلادر، از طراحی آزمایش D-Optimal و روش سطح پاسخ (RSM) استفاده کرد. سه نوع دوده تقویتی N330، N220 و N375 مورد مقایسه قرار گرفتند که نتایج نشان داد دوده N220 به دلیل سطح ویژه و ساختار مناسب، بهترین تعادل بین استحکام کششی، مدول و ازدیاد طول را فراهم می آورد. اعتبار مدل های آماری با مقادیر بالای R^2 و R^2 Adj و عدم معناداری Lack of Fit تأیید شد. بررسی فاکتورها نشان داد که عدد جذب یدی (IA) مهم ترین عامل مؤثر بوده و اثرات متقابل رزین، روغن کرچک و استراکتول نیز نقش قابل توجهی در بهبود خواص داشتند. نتایج بهینه سازی چندپاسخه، ترکیب پیشنهادی بر پایه دوده N220 را به عنوان گزینه مطلوب معرفی کرد. آزمون های نیمه صنعتی نیز افزایش طول عمر بلادر را به میزان ۲۴٪، از ۲۴۰ ساعت به ۳۴۰ ساعت را اثبات کردند. در مجموع، انتخاب صحیح نوع دوده و طراحی فرمولاسیون بهینه، تأثیر بسزایی در ارتقای عملکرد مکانیکی، کاهش هزینه ها و کاهش ضایعات زیست محیطی دارد.

واژه های کلیدی: طول عمر بلادر، طراحی آزمایش D-Optimal، خواص مکانیکی بلادر، عدد جذب یدی، عدد جذب روغن

مقدمه

بلادر یکی از حیاتی ترین قطعات در فرایند پخت تایر است که نقش دوگانه شکل دهی اولیه و انتقال حرارت یکنواخت به داخل تایر خام را بر عهده دارد. کیفیت و دوام این قطعه مستقیماً بر سه شاخص کلیدی تولید کیفیت نهایی تایر، هزینه های تولید و بازده خط تولید تأثیر می گذارد (Johnson، 2020). به همین علت عمر آن توسط سازندگان تایر مورد توجه قرار گرفته از این رو، توسعه فرمولاسیون های جدید برای افزایش طول عمر بلادر، به عنوان یک هدف اقتصادی و زیست محیطی (با کاهش ضایعات) در صنعت تایر دنبال می شود (گلستانی و رضایی، ۱۴۰۱). در این راستا، انتخاب سیستم تقویت کننده (مانند نوع دوده) و سیستم چسباننده (مانند رزین ها و عوامل کوپلینگ) برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. برای مدل سازی و بهینه سازی این سیستم چندمتغیره پیچیده، روش سطح پاسخ ابزاری قدرتمند برای مدل سازی و بهینه سازی فرایندهای پیچیده است که امکان ارزیابی اثرات اصلی و متقابل فاکتورها را بر پاسخ ها فراهم می آورد.

پیشینه پژوهش

عملکرد موفق بلادر به عنوان قطعه ای کلیدی در فرایند ولکانیزه کردن لاستیک، به شدت به خواص مکانیکی آمیزه لاستیکی وابسته است. این خواص کلیدی، از جمله استحکام کششی و ازدیاد طول، عمدتاً توسط نوع و میزان دوده و سیستم چسباننده به کاررفته تعیین می شوند [۲]. انتخاب دوده (مانند N220، N330 یا N375) براساس سطح ویژه و ساختار آن، تعادل مطلوب بین استحکام و انعطاف پذیری را رقم می زند [۵]. استفاده از عوامل چسباننده مانند استراکتول، با بهبود پخش دوده و ایجاد پیوند شیمیایی قوی تر، به طور چشم گیری خواصی مانند استحکام و مقاومت سایشی را ارتقا می دهد [۱]. در این راستا، به کارگیری روش های بهینه سازی پیشرفته مانند طراحی D-Optimal و (RSM) برای توسعه فرمولاسیونی که بهترین ترکیب خواص را فراهم کند، ضروری است (Myers et al.). در نهایت، دستیابی به این بهینه سازی، طول عمر بلادر را افزایش داده و مزایای اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی برای صنعت تایر سازی به ارمغان می آورد.

بخش تجربی

مواد مصرفی

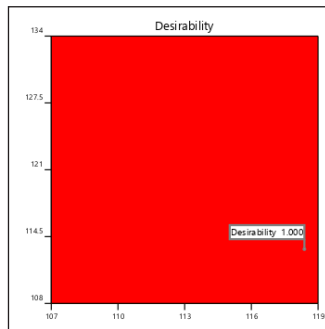
در این مطالعه از سه نوع دوده تقویتی شامل N330، N220 و N375 استفاده شد که هر یک به عنوان پرکننده اصلی نقش تعیین کننده ای در خواص مکانیکی ترکیبات لاستیکی دارند. افزون بر دوده، سه ماده افزودنی نیز به ترکیب به ترتیب به آمیزه افزوده شد: رزین (Resin) به عنوان عامل تقویت کننده و افزایش دهنده استحکام، روغن کرچک (caster oil) به عنوان نرم کننده و بهبوددهنده انعطاف پذیری و استراکتول (Struktol) به عنوان بهبوددهنده فرایند اختلاط و پخت. برای توصیف دقیق تر ویژگی های ساختاری دوده ها، دو شاخص استاندارد مورد توجه قرار گرفت. نخست عدد جذب روغن (DBP) که بیانگر میزان ساختار و تجمع ذرات بوده و با استحکام و مدول ارتباط مستقیم دارد. دوم عدد جذب یدی (IA) که سطح ویژه دوده را مشخص می کند و نشان دهنده توانایی دوده در ایجاد برهم کنش با زنجیره های پلیمری است. این دو شاخص به طور مستقیم بر رفتار مکانیکی نهایی آمیزه تأثیرگذار هستند. برای بررسی هم زمان اثر عوامل مختلف بر خواص مکانیکی، از روش طراحی D-OPTIMAL با پنج فاکتور مستقل شامل (A عدد جذب روغن، B عدد جذب یدی، C رزین)، (D استراکتول) و (E روغن کرچک) استفاده شد. در این طرح، مقادیر واقعی عوامل به سطوح کدگذاری شده تبدیل شد تا امکان مقایسه و تحلیل آماری فراهم شود. برای هر یک از سه نوع دود N220، N330 و N375، سه پاسخ مکانیکی کلیدی شامل مقاومت کششی (Tensile Strength)، ازدیاد طول در نقطه پارگی (Elongation at Break) و مدول (Modulus) اندازه گیری و تحلیل شدند. انتخاب این سه پاسخ به دلیل اهمیت آن ها در تعیین عملکرد و دوام لاستیک در شرایط کاری واقعی صورت گرفت.

تحلیل داده ها

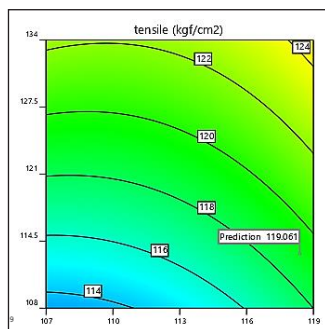
برای تحلیل داده ها، یک مدل درجه دوم به منظور بررسی هم زمان اثرات خطی، درجه دوم و برهم کنش ها برازش داده شد که به دلیل انعطاف پذیری بالا در شبیه سازی سیستم های پیچیده انتخاب شد. سپس با استفاده از آزمون ANO-

بهینه‌سازی چندپاسخه با تابع مطلوبیت (Desirability)

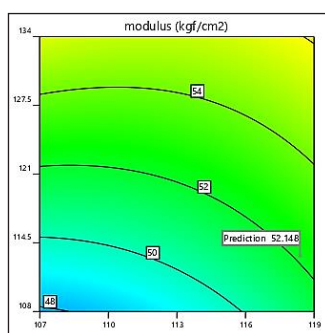
به‌منظور دستیابی هم‌زمان به شرایط مطلوب در چند پاسخ مختلف، از روش بهینه‌سازی چندپاسخه مبتنی بر تابع مطلوبیت در نرم‌افزار مناسب استفاده شد. در این روش، محدوده هدف برای هر پاسخ تعریف و سپس مقادیر پیش‌بینی شده براساس مدل رگرسیونی به مقیاس بدون‌بعدی بین صفر تا یک تبدیل شد؛ به‌گونه‌ای که عدد یک بیانگر تطابق کامل باهدف و عدد صفر نشان‌دهنده عدم انطباق است. مطلوبیت‌های تک‌پاسخه از طریق میانگین هندسی با یکدیگر ترکیب شدند تا شاخص مطلوبیت کلی به‌دست آید. درنهایت، الگوریتم جست‌وجوی عددی نرم‌افزار ترکیبی از متغیرهای مستقل را ارائه داد که مقدار مطلوبیت کلی را بیشینه کرده و به‌عنوان نقطه بهینه معرفی شد.



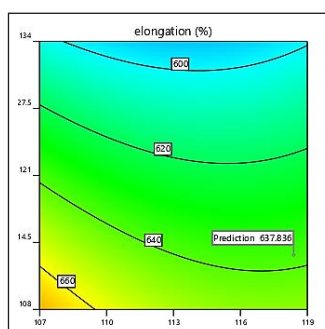
شکل ۱- نمودار تابع مطلوبیت دوده N220



شکل ۲- نمودار استحکام کششی دوده N220



شکل ۳- نمودار مدول دوده N220



شکل ۴- نمودار ازدیاد طول دوده N220

VA و شاخص‌های آماری مانند R^2 و R^2_{Adj} ، معنی‌داری ضرایب و اعتبار کلی مدل ارزیابی شد. مطابق نتایج جدول ۱، مدل درجه دوم برازش داده‌ها از قابلیت اعتماد بالایی برای تحلیل رفتار مکانیکی آمیزه دارد. مدل‌های آماری مربوط به استحکام کششی، مدول و ازدیاد طول بسیار قوی و معنادار بوده و شاخص‌های برازش بالا صحت آن‌ها را تأیید می‌کند. در هر سه پاسخ، IA مهم‌ترین نقش را ایفا کرد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش آن، استحکام و مدول افزایش یافته ولی ازدیاد طول کاهش پیدا کرد و در نتیجه ماده سخت‌تر و شکننده‌تر شد. در مقابل، روغن کرچک به‌عنوان نرم‌کننده موجب افزایش انعطاف‌پذیری و ازدیاد طول شد اما کاهش مدول و استحکام را به‌همراه داشت. رزین نیز به‌ویژه در ترکیب با استراکتول و روغن کرچک، اثر قابل‌توجهی بر بهبود خواص مکانیکی نشان داد.

جدول ۱- نتایج ANOVA دوده N220

Response	p-value	R^2	Adj. R^2	(p<0.05)
Tensile	<0.001	0.999	0.998	IA, DBP, رزین (C), روغن کرچک (E), و برهم‌کنش‌های متعدد
Elongation	0.0002	0.9977	0.9864	A, B, C, E, و برهم‌کنش‌های متعدد همچنین C^2 , D^2
Modulus	0.0001	0.9981	0.9887	A, B, C, D, E, و برهم‌کنش‌های متعدد, همچنین C^2 , E^2

جدول ۲ نشان می‌دهد که استحکام کششی بیشترین حساسیت را نسبت به متغیرهای فرمولاسیونی دارد؛ به‌طوری‌که تمامی عوامل اصلی و بسیاری از برهم‌کنش‌ها و اثرات درجه دوم در این پاسخ معنی‌دار گزارش شدند. در خصوص ازدیاد طول، اثرگذاری قابل‌توجهی از سوی عدد جذب یدی، رزین، استراکتول و روغن کرچک مشاهده شد، و برهم‌کنش‌های رزین، روغن کرچک و استراکتول، روغن کرچک نقش کلیدی در تغییر رفتار کشسانی داشتند. برای مدول نیز همه عوامل اصلی تأثیرگذار بودند و چند برهم‌کنش به‌همراه اثرات درجه دوم در تغییر سختی نقش مهمی ایفا کردند.

جدول ۲- تحلیل نتایج ANOVA دوده N330

Response	p-value	R^2	Adj. R^2	(p<0.05)
Tensile	1	0.9991	0.9948	همه عوامل اصلی (A, B, C, D, E), برهم‌کنش‌های و اثرات درجه دوم متعدد
Elongation	0.0026	0.9930	0.9580	(IA), (رزین), استراکتول, روغن کرچک, برهم‌کنش‌های و اثرات درجه دوم متعدد
Modulus	0.0008	0.9961	0.9768	(IA), (DBP), رزین, استراکتول, روغن کرچک, برهم‌کنش‌های و اثرات درجه ۲ متعدد

نتیجه‌ها و بحث

تحلیل نتایج N375

در جدول ۳ مدل آماری معتبر و معنی‌دار است. در آمیزه‌های حاوی دوده N375، برخلاف N220 و N330، نتایج نشان داد که تنها چند عامل اصلی بر خواص مکانیکی اثر معنی‌دار دارند. در استحکام کششی بیشترین اثر مربوط به رزین و روغن بود و سایر عوامل تأثیر چندانی نداشتند. در مورد ازدیاد طول نیز افزون‌بر رزین و روغن کرچک، اثر برهم‌کنش رزین و استراکتول و هم‌چنین اثر درجه دوم عدد جذب روغن معنی‌دار بود که نشان‌دهنده پیچیدگی محدود اما مشخص در تغییر خاصیت کشسانی است. برای مدول نیز نتایج مشابه Tensile بود و تنها رزین و روغن کرچک اثر قابل‌توجهی داشتند.

جدول ۳- تحلیل نتایج ANOVA دوده N375

Response	p-value	R^2	Adj. R^2	(p<0.05)
Tensile	1	Adj. R^2	Adj. R^2	همه عوامل اصل (A, B, C, D, E), برهم‌کنش‌های و اثرات درجه ۲ متعدد
Elongation	0.0026	0.851	0.801	عدد جذب یدی, رزین, استراکتول, (روغن کرچک), برهم‌کنش‌های و اثرات درجه ۲ متعدد
Modulus	0.0008	0.937	0.883	(جذب روغن), (جذب یدی), (رزین), (استراکتول), (روغن کرچک), برهم‌کنش‌های و اثر B^2

تحلیل گراف‌های بهینه‌سازی دوده N220

همچنان که در شکل ۱ نشان داده شده است سطح قرمز نشان‌دهنده مقدار مطلوبیت ۱۰ است. این موضوع بیانگر آن است که ترکیب انتخابی از متغیرها رزین، استراکتول و روغن کرچک (توانسته هم‌زمان سه پاسخ مکانیکی را دقیقاً در محدوده هدف قرار دهد. و شکل ۲ خطوط هم‌ارزش نشان می‌دهند که در ناحیه بهینه، استحکام کششی در حدود ۱۱۹ تا ۱۲۴ پیش‌بینی می‌شود. نقطه انتخابی در مرکز ناحیه سبز-زرد قرار دارد (۱۱۹/۶) که به‌خوبی در بازه هدف (۱۰ ± ۱۲۰) قرار می‌گیرد. این نشان می‌دهد N220 قادر است استحکام مطلوب و پایدار ایجاد کند. شکل ۳ نشان می‌دهد که مقادیر ازدیاد طول در ناحیه بهینه بین ۶۰۰ تا ۶۴۰٪ قرار دارد. و نقطه پیش‌بینی (۶۳۴/۸٪) بسیار نزدیک به بالای محدوده هدف (۵۰ ± ۶۳۰) است. که این مقدار کشسانی بالا نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری مناسب آمیزه با N220 است. شکل ۲ بیانگر آن است که مدول در ۳۰٪ در ناحیه بهینه بین ۵۰ تا ۵۴ قرار دارد. و نقطه انتخابی (۵۲/۱۵٪) دقیقاً در میانه محدوده هدف (۵۳ ± ۵۳) است. این موضوع نشان می‌دهد که سختی آمیزه به‌خوبی کنترل شده است. بنابراین N220 به‌عنوان دوده‌ای معرفی می‌شود که می‌تواند بهترین تعادل بین استحکام، سختی و انعطاف‌پذیری را فراهم آورد.

اعتبارسنجی مدل با داده‌های صنعتی در مقیاس نیمه‌صنعتی

به‌منظور اعتبارسنجی مدل، ترکیب بهینه پیشنهادی برای دوده، N220 پارت‌ها مطابق جدول ۵ انتخاب و در مقیاس نیمه‌صنعتی مورد آزمون قرار گرفت برای این منظور، ۶۰ بلادر در سه سایز رینگ ۱۳/۲، ۱۳/۳ و ۱۳/۵ (هرکدام ۲۰ نمونه) ساخته شد. نتایج آزمایش‌های عملکردی نشان داد که استفاده از ترکیب پیشنهادی باعث

افزایش طول عمر بلادر از ۲۴۰ ساعت به ۳۴۰ ساعت شد که نشان‌دهنده دقت و کارایی بالای مدل در پیش‌بینی و بهینه‌سازی خواص مکانیکی است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که استفاده از طراحی آزمایش D-Optimal و روش سطح پاسخ (RSM) ابزاری مؤثر برای تحلیل و بهینه‌سازی خواص مکانیکی آمیزه‌های لاستیکی است. در مقایسه بین سه نوع دوده تقویتی (N330، N220 و N375)، مشخص شد که دوده N220 به‌دلیل سطح ویژه و ساختار مطلوب، توانسته است بهترین تعادل بین استحکام کششی، مدول و ازدیاد طول را ایجاد کند. نتایج مدل‌های آماری نیز با مقادیر بالای R^2 و R^2_{Adj} و عدم معناداری Lack of Fit اعتبار بالای مدل‌ها را تأیید کردند. بررسی عوامل نشان داد که عدد جذب یدی (IA) مهم‌ترین نقش را داشته و افزایش آن استحکام و مدول را ارتقا داده ولی ازدیاد طول را کاهش می‌دهد. روغن کرچک به‌عنوان نرم‌کننده، موجب افزایش انعطاف‌پذیری و ازدیاد طول شده اما درعین حال استحکام و مدول را کاهش داده است. رزین و استراکتول نیز از طریق برهم‌کنش‌های مؤثر با سایر اجزاء، تأثیر مثبتی بر بهبود خواص مکانیکی داشته‌اند. نتایج بهینه‌سازی چندپاسخه با تابع مطلوبیت نشان داد که ترکیب پیشنهادی بر پایه دوده N220 می‌تواند به‌طور هم‌زمان هر سه پاسخ مکانیکی کلیدی را در محدوده هدف قرار دهد. آزمون‌های نیمه‌صنعتی نیز این نتایج را تأیید کردند و افزایش طول عمر بلادر از ۲۴۰ ساعت به ۳۴۰ ساعت را نشان دادند. درنهایت، این پژوهش ثابت کرد که انتخاب دقیق نوع دوده و فرمولاسیون بهینه نقش کلیدی در افزایش دوام و عملکرد بلادر داشته و منجر به کاهش هزینه‌های تولید، بهبود بهره‌وری خطوط تاپرسازی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از ضایعات می‌شود.

جدول ۵- ترکیب بهینه پیشنهادی برای دوده N220

Overall Desirability	M300 (kgf/cm ²)	Elongation (%)	Tensile (kgf/cm ²)	Castor Oil	Struktol	Resin	IA	DBP	Carbon Black
۱	۵۴/۴	۶۰/۲	۱۲۱/۴	۶/۹۸	۰/۷۸	۹/۲۵	۱۳/۱/۸	۱۱/۴/۶	N220

مراجع

- [1] Struktol Company. (2021). Struktol additives for rubber compounding: Technical datasheet. Struktol Technical Publications.
- [2] Davis, L., & Brown, M. (2019). Mechanical performance of bladder compounds in tire vulcanization. Journal of Rubber Research, 22(3), 145-156.
- [۳] مهدی، شیوا و آتشی، حسین. «بهینه‌سازی خواص شکست و رفتار پخت آمیزه رویه تایر سواری»، علوم و تکنولوژی پلیمر، ۱۳۸۹.
- [۴] مقاله «مطالعه تأثیر نانوخاک رس و ترکیب آن با دوده بر خواص فیزیکی و مکانیکی لاستیک SBR»، مجله ایرانی مهندسی شیمی.
- [۵] محمدی، م. و حسینی، ع. (۱۳۹۹). «بررسی اثر نوع و ساختار دوده بر خواص مکانیکی آمیزه‌های لاستیکی»، مجله علوم و تکنولوژی پلیمر ایران.
- [۶] قریشی، م.ح.ر. «کاربرد طراحی آزمایش و تحلیل آماری در آمیزه‌کاری لاستیک؛ مطالعه موردی بهینه‌سازی فرمول رویه تایر با رویکرد سطح پاسخ»، ۱۳۹۶.