

کاربرد طراحی آزمایش و تحلیل آماری در آمیزه کاری لاستیک؛ مطالعه‌ی موردی بهینه‌سازی فرمول رویه‌ی تایر با رویکرد سطح پاسخ

The Use of Design of Experiments and Statistical Analysis in Rubber Compounding: The Case Study of Tyre Tread Compound Optimization Using Response Surface Methodology

چکیده:

در این مطالعه تأثیر سه عامل مهم در فرمول آمیزه‌ی لاستیکی بر تعدادی از خواص کلیدی آمیزه‌ی رویه‌ی تایر سواری با استفاده از رویکرد "سطح پاسخ و طرح آزمایش CCD" مورد مطالعه قرار گرفته است. چهار ویژگی سایش، رشد ترک‌دی‌متیا، سختی و نیروی پارگی بر حسب سه متغیر طرح آزمایش به‌خوبی مدل‌سازی و اعتبارسنجی آماری شد. از مدل‌های توسعه‌داده شده برای شناخت رفتارها، مطالعه‌ی ساز و کارهای حاکم و اهداف بهینه‌سازی با موفقیت استفاده شد. در پایان نشان داده شد رویکرد "سطح پاسخ" ابزاری کارآمد در فرایند مطالعه و پژوهش در آمیزه‌کاری لاستیک است.

واژه‌های کلیدی: تایر رادیال، آمیزه‌ی رویه، طرح آزمایش، مدل‌سازی آماری، تحلیل رگرسیون.

نوع مقاله: پژوهشی

مقدمه:

مستقل متأثر می‌شود. یکی از مسائل مهم در آمیزه‌کاری لاستیکی، توسعه‌ی فرمول مناسب با هدف بهینه‌سازی طیف وسیعی از خواص مورد انتظار (متغیرهای وابسته) با تعیین سطح بهینه برای طیف گسترده‌ی از متغیرهای مستقل است. از طرفی، تهیه و ثبت ویژگی‌های یک فرایند یا محصول جدید زمان‌بر و پرهزینه است و همواره جست و جوی راهی برای کاهش هزینه‌ها و تسریع در رسیدن به نتیجه‌ی مطلوب مد نظر است. طراحی آزمایش و تحلیل آماری می‌تواند رویکردی کارآمد برای این مهم باشد.

در طراحی و توسعه‌ی فرمول برای آمیزه لاستیکی، با طیف گسترده‌ی از متغیرهای مستقل و وابسته مواجهیم [۱ تا ۴]. مهم‌ترین متغیرهایی که معمولاً به‌عنوان متغیر مستقل مطرح می‌شود، عوامل فرمولی (نوع و مقدار مواد) و عوامل فرایندی (شرایط اختلاط، پخت و...) است که تغییر آن‌ها بر متغیرهای وابسته تأثیرگذار است. متغیرهای وابسته یا خواص مورد انتظار، معمولاً شامل ویژگی‌های مختلف فیزیکی- مکانیکی و فرایندی آمیزه‌ی لاستیکی است که از متغیرهای

مهدی شیوا^{(۱)*} و حسین وارسته^(۲)
 ۱- گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند
 ۲- واحد تکنولوژی، شرکت کویر تایر بیرجند

* عهده دار مکاتبات:
 mehdishiva@birjandut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۹/۲۵
 تاریخ بازنگری: ۹۶/۴/۲۸
 تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۲۳

- ۱- تعیین تعداد متغیرها و محدوده‌ی (سطوح) هر یک و انتخاب طرح آزمایش آماری،
 - ۲- گردآوری نقاط تجربی بر اساس طرح آزمایش،
 - ۳- تخمین ضرایب مدل ریاضی و تعیین اهمیت ترم‌های مدل و بررسی کفایت مدل به کمک آماره‌های موجود،
 - ۴- پیش‌بینی توسط مدل و ترسیم منحنی‌های سطح پاسخ و کانتور و تفسیر نتایج،
 - ۵- بهینه‌سازی و توسعه‌ی فرمول از طریق ادغام مدل توسعه‌یافته با الگوریتم بهینه‌سازی مناسب.
- طرح‌های آزمایش درجه‌ی دوم در عمل، در شرایطی استفاده می‌شود که مدل‌های خطی (درجه اول) برای توصیف ریاضی فرایند دقت کافی را نداشته باشد. در این شرایط مدل ریاضی بر اساس معادله‌ی درجه دوم (quadratic) شکل می‌گیرد. به‌هنگام توصیف فرایند با معادله‌ی درجه دوم، تغییر متغیرها در دو سطح نمی‌تواند اطلاعات کافی ارائه کند. بنابراین، آزمایش به‌گونه‌ی طرح‌ریزی می‌شود که فاکتورها در سه سطح یا بیشتر تغییر کنند. یکی از این‌گونه طرح‌ها، طرح چرخشی درجه دوم (Box-Wilson design) است. برای این طرح‌های درجه دوم چرخشی، می‌توان طرح آزمایش فاکتوریل کامل (FUFU) یا کسری را با اضافه کردن تعدادی نقطه‌ی ویژه به هسته‌ی طرح ارتقا داد. این نوع طرح به "central"^(۱) نیز معروف است، زیرا همه‌ی نقاط طرح نسبت به نقطه‌ی مرکزی قرینه‌اند.
- طرح آزمایش Orthogonal Second-order Design یا Box-Benken Design زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که نیازی به آزمایش‌های متوالی نیست. به‌عبارت‌دیگر، طراحی آزمایش فقط برای یکبار انجام می‌شود. با این طرح‌ها امکان تخمین مؤثر ضرایب درجه اول و دوم وجود دارد. چون طرح Box-Behnken به تعداد نقاط طرح کمتری نیازمند است، اجرای آن در مقایسه با طرح‌های Central Composite هزینه‌ی

در مقاله‌ی پیشین استفاده از طراحی آزمایش فاکتوریل دوسطحی در مطالعات آمیزه‌کاری کائوچو در قالب مطالعه‌ی موردی ارائه شد [۵]. در مسائل طراحی و توسعه‌ی فرمول برای آمیزه‌ی لاستیکی، وابستگی ویژگی‌ها مختلف به‌عوامل فرمولی در بیشتر زمان‌ها خطی نیست. به عنوان مثال: رفتار و میزان مقاومت سایشی و نیروی پارگی آمیزه‌ی لاستیکی برحسب مقدار دوده، معمولاً به یک مقدار حداکثر رسیده و سپس افت می‌کند. زمانی‌که نیاز است متغیر طرح آزمایش در بازه‌ی گسترده مطالعه گردد، باید از طرح‌های آزمایش کارآمدتر از طرح آزمایش فاکتوریل دو سطحی استفاده کرد. در این‌جا کاربرد رویکرد "سطح پاسخ" در قالب مطالعه‌ی شناخت رفتارها، مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرمول آمیزه لاستیکی آدرس داده می‌شود. دو طرح آزمایش CCD و Box Behnken به‌عنوان دو طرح آزمایش استاندارد این رویکرد شناخته می‌شود [۶]. در این مقاله کاربرد طرح آزمایش CCD برای توسعه‌ی فرمول برای آمیزه‌ی لاستیکی ارائه شده است.

رویکرد سطح پاسخ

RSM^(۱) ترکیبی از روش‌های آماری و ریاضی مفید برای توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرایندها و محصولات است که در آن‌ها یک پاسخ موردنظر به‌وسیله‌ی چندین متغیر متأثر می‌شود. این رویکرد در زمره‌ی فنون طرح آزمایش چندمتایی قرار دارد که در آن‌ها تأثیر چندین متغیر بر پاسخ به‌طور هم‌زمان مطالعه می‌گردد و کاربردهای مهمی در طراحی، توسعه و فرمول‌بندی محصولات و فرایندهای جدید و نیز در بهبود طرح‌های محصول موجود و فرایندها دارد. روش سطح پاسخ یک روش رگرسیون (برازش) است که ارتباط مابین چندین متغیر مستقل و یک یا چند متغیر پاسخ را به تصویر می‌کشد. در مطالعات معمول تجربی با روش سطح پاسخ (RSM) معمولاً از روند و مراحل زیر استفاده می‌شود:

1. Response Surface Methodology

2. Central composite rotatable designs

$$df_{error} = n - p \quad (7)$$

و:

$$df_{regression} = p - 1 \quad (8)$$

که n و p تعداد مشاهدات و تعداد پارامترهای مدل است. این مقدار F با مقدار F استاندارد به دست آمده در سطح اطمینان ۹۵٪ (یا ۹۰٪) و درجه‌ی آزادی مقتضی، مقایسه می‌شود. اگر مقدار F به دست آمده از مقدار F استاندارد کمتر باشد به معنی آنست که مدل داده‌های تجربی را برازش کرده و مدل با توجه به قضاوت آماری کفایت دارد.

صحت و قابلیت عمومیت یافتن^(۵) مدل‌های رگرسیون همچنین می‌تواند با R^2 ارزیابی شود که آزمونی مفید برای بررسی خوبی^(۶) برازش است و از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$R^2 = \frac{SSR}{SSR + SSE} = \frac{SSR}{SSTO} \quad (9)$$

مقادیر R^2 بین ۰ و ۱۰۰ قرار دارد. اشاره به این نکته مهم است که نباید تنها به مقدار R^2 برای بررسی مقدار برازش مدل اکتفا کرد زیرا ممکن است مقدار زیاد R^2 به خاطر برازش بیش از حد^(۷) داده‌ها باشد. آماره‌ی دیگر برای بررسی میزان برازش داده‌ها R^2_{adj} است که تعداد ترم‌های مدل را نسبت به تعداد نقاط طرح تنظیم می‌کند:

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - p} \quad (10)$$

بخش تجربی

۱- فرمول و طرح آزمایش

در این مطالعه موردی، تأثیر سه عامل مهم فرمول بر تعدادی از خواص کلیدی آمیزه رویه تاپر سواری مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعه روی فرمول‌بندی آمیزه‌ی رویه‌ی تاپر بر پایه‌ی کائوچوی SBR/BR با نسبت ثابت ۷۵/۲۵ پر شده با دو بدهی مختلف انجام شده است. در طرح آزمایش مورد نظر، مقدار بدهی N234 در سطح ۴۰ پارت (phr) ثابت در نظر گرفته

کمتری دارد. همچنین طرح‌های CC معمولاً "نقاط محوری خارج از محدوده‌ی اولیه‌ی فاکتور" دارند که ممکن است نقاط مناسبی نباشد و امکان اجرای آن‌ها وجود نداشته باشد. طرح‌های Box-Behnken نقاط محوری ندارد و همه‌ی نقاط طرح در محدوده‌ی امن قرار می‌گیرد.

معادله‌ی رگرسیون مورد استفاده برای این دو طرح آزمایش اخیر دارای شکل کلی زیر است:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j} b_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

پارامترهای b (ضرایب رگرسیون) با استفاده از روش حداقل مربعات تخمین زده می‌شود.

معمولاً اهمیت مدل و ترم‌های درجه اول، درجه دوم و برهمکنش به کمک تحلیل واریانس و آزمون t بررسی می‌شود که اطلاعات عددی برای F-value و P-value فراهم می‌آورد. معمولاً P-value کمتر از ۰٫۰۵ (یا ۰٫۱) دلالت دارد که آن ترم مدل تأثیر معنی‌دار با سطح اطمینان ۹۵٪ (یا ۹۰٪) بر پاسخ دارد. کفایت مدل به کمک F-value، رگرسیون، و F-value فقدان برازش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

F-regression با توجه به معادله‌ی (۲) تعریف می‌شود:

$$F_{regression} = MSR / MSE \quad (2)$$

MSR^(۸) از رابطه‌ی (۲) و MSE^(۹) از رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌شود:

$$MSR = SSR / df_{regression} \quad (3)$$

$$MSE = SSE / df_{error} \quad (4)$$

در معادله‌ی (۲) و (۴)، SSR و SSE به ترتیب مجموع مربعات رگرسیون^(۱۰) و مجموع مربعات خطا^(۱۱) است که از معادله‌های (۵) و (۶) به دست می‌آید. در این معادله‌ها Y_i مقدار پاسخ (مقدار مشاهده‌شده)، \hat{Y}_i مقدار محاسبه‌شده یا پیش‌بینی‌شده، و \bar{Y} مقادیر میانگین پاسخ است.

$$SSR = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (5)$$

$$SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (6)$$

همچنین:

1. Mean Sum of Regression

2. Mean Square Error

3. Sum of Square of Regression

4. Sum of Square of Error

5. Generalability

6. Coefficient of multiple determination

7. Goodness

8. Over-fitting

رگرسیون، انحراف استاندارد آن و اهمیت آماری تأثیر هر ضریب مشخص شد. همچنین به کمک تحلیل واریانس اهمیت رگرسیون، ترم خطی درجه دوم، و ترم برهمکنش تحلیل آماری شد. برای به تصویر کشیدن نحوه وابستگی خواص مختلف به متغیرهای فرمول (مقدار بوده، روغن و شتاب‌دهنده) از منحنی‌های سطح پاسخ و کانتور استفاده شد. بر اساس تحلیل آماری انجام شده، ضرایب کم‌اهمیت چندجمله‌یی از لحاظ آماری به صورت مرحله‌به‌مرحله حذف شد. مدل حاصل مدل کوتاه شده^(۱) نامیده شد. در نهایت، فرمول بهینه از طریق کوپل کرن مدل ریاضی با الگوریتم بهینه‌سازی مناسب توسعه داده شد.

نتیجه‌ها و بحث

در جدول (۱) داده‌های تجربی گردآوری شده بر اساس طرح آزمایش برای چهار ویژگی سختی، سایش، نیروی پارگی و رشد ترک نی‌متیا ارائه شده است. در جدول (۲) مدل‌های رگرسیون به دست آمده از برازش داده‌های تجربی جدول (۱) شامل ضرایب ترم‌های درجه اول، درجه دوم و برهمکنش دوتایی برای چهار ویژگی فوق آمده است. از مقادیر ضرایب کدبندی شده در کنار آماری P استفاده شده است. همان‌طور که اشاره شد آماری P (مقادیر داخل پرانتز در جدول ۲) در واقع بیانگر اهمیت آماری ضریب مربوطه است و اگر برای ترمی کمتر از ۰٫۰۵ (یا ۰٫۱) باشد به معنی تأثیر معنی‌دار آن ترم بر ویژگی موردنظر است.

در بخش بالایی جدول (۳) آماره‌های تأییدی مدل‌های جدول (۲) نشان داده شده است. مقادیر نسبتاً بالای ضریب رگرسیون، همچنین مقدار P رگرسیون کمتر از ۰٫۰۵، و نیز مقادیر P فقدان برازش بیش از ۰٫۰۵ برای هر چهار مدل، دلالت بر کفایت آماری مدل‌های ارائه شده دارد.

شد. با انتخاب طرح آزمایش Central Composite Design و مقدار α برای آن برابر با ۱٫۶۸۲، و نیز محدوده‌ی سه متغیر به شرح زیر، در مجموع ۲۰ فرمول طراحی شد:

N330: 25.8-34.2

Oil: 6.2-9.8

CBS: 1.2-1.8

همان‌طور که اشاره شد در طرح CCD بر اساس مقدار آلفای انتخابی، نقاطی خارج از محدوده‌ی متغیرهای انتخابی نیز طراحی می‌شود، از این رو در این فرمول‌ها بر اساس طرح آزمایش، مقدار بوده‌ی N330 در فاصله‌ی ۲۳ تا ۳۴٫۲ قسمت وزنی، مقدار روغن در محدوده‌ی ۵ تا ۱۱ و مقدار شتاب‌دهنده در محدوده‌ی ۱٫۲ تا ۲ قسمت وزنی تغییر یافت که محدوده‌ی وسیعی را پوشش می‌دهد و قابل تهیه و آزمون و ثبت خواص است. بیست آمیزه‌ی طراحی‌شده (بر اساس طرح CCD) در مخلوطکن داخلی آزمایشگاهی تهیه و آزمون‌های لازم روی نمونه‌ها انجام شد. در این مقاله نتیجه‌های آزمون‌های مقاومت پارگی، سایش، رشد ترک نی متیا و سختی ارائه شده است. نحوه‌ی آزمون و استانداردهای این آزمون‌ها به شرح زیر است:

- نیروی پارگی توسط دستگاه کشش مطابق با استاندارد ASTM-D-624 form C

- سختی توسط Shore A durometer مطابق با استاندارد ASTM-D- 2240

- رشد ترک توسط DeMatia Crack Growth Tester (میزان رشد ترک برحسب mm در سیکل ۴۰۰۰)،

- سایش DIN با توجه به استاندارد ISO4649 (برحسب mm³).

۲- تحلیل آماری

به کمک نرم‌افزار مناسب، یک معادله‌ی درجه دوم بر داده‌های تجربی برای هر یک از خواص برازش شد. ضرایب معادله‌ی

جدول ۱- داده‌های تجربی گردآوری شده بر اساس طرح آزمایش آماری

شماره آزمایش	پاسخ			فاکتورها			
	Hardness (shore A)	Crack growth (mm)	Tear (kN/m)	Abrasion (mm ³)	N330 (phr)	OIL (phr)	CBS (phr)
۱	۷۱	۱۷.۹۸	۳۵.۱	۱۰۵.۰۵	۳۰	۵	۱.۵
۲	۶۸	۱۲.۸	۳۸.۷	۱۰۰.۶۷	۲۳	۸	۱.۵
۳	۷۲	۱۶.۹۷	۳۹	۱۰۴	۳۰	۸	۱.۵
۴	۷۳	۱۴.۴	۳۸.۹	۱۱۲	۳۴.۲	۹.۸	۱.۲
۵	۷۴	۱۶.۹	۳۶	۱۱۱.۸	۳۴.۲	۶.۲	۱.۲
۶	۷۴	۲۰.۱	۳۳.۴	۱۰۷.۳۴	۳۴.۲	۹.۸	۱.۸
۷	۷۲	۱۵.۴۵	۴۳.۹	۱۰۵	۳۰	۸	۱.۵
۸	۷۰	۱۵.۹	۴۰.۸	۹۹.۶۶	۳۰	۸	۱.۵
۹	۶۹	۱۲.۱	۳۷.۵	۹۳.۰۶	۲۵.۸	۶.۲	۱.۲
۱۰	۷۱	۱۵	۴۵.۴	۱۰۵	۳۰	۸	۱.۵
۱۱	۷۰	۱۶.۱	۴۰.۸	۹۹.۶۶	۳۰	۸	۱.۵
۱۲	۷۰	۱۷.۰۳	۴۰	۱۰۱.۶	۲۵.۸	۶.۲	۱.۸
۱۳	۶۷	۹.۹	۳۸.۶	۱۰۸.۷	۳۰	۸	۱
۱۴	۷۵	۱۶.۸	۳۶.۴	۱۰۷	۳۷	۸	۱.۵
۱۵	۷۱	۱۹.۵	۴۲	۱۰۹.۴	۳۰	۸	۲
۱۶	۶۹	۱۳.۸۸	۴۰	۱۲۸.۶۴	۳۰	۱۱	۱.۵
۱۷	۷۱	۱۷.۸	۳۹.۵	۱۰۲.۲۱	۳۰	۸	۱.۵
۱۸	۶۷	۱۵.۱	۴۳.۴	۱۲۱.۹	۲۵.۸	۹.۸	۱.۸
۱۹	۶۷	۱۱.۳	۳۸.۱	۱۱۴.۵	۲۵.۸	۹.۸	۱.۲
۲۰	۷۵	۱۹.۴	۳۲.۱	۱۰۱.۶	۳۴.۲	۶.۲	۱.۸

جدول ۲- ضرایب مدل برازش کامل و آماری P مربوط به هر ضریب، مقادیر کدبندی شده ارائه شده است

	Hardness	Crack Growth	Tear	Abrasion
Constant	۷۰.۹۵۷۴(۰.۰۰۰)	۱۶.۱۷۲۸(۰.۰۰۰)	۴۱,۵۹۹(۰.۰۰۰)	۱۰۶.۲۹۳(۰.۰۰۰)*
N330	۴.۲۶۲۳(۰.۰۰۰)	۲.۶۹۷۱(۰.۰۰۱)	-۲.۷۵۸۲(۰.۰۲۲)	۱.۵۰۴(۰.۲۳۷)
Oil	-۱.۲۷۰۵(۰.۰۲۸)	-۱.۳۹۷۱(۰.۰۲۷)	۲.۰۱۲۳(۰.۰۷۷)	۱۰.۶۹۶(۰.۰۰۰)
CBS	۱.۱۸۸۵(۰.۰۳۷)	۴.۰۴۸۸(۰.۰۰۰)	۰.۵۰۰۰(۰.۶۳۵)	۰.۲۷۶(۰.۸۲۲)
N330*N330	۱.۱۱۸۴(۰.۱۹۶)	-۰/۹۶۱۳(۰.۳۰۳)	-۴.۴۹۵۵(۰.۰۲۳)	-۰.۲۷۴(۰.۸۹۲)
Oil*Oil	-۰.۳۸۱۶(۰.۶۴۷)	۰/۱۶۸۷(۰.۸۵۳)	-۴.۴۹۵۵(۰.۰۲۳)	۱۲.۷۳۶(۰.۰۰۰)
CBS*CBS	-۱.۳۸۱۶(۰.۱۱۸)	-۱.۰۶۱۳(۰.۲۵۹)	-۱.۷۴۵۵(۰.۳۲۱)	۴.۹۴۱(۰.۰۳۰)
N330*Oil	۱.۰۴۱۷(۰.۳۵۳)	۰.۳۲۲۹(۰.۷۸۹)	۰.۰۶۹۴(۰.۹۷۶)	-۱۲.۴۳۱(۰.۰۰۱)
N330*CBS	۰.۳۴۷۲(۰.۷۵۲)	-۰.۱۸۴۰(۰.۸۷۹)	-۵.۹۷۲۲(۰.۰۲۲)	-۱۰.۶۹۴(۰.۰۰۲)
Oil*CBS	-۰.۳۴۷۲(۰.۷۵۲)	۰.۷۱۸۷(۰.۵۵۴)	۰.۴۱۶۷(۰.۸۵۵)	۱.۵۲۸(۰.۵۶۹)

*داخل پرانتز مقادیر P-value کمتر از ۰,۰۱، آن‌ها بیانگر معنی‌دار بودن تأثیر ضریب بر پاسخ در سطح اطمینان ۹۰٪ است.

جدول ۳- آماره‌های مدل‌های رگرسیون کامل و رگرسیون کوتاه شده (بعد از حذف ترم‌های کم‌اهمیت) و مدل‌های آماری نهایی

	Hardness	Crack growth	Tear	Abrasion
R^2 (Full regression model)	۹۰.۴	۹۰.۱	۷۶.۴	۹۴.۴
R^2_{adj} (Full regression model)	۸۱.۷	۸۱.۱	۵۵.۱	۸۹.۴
F-regression(P)	۱۰.۴۴(۰.۰۰۱)	۱۰.۰۶(۰.۰۰۱)	۳.۵۹(۰.۰۲۹)	۱۸.۷۵(۰.۰۰)
F-Lack of fit(P)	۱.۹۶(۰.۲۳۸)	۱.۷۲(۰.۲۸۴)	۰.۵۸(۰.۷۱۷)	۱.۲۶(۰.۴۰۴)
After Pruning				
R^2 (Pruned Model)	۸۹.۱	۸۷.۱	۷۳.۷	۹۴.۲
R^2_{adj} (Pruned Model)	۸۵.۱۴	۸۴.۶	۶۱.۶	۹۰.۸
F-regression(P)	۲۲.۷(۰.۰۰۰)	۳۵.۸(۰.۰۰)	۶.۰۸(۰.۰۰۳)	۲۷.۸۵(۰.۰۰)
Pruned regression Models				
$Hardness = 70.85 + 4.26N330 - 1.27Oil + 1.19CBS + 1.153N330 * N330 - 1.35CBS * CBS$ $Crack_Growth = 15.72 + 2.7N330 - 1.4Oil + 4.1CBS$ $Tear = 41.09 - 2.76N330 + 2.012Oil + 0.5CBS - 4.34N330 * N330 - 4.34Oil * Oil - 5.97N330 * CBS$ $Abrasion = 102.61 + 1.5N330 + 10.7Oil + 0.28CBS + 12.76Oil * Oil + 4.97CBS * CBS$ $- 12.43N330 * Oil - 10.69N330 * CBS$				

CBS از لحاظ آماری کم‌اهمیت است اما چون ترم برهمکنش $N330 * CBS$ مهم است، عبارت CBS حذف نشده است. مشابه آن برای سایش نیز اعمال شده است. در واقع تأثیر CBS بر سایش با اهمیت است زیرا برهمکنش آن با دوده از لحاظ آماری معنی‌دار و مهم دیده شد.

معادله‌های کوتاه شده در جدول (۳) (پایین جدول) بیان می‌کند که در محدوده‌ی مورد مطالعه، وابستگی رشد ترک به سه متغیر فرمول‌بندی به صورت خطی و ساده است. همی ترم‌های برهمکنش و درجه دو (quadratic) برای این ویژگی حذف شده است. برای ویژگی سختی، تعدادی از ترم‌های درجه دوم از لحاظ آماری معنی‌دار تشخیص داده شد و در معادله‌ی کوتاه شده حفظ شده است.

اما برای دو ویژگی نیروی پارگی و سایش تعدادی از ترم‌های برهمکنش نیز در کنار تعدادی از ترم‌های درجه دوم برای دو ویژگی با اهمیت آماری است که نشان‌دهنده‌ی وابستگی پیچیده‌تر آن‌ها به متغیرهای فرمول‌بندی در محدوده‌ی

همچنین در پایین جدول (۳) مدل‌های کوتاه شده بعد از حذف ترم‌های کم‌اهمیت از لحاظ آماری، در کنار آماره‌های تأییدی مدل کوتاه شده ارائه شده است. مقادیر R^2 و R^2_{adj} به دست آمده بعد از حذف جملات کم‌اهمیت، برای مدل سختی ۸۹.۱ و ۸۵.۱۴ ، برای رشد ترک ۸۷.۱ ، ۸۴.۶ ، برای نیروی پارگی ۷۳.۷ و ۶۱.۶ ، و برای سایش ۹۴.۲ و ۹۰.۴ بود. همچنین مقادیر آماری F برای رگرسیون مدل سختی ۲۲.۷ ، برای رشد ترک ۳۵.۸ ، برای مقاومت پارگی ۶.۰۸ ، و برای سایش ۲۷.۸۵ محاسبه شد که با توجه به مقادیر P کمتر از ۰.۰۵ ، نشان‌دهنده‌ی صحت مدل‌های پیش‌گویی برای این ویژگی‌هاست.

در مرحله‌ی حذف ترم‌های کم‌اهمیت (از لحاظ آماری) باید به این نکته توجه داشت که چنانچه برای یک متغیر مورد نظر یک ترم برهمکنش یا درجه ۲ حائز اهمیت در چندجمله‌ی وجود داشته باشد، در این صورت نباید ترم درجه اول را حذف کرد. به عنوان مثال در مورد مقاومت پارگی ترم

را ارتقا می‌بخشد. افزایش مقدار دوده در فرمول نیز علاوه بر جنبه‌های هیدرودینامیکی، قابلیت تحرک زنجیرهای کائوچویی را به دلیل افزایش برهمکنش‌های پرکننده-کائوچو کاهش می‌دهد. این برهمکنش‌ها هم ماهیت فیزیکی دارند (کائوچوی محبوس یا occluded rubber) و هم ماهیت شیمیایی (attachments) یا پیوند کووالانسی کائوچو - دوده از راه پیوند گوگردی، که در مراجع تقویت‌کنندگی کائوچو توسط پرکننده به آن پرداخته شده است. افزایش روغن در آمیزه منجر به افزایش قابلیت تحرک زنجیرهای پلیمر شده و کاهش سختی را به همراه دارد. برخلاف دوده و شتاب‌دهنده، وابستگی سختی به مقدار روغن در محدوده‌ی مورد مطالعه کاملاً خطی است.

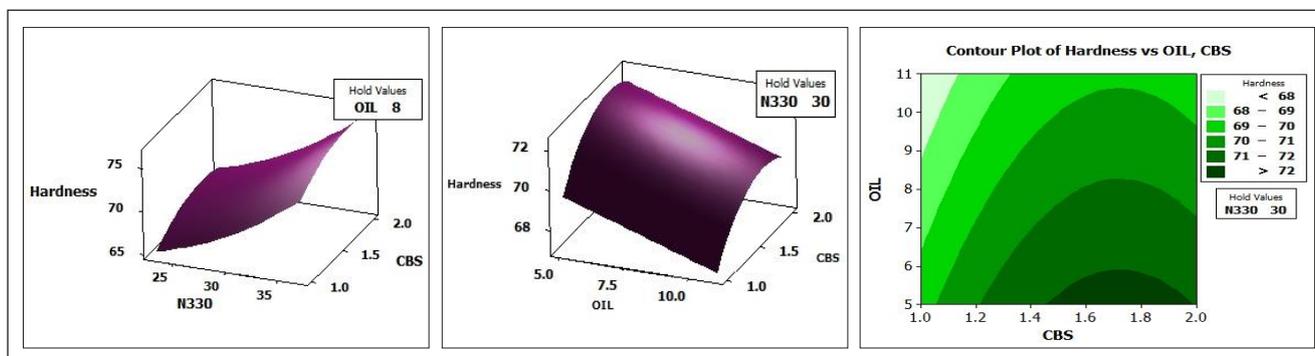
شکل (۲) وابستگی ساده‌ی میزان رشد ترک دی متیا (برحسب میلی‌متر) به سه متغیر مورد مطالعه را در قالب منحنی‌های سطح پاسخ و کانتور نشان می‌دهد. این ویژگی با افزایش مقدار دوده و شتاب‌دهنده افزایش (= افت) و با افزایش مقدار روغن کاهش (= بهبود) می‌یابد. به‌یاری منحنی کانتور، می‌توان مقادیر رشد ترک را در محدوده‌های مختلف عوامل فرمولی مورد مطالعه قرار داد. نمونه‌ی از منحنی کانتور در پایین شکل (۲) برای رشد ترک دی متیا آمده است که به‌عنوان مثال نشان می‌دهد برای مقدار ثابت دوده N330 برابر با ۳۰ phr، برای به‌دست آوردن مقادیر مختلف رشد ترک، میزان دوده و شتاب‌دهنده را در چه محدوده‌ی می‌توان تنظیم کرد.

مورد مطالعه است. برای نیروی پارگی، برهمکنش دوده و شتاب‌دهنده از لحاظ آماری با اهمیت است. همچنین ترم درجه ۲ برای روغن و دوده لحاظ شده است.

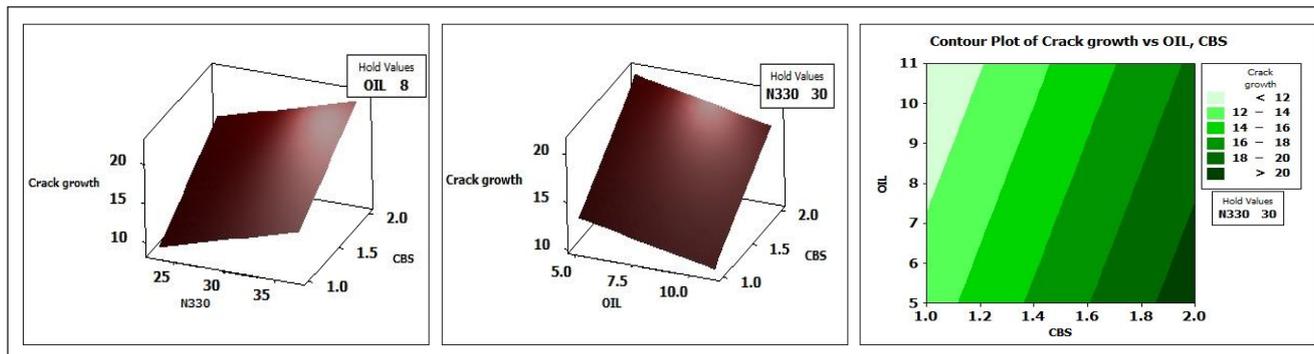
برای سایش نیز ترم‌های درجه دوم روغن و شتاب‌دهنده، و برهمکنش دوده - روغن و دوده-شتاب‌دهنده از لحاظ آماری دارای اهمیت است.

تعدادی از منحنی‌های سطح پاسخ و یک منحنی کانتور برای هر یک از خواص مورد مطالعه در شکل‌های (۱) تا (۴) ارائه شده است.

منحنی سطح پاسخ و کانتور برای سختی در شکل (۱) آمده است. منحنی‌های سطح پاسخ نشان می‌دهد سختی با افزایش مقدار دوده و شتاب‌دهنده افزایش و با افزایش مقدار روغن کاهش می‌یابد. منحنی کانتور نشان می‌دهد مقادیر بالای سختی در سطوح زیاد شتاب‌دهنده و کم روغن قابل حصول است. به‌نظر می‌رسد تأثیر شتاب‌دهنده بر مقدار سختی در سطوح بالای شتاب‌دهنده محدود می‌شود و به‌همین دلیل تحلیل آماری نیز ترم درجه دوم CBS*CBS را (با ضریب منفی) با اهمیت تشخیص داده است. سختی shore A آمیزه‌ی لاستیکی معیاری از مقاومت آمیزه در برابر نفوذ جسم خارجی است. افزایش شتاب‌دهنده‌ی سولفنامیدی تأثیر قابل ملاحظه‌ی بر چگالی پیوندهای عرضی می‌گذارد. این افزایش در چگالی پیوندهای عرضی، مقاومت آمیزه در برابر نفوذ جسم خارجی و یا سختی



شکل ۱- تأثیر دوده، روغن و شتاب‌دهنده بر سختی آمیزه‌ی لاستیکی



شکل ۲- تأثیر دوده، روغن و شتاب‌دهنده بر رشد ترک بی‌متیالی آمیزی لاستیکی (رشد ترک برحسب میلی‌متر)

کرنشی متناوب را داشته، بنابراین بخشی از انرژی الاستیک ورودی به محل ترک به‌جای شکستن پیوندها و پیشرفت ترک، از راه این سازوکار اتلافی مصرف می‌شود، کاری که پیوندهای مونوسولفیدی قادر به انجام آن نیستند [۷].

تأثیر عوامل فرمول‌بندی بر رفتار مقاومت پارگی آمیزی لاستیکی در شکل (۳) در قالب منحنی‌های سطح پاسخ و کانتور نمایش داده شده است. به‌یاری منحنی کانتور می‌توان محدوده‌ی متغیرها را برای رسیدن به نیروی پارگی موردنظر مشخص کرد. منحنی کانتور نشان می‌دهد نیروی پارگی آمیزه در مقادیر کم روغن، پایین است، از طرفی برای مقدار دوده N330 برابر با ۳۰ phr که منحنی کانتور آن ارائه شده شتاب‌دهنده تأثیر کمی بر رفتار پارگی دارد. اما همان‌طور که در معادله‌ی چندجمله‌یی انتهای جدول (۳) مشاهده می‌شود، برهمکنش CBS*N330 دارای اهمیت است، به‌عبارت‌دیگر تأثیر CBS بر رفتار نیروی پارگی آمیزی لاستیکی وابسته به مقدار دوده است. منحنی سطح پاسخ (تصویر سمت چپ شکل ۳) به‌خوبی این اثر برهمکنشی را به‌تصویر می‌کشد. برای Oil برابر با ۸ phr، افزایش مقدار شتاب‌دهنده در مقادیر کم دوده N330 برابر با ۲۵ phr، باعث بهبود و افزایش نیروی پارگی می‌شود، حال آن‌که در مقادیر زیاد دوده، مثلاً N330 برابر با ۲۵ phr، افزایش شتاب‌دهنده افت نیروی پارگی را به همراه دارد. در مقادیر دیگر روغن هم کم‌وبیش همین رفتار و

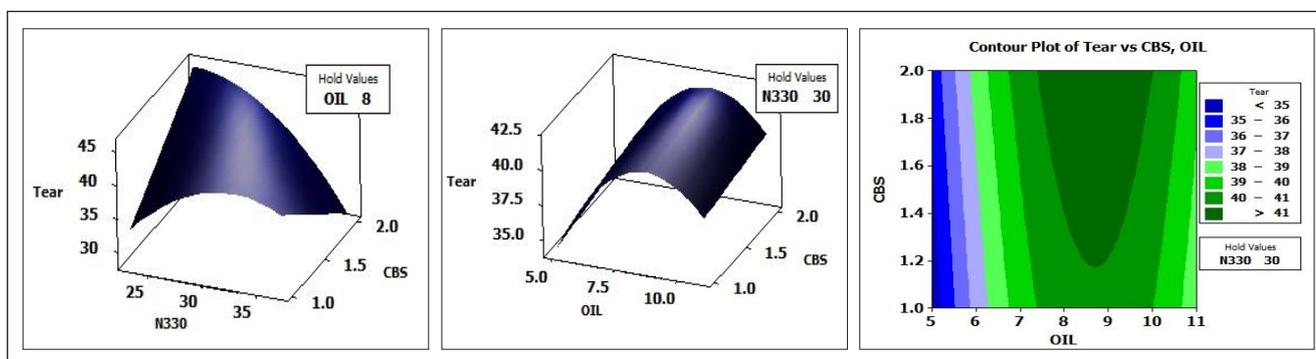
رفتار رشد ترک بی‌متیالی تحت کنترل کرنش است و افزایش مدولوس آمیزه تأثیر منفی روی آن دارد؛ زیرا در آمیزه‌یی که مدولوس کمتری دارد در کرنش یکسان در هر سیکل، انرژی الاستیک یا کرنشی کمتری به محل ترک اعمال می‌گردد. در اینجا نیز افزایش دوده و افزایش شتاب‌دهنده منجر به افزایش مدولوس آمیزه می‌گردد که تأثیر افزایشی بر انرژی الاستیک ورودی به محل ترک و در نتیجه تأثیر منفی بر رشد ترک بی‌متیالی دارد، حال آن‌که افزایش روغن منجر به کاهش مدولوس و بهبود مقاومت در برابر رشد ترک می‌شود.

با عنایت به ضرایب معادله‌ی کوتاه شده‌ی خطی در انتهای جدول (۳) و نیز شیب منحنی‌ها، می‌توان دید که در محدوده‌ی متغیرهای موردبررسی، تأثیر مقدار شتاب‌دهنده شدیدتر از تأثیر مقدار دوده و روغن بر ویژگی رشد ترک بی‌متیالی است، زیرا شتاب‌دهنده علاوه بر تأثیر افزایشی بر مدولوس آمیزه - که افزایش انرژی الاستیک ورودی به محل پیوند در هر سیکل را به‌همراه دارد- بر توزیع پیوندهای گوگردی نیز تأثیرگذار است و افزایش احتمالی پیوندهای مونوسولفیدی در مقایسه با پلی‌سولفیدی (با افزایش شتاب‌دهنده و عدم تغییر مقدار گوگرد) رفتار شکست آمیزه در محل ترک در حین اعمال کرنش متناوب را تضعیف می‌کند. همان‌طور که توسط نویسندگان بسیاری اظهار شده، پیوندهای پلی‌سولفیدی در مقایسه با پیوندهای مونوسولفیدی قابلیت شکست و تشکیل مجدد در حین فرایند

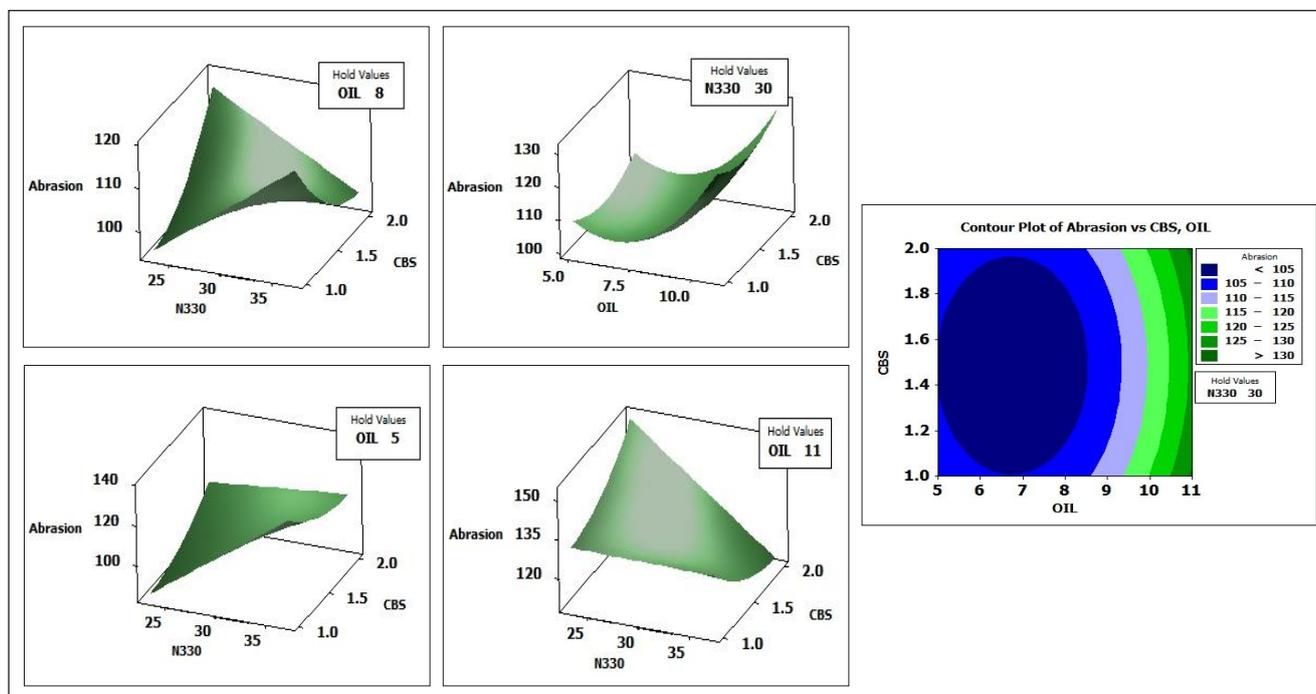
است. منحنی سطح پاسخ (تصویر سمت راست بالا در شکل ۴) اثرات برهمکنش قوی بین شتاب‌دهنده و روغن بر رفتار سایش را به تصویر می‌کشد. سایر منحنی‌ها وابستگی سایش به شتاب‌دهنده و دوده را در مقادیر مختلف روغن نشان می‌دهند. در مقادیر میانی روغن (تصویر بالا سمت چپ در شکل ۴)، چنانچه مقدار دوده زیاد باشد، افزایش مقدار شتاب‌دهنده تأثیر کاهشی (= بهبوددهنده) بر مقدار سایش دارد. در مقادیر کم

وابستگی مشاهده می‌شود (منحنی‌ها ارائه نشده است) چراکه تحلیل آماری ترم‌های اثرات برهمکنش روغن با دو متغیر دیگر را کم‌اهمیت دانسته است.

شکل (۴) وابستگی پیچیده‌ی ویژگی میزان سایش DIN به عوامل فرمول‌بندی این مطالعه را نشان می‌دهد. به دلیل پیچیدگی رفتارها و حضور دو ترم برهمکنش CBS*N330 و Oil*N330، تعداد منحنی‌های سطح پاسخ بیشتری ارائه شده



شکل ۳- منحنی‌های سطح پاسخ و کانتور برای مقاومت پارگی آمیزه‌ی لاستیکی (برحسب kN/m)



شکل ۴- منحنی‌های سطح پاسخ برای میزان سایش DIN- وابستگی پیچیده‌ی سایش به عوامل فرمول‌بندی

بعضی از رفتارهای سایش را به خوبی می‌توان با این مدل تفسیر کرد. به‌عنوان مثال در بیشتر حالت‌ها، افزایش روغن باعث افزایش میزان سایش شده است. مهم‌ترین دلیل به این شرح است که افزایش روغن منجر به کاهش مدولوس و افزایش ε^* می‌شود که به ضرر سایش است، زیرا لاستیک در محل ترک بیشتر کشیده شده و انرژی کرنشی بیشتری به محل ترک در هر سیکل سایش وارد می‌شود. افزایش مقدار شتاب‌دهنده با وجود تأثیر مثبت بر مدولوس و اثر کاهشی بر ε^* ، از آن‌جا که منجر به افزایش سهم پیوندهای مونوسولفیدی و اُفت ماهیت رشد ترک آمیزه (از راه اُفت فرایندهای اتلافی) می‌گردد، در بیشتر موارد اُفت سایش را به‌همراه دارد، به‌جز در مقادیر به‌اندازه‌ی کافی زیاد دوده، جایی‌که مقدار مدولوس آمیزه به‌اندازه‌ی کافی زیاد و ε^* به‌اندازه‌ی کافی کم است. افزایش شتاب‌دهنده نیز مقدار مدولوس را بیشتر می‌کند به‌گونه‌ی که تغییر شکل (ε^*) بسیار کمی در محل سایش وارد می‌شود، پس اُفت ماهیت رشد ترک که به‌دلیل حضور مقادیر زیاد پیوندهای عرضی مونوسولفیدی است کم‌رنگ می‌گردد. برای تأیید تفسیر بالا، به بهترین شکل می‌توان دید در مقادیر زیاد روغن (تصویر بالا سمت راست شکل ۴) جایی‌که دوده هم زیاد است (۳۰ قسمت وزنی) چون مقادیر زیاد روغن، مدولوس آمیزه را پایین آورده، افزایش شتاب‌دهنده منجر به افزایش جزئی میزان سایش شده است. در شکل (۴) پایین سمت راست نیز می‌توان به‌خوبی دید در مقادیر بیشتر دوده (۳۵ قسمت وزنی) و همان مقدار زیاد روغن (۱۰ قسمت وزنی) چون مجدداً مدولوس بیشتر شده، پس افزایش مقدار شتاب‌دهنده تأثیر افزایشی قابل‌توجه بر سایش نشان نمی‌دهد. در مورد تأثیر پرکننده بر رفتار سایش و اثر متقابل آن با روغن و شتاب‌دهنده، می‌توان دید دوده هم با شتاب‌دهنده و هم با روغن اثر برهمکنشی دارد (شکل ۴) و معادله‌ی درجه دوم جدول ۳). ابتدا انتظار بر این‌ست که با توجه به معادله‌ی

دوده، افزایش شتاب‌دهنده باعث افزایش میزان سایش می‌شود. تأثیر افزایش دوده بر رفتار سایش وابسته به سطوح روغن و شتاب‌دهنده است. در مقادیر زیاد روغن، افزایش دوده تأثیری بر سایش نشان نمی‌دهد (تصویر پایینی شکل ۴ سمت راست)، اما در مقادیر کم شتاب‌دهنده و روغن، تأثیر افزایشی سایش با افزایش دوده مشاهده می‌شود. به‌دلیل عدم شناخت و اشراف کامل به سازوکارهای سایش، امکان توجیه دقیق این رفتارها وجود ندارد. شاید مدل Fukahori برای توجیه تقریبی این رفتارهای سایش مناسب به نظر برسد [۸]. در مدل Fukahori پدیده‌ی سایش به‌صورت پدیده‌ی رشد ترک خستگی برحسب دامنه‌ی کرنشی میانگین ε^* بیان می‌شود. این پارامتر در مدل Fukahori توسط ضریب اصطکاک μ ، مدول یانگ E ماده، بار عمودی P و مساحت سطح S و با رابطه‌ی (۱۱) توصیف می‌شود. به این شیوه سرعت سایش توسط رابطه‌ی (۱۲) بیان می‌شود:

$$\varepsilon^* = \mu P / ES \quad (11)$$

$$\dot{D} = dc(\varepsilon^*) / dt \quad (12)$$

بنابراین نقش عوامل فرمولاسیونی بر رفتار سایش آمیخته‌ی لاستیکی را می‌توان از راه آثار آن‌ها در دو شاخه‌ی مختلف تفکیک و مطالعه کرد. اول، اثر آن عامل بر پارامتر ε^* و دوم، تأثیر آن بر رفتار رشد ترک لاستیک [۸]. مدولوس آمیزه در پارامتر ε^* با اهمیت است و هرچه مدولوس آمیزه کمتر باشد مقدار این پارامتر بیشتر می‌شود، که به‌معنی آنست محل سایش آمیزه در حین اعمال بار، تغییر شکل و کرنش بیشتری را تجربه می‌کند که به ضرر فرایند سایش است؛ زیرا انرژی کرنشی بیشتری به محل ترک اعمال می‌گردد. از طرف دیگر ترم dc/dt رفتار ذاتی رشد ترک آمیزه، برابند فرایندهای اتلافی‌ست که در محل ترک تجربه می‌شود، نظیر انرژی لازم برای شکست پیوند، هیسترسیس حاصل از برهمکنش رابر-پرکننده، سازوکارهای اتلافی پیوندهای پلی سولفیدی و ...

افزایش مقدار سایش مشاهده می‌شود. نتیجه‌های منحنی‌ها نشان می‌دهد این سطح بهینه‌ی برهمکنش را در مقادیر کمتر دوده باید جست‌وجو نمود (توجه شود که مقدار دوده‌ی پایه‌ی فرمول ۴۰ قسمت وزنی است و مقدار دوده در این طرح آزمایش به مقدار پایه اضافه شده است). مقدار روغن قطعاً بر این سطح بهینه تأثیر دارد. منحنی پایین سمت راست ارائه شده در شکل (۴) نشان می‌دهد در مقادیر زیاد روغن، افزایش مقدار دوده تأثیر افزایشی بر سایش ندارد.

بهینه‌سازی

از ۴ مدل رگرسیون به‌دست آمده (جدول ۴) برای بهینه‌سازی ترکیب آمیزه‌ی لاستیکی برای چهار ویژگی مورد مطالعه استفاده شد. ابتدا مقدار هدف و حدود بالا و پایین برای چهار ویژگی

Fukahori و توضیحات ارائه شده، افزایش دوده به نفع سایش عمل کند زیرا افزایش دوده مدولوس آمیزه را افزایش و ϵ^* را کاهش می‌دهد. اما رفتارهای معکوس منحنی‌ها در بیشتر موارد نشان می‌دهد عامل مهم‌تر و غالب دیگری وجود دارد که احتمالاً همان ماهیت رشد ترک آمیزه و چگونگی فرایندهای اتلافی در ناحیه‌ی ترک است. بنابراین بخش دوم مدل بالا که مربوط به ماهیت رفتار آمیزه در محل ترک است اهمیت دارد. به نظر می‌رسد یک سطح بهینه‌ی برهمکنش کائوچو- پرکننده برای رفتار رشد ترک آمیزه dc/dt در این ناحیه وجود دارد که متأثر از مقدار پرکننده، مقدار روغن و حتی مقدار عوامل پخت باشد. زمانی‌که مقدار پرکننده در آمیزه به اندازه‌ی می‌رسد که از این سطح بهینه خارج شود، رشد ترک آفت و با وجود افزایش مدولوس (و کاهش ϵ^*),

جدول ۴- شرایط بهینه‌ی حاصل از مدل سطح پاسخ

ورودی نرم‌افزار شامل تعیین مقادیر هدف، و حد بالا و پایین، و وزن‌ها و اهمیت						
Response Optimization						
Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Abrasion	Minimum	90	90	95	1	1
Tear	Maximum	35	38	38	1	1
Crack growth	Minimum	14	14	16	1	1
Hardness	Target	65	68	72	1	1
خروجی و جواب بهینه‌سازی نرم‌افزار شامل مقادیر متغیرها و پیش‌بینی مقادیر خواص						
Global Solution						
N330	=	23.1414				
OIL	=	6.63636				
CBS	=	1.42534				
Predicted Responses						
Abrasion	=	91.8842	,	desirability =	0.623164	
Tear	=	36.8764	,	desirability =	0.625473	
Crack growth	=	13.1084	,	desirability =	1.000000	
Hardness	=	68.1481	,	desirability =	0.962984	
Composite Desirability = 0.782722						

رشد ترک، سایش، پارگی و سختی تعیین شد، سپس ترکیب موردنظر و نتایج پیش‌بینی توسط نرم‌افزار محاسبه شد. نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد فرمول بهینه به سمت مقادیر کمتر دوده و روغن حرکت کرده است.

نتیجه‌گیری

رویکرد "سطح پاسخ" در مقایسه با روش‌های تجربی و روش‌های بهینه‌سازی معمول، که در آن‌ها یک متغیر در هر لحظه بررسی می‌شود، دارای چندین مزیت است. نخست این‌که به‌کمک آن حجم زیاد اطلاعات از تعداد اندک آزمایش به‌دست می‌آید. در حقیقت روش‌های کلاسیک زمان‌بر و پرهزینه بوده و تعداد زیادی آزمون نیاز است تا رفتار سیستم توضیح داده شود. دوم اینکه کارکردن با یک طرح تجربی آماری نه‌تنها خطای تجربی هر نقطه‌ی تجربی را تصادفی می‌کند بلکه توزیع نقاط تجربی را در گسترده‌ی بررسی متغیرهای مستقل معادل می‌کند. این امر صحت معادله‌ی مدل را افزایش خواهد داد. سوم اینکه در RSM امکان مشاهده‌ی اثر برهمکنش مابین متغیرهای مستقل (فاکتورها) روی پاسخ وجود دارد و مدل سطح پاسخ به‌راحتی آثار ترکیب‌های دوتایی متغیرهای مستقل را مشخص می‌کند. علاوه بر این، مدل تجربی RSM که

پاسخ را به متغیرهای مستقل مرتبط می‌کند می‌تواند ابزاری مفید برای بهینه‌سازی باشد. در مجموع RSM حل مسائل مهندسی مورد ملاحظه را با مقایسه‌ی معنی‌دار ضرایب و حذف ترم‌های کم‌اهمیت (از لحاظ آماری) راحت‌تر می‌کند.

کار تجربی انجام شده پتانسیل بالای RSM را در مطالعه‌ی آمیزه‌کاری کائوچو نشان داده است. به‌یاری "طراحی آزمایش" مناسب و استفاده از ابزار توانمند تحلیل آماری در کنار منحنی‌های سطح پاسخ و کانتور می‌توان رفتارهای پیچیده‌ی حاکم را به‌خوبی تحلیل، مدل‌سازی و بهینه کرد. متدولوژی ارائه شده با وجود قابلیت‌های برجسته‌ی خود دارای معایبی نیز هست. به‌عنوان مثال، داده‌های تجربی باید با نهایت دقت گردآوری شود و می‌دانیم گردآوری داده برای توسعه‌ی فرمول لاستیکی دارای خطاهای مختلف است. مسأله‌ی دوم، استفاده از مدل درجه ۲ برای بررسی همه‌ی رفتارها، ممکن است ایجاد خطا کند. بنابراین نباید به رفتارهای پیش‌بینی شده به‌طور کامل اعتماد کرد. روش‌های نوین مدل‌سازی، رفتارهای پیچیده و به‌شدت غیرخطی نظیر مدل‌سازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌تواند در کنار RSM به‌کار گرفته شود و پیش‌بینی و مطالعه‌ی رفتارها را کارآمدتر و قابل‌اعتمادتر سازند. این مهم در مقاله‌های قبلی این مجموعه مقالات ارائه شده است *IRM*

مراجع

1. Derringer G. C., Statistical methods in rubber research and development, Rubber Chem. Technol., 61, 377-420(1986).
2. Shiva M., Atashi H., Fakhari M. H., Studying the Possibility of Reducing of NR/BR Ratio in Truck Tread Compound with Silica/Silane/Carbon Black Reinforcement Systems., 9th International Seminar on Polymer Science and Technology, Tehran, Iran, 17-21 October (2009).
3. Shiva M., Atashi H., Fakhari M. H., Studying the Effect of Compounding Ingredients on Tearing Behavior of Rubber, The 6th International Chemical Engineering Congress & Exhibition., Kish Island, Iran, 16-19 November (2009).
4. Kukreja T.R., Kumar D., Prasad K., Chauhan R.C., Choe S., Kundu P.P., Optimization of physical and mechanical properties of rubber compounds by response surface methodology—Two component modeling using vegetable oil and carbon black, European Polymer Journal 38, 1417-1422, 2002

۵- مهدی شیوا، سیدعلی ضیاتبار، کاربرد طراحی آزمایش و تحلیل آماری در آمیزه‌کاری لاستیک، مطالعه موردی، استفاده از آلی‌رس در آمیزه‌های ترد تایر در قالب طرح آزمایش فاکتوریل دو سطحی، نشریه‌ی صنعت لاستیک ایران، سال بیست و یکم، شماره‌ی ۸۴، زمستان ۹۵، صفحه‌ی ۲۲-۳۲

6. Proust M., Design of Experiments, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA(2005).

7. Lake G. J., Lindley P. B., The mechanical Fatigue Limit for ubber, Journal of Applied Polymer Science, 9, 1233-1251(1965)

۸- مهدی شیوا، امیر هوشنگ حدادی، علیرضا نخعی، حسین وارسته، مطالعه‌ی رفتار سایش DIN رویه‌ی تایر به کمک مدل‌های سطح پاسخ و شبکه‌ی عصبی مصنوعی، مجله‌ی علوم و تکنولوژی پلیمر، سال بیست و هشتم، شماره‌ی ۳، صفحه‌ی ۱۹۷-۲۰۹، ۱۳۹۴

«تویوتا» چیست ؟

تویوتا، شرکتی است که در آن سالیانه، حدود ۷۰۰,۰۰۰ پیشنهاد از طرف تمامی کارکنان ارائه می‌شود! (دقت کنید: «تمامی کارکنان»!) و ... ۹۹ درصد از این پیشنهادات، به اجرا در می‌آید!!

نظام پیشنهادات (Suggestion System ~ SS)، یکی از اجزای اصلی و حیاتی سیستم مدیریت تویوتاست. در نظام پیشنهادات (SS)، کارکنان برای ارائه‌ی پیشنهادهای مفید، «آموزش» می‌بینند. در SS، کارکنان به ازای هر پیشنهاد مفید و اجرایی که بدهند، متناسب با منافع بدست آمده، منفعت می‌برند. در SS، مدیران، «عاشق» گرفتن پیشنهادات هستند. پیشنهادهایی که بعضاً، حتی طرز مدیریت آن‌ها را زیر سوال می‌برد، اما در نهایت منجر به «مدیر نمونه» شدن ایشان می‌شود! در SS، تمام کارکنان، از پایین تا بالا، در همه‌ی زمینه‌ها (از تولید و مهندسی گرفته، تا مواد شوینده و حتی نظافت سرویس بهداشتی!) پیشنهاد می‌دهند. به‌ویژه که بیشتر پیشنهادات، از پایین دست‌هاست. زیرا سیستم مدیریت تویوتا، باور دارد که ۹۷ درصد از مشکلات و نواقص و درزها و نشتی‌ها، تنها توسط کارکنانی قابل شناسایی است که در کف سیستم، مشغول به کارند و از این‌رو، تا ریزترین اشکالات در امور را متوجه می‌شوند.

سیستم مدیریت تویوتا می‌گوید: «فهم مدیران از مشکلات و معایب، در حالت خوشبینانه، فقط ۳ درصد است!» این است که به مشارکت «تمام کارکنان»، اعتقاد و التزام عملی دارند. این اعتقاد و التزام، برآمده از یک قاعده‌ی ساده ریاضی است ... و اما قاعده‌ی ریاضی حاکم بر تویوتا، از زبان خودشان این است: عقل «من»، کوچکتر-مساوی عقل «ما» (به همین سادگی!) بدیهی است که بدون «روح» تویوتایی، نمی‌توان با «ابزار» تویوتایی به جایی رسید. این که چرا آن‌ها تویوتا هستند و ما نیستیم، با همان قاعده‌ی ریاضی که تویوتایی‌ها به آن اعتقاد و «تعهد» دارند، به‌سادگی قابل توجیه است.

و اما در پایان، بد نیست که محاسبه‌ی کوچکی انجام دهیم:

۷۰۰ هزار پیشنهاد در «سال»، مساوی است با سالی که در هر «ساعت» از شبانه‌روز آن، ۸۰ پیشنهاد تولید و تقدیم شود. فقط تصور کنید اگر تویوتا فاقد یک چنین «سیستم مدیریت» می‌بود؛ مدیر تویوتا، چقدر باید فکر می‌کرد و چقدر باید توان جسمانی می‌داشت و چقدر باید اشراف کامل و همه‌جانبه به تمامی امور در تمامی سطوح سیستم می‌داشت، که بتواند در هر «شبانه‌روز»، بیش از ۱۹۰۰ ایده‌ی «بهبود» ارائه کند! آن هم به‌طوری که ۹۹ درصد آن ایده‌ها، عملی باشند.

The Use of Design of Experiments and Statistical Analysis in Rubber Compounding: The Case Study of Tyre Tread Compound Optimization Using Response Surface Methodology

M. Shiva^{1,*} and H. Varasteh²

1. Assistant Prof. of Chemical Engineering, University of Birjand
2. The Technology Unit, Kavir Tire Co.

*Corresponding author Email: mehdishiva@birjandut.ac.ir

Received: December 2016, Revised: July 2017, Accepted: August 2017

Abstract: The impact of three important formulation factors on a number of key rubber compound properties of a tyre tread formulation was studied using response surface methodology and central composite design of experiments. Abrasion, dematia crack growth, hardness and tear force of rubber compounds were well modeled and statistically validated. The developed models were successfully employed for recognizing behaviors, studying the governed mechanisms and optimization. It has been shown that response surface methodology is an efficient approach for rubber compounding studies.

Keywords: Radial tyre, Tread compound, Design of experiments, Statistical modeling, Regression analysis.