

Study of Abrasion of Rubber Materials by Experimental Design, Response Surface and Artificial Neural Network Modeling

Mehdi Shiva^{1,2*}, Amir Hoshang Hadadi¹, Alireza Nakhaei³, and Hossein Varasteh²

1. Department of Chemical Engineering, University Birjand of Technology,

Postal Code: 9719866981, Birjand, Iran

2. Research Center of Kavir Tire Co., P.O. Box: 518, Birjand, Iran

3. Department of Chemistry, Yazd Branch, Islamic Azad University, Postal Code: 8916871967, Yazd, Iran

Received: 26 July 2014, accepted: 1 March 2015

ABSTRACT

Effect of different formulation ingredients on the abrasion behavior, crack growth and modulus of tire tread formulation was studied using two different case studies. In the first case study, the effect of the partial substitution of natural rubber by cis-butadiene and the content variation of oil and sulfur in the presence of modified clay was studied on the basis of central composite design experiment in a NR/SBR-based truck tire tread formulation. In the second case study, the effect of oil, sulfur and highly dispersible silica level was investigated via Box-Benken design experiment in a SBR/BR-based passenger tire tread formulation. In each study a suitable response surface model was developed on the basis of the data obtained using the experimental design. Artificial neural network models with forwarding multi-layers were also developed to investigate the potential of the current approach in modeling of fracture behavior of rubber materials. It was observed that the complex dependency of the fracture/abrasion behavior of rubbery materials on formulation variations could be modeled with high accuracy through response surface and artificial neural models. The response surface profiles were developed to explain the abrasion behavior better. The observed behaviors for the abrasion of rubber formulations were also investigated with the aid of the modulus statistical analysis, deMattia crack growth model and also the Fukahori and mechano-chemical abrasion theories. In the presence of high levels of cis-butadiene, the abrasion with the mechano-chemical mechanism is dominant. However, according to the Fukahori model, the mean amplitude strain has a key effect on the abrasion of rubbery materials.

Keywords:

rubber,
experimental design,
statistical models,
artificial neural network,
abrasion mechanism,
crack growth

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mehdishiva@birjandut.ac.ir

کاربرد طراحی آزمون، مدل سازی سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی در مطالعه سایش مواد لاستیکی

مهدی شیوا^{۱*}، امیر هوشنگ حدادی^۱، علیرضا نخعی^۲، حسین وارسته^۳

۱- بیرجند، دانشگاه صنعتی بیرجند، گروه مهندسی شیمی، کد پستی ۹۷۱۹۸۶۶۹۸۱

۲- بیرجند، شرکت کویر تایر، واحد تکنولوژی، صندوق پستی ۵۱۸

۳- یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یزد، گروه شیمی، کد پستی ۸۹۱۶۸۷۱۹۶۷

دریافت: ۹۳/۵/۴، پذیرش: ۹۳/۱۲/۱۰

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،
سال بیست و هشتم، شماره ۳،
صفحه ۲۰۹-۱۹۷، ۱۳۹۴
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883

چکیده

اثر عوامل مختلف فرمول بندی بر رفتار سایش، رشد ترک و مدول آمیخته رویه تایر در دو مطالعه موردی بررسی شد. در مطالعه اول، اثر جایگزینی بخشی از کائوچوی طبیعی با کائوچوی بوتادی ان، تغییر مقدار روغن و گوگرد براساس طراحی آزمون مرکب مرکزی (central composite) در آمیزه رویه تایر باری برپایه NR/SBR در مجاورت خاکرس اصلاح شده مطالعه شد. در مطالعه دوم، اثر مقدار روغن، گوگرد و سیلیکا با قابلیت پراکنش زیاد در آمیزه رویه تایر سواری آمیخته SBR/BR در طراحی آزمون box Behnken بررسی شد. در هر دو مطالعه، مدل سطح پاسخ مناسب بر مبنای داده های تجربی گردآوری شده براساس طراحی آزمون توسعه داده شد. همچنین، مدل شبکه عصبی مصنوعی چندلایه پیشرو برای بررسی قابلیت این رویکرد پیشرفته در مدل سازی خواص شکست آمیخته لاستیکی توسعه داده شد. مشاهده شد، در مطالعات موردی وابستگی پیچیده خواص شکست آمیخته لاستیکی به عوامل فرمول بندی را می توان به خوبی با مدل سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی بیان کرد. برای بیان بهتر رفتار سایش از منحنی های سطح پاسخ استفاده شد. همچنین مشاهده شد، به کمک مدل های آماری مدول و رشد ترک deMattia، دانش موجود از نظریه Fukahori و نیز نظریه های مکانیکی شیمیایی، رفتارهای پیچیده مشاهده شده برای سایش آمیخته های لاستیکی را می توان بررسی کرد. وجود مقادیر زیاد کائوچوی بوتادی ان منجر به ارجحیت سازوکارهای مکانیکی شیمیایی سایش می شود، اما مقدار دامنه کرنشی میانگین مطابق با مدل Fukahori در مقدار سایش آمیزه لاستیکی بسیار کلیدی است.

واژه های کلیدی

لاستیک،
طراحی آزمون،
مدل های آماری،
شبکه عصبی مصنوعی،
سازوکار سایش،
رشد ترک

* مسئول مکاتبات، پیام نگار:
mehdishiva@birjandut.ac.ir

مقدمه

مدل شبکه عصبی را برای بیان رفتار سایش برحسب سایر خواص فیزیکی-مکانیکی توسعه داده‌اند. شبکه‌های عصبی مصنوعی ابزار مدل سازی پیشرفته بر مبنای داده‌های تجربی هستند که کاربرد گسترده‌ای در شاخه‌های مختلف علوم و مهندسی پلیمر پیدا کرده‌اند [۱۴]. با مرور مراجع می‌توان دید، مطالعات وابستگی رفتار سایش به عوامل فرمول‌بندی به کمک رویکرد سطح پاسخ و مدل شبکه عصبی کمتر انجام یا منتشر شده است [۱۵]. به کمک این رویکرد تجربی، مطالعه پدیده سایش مؤثرتر می‌شود. از آنجا که استفاده از رویکرد سطح پاسخ مستلزم گردآوری داده‌های تجربی بر اساس طرح‌های آزمایش استاندارد است و این موضوع منجر به توزیع یکنواخت تر داده‌ها در محدوده در حال مطالعه می‌شود، امکان توسعه مدل‌های دانش‌بنیان مانند شبکه عصبی مصنوعی بر مبنای داده‌های کمتر، میسر می‌شود. در این پژوهش، مدل سازی با شبکه عصبی مصنوعی روی داده‌های تجربی گردآوری شده بر اساس طراحی آزمون در قالب دو مطالعه موردی بررسی و نتایج مدل سازی با این رویکرد با روش مدل سازی کلاسیک سطح پاسخ مقایسه شده است. همچنین، رویکرد نوینی برای مطالعه سازوکار حاکم بر رفتار سایش به کمک رفتارهای مشاهده شده با مدل‌های تجربی و نیز نظریه‌های موجود تشریح شده است.

تجربی

مواد

کائوچوی طبیعی با گرانروی مونی $(\pm 1) \times 88 \text{ ML}$ در 100°C و چگالی 0.91 g/cm^3 از شرکت ماروب مالزی، کائوچوی سیس بوتادی‌ان با گرانروی مونی ۴۵ و چگالی 0.908 g/cm^3 از پتروشیمی اراک، کائوچوی استیرن بوتادی‌ان امولسیون با گرانروی مونی $(\pm 1) \times 88 \text{ ML}$ در 100°C و چگالی 0.954 g/cm^3 از پتروشیمی بندر امام و دوده N375 با چگالی 1.78 g/cm^3 و pH برابر $8/7$ از دوده صنعتی پارس تهیه شد. از سیلیکا با پراکنش پذیری زیاد، BET و pH به ترتیب برابر 20 ± 170 و $0.5 \pm 6/5$ استفاده شد. سیلان Si69 از شرکت دگوسا، مونت‌موریلونیت اصلاح شده با روی استئارات در آزمایشگاه، روغن آروماتیک با دمای اشتعال 232°C ، نقطه آنیلین 33 ، چگالی 0.99 g/cm^3 و گرانروی سینماتیکی 26 cSt از شرکت نفت بهران، روغن TRAE، روغن فرایند سبز از شرکت ایرانول با دمای اشتعال 250°C ، نقطه آنیلین 70°C و گرانروی سینماتیکی 40 cSt در 100°C ، روی اکسید، استئاریک اسید، گوگرد معمولی و شتاب‌دهنده سولفونامیدی از شرکت‌های معتبر داخلی و خارجی تهیه شدند.

سایش از ویژگی‌های مهم قطعه لاستیکی بوده و ارتباط نزدیکی با طول عمر آن دارد. با وجود این، پیش‌بینی رفتار سایش قطعه لاستیکی کار ساده‌ای نیست و عوامل متنوعی متأثر می‌شود [۱،۲]. سایش لاستیک پدیده‌ای پیچیده بوده و چند سازوکار در آن دخالت دارند [۲]. Schallamach [۳] تلاش‌های اولیه را برای مطالعه پدیده سایش قطعه لاستیکی و ارائه سازوکار برای آن انجام داد. Champ و همکاران [۴] نظریه ساده‌ای ارائه دادند که در آن پدیده سایش قطعه لاستیکی به خاصیت رشد ترک آن نسبت داده شد. Thomas [۵،۶] فرسایش سایشی را به شکل فرایند رشد ترک خستگی بررسی کرده است. فرایند سایش با جدایی ذرات ریزمیکرونی لاستیک آغاز می‌شود. با ادامه سایش، ذرات درشت‌تر چندمیکرونی جدا می‌شوند. باور بر این است که جدایی ذرات ریزتر حالت ابتدایی سایش است که منجر به الگوی سایش می‌شود. اگر سایش در همان جهت ادامه یابد، این الگوها شکل پایداری به خود می‌گیرند. Fukahori و همکاران [۷-۹] با طراحی و ساخت دستگاه بررسی سایش و اصطکاک قطعه لاستیکی، ضمن مطالعه سایش موفق به برقراری ارتباط بین ضریب اصطکاک و شکست قطعه لاستیکی و ارائه مدل سایش به شکل پدیده رشد ترک برحسب کرنش میانگین ایجاد شده در محل الگوها شدند. با وجود این، همان‌طور که Gent و Pulford [۲] اظهار کردند، پدیده سایش را نمی‌توان فقط برحسب خواص رشد ترک آمیخته لاستیکی بیان کرد و باید سایر فرایندها، به‌عنوان مثال فرایندهای شکست شیمیایی اکسیژنی، را نیز در نظر گرفت. گفته شده است، پدیده سایش حاصل رقابت بین دو سازوکار مختلف است [۲،۳]. سازوکار اول، شامل خارج شدن ذرات میکروسکوپی از سطح لاستیک از راه شکست مکانیکی و سازوکار دوم، تخریب شیمیایی لاستیک در ناحیه سطحی است که با تنش مکانیکی آغاز شده و با اکسیژن تشدید می‌شود. از طرف دیگر، شناخت رفتار سایش و پیش‌بینی آن در قطعه لاستیکی برای اهداف طراحی آمیخته لاستیکی بسیار حیاتی است. با توجه به پیچیدگی‌های رفتار سایش و نبود شناخت کامل از سازوکارهای حاکم بر آن، توسعه مدل‌های نظری و سازوکاری برای این پدیده دشوار است. بنابراین، استفاده از رویکردهای تجربی و توسعه مدل‌های آماری و دانش‌بنیان مناسب بر مبنای داده‌های تجربی می‌تواند برای مطالعه رفتارها و سازوکارهای حاکم بر رفتار سایش و نیز اهداف طراحی آمیخته مفید باشد. در این زمینه، تلاش‌های گسترده‌ای انجام شده است [۱۴-۱۰،۳]. Manas [۱۲] مدل رگرسیون خطی چندگانه را برای توصیف وابستگی سایش و سایر خواص فیزیکی-مکانیکی توسعه داده است. به‌تازگی Wang و همکاران [۱۳]

دستگاه‌ها و روش‌ها

فرمول بندی

در مطالعه موردی اول، اثر جایگزینی بخشی از کائوچوی طبیعی با کائوچوی بوتادی‌ان، تغییر مقدار روغن آروماتیک و تغییر مقدار گوگرد بر رفتار سایش، رشد ترک deMattia و DCG) و مدول آمیخته لاستیکی رویه تایلر باری برپایه NR/SBR (نسبت ۶۰ به ۴۰) پر شده با دوده و خاک رس آلی اصلاح شده بررسی شده است. در آمیخته مطالعه شده ۱۰ قسمت وزنی دوده N375 با ۵ قسمت وزنی خاک رس آلی اصلاح شده (مونت‌موریلونیت اصلاح شده با روی استئارات) جایگزین و سپس آثار گوگرد، روغن و کائوچوی بوتادی‌ان در قالب طراحی آزمون مرکب مرکزی (central composite design, CCD) ارزیابی شد. سایر مواد در فرمول بندی شامل محافظت کننده، شتاب دهنده، روی اکسید و استتاریک اسید بود که مقدار آنها برای همه فرمول بندی‌ها ثابت در نظر گرفته شد. تعداد ۱۷ فرمول بندی براساس این طراحی آزمون حاصل شد.

در مطالعه موردی دوم، اثر جایگزینی بخشی از دوده پایه با سیلیکا با پراکنش پذیری زیاد HDS (در مجاورت سیلان)، تغییرات روغن فرایند سبز TRAE و گوگرد بر رفتار سایش، رشد ترک deMattia و مدول آمیخته لاستیکی رویه تایلر سواری برپایه SBR/BR با نسبت زیاد BR بررسی شد. در این مطالعه از طراحی آزمون Box Behnken برای تعیین سطوح متغیرها و توسعه مدل آماری استفاده شد. سایر عوامل فرمول بندی شامل استتاریک اسید، روی اکسید، محافظت کننده‌ها و شتاب دهنده در همه فرمول بندی‌ها ثابت بود.

تهیه آمیخته‌ها

آمیخته‌ها در مخلوط کن داخلی آزمایشگاهی ۲ لیتری مدل POMINI MIX32 تهیه شدند. در مطالعه اول (آمیخته رویه تایلر باری برپایه NR/SBR/BR) سرعت چرخنده ثابت برابر ۶۰ rpm لحاظ شد تا حداکثر تنش برای پراکنش خاک رس آلی اصلاح شده اعمال شود. خاک رس آلی اصلاح شده به همراه کائوچو اضافه شد و پرکننده‌ها ۴۰ s بعد افزوده شدند. روغن پس از ۳۰ s اضافه و دمای تخلیه روی ۱۷۰°C تنظیم شد. زمان‌های مؤثر اختلاط برای ۱۷ آمیخته طراحی شده در محدوده ۲۲۰ s تا ۲۴۰ s و انرژی اختلاط در محدوده ۰/۱۶ kW/s تا ۰/۱۹ kW/s به دست آمد. آمیخته‌های نهایی با اضافه کردن عوامل پخت روی آسیاب دوغلتکی پس از یک روز استراحت تهیه شدند.

در مطالعه دوم، شرایط اختلاط طوری تنظیم شد تا واکنش اصلاح سطح سیلیکا (سیلان دار کردن) به خوبی انجام شود. بدین منظور پس از

افزودن ترتیبی کائوچو، مواد شیمیایی، دوده، سیلیکا-سیلان و روغن، مراحل آخر اختلاط در چند فاز تنظیم و با تغییر سرعت چرخنده، دمای فرایند اختلاط کنترل شد. آمیخته‌های به دست آمده روی آسیاب دوغلتکی نهایی شدند. شرایط اختلاط برای همه آمیخته‌های طراحی شده یکسان در نظر گرفته شد.

پخت آمیخته و اندازه گیری خواص

نمونه‌های کشش، رشد ترک deMattia و سایش براساس زمان پخت بهینه به دست آمده از رنومتر ODR درون پرس پخت آزمایشگاهی پخت شدند. دمای پخت برای مطالعه موردی اول، ۱۵۱°C و برای مطالعه موردی دوم، ۱۴۵°C در نظر گرفته شد.

برای به دست آوردن مدول آمیخته‌ها، آزمون تنش - کرنش براساس ASTM D 624 انجام شد. میانگین چهار آزمون گزارش شده است. سایش آمیخته‌ها براساس ISO 4649 و در دستگاه سایش DIN انجام شد. مقدار سایش برحسب mm³ گزارش شد که متوسط انجام آزمون روی چهار نمونه است. آزمون رشد ترک deMattia در دستگاه مربوط انجام شد. مقدار رشد ترک در ۲۰ چرخه برای مطالعه اول و ۱۰ چرخه برای مطالعه دوم گزارش شده است.

توسعه مدل سطح پاسخ

داده‌های تجربی گردآوری شده از هر طراحی آزمون به طور جداگانه با مدل سطح پاسخ شامل آثار اصلی، درجه دوم و برهمکنش برازش شد [۱۸-۱۶]. یک مدل چندجمله‌ای درجه دوم برای سه عامل به شکل زیر است:

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

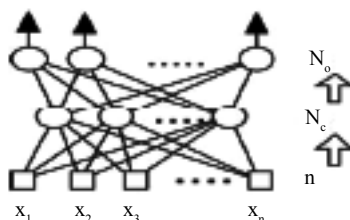
y_i متغیر پاسخ، x_i متغیر کنترل کننده و a_i و a_{ij} ضرایب مدل هستند. مقدار برازش با آماره‌های ضرایب رگرسیون (R^2) و رگرسیون تنظیم شده (R^2_{adj}) بررسی شد. همچنین، به کمک تحلیل واریانس و تعریف آماره F و محاسبه آماره P متناظر با آن اهمیت آماری مدل‌های توسعه یافته در سطح اطمینان ۹۵٪ مطالعه شد. رویکرد سطح پاسخ این امکان را فراهم می‌سازد که اهمیت آماری عوامل مختلف مدل ارائه شود. برای این کار آماره T، که حاصل تقسیم مقدار ضریب محاسبه شده به خطای استاندارد محاسبه است، با نرم افزار محاسبه و آماره P، به عنوان معیار سنجش اهمیت آماری آن ضریب ارائه می‌شود [۱۶]. معمولاً مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ بیانگر اهمیت آماری ضریب رگرسیون محاسبه شده است. تمام محاسبات و توسعه مدل و تحلیل آماری با

جدول ۱- مطالعه موردی اول، طراحی آزمون CCD در آمیخته NR/SBR پرشده با دوده و خاک رس آلی اصلاح شده، اثر مقدار گوگرد، روغن و نسبت کائوچو، نقاط تجربی و پیش بینی مدل های سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی.

متغیرهای وابسته									متغیرهای مستقل و مقدار آنها			
پیش بینی مدل شبکه عصبی، ANN			پیش بینی مدل سطح پاسخ، RSM			داده های تجربی			کائوچوی سیس بوتادی ان (BR)	روغن آروماتیک (Oil)	گوگرد* (S)	طرح نقاط
مدول M300 (MPa)	رشد ترک deMattia (mm)	ساییش (mm ³)	مدول M300 (MPa)	رشد ترک deMattia (mm)	ساییش (mm ³)	مدول M300 (MPa)	رشد ترک** deMattia (mm)	ساییش (mm ³)				
۸/۸	۶/۶	۱۷۵/۱	۸/۶	۶/۹	۱۷۶/۱	۸/۳	۷	۱۸۶	۱۰/۵	۸	۱/۸۵	A/1
۱۰/۲	۶/۹	۱۵۳/۷	۱۰	۶/۹	۱۶۱/۵	۱۰/۱	۷	۱۶۶	۱۰/۵	۴/۶۴	۱/۸۵	A/2
۸/۹	۷/۱	۱۵۵/۳	۹/۴	۶	۱۵۳/۵	۹/۴	۶	۱۵۴	۴/۶۱	۸	۱/۸۵	A/3
۸/۸	۵/۵	۱۵۷/۲	۸/۷	۵/۸	۱۵۸/۳	۸/۸	۵	۱۵۷	۱۴	۶	۱/۷	A/4
۸/۸	۶/۶	۱۷۵/۱	۸/۶	۶/۹	۱۷۶/۱	۸/۹	۷	۱۶۴	۱۰/۵	۸	۱/۸۵	A/5
۸/۶	۶/۱	۱۴۳/۸	۸/۸	۵/۸	۱۴۳/۹	۸/۷	۶	۱۴۳	۱۶/۳۹	۸	۱/۸۵	A/6
۱۰/۱	۱۰	۱۳۵/۷	۹/۵	۱۰/۶	۱۳۶/۵	۹/۷	۱۰	۱۳۶	۱۰/۵	۸	۲/۱	A/7
۸	۴/۶	۱۷۸/۳	۷/۹	۳/۸	۱۸۳	۷/۷	۴	۱۷۸	۱۰/۵	۱۱/۴	۱/۸۵	A/8
۱۰/۱	۱۰/۱	۱۳۹	۹/۷	۹/۴	۱۲۹/۷	۹/۶	۱۰	۱۲۸	۱۴	۶	۲	A/9
۸/۶	۶/۱	۱۳۴	۸/۸	۵/۹	۱۳۳/۴	۸/۸	۶	۱۳۵	۷	۱۰	۲	A/10
۱۰/۱	۱۰/۱	۱۴۰/۳	۱۰/۴	۹/۸	۱۴۱/۶	۱۰/۲	۱۰	۱۴۰	۷	۶	۲	A/11
۷/۵	۸/۲	۲۱۳/۵	۷/۷	۷/۵	۲۰۹/۵	۷/۵	۸	۲۰۹	۱۰/۵	۸	۱/۶	A/12
۸/۵	۵/۶	۱۶۴/۶	۸/۸	۵/۶	۱۶۴/۴	۸/۸	۶	۱۶۷	۱۴	۱۰	۲	A/13
۸/۸	۶/۶	۱۷۵/۱	۸/۶	۶/۹	۱۷۶/۱	۸/۵	۷	۱۷۹	۱۰/۵	۸	۱/۸۵	A/14
۷/۹	۵/۵	۱۹۶/۴	۷/۷	۵/۹	۱۹۱/۵	۷/۹	۵	۱۹۴	۷	۱۰	۱/۷	A/15
۹/۳	۵/۴	۱۷۴/۹	۹/۴	۵/۶	۲۰۰/۶	۹/۴	۵	۱۹۸	۷	۶	۱/۷	A/16
۷/۵	۵/۸	۱۹۶/۹	۷/۷	۶/۱	۱۹۲/۱	۷/۹	۶	۱۹۴	۱۴	۱۰	۱/۷	A/17

(*): مقادیر گوگرد، روغن و کائوچوی سیس بوتادی ان برحسب قسمت وزنی، ۱۰۰ قسمت کائوچو (phr)، بوده و (**): رشد ترک deMattia در ۲۰۰۰۰ چرخه است.

تعداد نرون های ورودی برابر با تعداد متغیرهای مستقل و تعداد نرون ها در لایه خروجی برابر با تعداد متغیرهای وابسته است. شبکه با استفاده از الگوریتم های آموزشی مناسب و به کمک نقاط تجربی آموزش داده می شود. الگوریتم های آموزشی مقادیر پیوندهای



شکل ۱- تصویر کلی از ساختار کلی شبکه عصبی پیشرو شامل n ورودی، N_c نرون مخفی و N_o نرون خروجی.

نرم افزار MINITAB16 انجام شده است.

توسعه مدل شبکه عصبی مصنوعی

توسعه شبکه عصبی مصنوعی با نرم افزار MATLAB R2009a انجام شد. در این مطالعه، از شبکه عصبی پیشرو چندلایه (multilayer feed forward neural network) برای مدل سازی داده های تجربی استفاده شده است. در شکل ۱ ساختار این نوع شبکه ها نشان داده شده است. ساختار شامل لایه های ورودی، مخفی و خروجی بوده و هر لایه شامل یک تا چند عنصر پردازشگر موسوم به نرون است. در این شبکه ها، سیگنال ها از لایه ورودی و از راه لایه میانی به لایه خروجی پیشرفت می کنند. بنابراین، یک گره سیگنال ها را از راه پیوندهای سایر گره ها یا از محیط بیرون دریافت می کند [۱۴].

مدل‌های سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی آمده است. مدل‌های آماری این امکان را به وجود می‌آورند که وابستگی سایز، رشد ترک و مدول آمیخته به عوامل فرمول‌بندی به‌طور کامل و با احتساب آثار برهم‌کنش بین متغیرها مطالعه شود. مدل‌های سطح پاسخ برای سایز، رشد ترک deMattia و مدول در مطالعه موردی اول (در آمیخته الاستومری NR/SBR) در جدول ۲ آمده است. ضرایب مدل و آماره T برای هر ضریب در بخش بالایی جدول برای سه خاصیت مدول، سایز و رشد ترک به‌طور مجزا آمده است. این مدل‌ها منطبق بر معادله (۱) بوده و مقادیر ضرایب ارائه شده برای هر خاصیت در واقع همان ضرایب a_0 و a_1 معادله (۱) هستند. از این مدل‌ها برای اهداف پیش‌بینی استفاده شده است (جدول ۱). دقت شود، ضرایب مدل رگرسیون به شکل کدبندی

جدول ۲- ضرایب مدل سطح پاسخ و اهمیت هر ضریب براساس آزمون T، ضرایب برازش و نیز نتایج ANOVA برای بررسی صلاحیت مدل در مطالعه موردی اول.

مدول M300	رشد ترک deMattia		سایز		مشخصه	
	ضریب مدل	آماره P	ضریب مدل	آماره P		
۸/۵۷	۰	۴/۹۴	۰	۱۷۶/۱۳	۰	Constant
-۰/۳۱	۰/۰۳	-۰/۱۴	۰/۲۷	-۴/۷۸	۰/۱۷	BR
-۱/۰۷	۰	-۰/۵۸	۰	۱۰/۷۸	۰/۰۱	Oil
۰/۸۷	۰	۰/۹۳	۰	-۳۶/۴۸	۰	S
۰/۵۱	۰/۰۴	-۰/۹۱	۰	-۲۷/۴۳	۰	BR*BR
۰/۳۹	۰/۱	-۰/۷۵	۰/۰۱	-۳/۸۹	۰/۵۳	Oil*Oil
۰/۰۵	۰/۸۳	۱/۶۹	۰	-۳/۱۲	۰/۶۱	S*S
۰/۴۵	۰/۱۱	۰/۳۴	۰/۲۴	۳۰/۳۹	۰	BR*Oil
-۰/۰۴	۰/۸۸	۰/۲۴	۰/۳۸	۲۱/۵۱	۰/۰۲	BR*S
۰/۰۳	۰/۹	-۱/۸۹	۰	۰/۶۱	۰/۹۳	Oil*S
ضرایب برازش و تحلیل واریانس ANOVA						
۹۷/۱۶	۹۷/۴۳	۹۶/۶	R ²			
۹۱/۲۴	۹۴/۱۲	۹۲/۲۴	R ² _{adj}			
۱۹/۵۲	۲۹/۴۵	۲۲/۱۳	F _{Regression}			
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	P Value			

(وزن‌ها) بین گره‌ها را با حداقل کردن خطای خروجی شبکه و مقادیر هدف تنظیم می‌کنند. فرایند آموزش تا زمانی ادامه می‌یابد که خروجی شبکه داده‌های تجربی (هدف) را دنبال کند. پس از آموزش شبکه، عوامل وزنی ثابت می‌شوند و از این شبکه برای شبیه‌سازی داده‌های تازه استفاده می‌شود که در فرایند آموزش شرکت نکرده‌اند. در این مطالعه، از الگوریتم لونیگ مارکوارت به‌عنوان الگوریتم آموزشی استفاده شده است. از معیارهای متنوع برای ارزیابی رفتار شبکه استفاده می‌شود. معمولاً از ضریب همبستگی، R، و خطای میانگین مربعات (mean square error, MSE) برای بررسی عملکرد شبکه عصبی استفاده می‌شود. یک برازش بسیار خوب مقادیر نزدیک به ۱ را ارائه می‌دهد.

از نکات مهم در توسعه مدل شبکه عصبی توجه به پدیده بیش‌برازش (over fitting) است. بدین معنی که شبکه داده‌های تجربی را حفظ می‌کند. به عبارت دیگر، شبکه آموزش داده شده داده‌های تجربی را به خوبی مدل می‌کند، اما از پیش‌بینی داده‌های جدید عاجز است. این موضوع به‌طور عمده به سبب بزرگ شدن مقادیر وزن‌ها حین آموزش است. برای اجتناب از این پدیده راه‌حل‌های زیادی پیشنهاد شده است [۱۴]. اما، معمولاً با تقسیم داده‌های تجربی به سه بخش آموزش، ارزیابی و آزمون از این پدیده جلوگیری می‌شود. در مطالعه حاضر نیز از این روش استفاده شده است.

نتایج و بحث

جدول ۱ نتایج سایز، رشد ترک و مدول آمیخته‌های لاستیکی را در مطالعه موردی اول نشان می‌دهد. در این مطالعه، آثار جایگزینی بخشی از کائوچوی طبیعی با کائوچوی سیس‌بوتادیان و افزایش مقدار روغن و گوگرد در قالب طراحی آزمون در آمیخته رویه تأیر باری برپایه NR/SBR بررسی شده است. در این جدول، نقاط طراحی آزمون با کد A1 تا A17 و سطوح متغیرهای فرمول‌بندی در سه ستون بعدی ارائه شده است. مقدار کائوچوی بوتادیان در سطوح ۴/۶ تا ۱۶/۴ قسمت وزنی (جایگزین با کائوچوی طبیعی) روغن در سطوح ۴/۶ تا ۱۱/۴ قسمت وزنی و گوگرد در سطوح ۱/۶ تا ۲/۱ قسمت وزنی تغییر می‌کند. هدف، مطالعه هم‌زمان آثار تغییر توأم در سه عامل فرمول‌بندی بر سه خاصیت کلیدی آمیزه لاستیکی است. در بخش بعدی جدول، مقادیر تجربی (اندازه‌گیری شده) به دست آمده برای مقادیر سایز، رشد ترک deMattia و مدول آمیزه‌های طراحی شده ارائه شده است. در سایر بخش‌های جدول ۱ نتایج حاصل از

(S*S) و روغن (Oil*Oil) و نیز پارامتر برهمکنش روغن-گوگرد (ضریب Oil*S) اهمیت آماری دارد. مدل سطح پاسخ توسعه یافته برای سایش حاکی از آن است که روغن باعث افزایش مقدار سایش و گوگرد سبب بهبود سایش می شود. با وجود این، تحلیل آماری برهمکنش گوگرد-کائوچوی بوتادی ان (BR*S) و بوتادی ان-روغن (BR*Oil) را معنی دار نشان می دهد. این موضوع بیانگر آن است، به دلیل آثار برهمکنش قوی لازم است تا در تحلیل نتایج نهایت دقت اعمال شود. تعدادی از منحنی های سطح پاسخ در شکل ۱ آمده که پیچیدگی رفتار سایش به عوامل فرمول بندی را به وضوح نشان داده است. وابستگی رشد ترک و سایش به مقدار کائوچوی بوتادی ان (نسبت NR/BR) و نیز گوگرد به سطح روغن کاملاً وابسته است. افزایش گوگرد در سطوح کم روغن سرعت رشد ترک را افزایش می دهد، حال آنکه در مقادیر زیاد روغن، اثر چندانی بر سرعت رشد ترک ندارد. در مقادیر کم روغن، جایگزینی بخشی از کائوچوی طبیعی با کائوچوی بوتادی ان کاهش جزئی مدول را به همراه دارد، اما رشد ترک بدون تغییر باقی مانده است و سایش به شدت بهبود می یابد. اینکه رشد ترک با وجود جایگزینی مقادیر قابل توجه کائوچوی بوتادی ان بدون تغییر مانده است، احتمالاً باید به وجود ذرات خاک رس آلی اصلاح شده و نقش ممانعت کنندگی از پیشرفت ترک آنها نسبت داد [۱۹]. اثر عوامل فرمول بندی بر مقدار سایش را می توان با مدل Fukahori و نیز سازوکارهای مکانیکی شیمیایی حاکم بر سایش قطعه لاستیکی تشریح کرد. در مدل Fukahori پدیده سایش به شکل پدیده رشد ترک خستگی برحسب دامنه کرنشی میانگین بیان می شود. این پارامتر در مدل Fukahori به کمک ضریب اصطکاک (μ)، مدول یانگ (E) ماده، پارامتر عمودی (P) و مساحت سطح (S) با معادله (۷) توصیف می شود. بدین ترتیب، سرعت سایش با معادله (۸) بیان می شود:

$$\varepsilon^* = \mu P / ES \quad (7)$$

$$\dot{D} = dc(\varepsilon^*) / dt \quad (8)$$

بنابراین، نقش عوامل فرمول بندی بر رفتار سایش آمیخته لاستیکی را می توان از راه آثار آنها در دو شاخه مختلف تفکیک و مطالعه کرد. اول؛ اثر آن عامل بر پارامتر ε^* و دوم، اثر آن بر رفتار رشد ترک لاستیک است. اثر گوگرد بر پدیده سایش را نیز می توان با توجه به رفتارهای مشاهده شده در منحنی های سطح پاسخ و نیز مدل Fukahori به خوبی توجیه کرد. افزایش گوگرد، بهبود مدول را به همراه دارد که منجر به کاهش کرنش میانگین ε^* می شود، اما ماهیت رشد ترک

شده ارائه شده است. تعیین اهمیت هر ضریب مقوله مهمی است که از راه آماره P قابل بررسی است. مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ برای هر ضریب دلالت بر اهمیت آماری آن ضریب در سطح اطمینان ۹۵٪ دارد. در یک تحلیل آماری لازم است، اهمیت آماری و معنی دار بودن مدل توسعه یافته بررسی شود. به همین دلیل برای هر یک از سه مدل مدول، رشد ترک و سایش مقادیر ضریب همبستگی و نیز نتایج تحلیل واریانس (آماره F و P_{value} مربوط به آن) در پایین جدول ۲ آمده است.

مقادیر بزرگ R^2 ، نشان دهنده قابلیت زیاد مدل های سطح پاسخ برای بیان وابستگی مدول، رشد ترک و سایش برحسب سه متغیر فرمول بندی است. همچنین، تحلیل واریانس و آماره های F و P نشان دهنده اهمیت آماری مدل های سطح پاسخ است. آماره F از تقسیم مجموع میانگین رگرسیون (mean sum of regression, MSR) بر خطای میانگین مربعات (MSE) دست آمده است. این مقدار F با مقدار آن در جدول مقایسه می شود. اگر F به دست آمده از مقدار آن در جدول (توزیع F) کمتر باشد، مدل داده ها را به خوبی برازش کرده است. همچنین، می توان به جای این مقایسه از آماره P (سطح زیر منحنی توزیع F) استفاده کرد. معمولاً مقدار آماره P کمتر از ۰/۰۵ نشان دهنده اهمیت آماری مدل توسعه یافته در سطح اطمینان ۹۵٪ است.

مقدار F به دست آمده از تحلیل واریانس برای مدل های مدول، رشد ترک deMattia و سایش به ترتیب ۱۹/۵۲، ۲۹/۴۵ و ۲۲/۱۳ و مقادیر P متناظر با آنها مقدار صفر است. همچنین، می توان اهمیت آماری تک تک ضرایب مدل را به کمک آزمون T مطالعه کرد. آماره T را می توان از تقسیم مقدار ضریب (مدل رگرسیون) محاسبه شده به خطای استاندارد محاسبه ضریب (SE) به دست آورد و با جدول T مقایسه کرد. مقادیر T در جدول ۲ ارائه نشده و به جای آن مقادیر آماره P آمده است. مقدار P کمتر از ۰/۰۵ برای ضریب مدل حاکی از اهمیت آماری آن ضریب در سطح اطمینان ۹۵٪ است. تحلیل آماری نشان می دهد، جایگزینی بخشی از کائوچوی طبیعی با کائوچوی بوتادی ان و نیز افزایش روغن اثر معنی دار کاهشی بر مدول آمیخته دارد، در حالی که گوگرد اثر معنی دار مثبت (افزایشی) دارد. همچنین، جمله درجه دوم برای بوتادی ان (ضریب BR*BR) از لحاظ آماری معنی دار است.

تحلیل آماری براساس آماره P حاصل از آزمون t-student حاکی از آن است که روغن باعث بهبود (کاهش) رشد ترک deMattia می شود، ولی افزایش گوگرد رشد ترک را کاهش (افزایش) می دهد. همچنین، جمله های درجه دوم برای بوتادی ان (BR*BR)، گوگرد

توجه به افزایش کرنش میانگین و عدم تغییر قابل توجه ماهیت رشد ترک آمیخته نمی توان بهبود سایش آمیخته با افزایش مقدار BR را از معادله Fukahori به خوبی توضیح داد. با اینکه Liang با محاسبات دقیق تر تحلیل اجزای محدود نشان داده است، سرعت رهایش انرژی کرنشی در لبه برجستگی های الگوی سایش در آمیخته لاستیکی حاوی BR کمتر است. این مسئله سرعت سایش را کاهش می دهد و دلیل عملکرد بهتر سایش آمیخته حاوی کائوچوی بوتادی ان در مقایسه با SBR و NR است [۲۱]. با وجود این، همان طور که Gent اظهار کرد، نباید از سازوکارهای شیمیایی دخالت کننده در پدیده سایش غفلت کرد [۲]. استحکام و سفتی و نیز رشد ترک آمیخته لاستیکی با جایگزینی بخشی از کائوچوی طبیعی با کائوچوی بوتادی ان چندان تغییری نکرده است، بنابراین سازوکار مکانیکی شیمیایی در پدیده سایش غالب خواهد شد. برخلاف NR و SBR، رادیکال های آزاد تشکیل شده از شکست زنجیرهای اصلی پلیمری حین سایش آمیخته

آمیخته تضعیف می شود. بنابراین، از یک سو نقش مثبت و از سوی دیگر نقش منفی دارد. بنابراین با افزایش گوگرد، سایش تقریباً بدون تغییر بوده و اندکی بهبود را نشان می دهد. افزایش روغن باعث کاهش شدید مدول آمیخته شده و در نتیجه منجر به افزایش کرنش میانگین می شود. بنابراین، با وجود بهبود معنی دار رشد ترک deMattia، افزایش روغن سایش آمیخته را کاهش داده است.

با توجه به نتایج، جایگزینی بخشی از کائوچوی طبیعی با کائوچوی بوتادی ان بر مدول آمیخته اثر جزئی دارد. از طرف دیگر، در یک آمیخته پر شده ضریب اصطکاک کائوچوی بوتادی ان اندکی بیشتر از کائوچوی طبیعی است [۲۰]. بنابراین، جایگزینی جزئی BR احتمالاً ضریب اصطکاک آمیخته را اندکی افزایش داده است، پس کرنش متوسط با توجه به مدل Fukahori نباید چندان تغییر کند. از طرف دیگر، وجود خاک رس آلی اصلاح شده ماهیت رشد ترک آمیخته را حتی در نسبت کمتر NR/BR چندان تغییر نداده است، بنابراین با

جدول ۳- مطالعه موردی دوم، طراحی آزمون Box Behnken در آمیخته SBR/BR، نقاط تجربی و نتایج مدل سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی.

متغیرهای وابسته									متغیرهای مستقل و مقدار آنها			
پیش بینی مدل شبکه عصبی، ANN			پیش بینی مدل سطح پاسخ، RSM			داده های تجربی			سیلیکا (phr)	TARE (phr)	گوگرد* (phr)	نقاط طرح
مدول M300 (MPa)	رشد ترک deMattia (mm)	سایش (mm ³)	مدول M300 (MPa)	رشد ترک deMattia (mm)	سایش (mm ³)	مدول M300 (MPa)	رشد ترک** deMattia (mm)	سایش (mm ³)				
۲۳/۲	۹۴/۸	۱۲/۷	۱۳/۳	۲۲/۵	۹۵/۰	۱۳/۲	۲۳/۱	۹۳/۹	۱۰/۰	۱۳/۰	۱/۶	B.1
۱۸/۱	۹۶/۶	۱۱/۰	۱۱/۵	۱۷/۰	۹۷/۴	۱۱/۰	۱۸/۱	۹۶/۷	۱۰/۰	۱۶/۰	۱/۴	B.2
۱۹/۱	۹۸/۰	۱۱/۵	۱۱/۳	۱۹/۶	۹۷/۷	۱۱/۵	۱۹/۱	۹۷/۹	۲۳/۳	۱۰/۰	۱/۴	B.3
۲۰/۰	۱۰۱/۷	۱۱/۸	۱۲/۲	۱۸/۸	۱۰۰/۳	۱۱/۸	۲۰/۰	۹۹/۰	۱۴/۰	۱۰/۰	۱/۲	B.4
۲۲/۲	۹۸/۳	۱۱/۸	۱۳/۴	۲۳/۷	۱۰۳/۶	۱۳/۳	۲۳/۸	۱۰۳/۵	۱۴/۰	۱۰/۰	۱/۶	B.5
۱۳/۷	۱۰۳/۰	۱۰/۴	۱۰/۳	۱۳/۸	۱۱۰/۴	۱۰/۴	۱۳/۷	۱۱۰/۵	۱۴/۰	۱۶/۰	۱/۲	B.6
۲۳/۱	۱۰۰/۸	۱۱/۳	۱۰/۹	۲۴/۲	۹۹/۲	۱۱/۳	۲۳/۱	۱۰۰/۶	۱۴/۰	۱۶/۰	۱/۶	B.7
۱۲/۷	۱۰۳/۲	۱۳/۴	۱۳/۲	۱۳/۶	۱۰۳/۲	۱۳/۴	۱۲/۷	۱۰۳/۸	۱۰/۰	۱۳/۰	۱/۲	B.8
۱۲/۶	۱۰۳/۴	۱۰/۲	۹/۳	۱۵/۱	۹۹/۸	۹/۲	۱۵/۰	۱۰۰/۴	۲۳/۳	۱۳/۰	۱/۲	B.9
۱۳/۶	۱۰۲/۹	۸/۵	۸/۵	۱۳/۵	۱۰۲/۶	۸/۴	۱۳/۶	۱۰۱/۹	۲۳/۳	۱۶/۰	۱/۴	B.10
۱۹/۹	۱۰۲/۰	۱۰/۹	۱۰/۸	۱۹/۵	۱۰۲/۵	۱۰/۹	۱۹/۹	۱۰۲/۸	۱۴/۰	۱۳/۰	۱/۴	B.11
۱۹/۹	۹۶/۹	۱۱/۸	۱۳/۴	۱۷/۶	۹۵/۵	۱۳/۶	۱۶/۹	۹۶/۸	۱۰/۰	۱۰/۰	۱/۴	B.12
۱۹/۹	۱۰۲/۰	۱۰/۹	۱۰/۸	۱۹/۵	۱۰۲/۵	۱۰/۷	۱۸/۹	۱۰۲/۸	۱۴/۰	۱۳/۰	۱/۴	B.13
۲۰/۰	۱۰۵/۳	۱۱/۹	۱۲/۱	۱۹/۵	۱۰۵/۹	۱۱/۹	۲۰/۰	۱۰۵/۷	۲۳/۳	۱۳/۰	۱/۶	B.14
۱۹/۹	۱۰۲/۰	۱۰/۹	۱۰/۸	۱۹/۵	۱۰۲/۵	۱۰/۷	۱۹/۶	۱۰۲/۰	۱۴/۰	۱۳/۰	۱/۴	B.15

(* مقدار مجموع پرکننده ۷۰ قسمت وزنی بوده که با سیلیکا و دوده جایگزین شده و (** رشد ترک deMattia در ۲۰۰۰ چرخه است).

جدول ۴- ضرایب مدل سطح پاسخ و اهمیت هر ضریب براساس آزمون T، ضرایب برازش و نیز نتایج ANOVA برای بررسی صلاحیت مدل، مطالعه موردی دوم.

مدول M300		رشد ترک deMattia		سایش، Abrasion		مشخصه
ضریب مدل	آماره P	ضریب مدل	آماره P	ضریب مدل	آماره P	
۱۰/۱۱	۰/۰۰	۱۹/۷۹	۰/۰۰	۱۰۴/۰۵	۰/۰۰۰	Constant
-۱/۲۷	۰/۰۰	-۰/۳۷	۰/۳۹۳	۱/۸۵	۰/۰۱۱	Silica
-۱/۱۸	۰/۰۰	-۱/۶۹	۰/۰۰۹	۱/۷۱	۰/۰۱۷	TRAE
۰/۷۴	۰/۰۰۳	۳/۳۵	۰/۰۰۰	-۰/۵۳	۰/۳۲۳	S
۰/۹۷	۰/۰۰۹	-۲/۸	۰/۰۱۲	-۴/۸۳	۰/۰۰۲	Silica*Silica
۰/۰۷	۰/۷۲۶	-۰/۶	۰/۹۱۹	-۰/۹۱	۰/۲۴۵	TRAE* TRAE
۰/۸۷	۰/۰۰۶	۰/۷	۰/۲۸۵	۱/۷۵	۰/۰۵۲	S*S
-۰/۲۲	۰/۲۷۲	-۱/۴	۰/۰۴۹	۰/۷۴	۰/۲۹۸	Silica*TRAE
۰/۶۸	۰/۰۱۲	-۱/۱۲	۰/۰۹۳	۳/۵۷	۰/۰۰۲	Silica*S
-۰/۱۵	۰/۴۶۶	۱/۳۹	۰/۰۵۷	-۳/۶۱	۰/۰۰۳	TRAE*S
ضرایب برازش و تحلیل واریانس ANOVA						
۹۷/۸۹		۹۶/۳۵		۹۶/۳۱		R ²
۹۴/۱		۸۹/۷۹		۸۹/۶۷		R ² _{adj}
۲۵/۸		۱۴/۶۸		۱۴/۵		F _{Regression}
۰/۰۰۱		۰/۰۰۴		۰/۰۰۴		P _{Value}

لاستیک که در تماس با پرکننده است، نسبت داده شده که منجر به افزایش جزء حجمی پرکننده می شود. جایگزینی بخشی از دوده با سیلیکا با پراکنش پذیری زیاد (در مجاورت مقدار بهینه سیلان) منجر به کاهش معنی دار مدول آمیخته شده است که نشان دهنده برهمکنش کمتر سامانه سیلیکا با بستر آمیخته SBR/BR است.

اهمیت آماری ضرایب برهمکنش، (P=۰/۰۴۹) Silica*TRAE و (P=۰/۰۵۷) TRAE*S در مدل سایش و نیز (P=۰/۰۰۲) Silica*S و (P=۰/۰۰۳) TRAE*S در رشد ترک نشان دهنده وابستگی پیچیده این دو خاصیت به عوامل فرمول بندی این مطالعه است. این رفتارها در قالب منحنی های سطح پاسخ شکل ۲ نشان داده شده است. جایگزینی بخشی از دوده با سیلیکا، بدون تغییر محسوس در رشد ترک deMattia، منجر به کاهش مدول آمیخته شده، این جایگزینی رفتار سایش را نیز اندکی متأثر کرده است. افزایش مقدار گوگرد منجر به افزایش مدول و

بوتادی ان، به جای آنکه تجزیه شوند، با یکدیگر واکنش داده و اتصال عرضی ایجاد می کنند. این موضوع باعث ارتقای رفتار سایش آمیخته لاستیکی با افزایش مقدار BR می شود [۲۰]. با وجود این، همان طور که از منحنی های سطح پاسخ مشخص می شود، گاهی به عنوان مثال، در مقادیر زیاد روغن جایی که مدول آمیخته کاهش یافته و پارامتر ϵ^* به شدت افزایش می یابد. جایگزینی کائوچوی بوتادی ان بهبودی را در رفتار سایش نشان نمی دهد که بیانگر اهمیت سازوکارهای حاکم بر رفتار سایش براساس نظریه Fukahori در کنار سازوکارهای فیزیکی شیمیایی است.

مطالعه موردی دوم

در این مطالعه، با تغییر سه عامل فرمول بندی شامل گوگرد (S)، روغن فرایند سبز (TRAE) و سیلیکا (جایگزینی یک به یک با دوده اصلی) به طور اسلوب مند و در قالب طراحی آزمون Box Behnk-en تعداد ۱۵ فرمول بندی طراحی و تهیه شد که با کد B در جدول ۳ آمده است. سایر عوامل فرمول بندی ثابت بوده و سطوح سه متغیر برای هر نقطه طرح نیز در جدول ۳ آمده است. مقادیر تجربی برای هر آمیخته و مقادیر شبیه سازی اصل از مدل سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی به طور جداگانه نیز در این جدول آمده است. جزئیات مدل های سطح پاسخ برای سایش، رشد ترک deMattia و مدول در مطالعه موردی دوم (آمیخته الاستومری SBR/BR) در جدول ۴ آمده است. در این مدل ها آثار اصلی، درجه دوم و برهمکنش برحسب سه عامل فرمول بندی مقدار روغن TRAE، گوگرد و سیلیکای HDS نشان داده شده است. مقادیر بزرگ R² و نیز نتایج تحلیل واریانس حاکی از آن است که مدل های توسعه یافته صلاحیت و کفایت آماری لازم را برای بیان رفتارها دارند. مقدار R² به دست آمده برای مدول، رشد ترک و سایش به ترتیب ۹۷/۸۹، ۹۶/۳۵ و ۹۶/۳۱ محاسبه شده است. همچنین، مقدار آماره F حاصل از تحلیل واریانس برای مدول، رشد ترک و سایش به ترتیب ۲۵/۸، ۱۴/۶۸ و ۱۴/۵ و مقدار P_{value} مرتبط با آن به ترتیب ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۴ به دست آمده که همگی کمتر از ۰/۰۵ و بیانگر معنی دار بودن مدل سطح پاسخ در سطح اطمینان ۹۵٪ است. ضرایب مدل ها نیز در جدول ۴ آمده است. مقدار P_{value} کمتر از ۰/۰۵ یا ۰/۱ مربوط به ضریب نشان دهنده اهمیت آماری آن ضریب است. ضرایب مدل سطح پاسخ برای مدول نشان می دهد، گوگرد اثر معنی دار افزایشی و جایگزینی سیلیکا و افزایش روغن اثر معنی دار کاهشی بر مدول آمیخته نهایی دارد. به طور کلی، نقش پرکنندگی تقویت کننده بر مدول آمیخته لاستیکی به ساکن کردن بخشی از

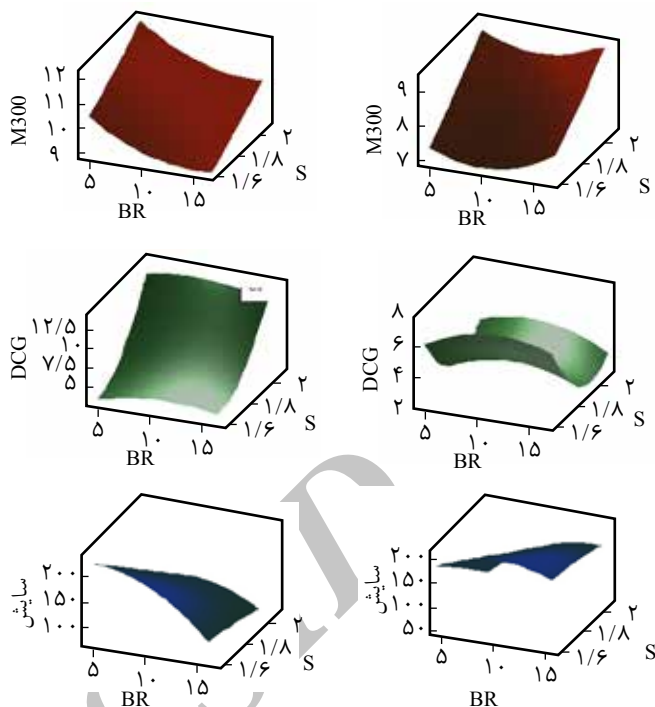
اول بر مبنای حاکمیت سازوکارهای مکانیکی شیمیایی است، به طوری که اثر تغییر سایر عوامل فرمول بندی محدود و پیچیده شده است. دیدگاه دوم، کاهش قابل توجه ضریب اصطکاک به دلیل مقادیر زیاد کائوچوی بوتادی ان است که باعث کاهش ϵ^* و کم رنگ شدن سایر آثار شده است. جالب است، با وجود نزدیکی داده های سایش، مدل های سطح پاسخ قابلیت توصیف وابستگی سایش به تغییر عوامل فرمول بندی را دارند.

توسعه مدل های شبکه عصبی مطالعه موردی اول

شبکه های عصبی پیشرو با یک لایه مخفی شامل سه متغیر ورودی (مقدار کائوچوی بوتادی ان، گوگرد و روغن) و دو متغیر پاسخ (مدول-رشد ترک و سایش-مدول) بر مبنای داده های تجربی توسعه داده شده است. برای جلوگیری از برازش بیش از حد، ۱۷ داده تجربی به سه بخش آموزش (۱۱ داده)، اعتبارسنجی (۳ داده) و آزمون (۳ داده) تقسیم شد. مشاهده شد، شبکه با مقادیر زیاد R قابل آموزش دادن است. مقدار بهینه نرون های لایه مخفی برای مدل دو پاسخی مدول رشد ترک ۴ و برای مدل دو پاسخی مدول-سایش، ۵ انتخاب شد. در این شرایط، مقادیر R در جدول ۵ آمده است. مشاهده می شود، با وجود تعداد اندک داده های تجربی امکان توسعه شبکه قابل اطمینان وجود دارد. این موضوع به این دلیل است که با انتخاب طراحی آزمون مناسب داده های تجربی در محدوده آزمون به خوبی توزیع شده است.

مطالعه موردی دوم

در اینجا نیز مشاهده شد، امکان توسعه شبکه عصبی پیشرو بر مبنای تنها ۱۵ داده تجربی وجود دارد. داده ها به سه بخش آموزش (۹ داده)، ارزیابی (۳ داده) و آزمون (۳ داده) تقسیم بندی شد. تعداد نرون ها در لایه ورودی ۳ است (سه متغیر مقدار سیلیکا، روغن و گوگرد) و دو

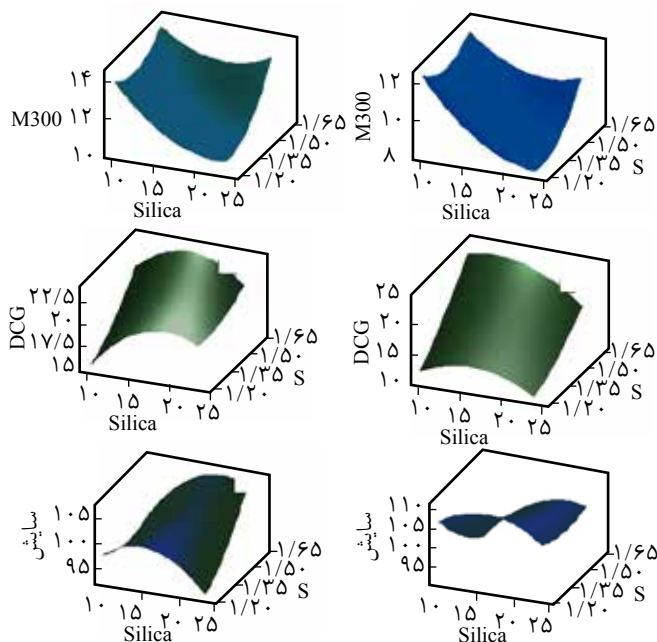


شکل ۲- منحنی های سطح پاسخ برای مطالعه موردی اول (آمیخته لاستیکی بر پایه NR/SBR پر شده با دوده و خاک رس آلی اصلاح شده) و بیان وابستگی مدول، رشد ترک و سایش به سه عامل روغن، گوگرد و جایگزینی بخشی از کائوچوی طبیعی با کائوچوی بوتادی ان. افزایش جزئی سرعت رشد ترک شده است. اما، سایش در مقادیر کم جایگزینی سیلیکا و نیز سطوح زیاد روغن TRAE چندان تغییر نکرده است. با نگاهی دوباره به بازه تغییرات سایش می توان دریافت، با وجود تغییرات زیاد مقدار گوگرد، روغن و نیز جایگزینی سیلیکا که منجر به محدوده گسترده تغییرات در رشد ترک و مدول شده است، اما سایش تغییرات محدودی را نشان می دهد.

نتایج سایش در جدول ۳ از محدوده ۹۴ تا ۱۱۰ تغییر می کند. این موضوع می تواند به دلیل وجود مقادیر زیاد کائوچوی بوتادی ان در فرمول بندی آمیخته باشد و از دو دیدگاه قابل بررسی است. دیدگاه

جدول ۵- مشخصات شبکه عصبی توسعه داده شده برای مطالعات موردی اول و دوم.

R				تعداد نرون های لایه مخفی	متغیر پاسخ	متغیر ورودی	مطالعه موردی	مدل شبکه عصبی
آموزش	ارزیابی	آزمون	مجموع					
۰/۹۹۵۴۸	۰/۹۸۰۷۱	۰/۹۷۱۲۱	۰/۹۸۳۶۹	۴	مدول و رشد ترک	S, BR, Oil	اول	۱
۰/۹۹۵۲۷	۰/۹۹۵۶۴	۰/۹۸۲۱۹	۰/۹۸۸۸۶	۵	سایش و مدول	S, BR, Oil	اول	۲
۰/۹۹۹۹۸	۰/۹۲۷۷۷	۰/۹۷۵۵	۰/۹۷۸۷۱	۶	مدول و رشد ترک	HDS, TRAE, S	دوم	۱
۰/۹۹۹۹۹	۰/۹۹۷۹۹	۰/۹۹۸۱۲	۰/۹۹۹۱۵	۴	سایش و رشد ترک	HDS, TRAE, S	دوم	۲



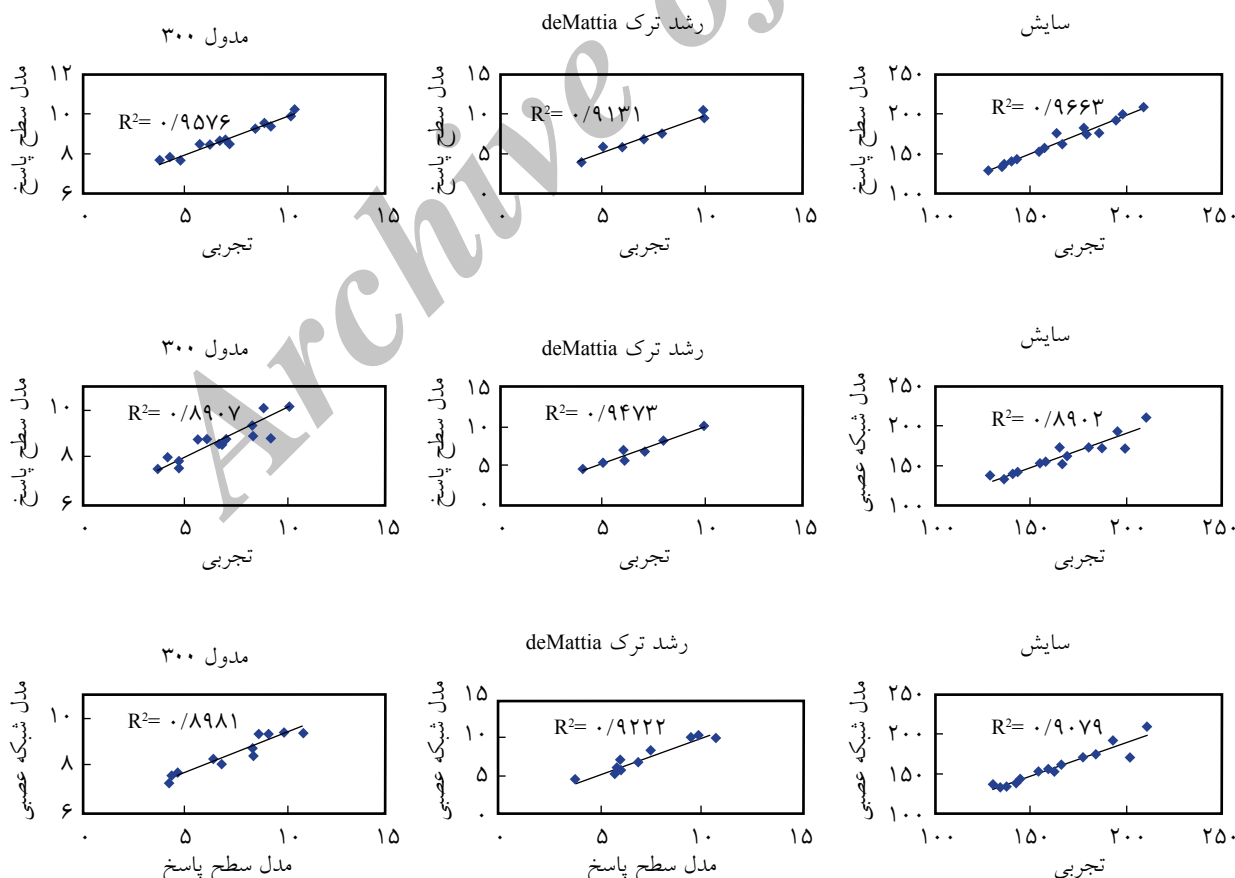
شکل ۳- منحنی های سطح پاسخ برای بیان وابستگی مدول، رشد ترک و سایش به سه عامل روغن، گوگرد و سیلیکا در آمیخته لاستیکی برپایه SBR/BR پر شده با دوده (مطالعه موردی دوم).

شبکه مجزا برای مدول-رشد ترک و رشد ترک-سایش با مقادیر زیاد R توسعه داده شد. تعداد نرون در لایه مخفی برای مدل دوپاسخی مدول-رشد ترک و سایش-رشد ترک به ترتیب برابر ۶ و ۴ انتخاب شد. مقادیر R در جدول ۵ آمده است.

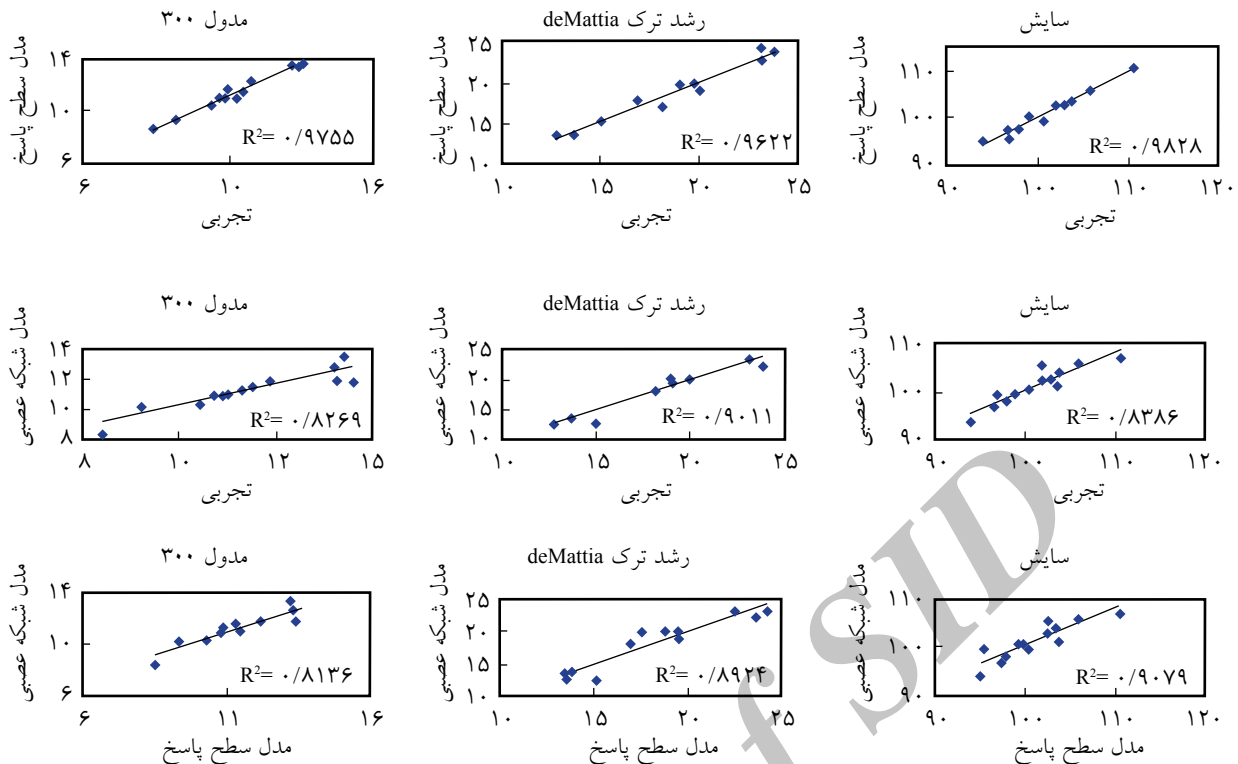
مقایسه عملکرد مدل های سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی

نتایج شبیه سازی مدل های سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی برای مطالعات موردی این مقاله در جدول های ۱ و ۳ و پس از داده های تجربی آمده است. مشاهده می شود، هر دو مدل نتایج نزدیک به داده های تجربی را ارائه داده اند. برای مقایسه بهتر، مقدار همبستگی پیش بینی ها در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است. پیش بینی های مدل ها از همبستگی زیادی برخوردارند که نشان دهنده قابلیت این دو مدل در پیش بینی رفتارهای رشد ترک، سایش و مدول آمیخته های لاستیکی است.

با این وجود، پیش بینی های مدل سطح پاسخ بهتر از مدل شبکه عصبی بوده که علت این است، تعداد داده های تجربی برای توسعه مدل شبکه عصبی مصنوعی بسیار کم شده است. مطمئناً با افزایش



شکل ۴- ضریب همبستگی بین داده های تجربی و مدل های توسعه یافته در مطالعه موردی اول.



شکل ۵- ضریب همبستگی بین داده‌های تجربی و مدل‌های توسعه یافته در مطالعه موردی دوم.

این پیچیدگی‌ها به خوبی با تحلیل آماری و مدل‌های سطح پاسخ قابل مدل‌سازی است. همچنین، با گردآوری داده‌های تجربی بر مبنای طراحی آزمون امکان توسعه مدل‌های شبکه عصبی نیز بر اساس داده‌های تجربی میسر می‌شود. حسن استفاده از شبکه‌های عصبی در این است که ناگزیر به توسعه بر مبنای طراحی آزمون نیستند، بنابراین می‌توان با اضافه کردن داده‌های تجربی بیشتر به نقاط طراحی آزمون اولیه یا استفاده از طراحی آزمون دیگر با عوامل مشترک در کنار طراحی آزمون اولیه مطالعه را به طور اسلوب‌مند و با مدل شبکه عصبی توسعه داد.

قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت مسئولان شرکت لاستیک‌سازی کویر تایر تشکر و قدردانی می‌کنند.

مراجع

- Muhr A.H. and Roberts A.D, Rubber Abrasion and Wear, *Wear*, **158**, 213-228, 1992.
- Gent A.N. and Pulford C.T.R., Mechanisms of Rubber Abrasion,

داده‌های تجربی می‌توان عملکرد مدل شبکه عصبی را ارتقا بخشید. با این حال توسعه مدل شبکه عصبی عاری از پدیده بیش برآزش فقط با تعداد داده‌های اندک یک موفقیت به شمار می‌آید.

نتیجه گیری

رویکردهای تجربی برای اهداف شناخت رفتار و طراحی آمیخته لاستیکی بسیار مهم هستند. در این مطالعه، اصول طراحی آمیخته لاستیکی به کمک دو رویکرد سطح پاسخ و شبکه عصبی مصنوعی ارائه شد. مشاهده شد، رفتار پیچیده سایش، رشد ترک و مدول آمیخته را می‌توان به خوبی به کمک مدل یاد شده بررسی کرد. تحلیل آماری نشان داد، وجود برهمکنش‌های قوی بین عوامل فرمول‌بندی باعث پیچیدگی‌های رفتاری خواص فیزیکی-مکانیکی آمیخته‌ها می‌شود که

J. Appl. Polym. Sci., **28**, 943-60, 1983.

- Schallamach A., Recent Advances in Knowledge of Rubber Friction and Tyre Wear, *Rubber Chem. Technol.*, **41**, 209-244,

- 1968.
4. Champ D.H., Southern E., and Thomas A.G., *Coat. Plast. Prepr.*, **34**, 237-243 1974.
 5. Southern E. and Thomas A.G., Studies of Rubber Abrasion, *Rubber Chem. Technol.*, **52**, 1008-1018, 1979.
 6. Thomas A.G., Rupture of Rubber. V. Cut Growth in Natural Rubber Vulcanizates, *J. Polym. Sci.*, **31**, 467-480, 1958.
 7. Fukahori Y. and Yamazaki H., Mechanism of Rubber Abrasion. Part I: Abrasion Pattern Formation in Natural Rubber Vulcanizates, *Wear*, **171**, 195-202, 1994.
 8. Fukahori Y. and Yamazaki H., Mechanism of Rubber Abrasion: Part 2. General Rule in Abrasion Pattern Formation in Rubber-Like Materials, *Wear*, **178**, 109-116, 1994.
 9. Fukahori Y. and Yamazaki H., Mechanism of Rubber Abrasion, Part 3: How is Friction Linked to Fracture in Rubber Abrasion, *Wear*, **188**, 19-26, 1995.
 10. Ratner S.B. and Lurie Y.G., The Relation Between Wear and the Thermochemical Stability of Polymers, *Polym. Sci. USSR*, **8**, 93-99, 1966.
 11. Ratner S.B., Farberova I.I., Radyukevich O.V., and Lure E.G., Connection Between Wear Resistance of Plastics and Other Mechanical Properties, *Soviet Plast.*, **12**, 37-39, 1964.
 12. Manas D., Stanek M., and Manas M., Influence of Mechanical Properties on Wear of Heavily Stressed Rubber Parts, *Kautsch Gummi Kunstst*, **63**, 240-245, 2009.
 13. Wang B., Ma J.H., and Wu Y.P., Application of Artificial Neural Network in Prediction of Abrasion of Rubber Composites, *Mater. Des.*, **49**, 802-807, 2013.
 14. Samarasinghe S., *Neural Networks for Applied Sciences and Engineering*, Auerbach, Boston, Chapt. 2, 2006.
 15. Shiva M., Atashi H., and Hassanpourfard M., Studying the Abrasion Behavior of Rubbery Maerials with Combined Design of Experiment-Artificial Neural Network, *Chinese J. Polym. Sci.*, **30**, 520-529, 2012.
 16. Proust M., *Design of Experiments*, SAS Institute, Cary, NC, USA, Chapt. 5, 2009.
 17. Moghimi Ardakani A. and Taghizadeh S.M., Skin Permeation Enhancers and Their Effects on Narcotic Transdermal Drug Delivery Systems Through Response Surface Experimental Design, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **26**, 459-473, 2014.
 18. Arabi H., Ghafari M., Zohuri G., Damavandi S., and Ahmadjo S., Polymerization of Ethylene Using α -Diimine Nickel Catalyst, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **26**, 327-335, 2013.
 19. Malas A. and Das C.K., Selective Dispersion of Different Organoclay in Styrene Butadiene Rubber in the Presence of a Compatibilizer, *Mater. Des.*, **49**, 857-865, 2013.
 20. Hong C.K., Kim H., Ryu C., Nah C., Huh Y., and Kaang S., Effects of Particle Size and Structure of Carbon Blacks on the Abrasion of Filled Elastomer Compounds, *J. Mater. Sci.*, **42**, 8391-8399, 2007.
 21. Liang H., Fukahori Y., Thomas A.G., and Busfield J.J.C., The Steady State Abrasion of Rubber: Why are the Weakest Rubber Compounds so Good in Abrasion?, *Wear*, **268**, 756-762, 2010.