علمی- فنی

کاربرد طراحی آزمایش و تحلیل آماری در آمیزه‌کاری لاستیک؛ مطالعه‌ی موردی طراحی فرمول ترد تایر سواری با ترکیب طرح آزمایش و شبکه‌ی عصبی مصنوعی

The Use of Design of Experiments and Statistical Analysis in Rubber Compounding; The Case Study of Design of Passenger Tyre Tread Formulation with Combined Design of Experiment and Artificial Neural Networks

چکیده:

در این مقاله آمیزه‌کاری پیشرفته و مبانی طراحی آمیزه‌ی لاستیکی به‌یاری رویکرد سطح پاسخ ترکیبی با شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد مطالعه گرفته است. تأثیر همزمان ۷ متغیر فرمول‌بندی برویژگی‌های رئومتری و فیزیکی- مکانیکی آمیزه‌ی رویه‌ی تایر رادیال سواری مورد مطالعه قرار گرفته و رویکرد ترکیبی کارآمد برای شناخت رفتارها، مدل‌سازی و بهینه‌سازی آمیزه‌ی لاستیکی ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: طرح آزمایش، شبکه‌ی عصبی مصنوعی، مدل سطح پاسخ، بهینه‌سازی.

نوع مقاله: پژوهشی

مهدی شیوا[1]* و ابراهیم مطهری‌فر[2]

۱- گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند

۲- واحد تکنولوژی، کویر تایر

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

تاریخ دریافت: ۹۵/۹/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۶/۲/۲

مقدمه

در طراحی یک آمیزه‌ی لاستیکی، بهینه‌سازی ویژگی‌های فیزیکی- مکانیکی و فرایندی مورد انتظار نیازمند صرف زمان و هزینه‌ی قابل توجهی است. در حقیقت لازم است چندین ویژگی مختلف آمیزه به طور همزمان مورد ملاحظه قرار بگیرند و تأثیر چندین عوامل فرمول‌بندی و فرایندی مختلف و متنوع با ساز و کارهای پیچیده بر این ویژگی‌ها مطالعه شود. در مقاله‌های پیش‌تر چاپ شده در این نشریه و نیز سایر مقاله‌های منتشر شده، کاربرد طراحی آزمایش فاکتوریل و سطح پاسخ در شناخت رفتارها، مدل‌سازی، بهینه‌سازی و توسعه‌ی فرمول آمیزه‌ی لاستیکی آدرس داده شده است [۱ و ۲]. در این مقاله به ترکیب این رویکرد کارآمد با رویکرد مدل‌سازی با شبکه‌ی‌عصبی مصنوعی در مطالعات طراحی آمیزه‌ی لاستیکی پرداخته شده است.

مقدمه‌یی‌برشبکه‌های‌عصبی‌مصنوعی:

شبکه‌های عصبی پیش‌رو[1] در مدل‌سازی رفتار پیچیده/غیرخطی مرسوم هستند [۳]. این شبکه‌ها شامل لایه‌های ورودی، خروجی و مخفی بوده و هرلایه

1. Feed Forward Neural Networks

شامل عناصر پردازش‌گر موسوم به نرون یا گره است. نرون‌ها به لایه‌های خروجی و مخفی متصل‌اند. تعداد نرون‌ها در لایه‌ی ورودی برابر با تعداد فاکتورهای ورودی (متغیرها) است. تعداد نرون‌ها در لایه‌ی خروجی برابر با تعداد پاسخ‌ها یا اهداف است. تعداد نرون‌ها در لایه‌ی مخفی باید به‌گونه‌یی انتخاب شود که بهترین برازش داده‌ی تجربی به‌دست آید. اطلاعات موجود در لایه‌ی ورودی در لایه‌های خارج از طریق لایه‌های مخفی به‌تصویر کشیده می‌شود. قدرت اتصال‌های بین نرون‌ها موسوم به وزن است. هر نرون یک مجموعه وزن داده شده‌ی ورودی با یک بایاس را دریافت می‌کند و مجموع ورودی‌های وزن داده شده با یک بایاس، در معرض یک تابع فعالیت قرار می‌گیرد. از داده‌های تجربی برای آموزش شبکه به‌کمک یک الگوریتم آموزشی مناسب باید استفاده شود. الگوریتم آموزشی مقادیر اتصال‌ها یعنی ضرایب وزنی مابین گره‌های پردازش‌گر را با حداقل سازی خطای مابین خروجی شبکه و هدف تنظیم می‌کند. فرایند آموزش ادامه می‌یابد مادامی‌که خروجی شبکه با مقادیر هدف (داده‌های تجربی) منطبق شود.

عملکرد مدل‌سازی/ شبیه‌سازی با شبکه‌ی عصبی توسط تحلیل رگرسیون بین خروجی‌های شبکه، یعنی پارامترهای پیش بینی شده و اهداف مربوطه - یعنی مقادیر تجربی - ارزیابی می‌شود. برای ارزیابی عملکرد شبکه، چندین معیار می‌تواند استفاده شود. برای اجتناب از برازش بیش از حد[1]، معمولاً داده‌ها به سه بخش آموزش، ارزیابی و آزمون تقسیم می‌شود. داده‌ی ارزیابی برای اندازه‌گیری عمومیت شبکه و متوقف کردن آموزش مورد استفاده قرار می‌گیرد. داده‌ی آزمون تاثیری بر آموزش ندارد و بنابراین یک معیار مستقل از عملکرد شبکه فراهم می‌آورد.

رویکرد ترکیبی طرح آزمایش و شبکه‌ی عصبی مصنوعی (DOE/ANN)

طراحی آمیزه‌ی لاستیکی بر مبنای داده‌های تجربی است و طراح آمیزه همواره به‌دنبال درک ارتباط ویژگی‌های فیزیکی- مکانیکی، رئومتری و فرایندپذیری آمیزه به عوامل فرمولی (مقدار و نوع مواد) و فرایندی (شرایط اختلاط، پخت و...) از طریق تهیه‌ی آمیزه با تغییر عوامل فرمولی و فرایندی و ثبت ویژگی‌های مورد نظر است. به‌عنوان مثال، در مرحله‌ی اولیه‌ی توسعه‌ی یک فرمول مناسب برای آمیزه‌ی بلت سیمی، لازم است عوامل اصلی مؤثر بر ویژگی چسبندگی آمیزه به‌سیم شناسایی شود [۲]. این کار در قالب طرح‌های "آزمایش غربالی تاگوچی و فاکتوریل دو سطحی" قابل اجراست. حُسن طرح‌های فاکتوریل در احتساب اثرات برهمکنش فاکتورها است، موضوعی که در آمیزه‌کاری لاستیک به‌شدت اهمیت دارد. حسن طرح تاگوچی در تعداد اجراهای بسیار اندک آن است [۲]. یک تحلیل رگرسیون خطی ساده در کنار تحلیل واریانس روی داده‌های گردآوری شده برمبنای "طرح آزمایش" منجر به‌توسعه‌ی یک مدل ریاضی ساده شامل ترم‌های اصلی و برهمکنش می‌شود، به‌گونه‌یی که اهمیت هر فاکتور در کنار اهمیت مدل از لحاظ آماری به‌کمک آماره‌های محاسبه شده مانند آماره t، آماره P، آماره F و آماره R^2 قابل بررسی است.

یک آنالیز رگرسیون را می‌توان بدون اجرای طرح آزمایش روی داده‌های تجربی پیاده‌سازی کرد. حتی با یک تحلیل رگرسیون ساده یک متغیره می‌توان به نتیجه‌های کاربردی مناسبی رسید [۴]. معمولاً در بیشتر موارد مقدار متغیر در طرح‌های فاکتوریل در دو سطح انتخاب می‌شود و در نتیجه، توسعه‌ی مدل رگرسیون قادر به‌بیان رفتارهای غیرخطی نیست. در این موارد عمدتاً از رویکرد سطح پاسخ استفاده می‌شود. روال معمول در روش اخیر این‌ست که که داده‌ها بر اساس دو طرح استاندارد Central Composite و Box Behnken گردآوری می‌شود که توزیع داده‌ی ویژه‌یی دارند و این‌کار موجب افزایش دقت فرایند برازش می‌شود.

"شبکه‌ی عصبی‌مصنوعی" یک ابزار مدل‌سازی تجربی‌ست

1. Over fitting 2.

که ساختار و رفتاری مشابه با نرون‌های بیولوژیکی دارد. این شبکه ابزاری نیرومند در تعیین روابط پیچیده برای مدل‌سازی سیستم‌هایی که تنها ورودی و خروجی آن‌ها مشخص است، به‌حساب می‌آید. پرکاربردترین شبکه‌ی عصبی برای این‌گونه اهداف مدل‌سازی، شبکه‌ی عصبی پیش‌رو[1] چندلایه است [۵]. این نوع شبکه‌ی عصبی مصنوعی یک ساختار شبکه‌یی به‌هم پیوسته[2]، شامل تعداد زیادی عناصر پردازش‌گر ساده موسوم به نرون است. مجموعه پارامترهای یک شبکه‌ی عصبی با توجه به داده‌ی آموزشی مفروض و یک رویکرد آموزشی تعیین می‌شود. بعد از آموزش شبکه، از آن می‌توان برای اهداف شبیه‌سازی و بهینه‌سازی استفاده کرد.

در حوزه‌ی آمیزه‌کاری لاستیک، جایی‌که توسعه‌ی مدل‌های تئوری برای بیان وابستگی ویژگی‌های مختلف آمیزه‌ی لاستیکی به‌عوامل فرمول‌بندی مشکل است، استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی می‌تواند کارآمد باشد. وابستگی یک یا چند ویژگی آمیزه‌ی لاستیکی به‌عوامل فرمول‌بندی را می‌توان به‌خوبی با شبکه‌ی عصبی مدل کرد [۶]. مزیت مدل شبکه‌ی عصبی نسبت به مدل آماری سطح پاسخ، توانایی بالای آن برای توصیف بهتر رفتارهای غیرخطی است. هم‌چنین نیازی به گردآوری داده‌ها بر اساس طرح آزمایش نیست. مزیت دیگر شبکه‌ی عصبی نسبت به مدل آماری سطح پاسخ، این‌ست که امکان توسعه‌ی یک مدل شبکه‌ی عصبی برای دو یا چند پاسخ به‌طور هم‌زمان وجود دارد. در مقابل، یکی از معایب شبکه‌های عصبی مصنوعی در مقایسه با رگرسیون خطی چندگانه، مشکل بودن توصیف ارتباط بین متغیرهای مستقل و غیرمستقل است که به خاطر ابهام در وزن‌های تعریف شده، در واقع یک جعبه‌ی سیاه به‌حساب می‌آید. با این‌حال روش‌های مختلفی برای ارتقای عملکرد شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای تعیین درجه‌ی اهمیت هر متغیر مستقل ارائه شده است [۶].

عیب دیگری که برای شبکه‌های عصبی مصنوعی مطرح می‌شود این‌ست که معمولاً برای توسعه‌ی شبکه‌ی عصبی مصنوعی لازم است تعداد زیادی داده‌ی تجربی گردآوری شود، هر چند که قانونی برای تعیین تعداد این نقاط ارائه نشده است. برای اجتناب از پدیده‌ی برازش بیش از حد که عیب دیگری برای شبکه‌ی عصبی است، معمولاً داده‌ها به سه بخش آموزش، ارزیابی و آزمون تقسیم می‌شود. بنابراین برای اهداف آمیزه‌کاری و توسعه‌ی فرمول بر مبنای شبکه‌ی عصبی مصنوعی، باید تعداد زیادی آمیزه تهیه و از ویژگی‌های ثبت شده برای آموزش شبکه استفاده کرد. عیب دیگر شبکه‌های عصبی مصنوعی این‌ست که معمولاً چندین شبکه‌ی عصبی مختلف را می‌توان با داده‌های تجربی موجود آموزش داد و شبیه‌سازی آن‌ها جواب‌های مختلفی می‌دهد. بنابراین لازم است راهی پیدا شود که به‌کمک آن شبکه‌ی توسعه داده شده محدود شود. یکی از این راه‌ها، ترکیب با طرح آزمایش و تحلیل آماری است.

با ترکیب دو رویکرد سطح پاسخ و شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان رویکردی ارتقا یافته به‌دست آورد که به‌یاری آن معایب موجود در هر یک از این تکنیک‌ها پوشیده شود و از مزایای هر یک از آن‌ها استفاده‌ی بهتری شده باشد. به‌کاربرد رویکرد ترکیبی ANN/RSM(DOE) در سال‌های اخیر در چندین مقاله پرداخته شده است [۶ تا ۸]. اگر داده‌های مورد نیاز برای آموزش شبکه‌ی عصبی بر مبنای طرح آزمایش گردآوری شود (به عنوان مثال طرح‌های استاندارد رویکرد سطح پاسخ)، در این صورت به‌دلیل توزیع مناسب داده‌ها، توسعه‌ی شبکه‌ی عصبی با داده‌های کمتر امکان‌پذیر می‌شود [۶ تا ۸]. هم‌چنین زمانی‌که داده‌های تجربی بر اساس طرح آزمایش گردآوری شود، بعد از آن‌که مدل شبکه‌ی عصبی توسعه داده شد، امکان اعمال تحلیل آماری برای تعیین درجه‌ی اهمیت متغیرهای مستقل وجود خواهد داشت [۷ و ۸].

1. Feed forward 2. Interconnected

بخش تجربی

فرایند توسعه‌ی فرمول مناسب برای آمیزه‌ی لاستیکی رویه‌ی (ترد) تایر سواری با هدف ارتقای مقاومت سایشی در کنار حفظ یا ارتقای سایر ویژگی‌ها در این مطالعه ارائه شده است. از داده‌های تجربی موجود بر اساس سه طرح آزمایش جداگانه با فاکتورهای مشترک استفاده شده است. فرمول و سطوح متغیرهای هر طرح در جدول (۱) آمده است. طرح آزمایش اول از نوع CCD سه فاکتوری است که در آن مقدار دوده N330، روغن و شتاب‌دهنده بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول (۱) تغییر کرده است. نسبت کائوچو SBR/BR برای همه‌ی نقاط ثابت است. هم‌چنین مقدار دوده‌ی N234 نیز برای همه‌ی نقاط طرح ثابت است. تعداد نقاط بر این اساس ۱۸ داده‌ی تجربی‌ست. در طرح آزمایش دوم که از نوع Box Behnken سه فاکتوری است و برای فرمول با پایه‌ی آلیاژ سه تایی SBR/BR/NR توسعه داده شده است، سه متغیر: مقدار دوده‌ی N330، شتاب‌دهنده و گوگرد تغییر کرده است. بر این اساس ۱۵ آمیزه تهیه و ثبت ویژگی‌ها شده است. طرح آزمایش سوم نیز مشابه طرح آزمایش دوم است. منتهی فرمول پایه شامل کائوچوی سیس بوتادین و استایرن بوتادین و حذف کائوچوی طبیعی است. در مجموع ۵۲ داده برای طرح آزمایش و توسعه‌ی مدل شبکه‌ی عصبی‌مصنوعی در نظر گرفته شد (۱۸ داده مربوط به طرح آزمایش اول، ۱۵ داده مربوط به طرح آزمایش دوم، ۱۵ داده مربوط به طرح آزمایش سوم و ۴ داده‌ی تجربی اضافی در محدوده‌ی فرمول نرمال خط تولید (بدون کائوچوی سیس بوتادین). همه‌ی آمیزه‌ها در بنبوری آزمایشگاهی دو لیتری با شرایط یکسان تهیه شد و بعد از گذشت زمان مناسب، روی میل دوغلتکی فاینال شدند. بعد از انجام آزمون رئومتری، برای انجام آزمون‌های لازم، نمونه‌ها پخت و ثبت ویژگی‌ها شدند. این مطالعه روی ویژگی‌های کلیدی زیر متمرکز بود: گشتاور اختلاف که از اختلاف گشتاور حداکثر و حداقل در آزمون رئومتری به‌دست آمده است. زمان ایمنی و زمان پخت بهینه‌ی حاصل از آزمون رئومتری، ویژگی رشد ترک دی متیا، سایش DIN و مدولوس. محدوده‌ی تغییرات این ویژگی‌ها برای ۵۲ نقطه‌ی طرح آزمایش در جدول (۲) آمده است. به‌طور خلاصه مراحل زیر برای توسعه‌ی فرمول بهینه انجام شد:

۱- طراحی آزمایش بر اساس سه طرح مجزا با فاکتورهای مشترک،
۲- گردآوری داده‌های تجربی بر اساس طرح‌های آزمایش،
۳- توسعه‌ی مدل سطح پاسخ برای هر ویژگی،
۴- توسعه‌ی مدل شبکه‌ی عصبی برای همه‌ی نقاط تجربی (مجموع سه طرح آزمایش به‌علاوه چند نقطه‌ی اضافی)،
۵- تنظیم طرح آزمایش CCD جامع ۷ فاکتوری بر اساس همه‌ی متغیرهای مورد مطالعه،
۶- استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده از شبکه‌ی عصبی (بند ۴) برای پیش‌بینی مقدار هر ویژگی در نقاط طرح آزمایش بند ۵،
۷- تحلیل رگرسیون، توسعه‌ی مدل سطح پاسخ و منحنی‌های کانتور برای ویژگی‌ها بر اساس طرح آزمایش جامع ۷ فاکتوری بند ۵،
۸- بررسی صلاحیت مدل جامع با مقایسه‌ی پیش‌بینی آن با پیش‌بینی حاصل از مدل سطح پاسخ در هر طرح آزمایش جداگانه،
۹- بهینه سازی و پیدا کردن بهترین شرایط.

برای توسعه‌ی شبکه‌ی عصبی مصنوعی بر مبنای ۵۲ داده‌ی تجربی که برای هر ویژگی به‌طور جداگانه در نظر گرفته شده است، داده‌های تجربی به سه‌بخش آموزش، ارزیابی و آزمون تقسیم شدند. شبکه‌ی عصبی از نوع پیش‌رو انتخاب شد و تعداد نرون‌های لایه مخفی با حدس و خطا مشخص شد. طرح آزمایش جامع ۷ فاکتوری با متغیرها و سطوح

جدول ۱ (ستون آخر جدول) تعریف و مقادیر پاسخ برای آن توسط شبکه‌ی عصبی مصنوعی فراهم شد. توسعه‌ی مدل سطح پاسخ ۷ فاکتوری از طریق آنالیز رگرسیون برای همه‌ی ویژگی‌ها انجام شد. در نهایت با کوپل‌کردن این مدل با الگوریتم بهینه‌سازی مناسب و تعیین محدوده‌ی مورد نظر برای ویژگی‌ها، چندین فرمول با ویژگی‌های برتر در مقایسه با شرایط نرمال برای آمیزه‌ی رویه‌ی تایر سواری توسعه داده شد.

جدول ۱- طرح آزمایش مورد استفاده در این پژوهش

	طرح آزمایش اول (داده تجربی)	طرح آزمایش دوم (داده تجربی)	طرح آزمایش سوم (داده تجربی)	طرح آزمایش جامع ۷ فاکتوری فرضی
Design Type	3 factor RCCD	3 factor Box Behnken	3 factor Box Behnken	7 factor RCCD Faced Centered
تعداد نقاط طرح آزمایش	۱۸	۱۵	۱۵	۸۸
SBR	۷۵	۵۷	۷۱	variable
BR Cis	۲۵	۲۹	۲۹	۰-۲۸
NR	۰	۱۴	۰	۰-۱۳
N330	۲۳-۳۴٫۲	۰-۲۰	۰-۲۰	۰-۳۰
N234	۴۰	۵۰	۵۰	۴۰-۵۰
Oil	۵-۱۱	۱۰.۲	۱۰.۲	۵-۱۰٫۲
Accelerator	۱-۲	۱-۲	۱-۲	۱-۲
Sulfur	۱.۲	۱-۲	۱-۲	۱-۲

نتیجه‌ها و بحث

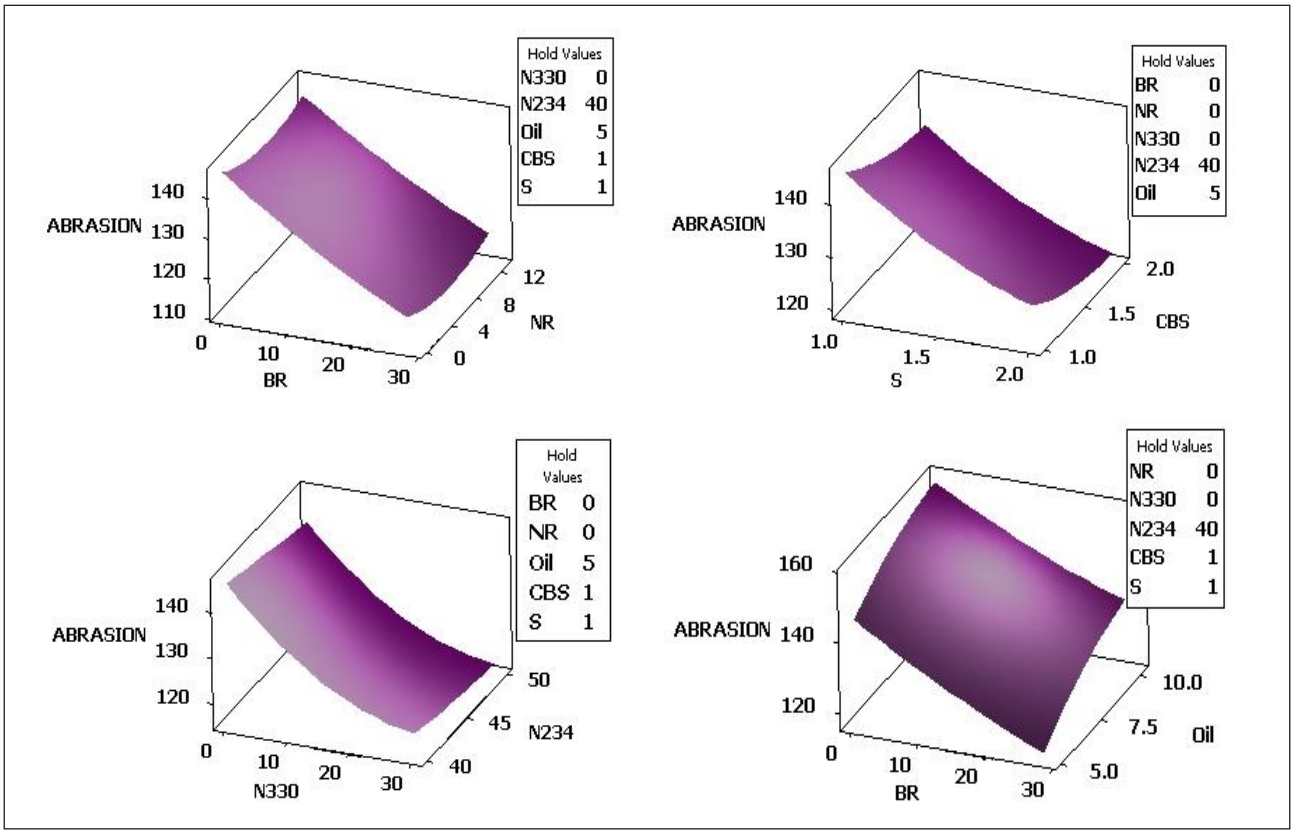
ضرایب رگرسیون مدل شبکه‌ی عصبی‌مصنوعی برای هر وسژگی در جدول (۳) ارائه شده است. تعداد نرون‌های بهینه‌ی لایه مخفی شبکه برای هر ویژگی در همان جدول آمده است. آماره‌های تائیدی مدل سطح پاسخ جامع ۷ فاکتوری نیز در جدول (۳) آمده است. مدل‌های شبکه‌ی عصبی مصنوعی به‌خوبی قادر به‌توصیف رفتارهای ویژگی‌ها بر حسب ۷ متغیر مورد مطالعه است. همچنین مدل سطح پاسخ جامع نیز به‌خوبی می‌تواند تغییرات ویژگی‌ها بر حسب متغیرها را به‌تصویر بکشد. تعدادی از منحنی‌های سطح پاسخ برای ۵ ویژگی کلیدی مورد مطالعه ارائه شده است. مشاهده می‌شود بانک اطلاعات جامع و مفیدی از این مطالعه ترکیبی حاصل شده است. در شکل (۱) نشان داده شده است که افزایش گوگرد و کائوچوی سیس‌بوتادین بهبود سایش را به‌دنبال دارد و افزایش روغن افت سایش. همچنین در محدوده‌ی مورد مطالعه، مقدار شتابدهنده و ورود کائوچوی طبیعی تأثیر قابل توجه بر سایش ندارد. البته دقت شود که اثرات برهمکنشی قوی برای سایش وجود دارد و چنانچه تمام منحنی‌ها ترسیم شود، این برهمکنش‌ها مشخص خواهد شد. البته نتیجه‌های حاصل از این چند شکل محدود قابل تعمیم نیست

جدول ۲- متغیرها و محدوده‌ی آن‌ها و محدوده‌ی ویژگی‌های مورد مطالعه در این پژوهش (مقادیر متغیرها بر حسب phr است)

متغیر	دوده N234	دوده N330	روغن	گوگرد	شتاب‌دهنده	کائوچوی سیس بوتادین	کائوچوی طبیعی
محدوده‌ی مورد مطالعه	۴۰-۵۰	۰-۳۵	۵-۱۱	۱-۲	۱-۲	۰-۲۹	۰-۱۵
ویژگی	گشتاور اختلاف (lb-in)	زمان پخت بهینه (دقیقه)	زمان ایمنی رئومتری (دقیقه)	سایش (mm^3)	مدولوس ۳۰۰ (MPa)	سرعت رشد ترک (mm/kcycle)	
محدوده‌ی نتیجه‌ها	۱۶-۳۴	۱۷-۳۰	۹-۱۶	۸۵-۱۳۵	۶-۱۶	۱,۳-۶	

جدول ۳- آماره‌های تأیید مدل‌های آماری سطح پاسخ و شبکه‌های عصبی مصنوعی

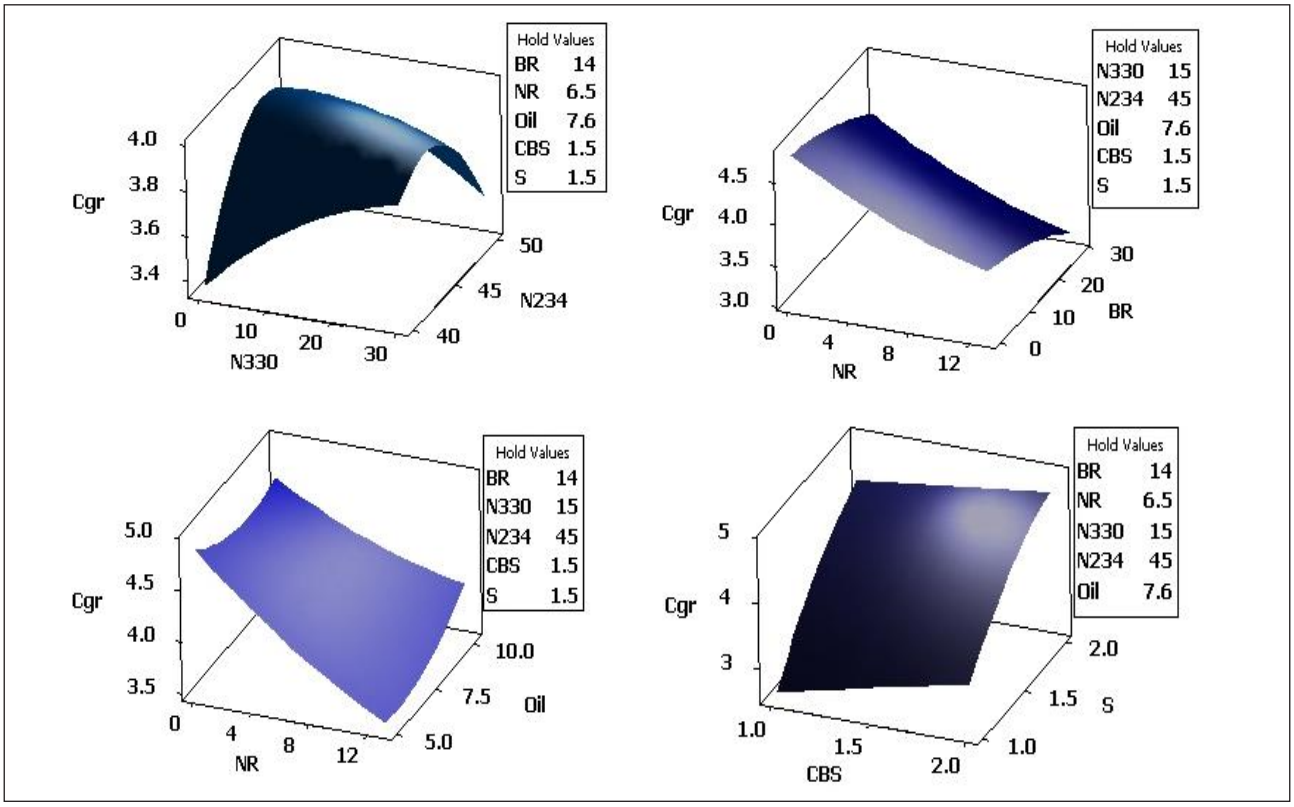
		Crack Growth (mm/kcycle)	Abrasion (mm^3)	M300 (MPa)	Scorch (min)	Tp90 (min)	Delta Torque (lb-in)
ANN model	R training	0.9951	0.9723	0.9994	0.9883	0.9984	0.9999
	R Validation	0.9839	0.9701	0.9704	0.9465	0.9799	0.9244
	R Test	09861	0.9461	0.9531	0.9724	0.9811	0.9729
	R total	0.9912	0.9668	0.9857	0.9802	0.9906	0.9837
	Number of Neurons in Hidden Layer	10	9	15	12	10	10
RSM Model	R^2	86.99	97.41	94.98	87.54	85.71	93.51
	R^2_{adj}	78.24	95.66	91.6	79.15	76.09	89.14
	$F_{regression}$	9.94	55.8	28.12	10.43	8.91	21.41
	P_{value}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



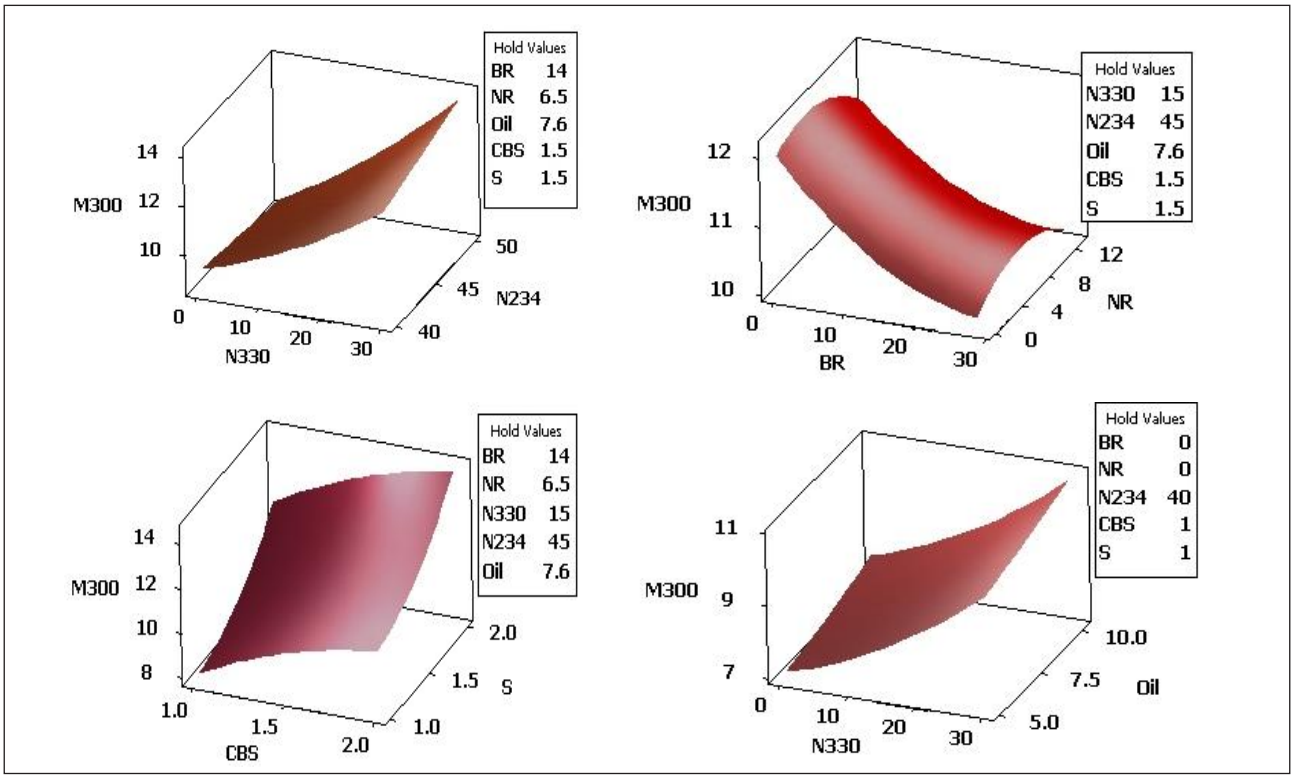
شکل ۱- منحنی‌های RSM/ANN برای سایش آمیزه‌ی لاستیکی بر حسب ۷ متغیر فرمول

در شکل (۲) وابستگی رشد ترک دی‌متیا به عوامل مختلف فرمول نشان داده شده است. ورود کائوچوی طبیعی به فرمول بهبود رشدترک دی‌متیا را باعث شده است. جایگزینی بخشی از کائوچوی استایرن بوتادین با کائوچوی سیس بوتادین و افزایش دوده، افزایش سرعت رشد ترک را به‌همراه دارد.

در شکل (۳) وابستگی مدولوس آمیزه‌ی لاستیکی به‌عوامل مختلف فرمول نشان داده شده است. افزایش دوده، شتاب‌دهنده و گوگرد در فرمول باعث افزایش مدولوس می‌شود. جزئیات این تأثیر به‌خوبی توسط منحنی‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲- منحنی‌های RSM/ANN برای سرعت رشد ترک دی‌متیا آمیزه‌ی لاستیکی بر حسب ۷ متغیر فرمول



شکل ۳- منحنی‌های RSM/ANN برای مدولوس آمیزه‌ی لاستیکی بر حسب ۷ متغیر فرمول

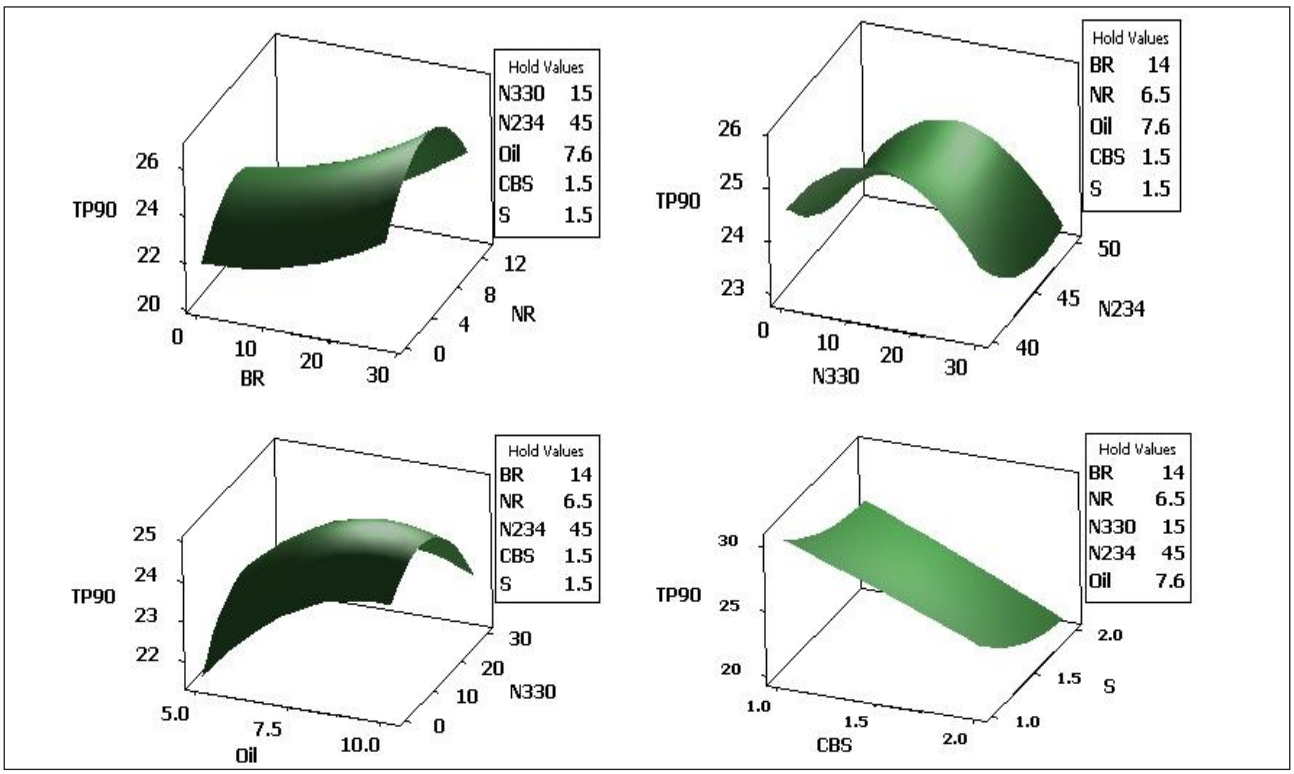
وابستگی زمان پخت بهینه در شکل (۴) به‌تصویر کشیده شده است که نشان می‌دهد افزایش شتاب‌دهنده و گوگرد بیشترین تأثیر کاهشی بر این ویژگی را داراست. در شکل (۵) وابستگی زمان ایمنی آمیزه به ۷ متغیر فرمولی نشان داده شده است که منحنی‌ها بیانگر اثرات کاهشی دوده، شتاب‌دهنده و گوگرد بر این ویژگی است. و درنهایت در شکل (۶) گشتاور اختلاف بر حسب ۷ متغیر فرمول نشان داده شده است. گوگرد بیشترین تأثیر را بر این ویژگی دارد. هم‌چنین افزایش دوده نیز افزایش این ویژگی را به‌همراه دارد.

در شکل (۷) به‌منظور تأکید بر درستی مدل جامع ۷ فاکتوری توسعه داده شده برای این مطالعه، مقایسه‌یی مابین نتیجه‌های مدل جامع و مدل سطح پاسخ برای هر طرح آزمایش (داده‌ی تجربی) به‌طور جداگانه ارائه شده است. مشاهده می‌شود روند تغییرات تشابه زیادی دارد.

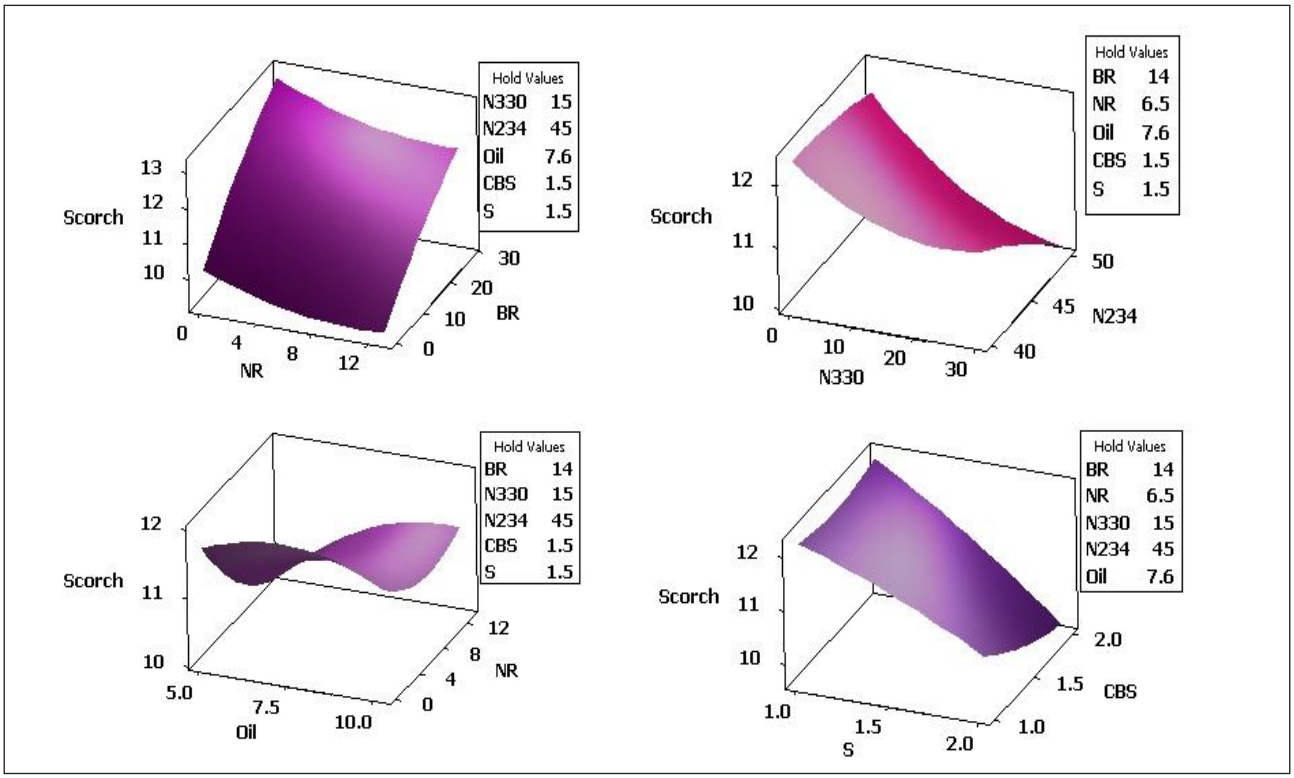
در جدول (۴) نتیجه‌های بهینه‌سازی انجام شده بر مبنای مدل جامع ارائه شده است. برحسب ویژگی‌های مورد انتظار چندین فرمول متنوع قابل توسعه است. به‌عنوان مثال، چنان‌چه کاهش زمان پخت هدف باشد فرمول شماره‌ی (۱) انتخاب مناسبی است و اگر بهبود سایش هدف باشد فرمول (۲) بهتر است. هم‌چنین فرمول (۴) سرعت رشد ترک بیشتر، کاهش زمان پخت و بهبود سایش را توأم با هم دارد.

جدول ۳- آماره‌های تأیید مدل‌های آماری سطح پاسخ و شبکه‌های عصبی مصنوعی

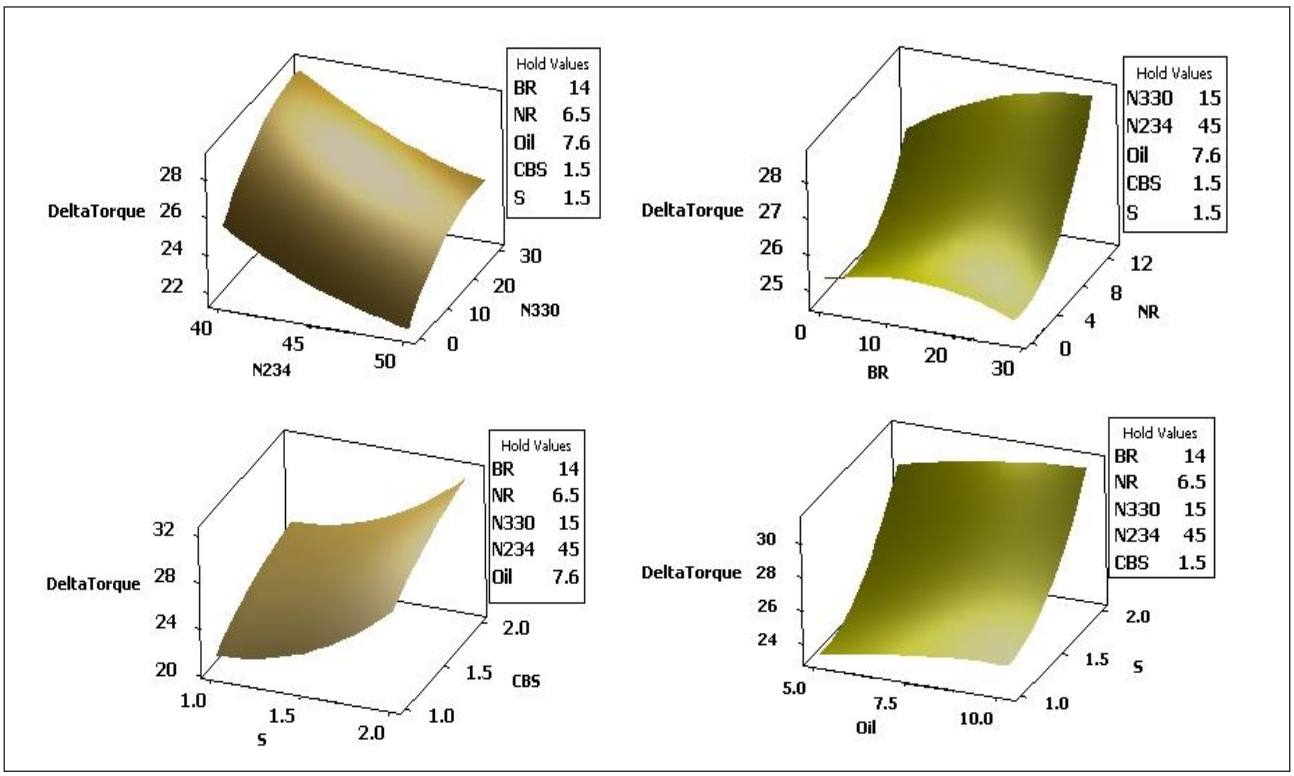
Global Solution1	Global Solution 2
BR = 27.1920 NR = 1.40506 N330 = 15.7576 N234 = 41.1111 Oil = 6.65939 CBS = 1.79588 S = 1.99956 **Predicted Responses** TP90 = 20.9903 , desirability = 0.995129 Cgr = 4.8560 , desirability = 0.856024 ABRASION = 95.0432 , desirability = 0.991352 M300 = 13.5041 , desirability = 0.991861 Scorch = 11.5351 , desirability = 0.985961	BR = 28 NR = 0.479448 N330 = 24.3585 N234 = 50 Oil = 6.16725 CBS = 1.19069 S = 2 **Predicted Responses** TP90 = 22.9992 , desirability = 0.999614 Cgr = 3.9999 , desirability = 0.999860 ABRASION = 85.2839 , desirability = 0.943219 M300 = 13.4989 , desirability = 0.997880 Scorch = 11.5004 , desirability = 0.999757
Global Solution3	**Global Solution 4**
BR = 26.7446 NR = 3.36839 N330 = 17.3774 N234 = 50 Oil = 7.10567 CBS = 2 S = 1.71998 **Predicted Responses** TP90 = 22.0000 , desirability = 1.000000 Cgr = 4.0000 , desirability = 1.000000 ABRASION = 85.0000 , desirability = 1.000000 M300 = 13.0000 , desirability = 1.000000 Scorch = 11.0000 , desirability = 1.000000	BR = 28 NR = 0 N330 = 30 N234 = 47.2080 Oil = 5.14991 CBS = 1.58106 S = 1.69587 **Predicted Responses** TP90 = 20.0007 , desirability = 0.999329 Cgr = 4.5000 , desirability = 1.000000 ABRASION = 85.5845 , desirability = 0.883109 M300 = 13.5000 , desirability = 1.000000 Scorch = 11.4396 , desirability = 0.879242



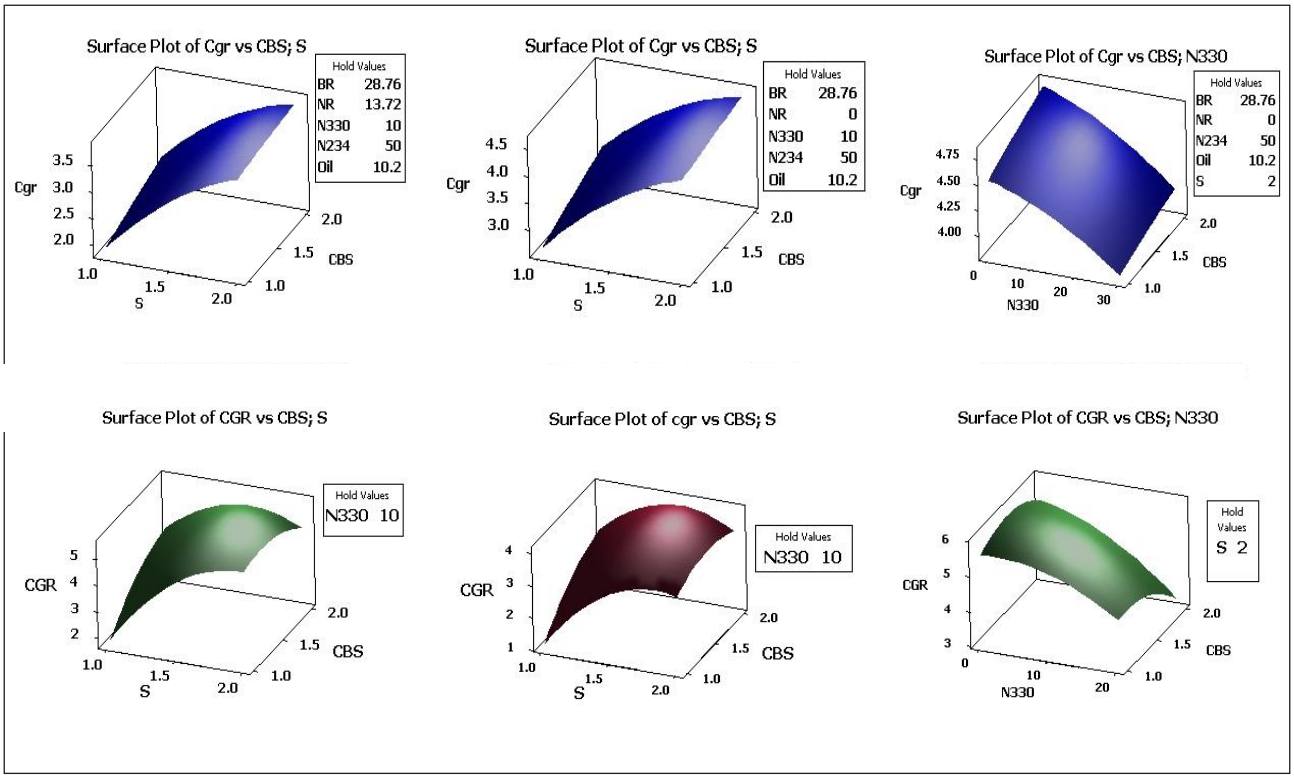
شکل ۴- منحنی‌های RSM/ANN برای زمان پخت بهینه‌ی آمیزه‌ی لاستیکی بر حسب ۷ متغیر فرمول



شکل ۵- منحنی‌های RSM/ANN برای زمان ایمنی آمیزه‌ی لاستیکی بر حسب ۷ متغیر فرمول



شکل ۶- منحنی‌های RSM/ANN برای گشتاور اختلاف آمیزه‌ی لاستیکی بر حسب ۷ متغیر فرمول



شکل ۷- بررسی صلاحیت مدل جامع با مقایسه‌ی پیش بینی آن با پیش بینی حاصل از مدل سطح پاسخ در هر طرح آزمایش جداگانه

نتیجه گیری:

در این پژوهش یک رویکرد ترکیبی از طراحی آزمایش سطح پاسخ با شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای شناخت رفتار و توسعه‌ی فرمول برای آمیزه‌ی رویه‌ی تایر سواری رادیال معرفی شده است. اشاره به این نکته نیز دارای اهمیت است که در زمان طراحی آزمایش‌ها، برنامه‌یی برای آموزش شبکه‌ی عصبی مصنوعی نبوده است. می‌توان طرح‌های آزمایش را بسیار هدفمندتر و با انتخاب بهتر فاکتورها و سطوح آن‌ها اجرا و بانک اطلاعات جامع و بهتری با تعداد داده‌های کمتر از این پژوهش نیز فراهم آورد.

مراجع

۱- مهدی شیوا، حسین آتشی، محمد حسن فخار" استفاده از رویکرد آماری RSM در مطالعه اثرات، مدل‌سازی و بهینه سازی مقدار روغن، دوده و شتابدهنده در یک آمیزه لاستیکی" دهمین همایش ملی لاستیک، تهران ۱۳۸۹.

۲- فاطمه نوروزی- مهدی شیوا، مطالعه اثرات اصلی عوامل فرمولاسیونی بر چسبندگی کامپاند به سیم به کمک طرح آزمایش،، یازدهمین همایش ملی لاستیک، تهران، اسفند، (۱۳۹۱).

3. Samarasinghe, S., “Neural networks for applied sciences and engineering”, Auerbach Publications, Boston, (2006)

4. Shiva M., Atashi H., Ahmadi M,, "Effect of Crosslink Density on Physical and Mechanical Properties of a Tire Tread Formulation; A general Regression Analysis", ISPST2012, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran,21-25 October(2012), Best Presentation.

۵- مهدی شیوا، حسین آتشی، محمد حسن فخار "مدل‌سازی مقاومت پارگی آمیزه لاستیکی به‌کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی" دهمین همایش ملی لاستیک، تهران ۱۳۸۹

6. Shiva M., Atashi H. Hassanpourfard M., "Studying the Abrasion Behaviour of rubbery Materials with Combined Design of Experiment Artificial Neural Network", Chinese Journal of Polymer Science, 30(4), 520−529, (2012).

7. Shiva M.,et al. " Modeling and Optimization of Rubber to Steel Adhesion on the basis of Experimental Data using Combined RSM/ANN Approach ", 11th International Seminar of Polymer Science and Technology, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran, 6-9 October, (2014)

۸- مهدی شیوا، حسین آتشی، "طراحی آمیزه لاستیکی به کمک رویکرد مدل‌سازی آماری ترکیبی"، ارائه شفاهی، یازدهمین همایش ملی لاستیک، تهران، اسفند ۹۱

The Use of Design of Experiments and Statistical Analysis in Rubber Compounding; The Case Study of Design of Passenger Tyre Tread Formulation with Combined Design of Experiment and Artificial Neural Networks

M. Shiva[1,*] and E. Motaharifar[2]

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

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

Recieved: December 2016, Accepted: May 2017

Abstract: In this study, the advanced rubber compounding and principles of rubber formulation design has been studied with the aid of hybrid response surface methodology and the artificial neural networks. The simultaneous effects of seven formulation variables on the curing and the physical properties of a passenger tyre tread formulation have been studied and an efficient hybrid approach for studying the behaviors and modeling and optimization of the rubber compound properties has been provided.

Keywords: Design of Experiments, Artificial neural network, Response surface model, Optimization.