یک روش جدید در پایش کیفیت برای بررسی فرمول‌بندی آمیزه رویه تایر رادیال‌سواری با به‌کارگیری سرعت انتشار موج فراآوایی

ابوالفضل فورگی‌نژاد*، مرتضی طاهری

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند

چکیده

یکی از روش‌هایی که برای پایش کیفیت در خطوط تولید استفاده می‌شود انطباق طراز (الگویی) می‌باشد. در این پژوهش، از طراز انتشار موج فراآوایی در آمیزه‌های که جزء روش‌های غیر-مخرب محسوب می‌شود، استفاده شد. آزمایش‌های غیر-مخرب علاوه بر شناسایی عیوب، در پژوهش‌های بسیاری برای مطالعه ویژگی‌های مختلف مواد از قبیل خواص مکانیکی و ساختاری، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مزیت اصلی آزمایش‌های غیر-مخرب، شناسایی عیوب و بررسی خواص مواد بدون ایجاد تغییر در قطعه مورد آزمایش ، می‌باشد. در پژوهش حاضر، از این روش برای بررسی فرمول‌بندی آمیزه رویه تایر رادیال‌سواری استفاده گردید. به منظور بررسی فرمول‌بندی آمیزه رویه تایر رادیال‌سواری ابتدا ۱۴ نمونه با فرمول‌بندی‌های متفاوت تهیه گردید و برای هرکدام از نمونه‌ها سرعت انتشار امواج طولی صدا اندازه‌گیری گردید. به منظور اعتبارسنجی نمونه دیگری با فرمول‌بندی جدید ساخته شد و سرعت انتشار موج طولی در آن اندازه‌گیری گردید. نتایج بدست آمده از نمونه اعتبارسنجی نشان دادند که روش ارائه شده می‌تواند با دقت سرعت انتشار موج طولی در آمیزه رویه تایر رادیال‌سواری را پیش‌بینی نماید، لذا، از این روش می‌توان در بخش کنترل کیفیت خطوط تولید، برای بررسی اعتبارسنجی فرمول‌بندی آمیزه رویه تایر رادیال‌سواری در خط تولید استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: آزمون غیر-مخرب، فراآوایی، فرمول‌بند لاستیک.

۱. مقدمه

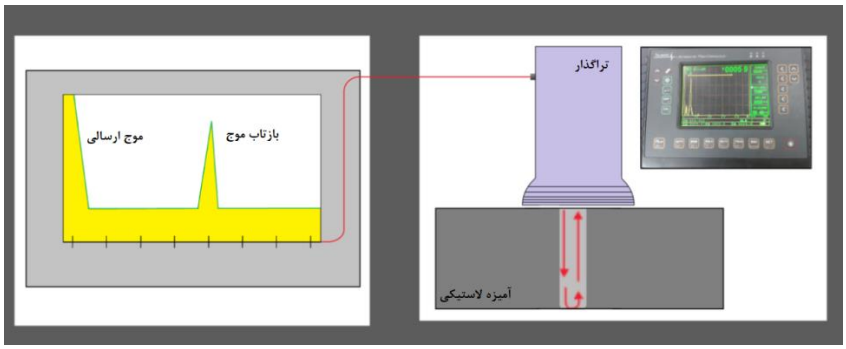
با رشد روزافزون صنایع، کیفیت به یک عامل اصلی جهت دستیابی به جایگاه رقابتی بالاتر تبدیل شده است. فرآیندهای تولید به نحوی طراحی می‌گردند که کلیه مراحل تولید تحت پایش (کنترل) قرار گرفته و از تولید محصولات معیوب یا به دور از خواص مطلوب جلوگیری شود. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری خواص محصولات و بررسی کیفیت آن‌ها وجود دارند. در این روش‌ها، علاوه بر اندازه‌گیری‌های ابعادی و بررسی شکل ظاهری محصولات، خواص فیزیکی و مکانیکی محصول نیز به منظور برخورداری از کیفیت لازم مورد آزمایش قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های متداول که در تعیین خواص مواد نیز کاربرد دارد، آزمون فراآوایی می‌باشد. آزمون غیر-مخرب فراآوایی یک ابزار حساس است که نه تنها برای تشخیص عیوب و ارزیابی قطعات و سازه‌های صنعتی بلکه هم‌چنین برای تعیین ریزساختار، خواص مکانیکی بافت و سوابق حرارتی مواد استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر از امواج فراآوایی و اندازه‌گیری میرایی آن‌ها برای ارزیابی کمی میکروساختارها و خواص مکانیکی مواد استفاده می‌شود [۱]. بررسی کیفیت و تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی مواد با به کارگیری محاسبه تغییرات سرعت امواج فراآوایی، در گستره وسیعی از مواد و کاربردها استفاده شده است.

تعیین خواص مواد بخش مهمی از علم مهندسی به شمار می‌رود [۲]. اطلاعات دریافت شده از امواج فراآوایی مانند میزان میرایی، شکل و زمان امواج در صورت تفسیر صحیح، می‌تواند خواص بسیاری از ماده را آشکار سازد. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است امواج فراآوایی و بازتاب آن‌ها بر روی نمایش‌گر نمایان می‌شوند که با تفسیر این علائم می‌توان به داده‌های مورد نیاز دست یافت.

* نویسنده پاسخگو: foorginejad@birjandut.ac.ir

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.6.5]



شکل ۱ طرحواره آزمون فراآوایی.

تاکنون پژوهش‌های بسیاری برای تعیین خواص مکانیکی و فیزیکی مواد با استفاده از بررسی تغییرات سرعت امواج فراآوایی انجام گردیده‌اند. آزمون فراآوایی جهت بررسی خواص مواد مختلف مانند فلزات، پلاستیک و یا حتی چوب و برای تعیین ضخامت قطعات و نیز تشخیص ویژگی ماده براساس اندازه‌گیری میزان سرعت و میرایی امواج و هم‌چنین برای پیدا نمودن عیوب سطحی، زیرسطحی و داخلی به کار می‌رود [۳]. هم‌چنین از این روش برای تعیین خواص مکانیکی و فیزیکی آلیاژها استفاده می‌شود. آکسوی با اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی و عرضی، برخی خواص مواد نرم و ویسکوالاستیک را ارزیابی کرد. وی با به کارگیری بازه وسیعی از بسامد، ضریب میرایی در مواد نرم را اندازه‌گیری کرد [۲]. هارتسون و هیوز ضمن بررسی خواص مکانیکی دینامیکی و رفتار سرعت آوایی آمیزه‌های پلی‌استایرن به این نتیجه رسیدند که سازگاری آمیزه‌های بسپاری را می‌توان با اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج فراآوایی تعیین نمود [۴]. در پژوهش انجام شده توسط الحادک، همگنی صفحات لاستیکی با استفاده از امواج فراآوایی مورد ارزیابی قرار گرفت. وی با استفاده از روش تپ اکو، ورق‌های لاستیکی با درصد تغییرات ۲٫۵± درصد سرعت امواج طولی را همگن به حساب آورد [۵]. حجازی و همکاران با استفاده از امواج فراآوایی، داده‌های مدول الاستیسیته را برای لاستیک‌های پلی استایرن بوتادین با دانستن جرم حجمی به دست آوردند. آن‌ها نشان دادند، مدول الاستیسیته با افزودن پرکننده‌ای مانند الیاف شیشه‌ای، افزایش می‌یابد [۶]. حجب و همکاران با افزودن ذرات لاستیک خواص بتن را بهبود دادند. آن‌ها برای به دست آوردن مدول الاستیسیته ترکیب به دست آمده، از اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج فراآوایی استفاده کرده و نتایج به دست آمده را با نتایج روش‌های تحلیلی مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که با اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج فراآوایی می‌توان مدول الاستیسیته را تخمین زد [۷]. عفیفی و همکاران به بررسی سرعت انتشار امواج فراآوایی در آمیزه لاستیکی کائوچوی طبیعی اپوکسی[1] با درصد وزنی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد از کائوچوی اتیلن پروپیلن و خواص مکانیکی آمیزه لاستیکی هم‌چون مدول طولی، مدول برشی، مدول یانگ، چگالی و نسبت پواسون پرداختند. آن‌ها نشان دادند که سرعت امواج فراآوایی وقتی درصد وزنی کائوچوی اتیلن پروپیلن تا ۷۵ درصد، افزایش می‌یابد، زیاد می‌شود ولی از ۷۵ درصد تا ۱۰۰ درصد کم می‌شود. که این وقوع تعامل بین مولکولی قوی‌تری در اجزای آمیزه لاستیکی کائوچوی طبیعی اپوکسی تا ۷۵ درصد وزنی کائوچوی اتیلن پروپیلن را نشان می‌دهد و این که خواص مکانیکی مناسب در محدوده ۰ درصد تا ۷۵ درصد از کائوچوی اتیلن پروپیلن قرار دارد [۸].

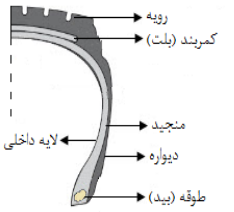
بررسی و آزمایش قطعات صنعتی به وسیله آزمون‌های غیر-مخرب[2] یکی از مراحل مهم صنایع روز دنیا است، زیرا پیچیدگی‌های ساخت و مخارج سنگین تولید قطعات صنعتی ایجاب می‌کنند که به نحوی در مورد اطمینان و کیفیت قطعه ساخته شده آزمون‌هایی به عمل آید. بررسی فرمول‌بندی[3] محصولات تولید شده و خواص فیزیکی و مکانیکی آن یکی از چالش‌های خطوط تولید محسوب می‌گردد.

[1] Epoxidized natural rubber- ethylene propylene diene monomer
[2] Non- Destructive
[3] Furmulation

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.6.5]

پژوهش‌های بسیاری برای استفاده از عناصر مختلف مانند سیلیکا و دوده[1] به عنوان پرکننده در آمیزه‌های لاستیکی تایر انجام شده‌اند که مقدار عناصر بر روی کیفیت نهایی لاستیک تولید شده تاثیر مستقیم دارد به عنوان مثال استفاده از سیلیکای رسوبی منجر به کاهش اصطکاک و پدیده گرمازایی و افزایش مقاومت در برابر خستگی در آمیزه‌ها است [۹]. خواص مورد انتظار از لاستیک تولید شده زمانی تامین می‌گردد که لاستیک با ترکیب عناصر مورد نظر، تولید شود و تغییر در درصد عناصر به کار رفته در لاستیک، خواص را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

در این پژوهش به منظور ارزیابی فرمول‌بندی رویه تایر رادیال‌سواری از روش انطباق الگو استفاده شد. بدین منظور سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی در رویه تایر رادیال‌سواری اندازه‌گیری گردید. هم‌چنین فرض گردید که در صورت عدم تغییر عناصر تشکیل‌دهنده، سرعت انتشار امواج فراآوایی تغییری نخواهد نمود. به عبارت دیگر در صورت وجود تغییر در سرعت انتشار امواج می‌توان به تغییر در ترکیب عناصر رویه تایر رادیال‌سواری پی‌برد. روش پیشنهادی قادر به تفکیک عناصر نبوده و فقط در صورت تغییر در سرعت، وجود تغییرات در فرمول‌بندی را نشان می‌دهد که در پایش (کنترل) کیفیت رویه تایر رادیال‌سواری تولید شده، کاربردی محسوب می‌شود.



شکل ۲ ساختار تایر رادیال.

۲. لاستیک

امروزه تایرهای رادیال به شکل گسترده‌ای در اتومبیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۲). رویه یا آج تایرها عموماً از لاستیک طبیعی اِن‌آر[2] یا لاستیک استایرن بوتادین اِس‌بی‌آر[3] ساخته می‌شوند. مخلوط‌هایی از لاستیک بوتادین بی‌آر[4] با لاستیک طبیعی یا لاستیک استایرن بوتادین نیز در آج تایرها مورد استفاده قرار می‌گیرند. رویه یا آج باید از حداکثر کارآیی در پیش بردن خودرو برخوردار باشد و فرمان‌گیری و تامین اتکای مناسب بر سطح جاده از دیگر وظایف آن است. از آن‌جایی که آج لاستیک با سطح جاده در تماس است، خواص اصطکاکی لاستیک در شرایط مختلف مانند تماس با سطوح خشک، مرطوب و یخی یا برفی از درجه اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. به همین دلیل تایرهای زمستانی و تایرهای تابستانی برای استفاده در شرایط متفاوت وجود دارند. لاستیک‌های استیرن بوتادین برای تایرهای تابستانی و مخلوط لاستیک طبیعی و لاستیک بوتادین برای تایرهای زمستانی استفاده می‌شوند. با وجود این‌که حداقل مقاومت تایر در برابر چرخش مطلوب است، برای ترمز کردن و شتاب گرفتن ضرایب اصطکاک بالایی نیاز می‌باشد. اخیراً از لاستیک‌های استایرن بوتادین با پرکننده سیلیکا در آج تایرها، به منظور کاهش مقاومت در برابر چرخش و افزایش کارآیی ترمز در سطوح خیس استفاده می‌شود. در ماشین‌آلات سنگین از لاستیک طبیعی در آج تایرها استفاده می‌شود تا کشش پایداری حتی در شرایط سخت ایجاد نمایند. در حین چرخش تایر لغزش‌های کمی در سطح تماس اتفاق می‌افتد. مقدار این لغزش‌ها حدوداً برابر ۱/۱۰۰۰۰ فاصله طی شده توسط تایر است [۱۰]. لغزش‌های به وجود آمده یکی از عوامل تاثیرگذار بر روی سایش لاستیک است. سایش سطوح در تماس با حرکت نسبی مانند آج تایرها به شکل گسترده‌ای توسط محققین علم تریبولوژی مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از مواردی که با طول عمر لاستیک‌ها رابطه مستقیم داشته و از بیش‌ترین تاثیر در طول عمر آن‌ها برخوردار است، سایش می‌باشد. از طرف دیگر پیش‌بینی سایش لاستیک‌ها به دلیل تاثیرگذاری عوامل مختلف در آن، پیچیده است [۱۱]. کیفیت لاستیک ارتباط مستقیم با فرمول‌بندی اجزاء مختلف آن دارد، لذا حفظ فرمول‌بندی تعریف شده برای هر قسمت یکی از ارکان مهم پایش (کنترل) کیفیت لاستیک می‌باشد که البته با توجه به دلایلی که ذکر

[1] N339
[2] NR
[3] SBR
[4] BR

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.6.5]

جدول ۱ فرمول‌بندی آمیزه‌ها.

شماره نمونه	گوگرد معمولی (گرم)	دوده (گرم)	سیلیکا با قابلیت پخش بالا (گرم)	سیلان (گرم)	شتاب‌دهنده سولفنامیدی (گرم)	کائوچوی بوتادین سیس (گرم)	اکسید روی (گرم)	اسید استئاریک (گرم)	استئارات روی (گرم)	کائوچوی استایرن بوتادین محلولی (گرم)
X۱	۵/۷	۳۸۶/۸۶	۰	۰	۴/۹۵	۰	۱۹/۴۱	۶/۴۵	۱۳/۵۷	۷۷۳/۷۱
X۲	۵/۷	۳۸۶/۸۶	۰	۰	۴/۹۵	۲۳۲/۱۱	۱۹/۴۱	۶/۴۵	۱۳/۵۷	۵۴۱/۶
X۳	۵/۵۶	۰	۳۷۷/۱۳	۳۰/۱۷	۴/۸۲	۰	۱۸/۹۲	۶/۲۹	۱۳/۲۳	۷۵۴/۲۶
X۴	۵/۵۶	۰	۳۷۷/۱۳	۳۰/۱۷	۴/۸۲	۲۲۶/۲۸	۱۸/۹۲	۶/۲۹	۱۳/۲۳	۵۲۷/۹۸
X۵	۶/۳۹	۰	۲۶۰/۶۹	۲۶/۰۷	۵/۵۴	۲۶۰/۶۹	۲۱/۸	۷/۲۴	۱۵/۲۴	۶۰۸/۲۷
X۶	۴/۸۷	.	۴۶۱/۲۹	۴۶/۱۳	۴/۲۲	۱۹۷/۷	۱۶/۵۳	۵/۴۹	۱۱/۵۶	۴۶۱/۲۹
X۷	۶/۵۳	۲۶۶/۴۸	۰	۰	۵/۶۶	۲۶۶/۴۸	۲۲/۲۸	۷/۴	۱۵/۵۸	۶۲۱/۷۸
X۸	۵/۰۶	۴۷۹/۷۴	۰	۰	۴/۳۹	۲۰۵/۶	۱۷/۱۹	۵/۷۱	۱۲/۰۲	۴۷۹/۷۴
X۹	۵/۰۶	۲۳۵/۱۶	۲۳۵/۱۶	۲۳/۵۲	۴/۳۹	۲۰۱/۵۷	۱۶/۸۶	۵/۶	۱۱/۷۹	۴۷۰/۳۲
X۱۰	۷/۲۲	۰	۲۶۰/۶۹	۲۶/۰۷	۶/۱۶	۲۶۰/۶۹	۲۱/۸	۷/۲۴	۱۵/۲۴	۶۰۸/۲۷
X۱۱	۵/۵۱	۰	۴۶۱/۲۹	۴۶/۱۳	۴/۷	۱۹۷/۷	۱۶/۵۳	۵/۴۹	۱۱/۵۶	۴۶۱/۲۹
X۱۲	۷/۰۲	۰	۳۷۷/۱۳	۳۰/۱۷	۵/۳۶	۲۲۶/۲۸	۱۸/۹۲	۶/۲۹	۱۳/۲۳	۵۲۷/۹۸
X۱۳	۸/۰۶	۰	۲۶۰/۶۹	۲۶/۰۷	۶/۱۵	۲۶۰/۶۹	۲۱/۸	۷/۲۴	۱۵/۲۴	۶۰۸/۲۷
X۱۴	۶/۱۵	۰	۴۶۱/۲۹	۴۶/۱۳	۴/۶۹	۱۹۷/۷	۱۶/۵۳	۵/۴۹	۱۱/۵۶	۴۶۱/۲۹

گردید این مهم در مورد رویه یا آج لاستیک از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. لذا در این پژوهش بررسی کیفیت آمیزه رویه تایر رادیال‌سواری با استفاده از امواج فراآوایی مورد بررسی قرار گرفت.

۳. آزمایش‌های تجربی

۳-۱. مواد

برای ساخت آمیزه‌ها از کائوچوی استایرن بوتادین محلولی ۱۵۰۰، کائوچوی بوتادین سیس[1]، دوده، سیلیکای با قابلیت پخش بالا[2]، سیلان[3]، گوگرد، شتاب دهنده سولفنامیدی، اکسید روی، اسید استئاریک و استئارات روی استفاده شده است.

۳-۲. دستگاه‌ها

در این پژوهش از تجهیزات شامل بنبوری آزمایشگاهی دو لیتری ساخت پومینی، آسیاب دو غلتکی الگوی ۱۵۲×۳۰۵ آر-ایی اِمسی‌سی‌آی‌اِن[4] ساخت برگامو ایتالیا برای اختلاط مواد، پرس پخت آزمایشگاهی ۱۰۰ تن ساخت ژاپن برای پخت آمیزه‌های لاستیکی و رئومتر ساخت شرکت آلفا انگلیس برای تعیین خصوصیات پخت استفاده گردید.

۳-۳. تهیه آمیزه‌ها

در پژوهش حاضر به منظور بررسی ارتباط بین فرمول‌بندی لاستیک و سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی تعداد ۱۴ نمونه لاستیک با فرمول‌بندی‌های متفاوت (جدول ۱) تولید گردیده‌اند.

آمیزه‌ها در بنبوری آزمایشگاهی دو لیتری تحت شرایط یکسان تهیه شدند، دور روتور در مراحل اضافه کردن کائوچو، مواد شیمیایی و پرکننده ثابت و برابر ۲۰ دور بر دقیقه بود. برای اطمینان از انجام کامل واکنش سیلانیزاسیون دور روتور در مراحل پایانی اختلاط به صورت متغیر در نظر گرفته شد تا دمای اختلاط به مدت طولانی در محدوده ۱۳۰ تا ۱۵۰ درجه‌ی سلیسوس حفظ شود. زمان کل اختلاط برای آمیزه‌ها ۶ دقیقه تنظیم گردید.

۳-۴. آزمون فراآوایی

به منظور بررسی ارتباط فرمول‌بندی لاستیک با سرعت انتشار امواج فراآوایی، سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی برای هر نمونه اندازه‌گیری شد. بدین منظور از دستگاه

[1] BR cis
[2] HDS; High Dispersible Silica
[3] Silane
[4] R-E MCCIN

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.6.5]

آزمون فراآوایی تروسونیک[1] استفاده گردید که مشخصات دستگاه، نمونه‌ها و کاوه در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. امواج فراآوایی که از میان ماده انتشار می‌یابند، همواره بخشی از انرژی خود را به سبب پراکندگی در فصل مشترک‌های میکروسکوپی و هم‌چنین اثر اصطکاک‌های درونی در ماده از دست می‌دهند. اثر تنکش (تضعیف) در واقع افت انرژی امواج در حین حرکت موج از میان محیط می‌باشد. در این مطالعه تجربی با توجه به اثر تنکش (تضعیف) شدیدتر در لاستیک‌ها [۳]، برای تعیین سرعت امواج فراآوایی از کاوه‌ای با بسامد ۴ مگاهرتز استفاده گردید.

جدول ۲ مشخصات دستگاه، کاوه و نمونه‌ها.

شرکت سازنده	تروسونیک
قطر کاوه (میلی‌متر)	۱۲
بسامد کاوه (مگاهرتز)	۴
قطر نمونه (میلی‌متر)	۴۱
ضخامت نمونه (میلی‌متر)	۶

سرعت انتشار امواج طولی فراآوایی برای نمونه‌های مختلف، با اندازه‌گیری زمان سپری‌شده بین ارسال امواج و بازتاب آن و سپس ظاهر شدن بر روی صفحه نمایش‌گر توسط مدار برقی استاندارد اندازه‌گیری شده است که سامانه اندازه‌گیری امواج فراآوایی در شکل ۳ نشان داده شده است و دقت اندازه‌گیری سرعت ۱ متربرثانیه می‌باشد. با توجه به این‌که زمان محاسبه شده مابین ارسال و دریافت موج شامل زمان‌های عبور موج از داخل کاوه و جفت‌کننده در هر یک از مراحل رفت و برگشت موج می‌باشد زمان محاسبه شده دارای مقداری خطا بوده که در نتیجه باعث به وجود آمدن خطا در محاسبه سرعت انتشار امواج می‌گردد.

در ابتدا با استفاده از بلوک استاندارد، زمان عبور امواج فراآوایی طولی از میان کاوه و جفت‌کننده اندازه‌گیری و از محاسبات به‌کار رفته در تخمین سرعت انتشار امواج طولی حذف شد و پس از آن سرعت انتشار امواج طولی در نمونه‌ها محاسبه گردید.

شکل ۳ سامانه اندازه‌گیری سرعت امواج فراآوایی: الف) دستگاه فراآوایی، ب) تراگذار و ج) نمونه آمیزه لاستیکی.

اندازه‌گیری‌ها در بسامد ۴ مگاهرتز و دمای اتاق انجام شده و در جدول ۳ سرعت طولی امواج درون آمیزه‌ها گزارش شده است.

جدول ۳ سرعت انتشار امواج فراآوایی در آمیزه‌های لاستیکی و مقادیر بهنجار آن.

شماره نمونه	سرعت انتشار امواج فراآوایی (متر/ثانیه)	مقدار بهنجارشده سرعت انتشار
X۱	۱۷۱۷	۰٫۹۸۱۴
X۲	۱۵۳۷٫۵	۰٫۸۷۸۸
X۳	۱۷۴۹٫۵	۱٫۰۰۰۰
X۴	۱۴۹۴	۰٫۸۵۴۰
X۵	۱۴۶۹٫۶۶۷	۰٫۸۴۰۰
X۶	۱۵۳۶٫۷۵	۰٫۸۷۸۴
X۷	۱۵۰۱٫۱۶۶۷	۰٫۸۵۸۱
X۸	۱۵۷۳٫۷۵	۰٫۸۹۹۵
X۹	۱۵۵۹٫۸۸۳	۰٫۸۹۱۶
X۱۰	۱۴۸۳٫۲	۰٫۸۴۷۸
X۱۱	۱۵۹۹	۰٫۹۱۴۰
X۱۲	۱۴۶۷	۰٫۸۳۸۵
X۱۳	۱۴۶۷٫۱۲۵	۰٫۸۳۸۶
X۱۴	۱۶۱۸٫۶۶۷	۰٫۹۲۵۳

برای الگوی رگرسیونی، از نرم‌افزار آماری اِس‌پی‌اِس‌اِس[2] استفاده شده است. به منظور رفع اختلاف ابعادی دو سوی معادله، داده‌ها قبل از استفاده توسط رابطه ۱ بهنجار (نرمال‌سازی) شده و در جدول ۴ ارائه گردیده است تا هم داده‌ها در بازه معینی قرار گیرند و هم رابطه به دست آمده بی‌بعد باشد.

[1] Tru-Sonic

[2] SPSS

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.6.5]

جدول ۴ مقادیر بهنجارشده عناصر موجود در ترکیب نمونه‌ها.

شماره نمونه	گوگرد معمولی	دوده	سیلیکا با قابلیت پخش بالا	سیلان	شتاب‌دهنده سولفنامیدی	کائوچوی بوتادین سیس	اکسید روی	اسید استئاریک	استئارات روی	کائوچوی استایرن بوتادین محلولی ۱۵۰۰
X۱	۰٫۷۰۷۲	۰٫۸۰۶۴	۰٫۰۰۰۰	۰٫۰۰۰۰	۰٫۸۰۳۶	۰٫۰۰۰۰	۰٫۸۷۱۲	۰٫۸۷۱۶	۰٫۸۷۱۰	۱٫۰۰۰۰
X۲	۰٫۷۰۷۲	۰٫۸۰۶۴	۰٫۰۰۰۰	۰٫۰۰۰۰	۰٫۸۰۳۶	۰٫۸۷۱۰	۰٫۸۷۱۲	۰٫۸۷۱۶	۰٫۸۷۱۰	۰٫۷۰۰۰
X۳	۰٫۶۸۹۸	۰٫۰۰۰۰	۰٫۸۱۷۶	۰٫۶۵۴۰	۰٫۷۸۲۵	۰٫۰۰۰۰	۰٫۸۴۹۲	۰٫۸۵۰۰	۰٫۸۴۹۲	۰٫۹۷۴۹
X۴	۰٫۶۸۹۸	۰٫۰۰۰۰	۰٫۸۱۷۶	۰٫۶۵۴۰	۰٫۷۸۲۵	۰٫۸۴۹۱	۰٫۸۴۹۲	۰٫۸۵۰۰	۰٫۸۴۹۲	۰٫۶۸۲۴
X۵	۰٫۷۹۲۸	۰٫۰۰۰۰	۰٫۵۶۵۱	۰٫۵۶۵۱	۰٫۸۹۹۴	۰٫۹۷۸۳	۰٫۹۷۸۵	۰٫۹۷۸۴	۰٫۹۷۸۲	۰٫۷۸۶۲
X۶	۰٫۶۰۴۲	۰٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۰٫۶۸۵۱	۰٫۷۴۱۹	۰٫۷۴۱۹	۰٫۷۴۱۹	۰٫۷۴۲۰	۰٫۵۹۶۲
X۷	۰٫۸۱۰۲	۰٫۵۵۵۵	۰٫۰۰۰۰	۰٫۰۰۰۰	۰٫۹۱۸۸	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۰٫۸۰۳۶
X۸	۰٫۶۲۷۸	۱٫۰۰۰۰	۰٫۰۰۰۰	۰٫۰۰۰۰	۰٫۷۱۲۷	۰٫۷۷۱۵	۰٫۷۷۱۵	۰٫۷۷۱۶	۰٫۷۷۱۵	۰٫۶۲۰۱
X۹	۰٫۶۲۷۸	۰٫۴۹۰۲	۰٫۵۰۹۸	۰٫۵۰۹۹	۰٫۷۱۲۷	۰٫۷۵۶۴	۰٫۷۵۶۷	۰٫۷۵۶۸	۰٫۷۵۶۷	۰٫۶۰۷۹
X۱۰	۰٫۸۹۵۸	۰٫۰۰۰۰	۰٫۵۶۵۱	۰٫۵۶۵۱	۱٫۰۰۰۰	۰٫۹۷۸۳	۰٫۹۷۸۵	۰٫۹۷۸۴	۰٫۹۷۸۲	۰٫۷۸۶۲
X۱۱	۰٫۶۸۳۶	۰٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۰٫۷۶۳۰	۰٫۷۴۱۹	۰٫۷۴۱۹	۰٫۷۴۱۹	۰٫۷۴۲۰	۰٫۵۹۶۲
X۱۲	۰٫۸۷۱۰	۰٫۰۰۰۰	۰٫۸۱۷۶	۰٫۶۵۴۰	۰٫۸۷۰۱	۰٫۸۴۹۱	۰٫۸۴۹۲	۰٫۸۵۰۰	۰٫۸۴۹۲	۰٫۶۸۲۴
X۱۳	۱٫۰۰۰۰	۰٫۰۰۰۰	۰٫۵۶۵۱	۰٫۵۶۵۱	۰٫۹۹۸۴	۰٫۹۷۸۳	۰٫۹۷۸۵	۰٫۹۷۸۴	۰٫۹۷۸۲	۰٫۷۸۶۲
X۱۴	۰٫۷۶۳۰	۰٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۱٫۰۰۰۰	۰٫۷۶۱۴	۰٫۷۴۱۹	۰٫۷۴۱۹	۰٫۷۴۱۹	۰٫۷۴۲۰	۰٫۵۹۶۲

با کمک داده‌های بهنجارشده و با استفاده از ابزار موجود در نرم‌افزار برای رگرسیون خطی، الگوی رگرسیون خطی با ضریب همبستگی R^2 برابر با ۰٫۹۲۲ بدست آمد.

بر این اساس، رابطه ۲ بهنجار شده سرعت امواج فراآوایی طولی درون آمیزه را در این فرآیند الگو می‌نماید.

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (۱)$$

که در این رابطه $\acute{x}$، مقدار بهنجارشده است و x_{min} مساوی صفر در نظر گرفته شده است.

$$v_c = ۱٫۰۸۳ - ۰٫۱۴۷A - ۰٫۱۱۷B + ۰٫۱۱۴C - ۰٫۱۷۸ + ۰٫۱۵۹E - ۰٫۰۷۸F \quad (۲)$$

که در این رابطه A، کائوچوی بوتادین سیس؛ B، سیلیکای با قابلیت پخش بالا؛ C، سیلان؛ D، استئارات روی؛ E، شتاب‌دهنده سولفنامیدی[1]؛ F، گوگرد معمولی می‌باشند.

با مقایسه ضرایب معادله ۲ با همدیگر اولویت و میزان تاثیر هر یک از عوامل مشخص می‌شوند. در این تحلیل از ۱۴ نمونه استفاده شد که سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی به عنوان متغیر وابسته و درصد عناصر به کار رفته در فرمول‌بندی آمیزه‌ها به عنوان متغیرهای غیروابسته در نظر گرفته شده‌اند.

همان‌طور که در رابطه ۲ دیده می‌شود سرعت امواج طولی از بین ۱۰ ماده شیمیایی موجود در فرمول‌بندی به شش ماده بستگی دارد. چهار ماده دوده، اکسید روی، اسید استئاریک و کائوچوی استایرن بوتادین محلولی توسط الگو رگرسیون با توجه با تاثیر ناچیز آن‌ها بر روی سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی در درون آمیزه‌ها حذف شده‌اند.

۴. نتایج و بحث

امواج آوایی از نوع امواج الاستیک محسوب می‌گردند. خواص الاستیک مواد براساس نیروهای بین اتمی تمام اتم‌های آن‌ها تخمین زده می‌شود. بنابراین کوچک‌ترین انحلال اتم‌ها یا تغییر موقعیت آن‌ها بر روی خواص الاستیکی آن‌ها اثر خواهد گذاشت و در نتیجه آن مقدار سرعت انتشار امواج آوایی تحت تاثیر قرار خواهد گرفت [۱۲]. در پژوهش حاضر به منظور بررسی فرمول‌بندی آمیزه‌های لاستیکی از روش غیر-مخرب فراآوایی استفاده شد. برای الگو کردن مقدار سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی از رگرسیون چندگانه خطی استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش و الگوی پیشنهادی به همراه میزان خطای الگوی پیشنهادی در تخمین سرعت انتشار امواج طولی در جدول ۵ آمده است. در شکل ۴ مقادیر به دست آمده سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی هر نمونه نشان داده شده‌اند. میانگین مقدار خطای الگوی رگرسیون

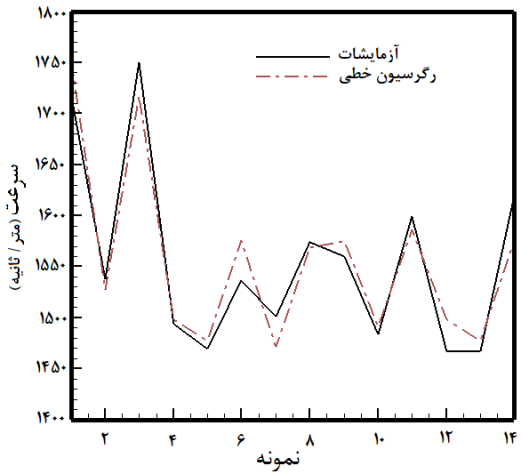
[1] CBS

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.6.5]

چندگانه خطی در پیش‌بینی مقدار سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی در ۱۴ نمونه مورد آزمایش، برابر ۱٫۲۸۴۰ درصد می‌باشد.

جدول ۵ سرعت امواج طولی به دست آمده از آزمایش‌ها و الگوی رگرسیون.

شماره نمونه	سرعت امواج فراآوایی بدست آمده از آزمایش (متر/ثانیه)	سرعت امواج فراآوایی بدست آمده از الگوی رگرسیون (متر/ثانیه)	درصد خطا
X۱	۱۷۱۷	۱۷۵۰٫۴۹۸	۱٫۹۵۱۰
X۲	۱۵۳۷٫۵	۱۵۲۶٫۴۹۲	۰٫۷۱۶۰
X۳	۱۷۴۹٫۵	۱۷۱۶٫۸۸۷	۱٫۸۶۴۱
X۴	۱۴۹۴	۱۴۹۸٫۵۰۷	۰٫۳۰۱۷
X۵	۱۴۶۹٫۶۶۷	۱۴۷۷٫۵۲۷	۰٫۵۳۴۸
X۶	۱۵۳۶٫۷۵	۱۵۷۵٫۷۱۵	۲٫۵۳۵۵
X۷	۱۵۰۱٫۱۶۶۷	۱۴۷۱٫۱۵۶	۱٫۹۹۹۲
X۸	۱۵۷۳٫۷۵	۱۵۶۸٫۵۰۶	۰٫۳۲۶۹
X۹	۱۵۵۹٫۸۸۳	۱۵۷۴٫۴۳۱	۰٫۹۳۵۹
X۱۰	۱۴۸۳٫۲	۱۴۹۱٫۴۷۲	۰٫۵۵۷۷
X۱۱	۱۵۹۹	۱۵۸۶٫۵۵۵	۰٫۷۷۸۳
X۱۲	۱۴۶۷	۱۴۹۸٫۱۷۴	۲٫۱۲۵۰
X۱۳	۱۴۶۷٫۱۲۵	۱۴۷۶٫۷۹۸	۰٫۶۵۹۳
X۱۴	۱۶۱۸٫۸۳۳	۱۵۷۵٫۲۶۸	۲٫۶۹۱۱



شکل ۴ سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی در آمیزه‌های لاستیکی.

در کلِ فرایند آزمایش، منابع ایجاد خطا به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول ناشی از عدم اختلاط کامل مواد در بنبوری و دسته دوم در اندازه‌گیری ضخامت نمونه و زمان رفت و برگشت امواج صوتی طولی است. تغییر ضخامت مایع جفت‌کننده هنگام اندازه‌گیری، باعث ایجاد خطا در محاسبه زمان می‌شود. برای اندازه‌گیری ضخامت نمونه‌ها از میکرومتری با دقت ۰٫۰۰۵ میلی‌متر استفاده شد که خطای زمانی معادل ۳٫۶۷ نانو ثانیه در محاسبات زمان ایجاد می‌نماید. دستگاه اندازه‌گیری فراآوایی مورد استفاده نیز، از قابلیت اندازه‌گیری زمان با دقت ۱۰ نانوثانیه برخوردار است.

منابع ایجاد خطا شامل خطاهای اتفاقی و سامانه‌مند (سیستماتیک) هستند. خطا در اندازه‌گیری ضخامت و خطای دستگاه اندازه‌گیری سرعت امواج صوتی جزء خطاهای سامانه‌مند (سیستماتیک) و تغییر ضخامت مایع جفت‌کننده نیز، جزء خطاهای اتفاقی محسوب می‌شوند.

اندازه خطای اتفاقی در اثر تغییر ضخامت مایع جفت‌کننده در حد ۰٫۵ نانوثانیه است [۱۳]. در بررسی منابع خطای اتفاقی، خطای ناشی از عدم اختلاط کامل در نظر گرفته نشده است که سبب ناهمسانگردی ماده می‌شود. خطای سامانه‌مند (سیستماتیک) زمان دیواره پشتی برای قطعه‌ای با ضخامت ۹ میلی‌متر، حدود ۴٫۵ نانوثانیه برآورد می‌شود [۱۳].

خطای سامانه‌مند (سیستماتیک) طبق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$E_T^2 - E_P^2 = E_{bw}^2 + E_{th}^2 + E_{me}^2 \qquad (۳)$$

که در این رابطه E_{bw}، مقدار خطای دیواره پشتی؛ E_{th}، مقدار خطای اندازه‌گیری ضخامت؛ E_{me}، مقدار خطای دستگاه اندازه‌گیری می‌باشند.

بنابراین مقدار خطا در اندازه‌گیری زمان برابر با ۱۱٫۶ نانوثانیه خواهد بود و با در نظر گرفتن ضخامت میانگین نمونه‌ها برابر ۶ میلی‌متر و سرعت انتشار امواج صوتی طولی میانگین برابر با ۱۵۵۵ متر بر ثانیه، مقدار خطا بر حسب سرعت برابر با ۲٫۳۳ متر بر ثانیه خواهد بود. بنابراین مقدار خطای آزمایش برابر ۱٫۴۳۳۸ درصد می‌باشد.

با توجه به مقدار خطای بدست آمده برای آزمایش بررسی مقادیر خطای الگو، این الگوی پیشنهادی در تخمین سرعت انتشار امواج فراآوایی در آمیزه رویه تایر رادیال سواری مناسب بوده است.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.6.5]

بررسی الگوی رگرسیون نشان می‌دهد که شتاب‌دهنده سولفنامیدی دارای بزرگ‌ترین ضریب در معادله است. شتاب‌دهنده سولفنامیدی که شتاب‌دهنده اولیه نیز نامیده می‌شود به منظور کاهش زمان پخت لاستیک به فرمول‌بندی افزوده می‌شود، خواص مکانیکی آمیزه را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. این شتاب‌دهنده در مقایسه با سایر شتاب‌دهنده‌ها پایداری بیش‌تری به خواص مکانیکی آمیزه لاستیکی می‌بخشد [۱۴]. با افزودن شتاب‌دهنده سولفنامیدی سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی، افزایش می‌یابد.

گوگرد از جمله موادی است که در پخت‌های اولیه آمیزه لاستیکی استفاده می‌شد. با توجه به این‌که گوگرد چگالی آمیزه لاستیکی را کاهش می‌دهد و کاهش چگالی نیز سرعت انتشار امواج را کاهش می‌دهد، سرعت انتشار امواج طولی با افزودن گوگرد کاهش یافته است.

هنگامی که از سیلیکا و یا دوده به عنوان پرکننده استفاده می‌شود، سیلان به منظور تقویت به فرمول‌بندی لاستیک اضافه می‌شود. با استفاده از سامانه تقویت کننده دوده/ سیلیکا/ سیلان دستیابی به توازن مطلوب در خواص لاستیک امکان‌پذیر می‌شود. با افزودن سیلان به فرمول‌بندی آمیزه تایر، سرعت انتشار امواج در آمیزه افزایش می‌یابد.

با توجه به این‌که به دلیل تفاوت شیمیایی سطح سیلیکا با زمینه لاستیکی، اختلاط مشکل است. در این پژوهش از سیلیکای با قابلیت پخش بالا استفاده گردید، استفاده از سیلیکا برای تقویت‌کنندگی در حال افزایش است ولی اگر از آن به تنهایی استفاده شود که دوده حذف گردد به علت مشکلاتی که در زمینه فراورش و پخت به وجود می‌آورد سبب اختلال در تقویت‌کنندگی می‌شود و به این دلیل در کنار آن از پیونددهنده سیلانی استفاده می‌شود [۱۵]. با افزایش مقدار سیلیکای با قابلیت پخش بالا سرعت انتشار امواج افزایش می‌یابد. وجود گروه‌های سیلانول سطح باعث ناسازگاری با بسپار بوده و به همین دلیل با استفاده از عامل اتصال سیلانی و اصلاح سطح سیلیکا و افزایش سازگاری با بستر پلیمر، پخش ارتقاء می‌یابد که افزایش پخش، منجر به اختلاط بیش‌تر ساختار درونی آمیزه گشته و همگنی ساختار بستر بسپاری افزایش می‌یابد هرچه بستر بسپاری همگن‌تر باشد، سرعت انتشار امواج درون آن نیز بیش‌تر می‌شود. نتایج به دست آمده از آزمایش نیز گواه همین موضوع است.

استئارات روی جزء فعال‌کننده‌ها محسوب می‌شود که برای بهینه کردن کارآیی شتاب‌دهنده‌ها به فرمول‌بندی آمیزه‌های لاستیکی افزوده می‌شود. افزودن استئارات روی به فرمول‌بندی آمیزه لاستیکی باعث کاهش سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی در آمیزه خواهد گردید.

در مقایسه با کائوچوی بوتادین سیس که تاثیری بر روی سرعت انتشار امواج ندارد، افزایش ضریب وزنی کائوچوی استایرن بوتادین محلولی، کاهش سرعت انتشار امواج طولی را در برخواهد داشت.

الگوی رگرسیون پیشنهادی نشان می‌دهد که استئارات روی بیش‌ترین تأثیر را بر روی سرعت انتشار امواج فراآوایی دارد و با افزودن آن به فرمول‌بندی، سرعت امواج به نحو چشمگیری کاهش می‌یابد. شتاب‌دهنده سولفنامیدی نیز تاثیر بسزایی بر روی سرعت امواج فراآوایی داشته و با افزودن آن سرعت انتشار امواج افزایش می‌یابد. از دیگر موادی که تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی سرعت می‌گذارند، کائوچوی بوتادین سیس است. مواد سیلان و سیلیکای با قابلیت پخش بالا از نظر کمی تاثیر مشابهی بر روی تغییرات سرعت داشته، با این تفاوت که سیلیکای با قابلیت پخش بالا سرعت را کاهش داده و سیلان سرعت را افزایش می‌دهد.

به منظور اعتبارسنجی[1] الگوی پیشنهادی آمیزه لاستیکی دیگری با فرمول‌بندی متفاوت (جدول ۶) ساخته شد. سپس سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی در آمیزه لاستیکی اندازه‌گیری گردید. مقدار سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی به دست آمده از آزمایش و الگوی رگرسیون چندگانه خطی برای نمونه ساخته شده به ترتیب برابر ۱۵۰۰٫۸ و ۱۵۱۰٫۵۳۳ متر بر ثانیه می‌باشند. برای نمونه اعتبارسنجی، مقدار خطا ۰٫۶۴۸۵ درصد می‌باشد. مقدار خطای کم در تخمین سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی نشان از کاربردی بودن روش پیشنهادی برای ارزیابی فرمول‌بندی آمیزه‌های لاستیکی دارد.

[1] Validation

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.6.5]

جدول ۶ فرمول‌بندی آمیزه اعتبارسنجی.

ترکیب نمونه	مقدار عناصر موجود در ترکیب	مقدار بهنجارشده عناصر موجود در ترکیب
گوگرد معمولی	۶٫۲۹	۰٫۶۲۷۸
دوده	۰٫۰	۰٫۰
سیلیکا با قابلیت پخش بالا	۳۷۷٫۱۳	۰٫۸۱۷۶
سیلان	۳۰٫۱۷	۰٫۶۵۴۰
شتاب‌دهنده سولفنامیدی	۵٫۳۶	۰٫۸۷۰۱
کائوچوی بوتادین سیس	۲۲۶٫۲۸	۰٫۸۴۹۱
اکسید روی	۱۸٫۹۲	۰٫۸۴۹۲
اسید استئاریک	۶٫۲۹	۰٫۸۵۰۰
استئارات روی	۱۳٫۲۳	۰٫۸۴۹۲
کائوچوی استایرن بوتادین محلولی ۱۵۰۰	۵۲۷٫۹۸	۰٫۶۸۲۴

۵. نتیجه‌گیری

کیفیت تایر تولیدی نقش به سزایی در سهم بازار شرکت‌های تولیدکننده تایر ایفا می‌کند.کیفیت لاستیک از نظر عموم مردم با توجه به کارکرد و طول عمر آن سنجیده می‌شود، بدین منظور اکثر شرکت‌های تولیدی تلاش دارند تا خواص آمیزه رویه تایر را بهبود بخشند. در پژوهش حاضر به منظور حفظ کیفیت رویه تایر رادیال‌سواری، فرمول‌بندی لاستیک مورد بررسی قرار گرفت، تا با الگوی پیش‌بینی شده برای آن، مطابقت داشته باشد، بدین منظور از روش غیر-مخرب فراآوایی استفاده گردید. به منظور تعیین ارتباط بین سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی و فرمول‌بندی آمیزه‌ها، تعدادی آمیزه لاستیکی با فرمول‌بندی‌های متفاوت، تهیه و سرعت امواج فراآوایی طولی در آن‌ها اندازه‌گیری گردید.

نتایج حاصل از الگوی رگرسیون پیاده‌سازی شده، و اعتبارسنجی انجام شده نشان داد، که می‌توان برای بررسی فرمول‌بندی یک آمیزه لاستیکی از سرعت انتشار امواج فراآوایی طولی استفاده نمود. در این پژوهش میانگین خطا برای داده‌های آزمایش ۱٫۲۸۴۰ درصد و برای نمونه اعتبارسنجی شده ۰٫۶۴۸۵ درصد به دست آمد، که نشان از کاربردی بودن روش ارائه شده در بررسی اعتبار فرمول‌بندی آمیزه رویه تایر رادیال‌سواری دارد.

۶. قدردانی

از مسئولان محترم شرکت کویر تایر که همکاری همه جانبه‌ای در این پژوهش، در تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها به عمل آورد، کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

۷. فهرست منابع

[1] V. Rajendran, S. Muthu Kumaran, T. Jayakumar, P. Palanichamy, P. Shankar, B. Raj, "Microstructure and ultrasonic behaviour on thermal heat-treated al–li 8090 alloy," Journal of Alloys and Compounds, vol. 478, no. 1-2, pp. 147-153, 2009.

[2] H. Aksoy, "Broadband ultrasonic spectroscopy for the characterization of viscoelastic," Ultrasonics, vol. 67, pp. 168-177, 2016.

[3] B. Hall, V. John, "Non Destructive Testing," London; Macmillan Education, pp. 63-95, 1988.

[4] D.J. Hourston, I.D. Hughes, "Dynamic mechanical and sonic velocity behaviour of polystyrene-poly (vinyl methyl ether) blends," Polymer, vol. 19, no. 10, pp. 1181-1185, 1978.

[5] M.A. El-Hadek, "Fracture mechanics of rubber epoxy composites," Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 45, no. 9, pp. 4046-4054, 2014.

[6] A.A. Higazy, H. Afifi, A.H. Khafagy, M.A. El-Shahawy, A.M. Mansour, "Ultrasonic studies on polystyrene/styrene butadiene rubber polymer blends filled with glass fiber and talc," Ultrasonics, vol. 44, no. 1, pp.1439-1445, 2006.

[7] H. Hadjab, A. Arbia, O. Boulekfouf, "The use of ultrasonic waves and analytical modeling to estimate elasticity modulus of rubber concrete specimen," Advanced Structured Materials, vol. 54, pp. 49-57, 2014.

[8] H.A. Afifi, A.M. El Sayed, "Ultrasonic properties of enr-epdm rubber blends," Polymer Bulletin, vol. 50, no. 1, pp. 115-122, 2003.

[9] M.H.R. Ghoreishy, S. Taghvaei, R. Zafar Mehrabian, "The effect of silica/carbon black filler systems on the fatigue properties of the tread compound in passenger tires,"

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.6.5]

Iranian Journal of Polymer Science and Technology, vol. 24, no. 4, pp. 329-337, 2011 (in Persian).

[10] Encyclopedia of tribology, pp. 2620-2644, 2013.

[11] A.N. Gent, C.T.R. Pulford, "Mechanisms of rubber abrasion," Journal of Applied Polymer Science, vol. 28, pp. 943-960, 1983.

[12] M. Hamidnia, F. Honarvar, H. Khorsand, "Accurate measurement of mechanical properties of tempered microstructures of aisi d6 alloy steel by ultrasonic nondestructive method," Modares Mechanical Engineering, vol. 12, no. 4, pp. 48-58, 2012 (in Persian).

[13] J.P. Charlesworth, J.A.G. Temple, "Engineering Application of Ultrasonic Time-of- Flight Diffraction," Research Studies Press LTD, pp. 75-112, 1989.

[14] H. Nabil, H. Ismail, A.R. Azura, "Optimisation of accelerators and vulcanising systems on thermal stability of natural rubber/recycled ethylene–propylene–dienemonomer blends," Materials and Design, vol. 53, pp. 651-661, 2014.

[15] H. Atashi, K. Sobhanmanesh, M. Shiva, "Improvement of physical and mechanical properties of butadiene rubber with silica/ silane reinforcement system," Iranian Journal of Polymer Science and Technology, vol. 17, no. 5, pp. 281-290, 2005 (in Persian).

[Downloaded from joasi.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.23455748.1395.4.2.6.5]