



## مدل سازی سختی تایرها بر پایه سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی با استفاده از رگرسیون فرآیند گاوسی

ابوالفضل فورگی نژاد<sup>۱\*</sup>، مرتضی طاهری<sup>۱</sup>، نادر ملایی<sup>۲</sup>، مهدی شیوا<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی صنایع و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۰۸

بازنگری: ۱۳۹۶/۰۸/۳۰

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۳۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۱۲/۲۴

### کلمات کلیدی:

سرعت انتشار امواج فراصوتی

سختی

آمیزه لاستیکی

رگرسیون فرآیند گاوسی

**خلاصه:** آزمون‌های غیرمخرب، از قابلیت شناسایی عیوب و بررسی خواص قطعه بدون تغییر خواص قطعه، برخوردار می‌باشند. آزمون غیرمخرب فراصوتی در پژوهش‌های بسیاری برای مطالعه ویژگی‌های مختلف مواد از قبیل خواص مکانیکی و ساختاری، مورد استفاده قرار گرفته است. از سرعت انتشار امواج فراصوتی به شکل گسترده‌ای در اندازه‌گیری سختی فلزات استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر برای اولین بار از روش غیرمخرب آزمون فراصوتی برای بررسی سختی لاستیک استفاده شده و مدل‌سازی توسط رگرسیون فرآیند گاوسی انجام شده است. به این منظور ۸۷ نمونه آمیزه با فرمول‌بندی متفاوت تهیه و در دو دمای متفاوت پخت گردیدند. پس از فرآیند پخت، خواص سختی و سرعت امواج فراصوتی طولی درون آمیزه اندازه گرفته شدند. نتایج مدل‌سازی انجام شده توسط رگرسیون فرآیند گاوسی نشان دادند که مدل ایجاد شده به شکل موفقیت‌آمیزی قادر به پیش‌بینی سختی در لاستیک است. همچنین با وجود بررسی تکرارپذیری وجود ارتباط بین سختی و سرعت امواج فراصوتی مشاهده شده است و امکان جایگزینی روش ارائه شده برای اندازه‌گیری پارامتر سختی وجود دارد. مزیت دیگر روش پیشنهادی، زمان کوتاه انجام آزمون و عدم نیاز به جداسازی نمونه در خطوط تولید لاستیک است که باعث می‌شود بتوان از آن به شکل برخط در خطوط تولید تایر استفاده نمود.

### ۱- مقدمه

در ساختمان تایر از مواد شیمیایی، طبیعی و معدنی مختلفی استفاده می‌شود که هر یک در عملکرد تایر و نیز در فرآیند تولید تایر نقش خاصی را ایفا می‌کنند. در واقع کیفیت تایر تولید شده وابسته به فرمول‌بندی مورد استفاده و رعایت همه استانداردهای فرایندی بکار رفته در مراحل مختلف تولید آمیزه لاستیکی، نیم‌ساخته‌ها، ساخت و مونتاژ تایر و پخت آن است. خواص فیزیکی و مکانیکی لاستیک با کوچک‌ترین تغییر در فرمول‌بندی و فرایند تولید، تحت تاثیر قرار گرفته و دچار تغییر می‌شوند. بنابراین با تغییر خواص مکانیکی تایر، عمر و کیفیت تایر نیز ممکن است از استانداردهای تعریف شده خارج شوند. کیفیت تایر تولیدی نقش کلیدی در رقابت با واحدهای تولیدکننده تایر بشمار می‌رود. کارخانجات تولید لاستیک با روش‌های مختلفی تلاش در کنترل کیفیت تولید با حفظ فرمول‌بندی و بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی در فرآیند تولید دارند. اخیراً امواج فراصوتی برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی حتی در سطح ریزساختارها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. بررسی کیفیت و تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی مواد با به کارگیری محاسبه تغییرات سرعت امواج فراصوتی، در

گستره وسیعی از مواد و کاربردها استفاده شده است.

عفیفی و همکاران [۲] سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی و عرضی در آمیزه لاستیکی کائوچوی طبیعی اپوکسی با درصد وزنی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ از کائوچوی اتیلن پروپیلن را با استفاده از روش بازتاب امواج فراصوتی بررسی نمودند. همچنین خواص مکانیکی آمیزه لاستیکی از قبیل چگالی، مدول طولی، مدول برشی، مدول یانگ، نسبت پواسون و سختی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد وزنی کائوچوی اتیلن پروپیلن تا ۷۵٪ سرعت امواج فراصوتی افزایش می‌یابد ولی از ۷۵٪ تا ۱۰۰٪ کاهش می‌یابد که این وقوع تعامل بین مولکولی قوی‌تری در اجزای آمیزه لاستیکی کائوچوی طبیعی اپوکسی تا ۷۵٪ وزنی کائوچوی اتیلن پروپیلن را نشان می‌دهد و این که خواص مکانیکی مناسب در محدوده ۰٪ تا ۷۵٪ از کائوچوی اتیلن پروپیلن قرار دارند. حجازی و همکاران [۳] با استفاده از تکنیک پالس اکو، داده‌های مدول الاستیسیته را برای لاستیک‌های پلی استایرن بوتادین با دانستن جرم حجمی به دست آوردند. در پژوهش انجام شده توسط الحادک [۴] از امواج فراصوتی برای تعیین همگنی صفحات لاستیکی استفاده گردید، برای دستیابی به هدف اشاره شده، الحادک از روش پالس اکو استفاده

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: foorginejad@birjandut.ac.ir



خطوط تولید تایرها از چهار مرحله تشکیل شده‌اند. مرحله اول فرایند اختلاط مواد و تهیه آمیزه لاستیکی، که در این مرحله مواد اولیه در دستگاه بنبوری (مخلوط‌کن داخلی) مخلوط و طی فرایند اختلاط آمیزه‌های لاستیکی تولید می‌شود از آنجاکه خواص مکانیکی مورد انتظار برای بخش‌های مختلف تایر متفاوت است، بنابراین باید آمیزه‌های مختلفی برای هر بخش از تایر تهیه گردد.

بنا به دلایل مختلف آمیزه‌های تولید شده در مرحله اول کاملاً یکنواخت نبوده که می‌تواند بر روی خواص مکانیکی لاستیک تولید شده تاثیر بگذارد لذا در خطوط تولید لاستیک قبل از مرحله پخت، خواص مکانیکی و فیزیکی لاستیک بررسی و در صورت مورد تایید نبودن آمیزه تولید شده از خط خارج می‌گردد. در این مرحله آزمایش‌های رئومتر، سختی و چگالی بر روی نمونه‌های گرفته شده از آمیزه‌های تولیدی انجام می‌شود که یکی از نکات کلیدی در حفظ کیفیت خطوط تولید تایر محسوب می‌شود.

تست‌های مذکور به شکل برخط قادر به شناسایی خواص فیزیکی و مکانیکی آمیزه‌ها نبوده و به نوعی توقف در جریان تولید ایجاد می‌نمایند. به منظور رفع این چالش در این پژوهش در گام اول پیشنهاد گردید که آزمون فراصوتی که قابلیت برخط شدن دارد به سایر تست‌های مشخص شده افزوده گردد.

مرحله دوم در خطوط تولید تایر مرحله آماده‌سازی و ساخت اجزاء تایر است که هر یک در بخش‌های متفاوتی انجام می‌گیرد. ساخت رویه، دیواره و نوارهای لاستیکی در اکسترودر، ساخت لایه‌های تشکیل‌دهنده منجید در بخش‌های کلندر و برش لایه‌ها و ساخت لایه داخلی در کلندر، ساخت کمر بند سیمی روی دستگاه استیلاستیک و ساخت طوقه در بخش بیدسازی انجام می‌گیرد. مرحله سوم شامل فرایند ساخت و مونتاژ تایر است. معمولاً ساخت تایرهای رادیال سیمی سواری در دو مرحله انجام می‌گیرد. در مرحله اول منجید تایر شامل لایه‌ها، طوقه و دیواره‌ها آماده می‌شود و سپس در مرحله دوم کمر بند سیمی و رویه به آن اضافه می‌گردد. در مرحله چهارم، تایر پخت می‌شود. در این مرحله تایر خواص فیزیکی و مکانیکی و شکل نهایی خود را به دست می‌آورد، لذا در این مرحله تایر با استفاده از عوامل پخت که هنگام مخلوط کردن آمیزه‌های لاستیکی به آن افزوده شده، بعد از قرار گرفتن در پرس پخت شکل نهایی را به خود گرفته و با حرارت قالب و به دنبال ایجاد اتصالات عرضی در آمیزه‌های لاستیکی، خاصیت الاستیک یا کشسان پیدا می‌نماید.

### ۳- سختی

اندازه‌گیری سختی به شکل سنتی به دو دسته عمده تقسیم می‌شود: دسته اول بر روی فلزات و سایر مواد صلب داکتیل، در این حالت از فرورونده با نیروی کافی برای ایجاد تغییر شکل پلاستیکی

نمود. براساس تحقیقات وی، ورق‌های لاستیکی با درصد تغییرات  $\pm 2/5$  درصد سرعت امواج طولی، همگن محسوب می‌شدند. با توجه به اهمیت درصد لاستیک خشک در محلول شیرابه‌ای و تاثیر آن بر روی قیمت تمام شده، کردونگمی و همکاران [۵] با استفاده از امواج فراصوتی، درصد لاستیک خشک را در محلول‌های شیرابه‌ای مشخص نمودند. آن‌ها همچنین نشان دادند، افزودن پرکننده‌ای مانند فیبرهای شیشه‌ای منجر به افزایش مدول الاستیسیته می‌شود. طاهری و همکاران [۶] در ارزیابی فرمول‌بندی لاستیک استایرن بوتادین<sup>۱</sup> نشان دادند که سرعت انتشار امواج فراصوتی در این نوع از آمیزه‌های لاستیکی با فرمول‌بندی بکار رفته در تولید لاستیک ارتباط دارد. آن‌ها همچنین نشان دادند که افزایش مقدار سیلیکای با قابلیت پخش بالا در فرمول لاستیک مورد بررسی تاثیر بسزایی در افزایش سرعت انتشار امواج فراصوتی در آمیزه‌ها دارد.

کنترل فرمول‌بندی و مراحل فرایندی (از اختلاط تا پخت) و تاثیر آن بر نوسانات خواص فیزیکی و مکانیکی آن یکی از چالش‌های خطوط تولید تایر محسوب می‌گردد. به منظور بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی لاستیک‌ها باید با انجام آزمون‌هایی پس از اختلاط مواد، کیفیت خواص لاستیک تولید شده را مورد ارزیابی قرار داد. یکی از تست‌هایی که برای ارزیابی خواص آمیزه‌ها استفاده می‌شود آزمون سختی است. در پژوهش حاضر ضمن معرفی روش جایگزین که استفاده از اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج در آمیزه‌های لاستیکی است اقدام به مدل‌سازی به روش ماشین‌بردار پشتیبان بین سختی و سرعت انتشار امواج گردید. نتایج بدست آمده از مدل تعریف شده و نتایج آزمایش برای سختی آمیزه‌های لاستیکی در نهایت مورد بررسی قرار گرفتند. امواج فراصوتی برای اندازه‌گیری سختی فلزات مورد استفاده قرار گرفته بود و در این پژوهش این موضوع بر روی لاستیک‌ها ضمن بررسی تکرار پذیری، توسعه یافته است.

### ۲- فرایند تولید تایر

تایر یک خودرو طبق شکل ۱ از بخش‌های رویه، دیواره کناری، طوقه (بید)، لایه داخلی، منجید و کمر بند (بلت) تشکیل شده است. که کیفیت لاستیک و انجام وظایف مورد انتظار از تایر خودرو توسط هر یک از بخش‌های تایر تامین می‌گردد.



شکل ۱: ساختار تایر رادیال

Fig. 1. Structure of radial tire

سوزن ثبت گردد. زمان‌های وقفه (خواندن سختی) در استاندارد آ.اس. تی.آم ۴، معادل ۱ یا ۳ ثانیه است. زمان وقفه در استاندارد دین ۵ معادل ۳ ثانیه است، زیرا معمولاً تغییر در مقدار سختی خوانده شده پس از ۱ ثانیه هنوز چشمگیر است. تغییر مکان سوزن روی نمایشگر دستگاه سنجش نمایان می‌شود و اندازه سختی لاستیک را در مقیاس شور A (بین صفر تا صد) نشان می‌دهد. هرچه نمونه سخت‌تر باشد، عدد سختی آن نیز بیش‌تر خواهد بود. سختی بیش‌تر لاستیک‌هایی که در صنعت به کار برده می‌شوند، بین ۴۵ تا ۷۵ شور A است.

هنگام اندازه‌گیری سختی، طبق استاندارد باید دو سمت نمونه صاف و هموار باشد و روی سطحی صاف و محکم قرار داده شود. هم‌چنین ابعاد نمونه مورد آزمون باید به‌گونه‌ای باشد که نقطه مورد اندازه‌گیری از هر طرف حداقل به اندازه ۱۲ میلی‌متر فاصله داشته باشد. ضخامت نمونه مورد آزمون نیز باید حداقل ۶ میلی‌متر باشد. هنگامی که نمونه مورد آزمون نازک است می‌توان با لایه‌گذاری (حداکثر ۳ لایه) ضخامت آن را به حد استاندارد ۶ میلی‌متری رساند (ضخامت هر لایه باید حداقل ۲ میلی‌متر باشد). اگر این موارد لحاظ نشود، مقدار سختی اندازه گرفته شده ظاهری خواهد بود. گرچه مقادیر سختی ظاهری را نمی‌توان به آسانی به اندازه‌گیری‌هایی ارتباط داد که به روش استاندارد انجام شده‌اند، اما برای مقاصد مقایسه‌ای هم چنان مفید هستند. اندازه‌گیری‌ها در سه نقطه از نمونه در فاصله مکانی و زمانی مشخص انجام می‌گیرد و معدل آن‌ها گزارش می‌شود. در میان انواع مختلف شور، می‌توان سختی شور A و D را به شرطی که سختی شور  $H_D$  در گستره بین ۵ تا ۵۵ تغییر کند، با رابطه نظری (۱) به سختی شور  $H_A$  ارتباط داد:

$$H_A = 116.1 - \frac{1408.9}{H_D + 12.2} \quad (1)$$

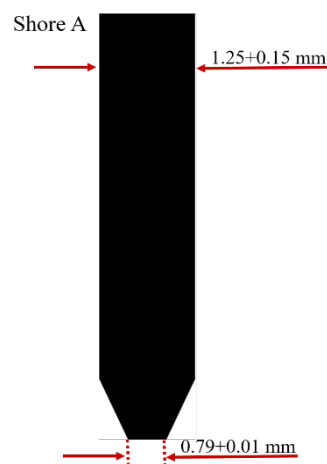
سختی اندازه‌گیری مقاومت مواد در مقابل تغییرات ایجاد شده توسط یک شی خارجی هستند. مقدار این سختی بستگی دارد به استحکام تسلیم، استحکام کششی و مدول الاستیسیته مواد. بر اساس بررسی و اندازه‌گیری‌های انجام شده، سختی از اهمیت حیاتی برخوردار است. در طول دهه‌های گذشته روش‌های متنوعی از اندازه‌گیری سختی به شکل مخرب و غیرمخرب توسعه داده شده‌اند. روش‌های غیرمخرب پرتابل هستند و می‌توانند بر روی مواد در حال کار به کار گرفته شوند. روشی که به طور گسترده از میان روش‌های غیرمخرب برای اندازه‌گیری سختی پذیرفته شده است، تکنیک فراصوت است. روش امواج پالس-اکو فراصوت برای بررسی تغییرات سختی مواد به کار برده می‌شود. امواج در داخل ماده حرکت می‌کنند و میانگین مقدار سختی در بالک ماده را می‌دهند. سرعت

استفاده می‌شود. تعداد زیادی از تست‌ها مانند برینل، راکول و ویکرز به این روش انجام می‌شوند. دسته دوم در مواد الاستومری جایی که تغییر شکل‌ها الاستیک‌اند، دو نوع تست ایزو<sup>۱</sup> و شور<sup>۲</sup> برای اندازه‌گیری سختی وجود دارد که تست‌های ایزو از یک کره و تست‌های شور از یک استوانه کوتاه به عنوان فرورونده استفاده می‌کنند. دو نوع از سختی شور وجود دارد، شور A و شور D که بازه‌های مختلفی از سختی را پوشش می‌دهند.

### ۳-۱- سنجش سختی شور (دورومتر<sup>۳</sup>)

نخستین سازنده دستگاه‌های سنجش سختی با نام دورومتر، شرکت ابزار شور بوده است لذا دورومتر شور نیز بنا به اصطلاح ایشان برای توصیف سختی به کار می‌رود. برای آن که محدوده گسترده سختی لاستیک‌ها پوشش داده شود، سختی‌سنج‌های شور مختلفی طراحی شده است. مناسب‌ترین مقیاس شور برای آمیزه‌های لاستیکی، مقیاس شور A است. از این‌رو در این پژوهش از مقیاس شور A استفاده شده است. ابزار سنجش سختی در مقیاس شور A (سوزن با پایه هرمی، شکل ۲) سختی‌های محدوده ۱۰ تا ۹۰ شور A را به خوبی اندازه می‌گیرد.

به هنگام استفاده از ابزار سختی‌سنج، سوزن آن را محکم به نمونه مورد نظر فشار می‌دهند تا عکس‌العمل ناشی از مقاومت نمونه لاستیکی، سوزن را به درون قاب خود در ابزار به بالا براند. فنر فولادی دقیقی که درون ابزار قرار دارد، در برابر نیروی وارد شده بر



شکل ۲: فرورونده سختی‌سنج شور A

Fig. 2. Indenter of Shore A hardness test

سوزن (از طرف لاستیک) مقاومت می‌کند. هنگامی که سوزن با نمونه تماس پیدا کرد، پس از سپری شدن وقفه زمانی، عمق فرورفتگی

4 ASTM  
5 DIN

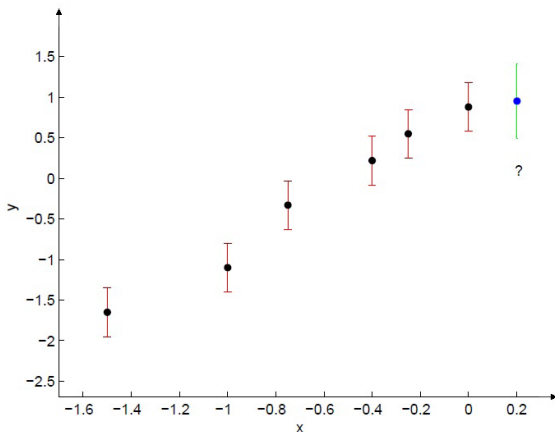
1 ISO  
2 Shore  
3 Durometer

در فرآیند رگرسیون باید به نحوی محاسبه شوند، که کمترین اختلاف ممکن بین مقدار  $f(x)$  به دست آمده از مدل سازی و مقدار آن بر مبنای مجموعه محدودی از مشاهدات حاصل گردد.

$$y = f(x) = w^T \varphi(x) \quad (2)$$

در این روش، با فرض داشتن  $N$  بردار از ورودی ها و مقدار مشاهده شده برای تابع در آن نقاط فرض می شود مقدار مشاهدات به صورت حاصل جمع مقدار تابع در آن نقاط و یک متغیر تصادفی برای مدل سازی نویز، مطابق معادله (۳) می باشد.

$$t_i = y_i + \varepsilon_i = y(x_i) + \varepsilon_i \quad (3)$$



شکل ۳: پیش بینی مقدار تابع و مقدار عدم قطعیت در نقطه هفتم با داشتن مقدار آن و میزان عدم قطعیت در شش نقطه دیگر [۱۳]

Fig. 3. Prediction the value of the function and the uncertainty in the seventh point by having its value and the uncertainty in the other six points

در این رابطه، نویز دارای توزیع گاوسی با میانگین صفر و واریانس در نظر گرفته می شود. لذا، توزیع هر یک از خروجی های به صورت گاوسی با میانگین و واریانس خواهد بود.

$$p(\varepsilon_n | x) = N(0, \sigma_n^2) \quad (4)$$

$$p(t_n | x) = N(y(x_n), \sigma_n^2) \quad (5)$$

یکی از شاخص های مهم در تحلیل آماری تابع کوواریانس، به عنوان معیاری از میزان تاثیر خروجی ها بر یکدیگر [۱۶] می باشد. در این روش، این تابع به صورت نمایی درجه دو، مطابق معادله ۶ تعریف می شود.

$$k(x, x') = \sigma_f^2 \exp \left[ -\frac{(x - x')^2}{2l^2} \right] \quad (6)$$

با لحاظ نمودن نویز تابع کوواریانس به صورت رابطه (۷) در می آید، که در این رابطه تابع دلتای کرونکر، مطابق معادله (۸) و واریانس نویز می باشند.

امواج فراصوت می تواند بر روی یک تکنیک اندازه گیری سختی پذیرفته شده برای مواد با مقادیر سختی متفاوت منطبق شود [۷]. خواص الاستیک مواد می تواند به سادگی توسط اندازه گیری سرعت امواج فراصوت به دست آیند [۸].

در صنایع مکانیکی بسیاری از قطعات مکانیکی باید بتوانند کارکردهای مد نظر را در حین کار برآورد سازند. آزمون ها یکی از موارد اساسی هستند تا خواص رفتاری مواد را مشخص کنند. سیگنال های دریافت شده از امواج منتشر شده و بازتاب شده از داخل مواد، باعث کشف برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی مواد می گردند. برای اندازه گیری سختی مواد، نمونه های فولادی عملیات حرارتی شدند تا گرادیان سختی به دست بیاید [۹].

#### ۴- رگرسیون فرآیند گاوسی

یادگیری ماشین به عنوان یکی از حوزه های جدید علوم کامپیوتر در چند دهه اخیر مورد توجه محققین در رشته های مختلف مهندسی قرار گرفته است. از اهداف این علم، بررسی و ابداع الگوریتم هایی است که بر مبنای آن ها یک کامپیوتر می تواند یادگیری و پیش بینی را بر مبنای مجموعه محدودی از داده انجام دهد [۱۰]. در یادگیری با نظارت، یادگیری ماشین بر مبنای مجموعه ای از مشاهدات برچسب زده شده خروجی برای ورودی های مشخص صورت می پذیرد [۱۱]. یکی از مسائل مهم در یادگیری با نظارت، رگرسیون است که در آن با وجود تعداد محدودی از مشاهدات برای یک تابع می خواهیم به مدلی برای آن، جهت تخمین مقدار آن در نقاطی که مشاهده نشده اند، دست یابیم. با توجه به وجود خطای غیر قابل اجتناب در هر اندازه گیری، مقادیر اندازه گیری شده دارای حاشیه ای از خطا می باشند. لذا، در عمل، برای مدل سازی بر مبنای تعداد محدودی از مشاهدات اندازه گیری شده می بایست این حاشیه خطا نیز لحاظ گردد. در این صورت، مدل سازی به این صورت تغییر می نماید که با داشتن مقدار تابع در نقاط مشخص و با عدم قطعیت مشخص خطا، به دنبال پیش بینی مقدار آن در سایر نقاط هستیم و همچنین به دنبال شاخصی برای پیش بینی میزان عدم قطعیت در سایر نقاط نیز می باشیم [۱۲]. این مساله در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۳].

مطالعات انجام شده در دهه ۹۰ میلادی، برای مدل سازی آماری وزن ها در شبکه های عصبی مصنوعی [۱۴] را می توان به عنوان نقطه آغازین در مدل سازی توابع با استفاده از فرآیند گاوسی در نظر گرفت. برای ارائه مدل رگرسیون فرآیند گاوسی<sup>۱</sup> یکی از روش های یادگیری با نظارت است که بدون هیچ پیش فرضی در مورد داده ها قادر به مدل سازی آماری با لحاظ نمودن عدم قطعیت می باشد [۱۵]. این روش جزء دسته روش های مبتنی بر هسته<sup>۲</sup> محسوب می گردد، که در آن ها نمایش یک تابع به فرم معادله (۲) می باشد. در این رابطه  $w$  و

در کوواریانس باشد، یعنی  $\theta = \{\sigma_f, \sigma_n, l\}$  مجموعه پارامترهای مذکور در پارامترها به نحوی به دست می‌آیند که بهترین توزیع پسین را بر روی مجموعه مشاهدات بانک اطلاعاتی مورد استفاده جهت آموزش را نتیجه بدهد، یعنی به بیشینه مقدار برای  $p(t|x, \theta)$  منتج شود. بر مبنای تئوری بیز، با داشتن اطلاعات کمی از مقدار مناسب  $\theta$ ، مقدار بیشینه برای  $p(t|x, \theta)$  زمانی حاصل می‌گردد که لگاریتم درست نمایی حاشیه‌ای<sup>۲</sup>، که مطابق با رابطه (۱۵) تعریف می‌شود بیشینه گردد [۱۸].

$$\log p(t|x, \theta) = -\frac{1}{\nu} t^T K^{-1} t - \frac{1}{\nu} \log |K| - \frac{n}{\nu} \log \nu \pi \quad (15)$$

لذا در نهایت یافتن پارامترهای بهینه در رگرسیون فرآیند گاوسی در قالب یک مساله بهینه‌سازی طرح می‌گردد که برای یافتن پاسخ بهینه می‌توان از روش‌های مختلفی مانند روش گرادیان مزدوج [۱۹] یا روش سیمپلکس سراسیمی (نلدر-مید<sup>۳</sup>) [۲۰] استفاده نمود.

## ۵- آزمایش‌های تجربی

### ۵-۱- فرمول‌بندی

در این مطالعه ۹ آمیزه لاستیکی با فرمول مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج بدست آمده هر فرمول‌بندی بین ۶ تا ۷ بار تکرار گردید و برای هر یک نمونه‌های لازم ساخته شد. آمیزه‌های مختلف به همراه تعداد و شرایط پخت آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

### ۵-۲- پخت آمیزه‌ها

آمیزه‌ها در پرس پخت در شرایط دمایی ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد (زمان ۵ الی ۶ دقیقه) پخت شدند. در مجموع ۶ یا ۷ نمونه از هر فرمول در شرایط فوق پخت گردید. همچنین برای بررسی تاثیر تغییر شرایط پخت بر رفتار عبور امواج فراصوتی و نیز سختی ۵ فرمول از ۱۰ فرمول فوق علاوه بر دمای ۱۸۵ درجه در دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد نیز پخت گردیدند. 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.

### ۵-۳- آزمون سختی

آزمون سختی بر اساس استاندارد آ.اس.تی.ام-دی ۷۵-۲۲۴۰<sup>۴</sup> تعیین می‌شود. به منظور اندازه‌گیری سختی از فشردن یک جسم

$$k(x, x') = \sigma_f^2 \exp \left[ \frac{-(x - x')^2}{2 l^2} \right] + \sigma_n^2 \delta(x, x') \quad (7)$$

$$\delta(x, x') = \begin{cases} 1 & x = x' \\ 0 & x \neq x' \end{cases} \quad (8)$$

در ادامه، با محاسبه تابع کوواریانس برای تمام ترکیبات مختلف از مجموعه داده‌های بانک اطلاعاتی آموزش، ماتریس کوواریانس را برای آن بانک اطلاعاتی، مطابق با معادله (۹) به دست می‌آید.

$$K = \begin{bmatrix} k(x_1, x_1) & k(x_1, x_2) & \dots & k(x_1, x_n) \\ k(x_2, x_1) & k(x_2, x_2) & \dots & k(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k(x_n, x_1) & k(x_n, x_2) & \dots & k(x_n, x_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

المان‌های قطری این ماتریس برابر با بوده و المان‌های خارج از قطر آن با توجه به فاصله بین دو ورودی از مقدار کاهش یافته، در صورت بزرگ بودن فاصله بین آن دو نمونه نسبت به پارامتر، به سمت صفر میل می‌نمایند. سری یک بردار جدید از ورودی‌ها، بردار کوواریانس مطابق با رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$K_* = [k(x_*, x_1) \quad k(x_*, x_2) \quad \dots \quad k(x_*, x_n)] \quad (10)$$

این تعریف را می‌توان در مورد یک ورودی جدید نسبت به خود نیز مطابق با رابطه (۱۱) تعمیم داد.

$$K_{**} = k(x_*, x_*) \quad (11)$$

تابع چگالی احتمال در مورد مقدار تابع برای ورودی جدید، با وجود مجموعه مشاهدات  $t$  از تابع  $f$  در بانک اطلاعات آموزش، یعنی  $p(y^*|t)$ ، در رگرسیون فرآیند گاوسی به صورت توزیع نرمال در نظر گرفته شده و با استفاده از روابط (۱۲) تا (۱۴) محاسبه می‌گردد.

$$p(y^*|t) = N(\mu, \Sigma) \quad (12)$$

$$\mu = K_* K^{-1} t \quad (13)$$

$$\Sigma = K_{**} - K_* K^{-1} K_*^T \quad (14)$$

که در روابط فوق، مقدار میانگین این توزیع،  $\mu$  به عنوان مقدار پیش‌بینی شده در فرآیند رگرسیون و مقدار واریانس توزیع،  $\Sigma$  به عنوان معیاری از میزان عدم قطعیت در پیش‌بینی در نظر گرفته می‌شوند.

با توجه به این‌که مقدار پیش‌بینی شده تا حد زیادی وابسته به پارامترهای  $\sigma_f$ ،  $\sigma_n$  و  $l$  در تابع کوواریانس تعریف شده در رابطه (۶) می‌باشد، انتخاب صحیح این پارامترها، تاثیر شایانی بر دقت مدل ارائه شده دارد. بدین منظور، روش‌های مختلفی ارائه شده است [۱۷]، که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از اعتبارسنجی متقابل ۱ و برآورد بر مبنای استنباط بیزی. در روش دوم، با فرض این‌که بردار  $\theta$  شامل مجموعه پارامترهای موثر

2 Marginal Likelihood

3 Nelder-Mead

4 ASTM-D 2240-75

1 Cross-Validation

#### ۵-۴- آزمون فراصوتی

به منظور بررسی ارتباط سختی آمیزه‌های لاستیکی با سرعت انتشار امواج فراصوتی، سرعت انتشار امواج طولی برای هر نمونه اندازه‌گیری شد. بدین منظور از دستگاه آزمون فراصوتی تروسونیک<sup>۲</sup> استفاده گردید. سرعت انتشار امواج از تقسیم ضخامت نمونه‌ها بر نصف زمان رفت و برگشت امواج بدست می‌آید. ضخامت نمونه‌ها با کمک میکرومتر بدست آمده و سپس محاسبه سرعت انتشار امواج توسط دستگاه تروسونیک با دقت یک متر بر ثانیه انجام می‌شود.

امواج فراصوتی که از میان ماده انتشار می‌یابد، همواره بخشی از انرژی خود را به سبب پراکندگی در فصل مشترک‌های میکروسکوپی و همچنین اثر اصطکاک‌های درونی در ماده از دست می‌دهند. اثر تضعیف در واقع افت انرژی امواج آوایی در حین حرکت موج از میان محیط می‌باشد. در این مطالعه تجربی با توجه به اثر تضعیف شدیدتر در لاستیک‌ها [۲۱]، برای تعیین سرعت امواج فراصوتی از کاوه‌ای با بسامد ۴ مگاهرتز استفاده گردید.

سرعت انتشار امواج طولی فراصوتی برای نمونه‌های مختلف، با اندازه‌گیری زمان سپری شده بین ارسال امواج و بازتاب آن و سپس ظاهر شدن بر روی صفحه نمایشگر توسط مدار الکترونیکی استاندارد اندازه‌گیری شده است که سامانه اندازه‌گیری امواج فراصوتی در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به این‌که زمان محاسبه شده مابین ارسال و دریافت موج شامل زمان‌های عبور موج از داخل کاوه و جفت‌کننده در هریک 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 فراصوتی طولی از میان کاوه و جفت‌کننده اندازه‌گیری و از محاسبات به کار رفته در تخمین سرعت انتشار امواج طولی حذف شد و پس از آن سرعت انتشار امواج طولی در نمونه‌ها محاسبه گردید.

اندازه‌گیری‌ها در فرکانس ۴ مگاهرتز و دمای اتاق انجام شده و پس از سه بار تکرار و میانگین‌گیری در جدول ۲ میانگین سرعت امواج فراصوتی طولی درون آمیزه‌ها گزارش شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های ۱۱، ۱۵ و ۶۸ از جدول ۲ به علت شرایط آزمایش، نامناسب بوده و از مجموع ۸۷ داده حذف شده است لذا فقط ۸۴ داده به منظور مدل‌سازی استفاده شده است.

نفوذکننده دارای شکل هندسی خاص تحت شرایط مشخص استفاده می‌شود. بنابراین اندازه‌گیری سختی آمیزه‌های لاستیکی تا حد زیادی به تعیین میزان تنش وارده به آن بستگی دارد. در آزمون سختی عمق نفوذ به نحوه اعمال نیرو، شکل جسم نفوذکننده و تغییر شکل آن بستگی دارد.

**جدول ۱:** تعداد آمیزه‌های مختلف به همراه شرایط پخت

**Table 1. Number of compounds with curing conditions**

کد آمیزه (کد نمایش)	پخت در دمای ۱۴۵ °C (P)	پخت در دمای ۱۸۵ °C (R)
H۱	۰ نمونه	۶ نمونه
H۲	۰ نمونه	۷ نمونه
H۳	۰ نمونه	۷ نمونه
H۴	۰ نمونه	۷ نمونه
H۵	۶ نمونه	۶ نمونه
H۶	۶ نمونه	۶ نمونه
H۷	۶ نمونه	۶ نمونه
H۸	۶ نمونه	۶ نمونه
H۹	۶ نمونه	۶ نمونه

ابتدا تنها یک جسم نفوذکننده کرومی شکل به عنوان استاندارد بین‌المللی برای اندازه‌گیری سختی بر اساس ایزو معرفی شد. اما در حال حاضر روش جدید اندازه‌گیری سختی بر اساس شور به عنوان یک روش استاندارد بین‌المللی می‌باشد. بسته به اینکه نمونه سخت و یا نرم باشد از این دستگاه با انواع مختلفی استفاده می‌شود. به عنوان مثال برای اندازه‌گیری سختی لاستیک‌های نرم از دستگاه شور A و برای لاستیک‌های سخت‌تر از دستگاه شور D استفاده می‌شود. جسم نافذ در ساختار دستگاه سختی‌سنج شور به شکل یک مخروط ناقص است و از روی میزان انحراف یک فنر صفحه‌ای<sup>۱</sup> که بر اساس سختی استاندارد کالیبره شده است، مقاومت نمونه لاستیکی در برابر نفوذکننده مخروطی شکل اندازه‌گیری و توسط یک عقربه نمایش داده می‌شود. در حالت کلی مقادیر سختی بین صفر تا ۱۰۰ متغیر می‌باشد. در مواد کاملاً سخت مقدار سختی برابر ۱۰۰ شور A می‌باشد که در این حالت مخروط ناقص به داخل نمونه به هیچ وجه فرو نمی‌رود و فنر تا آخرین حد خود فشرده می‌شود که در این حالت میزان نیروی وارده بر فنر برابر ۸۲۲ گرم است. مواد کاملاً نرم دارای سختی صفر می‌باشند که هیچ‌گونه انحرافی در فنر ایجاد نمی‌شود و در این حالت نیروی وارده به فنر ۵۶ گرم است.

در این پژوهش آزمون سختی با دستگاه سختی‌سنج شور اندازه‌گیری گردید. مقادیر سختی بر حسب شور A می‌باشد. برای هر نمونه این آزمون ۵ بار تکرار شد و سپس میانگین آن‌ها محاسبه شد. مقادیر میانگین سختی آمیزه‌ها در جدول ۲ گزارش گردیده است.

۵۰	۱۵۵۲	۶R-H۵	۳۳
۵۷	۱۵۵۸	۱P-H۵	۳۴
۶۰	۱۵۲۶	۲P-H۵	۳۵
۵۸	۱۵۳۴	H5-3P	۳۶
۵۸	۱۵۴۹	H5-4P	۳۷
۶۰	۱۵۵۴	H5-5P	۳۸
۵۸	۱۵۴۵	H5-6P	۳۹
۵۵	۱۵۳۲	H6-1R	۴۰
۵۶	۱۵۰۳	H6-2R	۴۱
۵۷	۱۵۱۷	H6-3R	۴۲
۵۵	۱۵۲۰	H6-4R	۴۳
۵۵	۱۵۳۲	H6-5R	۴۴
۵۶	۱۵۱۶	H6-6R	۴۵
۶۶	۱۵۴۸	H6-1P	۴۶
۶۶	۱۵۲۹	H6-2P	۴۷
۶۶	۱۵۳۹	H6-3P	۴۸
۷۰	۱۵۵۸	H6-4P	۴۹
۶۵	۱۵۴۹	H6-5P	۵۰
۶۷	۱۵۲۶	H6-6P	۵۱
۵۰	۱۵۰۲	H7-1R	۵۲
۵۲	۱۵۱۵	H7-2R	۵۳
۵۰	۱۴۹۸	H7-3R	۵۴
۵۴	۱۵۲۹	H7-5R	۵۵
۵۹	۱۵۶۳	H7-5R	۵۶
۵۷	۱۵۲۳	H7-6R	۵۷
۵۸	۱۵۴۲	H7-1P	۵۸
۵۷	۱۵۳۸	H7-2P	۵۹
۵۶	۱۵۴۲	H7-3P	۶۰
۵۵	۱۵۳۰	H7-4P	۶۱
۶۴	۱۵۴۲	H7-5P	۶۲
۶۲	۱۵۶۶	H7-6P	۶۳
۴۶	۱۵۰۷	H8-1R	۶۴
۴۹	۱۴۷۳	H8-2R	۶۵
۴۸	۱۳۷۷	H8-3R	۶۶
۵۰	۱۴۵۵	H8-4R	۶۷
۵۰	۱۵۹۵	H8-5R	۶۸

جدول ۲: میزان سختی و سرعت امواج فراصوتی آمیزه‌های لاستیکی

Table 2. Hardness and ultrasonic velocity of rubber compounds

شماره ردیف	کد آمیزه (کد نمایش)	میانگین سرعت امواج فراصوتی m/s	میانگین سختی شور A
۱	H1-1R	۱۶۰۴	۶۰
۲	H1-2R	۱۵۶۹	۶۱
۳	H1-3R	۱۵۶۹	۶۲
۴	H1-4R	۱۵۸۶	۶۰
۵	H1-5R	۱۵۷۱	۶۳
۶	H1-6R	۱۵۶۵	۶۰
۷	H2-1R	۱۶۲۱	۶۲
۸	H2-2R	۱۶۷۰	۶۴
۹	H2-3R	۱۶۷۵	۶۱
۱۰	H2-4R	۱۴۹۷	۶۲
۱۱	H2-5R	۱۶۶۷	۶۲
۱۲	H2-6R	۱۵۴۴	۶۳
۱۳	H2-7R	۱۵۵۱	۶۰
۱۴	H3-1R	۱۶۶۴	۸۶
۱۵	H3-2R	۱۶۸۰	۸۵
۱۶	H3-3R	۱۶۵۳	۸۶
۱۷	H3-4R	۱۶۸۱	۸۴
۱۸	H3-5R	۱۶۶۳	۸۶
۱۹	H3-6R	۱۶۳۵	۸۱
۲۰	H3-7R	۱۶۶۴	۸۲
۲۱	H4-1R	۱۵۱۸	۴۶
۲۲	H4-2R	۱۵۳۹	۴۶
۲۳	H4-3R	۱۵۷۵	۴۶
۲۴	H4-4R	۱۵۱۴	۴۶
۲۵	H4-5R	۱۵۰۱	۴۶
۲۶	H4-6R	۱۴۸۸	۴۶
۲۷	H4-7R	۱۴۷۷	۴۷
۲۸	H5-1R	۱۴۸۷	۴۷
۲۹	H5-2R	۱۵۰۹	۴۹
۳۰	H5-3R	۱۵۰۸	۴۹
۳۱	H5-4R	۱۵۲۷	۵۰
۳۲	H5-5R	۱۵۱۰	۵۰

شده پارامترهای نوع فرمول‌بندی، شرایط پخت و میانگین سرعت امواج فراصوتی به عنوان پارامترهای ورودی ماشین‌بردار پشتیبان و میانگین سختی آمیزه‌های لاستیکی به عنوان پارامتر خروجی در نظر گرفته شده است. مراحل مدل‌سازی شامل موارد زیر می‌باشد:

۱- از داده‌های جداول ۲ و ۳، ۶۳ داده برای آموزش مدل و ۲۱ داده برای ارزیابی دقت آن انتخاب شدند.

۲- به منظور افزایش دقت، داده‌های ورودی و خروجی با استفاده از رابطه (۱۶) در بازه ۱- تا ۱+، نرمالیزه شدند.

$$un = \frac{u - \left(\frac{\max + \min}{2}\right)}{\max - \min} \quad (16)$$

۳- مدل‌سازی با استفاده از جعبه ابزار یادگیری ماشین اسپیدر<sup>۱</sup> [۲۲] در نرم افزار متلب، ارائه شده توسط موسسه ماکس پلانک آلمان انجام گردید. این جعبه ابزار مقدار بهینه پارامترها را بر مبنای استنباط بیزی محاسبه می‌نماید. با توجه به نرمالیزاسیون داده‌ها قبل از مدل‌سازی، پس از محاسبه خروجی‌های مدل در مراحل آموزش و آزمون، داده‌های خروجی به دست آمده با استفاده از رابطه (۱۷)، به بازه اصلی خود بازگردانده شدند.

$$\hat{y} = y_p * \left(\frac{\max - \min}{2}\right) + \left(\frac{\max + \min}{2}\right) \quad (17)$$

نتایج بدست آمده از مدل رگرسیون فرآیند گاوسی برای پیش‌بینی سختی داده‌های آموزش و آزمون در شکل ۵ نشان داده شده است.

۴- دقت مدل با استفاده از معیارهای جذر میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (RMSE) و ضریب تشخیص ( $R^2$ )، که مطابق با معادلات (۱۸) و (۱۹) تعریف می‌گردند، در مراحل آموزش و آزمون مورد ارزیابی واقع گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (18)$$

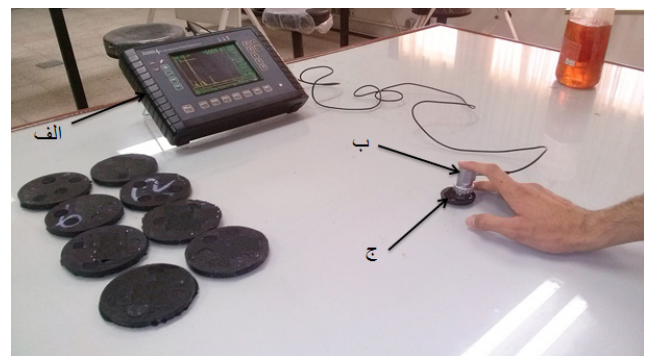
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - M)^2} \quad (19)$$

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (20)$$

شاخص‌های خطای آموزش و آزمون محاسبه شده برای مدل‌سازی پژوهش حاضر در جدول ۳ نشان داده شده است.

در ادامه برای اطمینان از قابلیت تعمیم مدل‌سازی، از ۶۳ داده دیگر برای آموزش و از ۲۱ داده دیگر برای آزمون استفاده نمودیم. شاخص‌های حاصله در جدول ۴ نشان داده شده‌اند، که بسیار مشابه نتایج مدل‌سازی قبلی می‌باشند. نتایج این دو جدول نشان‌دهنده دقت

۴۸	۱۴۸۲	H8-6R	۶۹
۴۹	۱۵۶۴	H8-1P	۷۰
۵۰	۱۵۶۶	H8-2P	۷۱
۵۰	۱۶۰	H8-3P	۷۲
۵۲	۱۷۵۶	H8-4P	۷۳
۵۱	۱۷۵۴	H8-5P	۷۴
۵۱	۱۸۰۷	H8-6P	۷۵
۸۴	۲۲۳۸	H9-1R	۷۶
۹۱	۲۳۵۱	H9-2R	۷۷
۹۱	۲۳۶۹	H9-3R	۷۸
۸۷	۲۳۱۲	H9-4R	۷۹
۸۶	۲۳۴۵	H9-5R	۸۰
۸۸	۱۹۹۴	H9-6R	۸۱
۸۴	۱۶۹۱	H9-1P	۸۲
۸۵	۱۷۵۹	H9-2P	۸۳
۸۵	۱۸۲۹	H9-3P	۸۴
۸۴	۱۶۴۲	H9-4P	۸۵
۷۵	۱۶۷۴	H9-5P	۸۶
۷۴	۱۶۷۷	H9-6P	۸۷



شکل ۴: سامانه اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی: الف- دستگاه فراصوتی، ب- تراگذار و ج- نمونه آمیزه لاستیکی

Fig. 4. Ultrasonic velocity measurement system: a- ultrasonic device b- probe and c- rubber compound

## ۶- مدل‌سازی سختی با استفاده از رگرسیون فرآیند گاوسی و نتایج حاصل

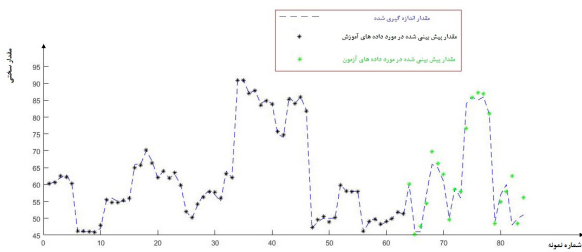
از ابزارهای یادگیری ماشین برای مدل‌سازی استفاده می‌شود، در این زمینه رگرسیون فرآیند گاوسی با توجه به ضرورت لحاظ نمودن حاشیه خطای اندازه‌گیری، مورد استفاده واقع گردید. در مدل ارائه

1 SPIDER

2 Root Mean Square Error (RMSE)



سرعت انتشار امواج فراصوتی در نمونه‌های لاستیکی نیز افزایش یافته است. یکی از نتایج جالب توجه در پژوهش حاضر، نشان دادن ارتباط بین نوع (دمای پخت) پخت و سرعت امواج فراصوتی است. همانطور که نوع (دمای) پخت باعث تفاوت بین سختی نمونه‌های با فرمول بندی یکسان شده است در مورد سرعت امواج فراصوتی نیز صادق است. ارتباط بین نوع پخت و سختی و سرعت امواج فراصوتی آمیزه‌های لاستیکی در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. در واقع با کاهش دمای پخت در اکثر آمیزه‌های مورد استفاده، چگالی اتصالات عرضی گوگردی افزایش می‌یابد که این اثر باعث افزایش سختی نمونه‌ها شده است. افزایش چگالی اتصالات عرضی با کاهش دما به راحتی از طریق انجام آزمون رئومتر و تعیین گشتاور اختلاف قابل بررسی است. تنها یک استثنا برای آمیزه H9 وجود دارد که کاهش دما باعث کاهش چگالی اتصالات عرضی و کاهش سختی شده است. نتایج رئومتر نیز تاثیر افزایشی چگالی اتصالات عرضی با افزایش دما را برای این آمیزه تایید می‌کند. برای همه موارد فوق نتایج التراسونیک همان روند تغییرات سختی را تبعیت می‌کند که نتیجه بسیار مهمی می‌باشد. یکی از مشکلات شرکت‌های تاپسازی در فرایند تولید تایر، نوسانات اجتناب‌ناپذیر شرایط پخت تایر در پرس‌های پخت می‌باشد که تاثیر خود را در میزان چگالی اتصالات عرضی بخش‌های مختلف تایر و متعاقبا کلیه خواص مکانیکی تایر می‌گذارد. کاهش چگالی اتصالات عرضی باعث افزایش حرارت‌اندوزی در حین سرویس تایر و کاهش طول عمر تایر می‌گردد. از آنجاکه امکان اندازه‌گیری سختی همه تایرهای تولید شده در شرکت تاپسازی وجود ندارد چنانچه بتوان این کنترل کیفی را به یاری توسعه فناوری التراسونیک انجام داد در این صورت امکان پیش‌بینی سختی، چگالی اتصالات عرضی و کیفیت تایر برای همه تایرهای تولیدی فراهم آورده و اقدام مهمی برای کنترل کیفی تایر انجام خواهد شد. البته این موضوع نیازمند مطالعه و تحقیق فراتر از آن چیزی است که در این مقاله به آن پرداخته است. از منظر بررسی ارتباط بین سختی و سرعت انتشار امواج هم به شکل واضح در اشکال ۸ و ۹ مشخص است که در دو نوع پخت مختلف، هر زمان سختی افزایش یافته متناظر با آن سرعت انتشار امواج فراصوتی افزایش یافته و با کاهش آن سرعت کاهش یافته است و در تمامی نمونه‌ها این ارتباط برقرار است.



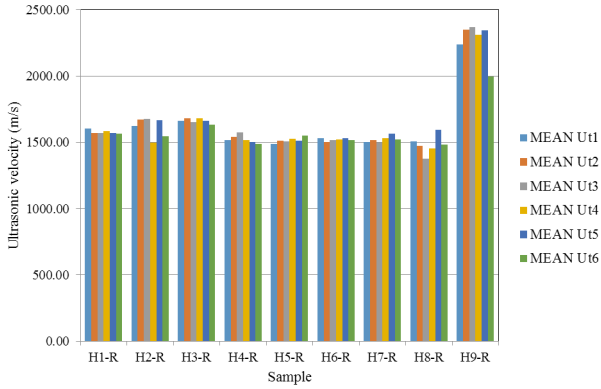
شکل ۵: نتایج بدست آمده از مدل رگرسیون فرآیند گاوسی برای پیش‌بینی سختی داده‌های آموزش و آزمون

Fig. 5. The results of the Gaussian process regression model for predicting the hardness of training and test data

مناسب و قابلیت تعمیم بالای مدل طراحی شده مبتنی بر رگرسیون فرآیند گاوسی دارد.

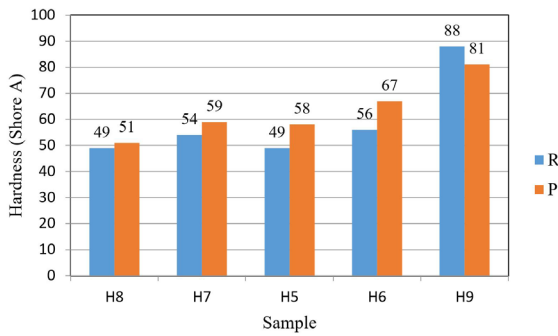
طبق طراحی آزمایش انجام شده به منظور بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها، همانطور که شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد، برای فرمول بندی ۶ نمونه ساخته شده و میزان سختی و سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی آن‌ها اندازه‌گیری شده است و نتایج حاصل در آزمون‌های سختی و فراصوتی برای آمیزه‌های لاستیک نشان داد که روش ارائه شده، قابلیت تکرارپذیری را دارد. بررسی شکل ۶ نشان می‌دهد که در چند سری از نمونه‌ها مقدار سختی از بقیه نمونه‌ها بالاتر است. به منظور بررسی آسان تر ارتباط بین سختی و سرعت انتشار امواج فراصوتی در آمیزه‌های لاستیکی میانگین این پارامترها برای هر سری از نمونه‌ها در جدول ۵ آورده شده است. در سری نمونه‌های H2R، H3R و H9R میانگین مقادیر سختی بر حسب شور A به ترتیب عبارتند از ۶۲، ۸۴ و ۸۸ و متناظر با همین مقادیر، میانگین سرعت انتشار امواج فراصوتی در این سری از نمونه‌ها به ترتیب مقادیر ۱۶۰۴، ۱۶۶۳ و ۲۲۶۸ متر بر ثانیه می‌باشند. ارتباط بین سرعت انتشار امواج فراصوتی و سختی بین تمامی سری‌ها برقرار بوده که همانگونه که مشخص است این ارتباط از نوع غیرخطی است و به همین دلیل در این پژوهش از روش رگرسیون فرآیند گاوسی استفاده گردید تا کم‌ترین مقدار خطا در پیش‌بینی مقدار سختی بدست آید.

به منظور بررسی پارامترهای موثر بر نحوه انتشار امواج در نمونه‌های لاستیکی، مواردی که بر روی انتشار امواج و سختی لاستیک تاثیرگذار هستند مورد بررسی قرار گرفتند و در این بین دو عامل چگالی و چگالی اتصالات عرضی دارای تاثیر قابل ملاحظه بر روی انتشار امواج می‌باشند. چگالی اتصالات عرضی با اندازه‌گیری گشتاور اختلاف آزمون رئومتر در دمای ۱۸۵ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶ دقیقه بدست آمده است که اختلاف گشتاور حداکثر و گشتاور حداقل می‌باشد. هرچه چگالی اتصالات عرضی آمیزه بیشتر باشد گشتاور حداکثر بیشتر می‌شود و چون گشتاور حداقل معمولاً ثابت است منجر به افزایش گشتاور اختلاف می‌گردد. چگالی اتصالات عرضی در واقع چگالی اتصالات گوگردی ایجاد شده در حین پخت آمیزه لاستیکی بین زنجیرهای لاستیک است که منجر به افزایش چقرمگی و سختی نمونه می‌گردد. همانطور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشخص است، بیشترین سختی و متناظر آن بیشترین سرعت انتشار امواج در سری شماره ۹ وجود دارد که بررسی چگالی و چگالی اتصالات عرضی نشان داد که این سری دارای میانگین چگالی ۱/۳۳۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب و میانگین چگالی اتصالات عرضی ۶۲/۷۵ مول بر مترمکعب است که بیشترین مقادیر در نمونه‌های مورد آزمایش می‌باشد. همچنین میانگین چگالی اتصالات عرضی در سری‌های ۲ و ۳ به ترتیب ۴۵/۳۲۱ و ۴۵/۶۲۱ مول بر مترمکعب می‌باشند که بعد از سری ۹ نمونه‌ها دارای بیشترین سختی می‌باشند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که با افزایش چگالی اتصالات عرضی تراکم لاستیک افزایش یافته و همزمان علاوه بر افزایش سختی،



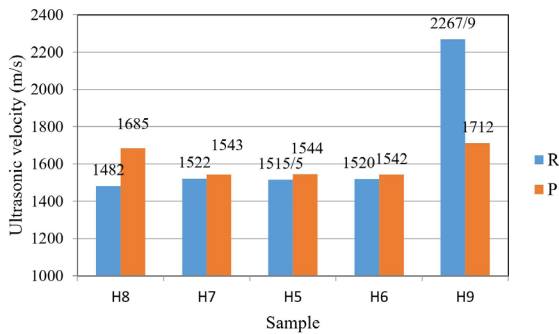
شکل ۷: بررسی تکرارپذیری برای داده‌های آزمون فراصوتی

Fig. 7. The repeatability of ultrasonic velocity



شکل ۸: ارتباط بین نوع پخت و سختی آمیزه‌های لاستیکی

Fig. 8. The relation between curing model and hardness of rubber compounds



شکل ۹: ارتباط بین نوع پخت و سرعت امواج فراصوتی درون آمیزه‌های لاستیکی

Fig. 9. The relation between curing model and ultrasonic velocity of rubber compounds

جدول ۵: میانگین سختی و سرعت انتشار امواج در هر سری از نمونه‌های مورد آزمایش

Table 5. Average hardness and ultrasonic velocity in each of the tested samples

سرّی	میانگین سختی (شور A)	میانگین سرعت (m/s)
H1R	۶۱/۱۴۲۸۶	۱۵۸۳/۵۷۱
H2R	۶۲	۱۶۰۳/۵۷۱

جدول ۳: شاخص‌های خطای آموزش و آزمون محاسبه شده در اولین آموزش سیستم

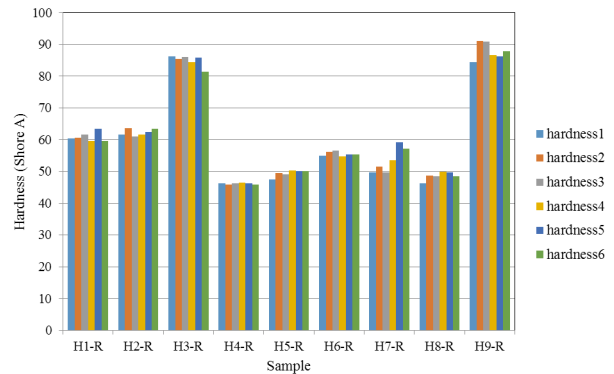
Table 3. Training and test error indexes calculated in first system training

مرحله آموزش		
$R^2$	RMSE	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) نسبت به مقدار ماکزیمم داده‌ها
۰/۹۹۸۷	۰/۴۶۹۸	۰/۰۰۵۲
مرحله آزمون		
$R^2$	RMSE	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) نسبت به مقدار ماکزیمم داده‌ها
۰/۹۱۳۳	۴/۰۳۴۳	۰/۰۴۶۹

جدول ۴: شاخص‌های خطای آموزش و آزمون محاسبه شده در دومین آموزش سیستم

Table 4. Training and test error indexes calculated in second system training

مرحله آموزش		
$R^2$	RMSE	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) نسبت به مقدار ماکزیمم داده‌ها
۰/۹۸۹۱	۱/۳۷۸۸	۰/۰۱۵۲
مرحله آزمون		
$R^2$	RMSE	جذر میانگین مربعات خطا نسبت به مقدار ماکزیمم داده‌ها
۰/۹۱۲۴	۴/۰۵۵	۰/۰۴۷۲



شکل ۶: بررسی تکرارپذیری برای داده‌های آزمون سختی

Fig. 6. The repeatability of hardness

مقدار نرمالیزه شده متغیر ورودی یا خروجی	un
بردار ضرایب	w
ماتریس مجموعه ورودی‌های	X
مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل بر مبنای داده‌های نرمالیزه	$y_p$
خروجی اندازه‌گیری شده	$y_i$
خروجی پیش‌بینی شده توسط مدل	$\hat{y}_i$
خروجی نهایی مدل	$\hat{y}$
تابع هسته	$\phi$

۱۶۶۲/۸۵۷	۸۴/۲۸۵۷۲	H3R
۱۵۱۶	۴۶/۱۴۲۸۶	H4R
۱۵۱۵/۵	۴۹/۱۶۶۶۷	H5R
۱۵۲۰	۵۵/۶۶۶۶۷	H6R
۱۵۲۱/۶۶۷	۵۳/۶۶۶۶۷	H7R
۱۴۸۱/۵	۴۸/۵	H8R
۲۲۶۸/۱۶۷	۸۷/۸۳۳۳۳	H9R

## ۷- نتیجه‌گیری

یکی از آزمون‌های مهم در خطوط تولید تایر، آزمون سختی است. اندازه‌گیری سختی فلزات توسط امواج فراصوتی انجام شده است ولی تاکنون از این امواج به منظور اندازه‌گیری سختی لاستیک‌ها استفاده نشده است. هدف پژوهش حاضر اندازه‌گیری سختی آمیزه‌های لاستیکی توسط آزمون غیرمخرب فراصوتی است. با توجه به اینکه امکان اندازه‌گیری سختی تمامی تایرهای تولیدی در شرکت تیرسازی وجود ندارد، چنانچه بتوان توسط فناوری آلتراسونیک، سختی آمیزه‌های لاستیکی را پیش‌بینی نمود، اقدام مهمی برای کنترل کیفی تایرها انجام خواهد شد.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش چگالی اتصالات عرضی تراکم لاستیک افزایش یافته و همزمان علاوه بر افزایش سختی، سرعت انتشار امواج فراصوتی در نمونه‌های لاستیکی نیز افزایش یافته است. نتایج مدل‌سازی انجام شده توسط رگرسیون فرآیند گاوسی نشان دادند که مدل ایجاد شده به شکل موفقیت‌آمیزی قادر به پیش‌بینی پارامترهای خروجی فرآیند است. همچنین نتایج با وجود بررسی تکرارپذیری، وجود ارتباط بین سختی و سرعت امواج فراصوتی را نشان دادند.

## تشکر و قدردانی

از مسئولان محترم شرکت کویر تایر که همکاری همه‌جانبه‌ای در این پژوهش، در تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها به عمل آوردند، قدردانی می‌شود.

## فهرست علائم

H	سختی
$H_A$	شور A
$H_D$	شور D
M	میانگین خروجی‌ها
max	ماکزیمم در مجموعه داده‌ها
min	مینیمم در مجموعه داده‌ها
N	تعداد نمونه‌ها
t	بردار مجموعه خروجی‌ها
u	متغیر ورودی یا خروجی

## مراجع

- [1] V. Rajendran, S.M. 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*, 478(1) (2009) 147-153.
- [2] H.A. Afifi, A.M. El Sayed, Ultrasonic properties of ENR-EPDM rubber blends, *Polymer bulletin*, 50(1-2) (2003) 115-122.
- [3] A. Higazy, H. Afifi, A. Khafagy, M. El-Shahawy, A. Mansour, Ultrasonic studies on polystyrene/styrene butadiene rubber polymer blends filled with glass fiber and talc, *Ultrasonics*, 44 (2006) e1439-e1445.
- [4] M.A. El-Hadek, Fracture Mechanics of Rubber Epoxy Composites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45(9) (2014) 4046-4054.
- [5] P. Kerdtongmee, C. Pumdaung, S. Danworaphong, Quantifying dry rubber content in latex solution using an ultrasonic pulse, *Measurement Science Review*, 14(5) (2014) 252-256.
- [6] M. Taheri, A. Foorginejad, M. Shiva, S.M. Emam, A. Haddadi, Investigation of rubber formulation by measuring ultrasonic propagation velocity, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 6(2) (2016) 285-294.
- [7] F. Uzun, A.N. Bilge, Application of ultrasonic waves in measurement of hardness of welded carbon steels, *Defence Technology*, 11(3) (2015) 255-261.
- [8] N. Korde, T. Kundu, Material hardness and ageing measurement using guided ultrasonic waves, *Ultrasonics*, 53(2) (2013) 506-510.

- [15] C.K. Williams, C.E. Rasmussen, Gaussian processes for regression, in: *Advances in neural information processing systems*, 1996, pp. 514-520.
- [16] C.M. Bishop, *Pattern recognition and machine learning*, springer, 2006.
- [17] C.E. Rasmussen, C.K. Williams, *Gaussian processes for machine learning*, MIT press Cambridge, 2006.
- [18] D.J. MacKay, *Introduction to Gaussian processes*, NATO ASI Series F Computer and Systems Sciences, 168 (1998) 133-166.
- [19] R. Fletcher, *Conjugate gradient methods for indefinite systems*, *Numerical analysis*, (1976) 73-89.
- [20] D.M. Olsson, L.S. Nelson, The Nelder-Mead simplex procedure for function minimization, *Technometrics*, 17(1) (1975) 45-51.
- [21] B. Hull, V. John, *Non-destructive testing*, (1988).
- [22] J. Weston, A. Elisseeff, G. Bakir, F. Sinz, *The spider machine learning toolbox*, Software available at <http://www.kyb.tuebingen.mpg.de/bs/people/spider>, (2005).
- [9] A.B. Bouda, A. Benchaala, K. Alem, Ultrasonic characterization of materials hardness, *Ultrasonics*, 38(1) (2000) 224-227.
- [10] R.S. Michalski, J.G. Carbonell, T.M. Mitchell, *Machine learning: An artificial intelligence approach*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [11] T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman, Overview of supervised learning, in: *The elements of statistical learning*, Springer, 2009, pp. 9-41.
- [12] R.J. Carroll, D. Ruppert, L.A. Stefanski, J. Buonaccorsi, Measurement error in nonlinear models, *Metrika*, 45(3) (1997) 182-183.
- [13] M. Ebden, Gaussian processes for regression: A quick introduction, The Website of Robotics Research Group in Department on Engineering Science, University of Oxford, (2008).
- [14] R.M. Neal, *Bayesian learning for neural networks*, Springer Science & Business Media, 2012.