



## ارزیابی تغییرات فرمول‌بندی لاستیک با اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی

مرتضی طاهری<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل فورگی‌نژاد<sup>۲</sup>، مهدی شیوا<sup>۳</sup>، سید محمد امام<sup>۴</sup> و امیر هوشنگ حدادی<sup>۴</sup><sup>۱</sup> کارشناس، مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند<sup>۲</sup> استادیار مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند<sup>۳</sup> استادیار مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند<sup>۴</sup> گروه علوم پایه دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۱۲/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۶

## چکیده

آزمایش‌های غیرمخرب، قادر به شناسایی عیوب و بررسی خواص قطعه مورد آزمایش بدون ایجاد تغییر در قطعه می‌باشند. در پژوهش حاضر، از روش بازرسی غیرمخرب امواج فراصوتی برای بررسی فرمول‌بندی لاستیک استفاده گردید. در این روش، زمان بین ارسال و بازتاب امواج صوتی با بسامد بالا اندازه‌گیری و با کمک آن سرعت انتشار امواج محاسبه می‌شود. با تغییر درصد عناصر تشکیل‌دهنده لاستیک، خواص فیزیکی و مکانیکی آن تغییر نموده، در نتیجه آن سرعت انتشار امواج صوتی در لاستیک تغییر خواهد کرد. به منظور بررسی فرمول‌بندی لاستیک، ابتدا ۱۲ نمونه با فرمول‌بندی‌های متفاوت تهیه گردید و برای هرکدام از نمونه‌ها، سرعت انتشار امواج صوتی طولی اندازه‌گیری گردید. از رگرسیون چندگانه خطی برای ایجاد مدل ریاضی بین درصد عناصر بکار رفته در فرمول‌بندی لاستیک و سرعت انتشار امواج طولی استفاده گردید. به منظور صحت‌سنجی نمونه دیگری با فرمول‌بندی جدید ساخته شد و سرعت انتشار امواج صوتی طولی در آن اندازه‌گیری گردید. بررسی نتایج حاصل از آزمایش و نتایج بدست آمده از مدل رگرسیون، نشان از خطای کم در پیش‌بینی نتایج توسط مدل پیشنهادی داشت؛ لذا از امواج فراصوتی به منظور بررسی فرمول‌بندی لاستیک می‌توان استفاده کرد و خطوط تولید لاستیک می‌توانند از این آزمون غیر مخرب به شکل برخط، برای کنترل کیفیت لاستیک استفاده نمایند.

**کلمات کلیدی:** آزمون غیرمخرب؛ امواج فراصوتی؛ فرمول‌بندی لاستیک؛ مدل رگرسیون.

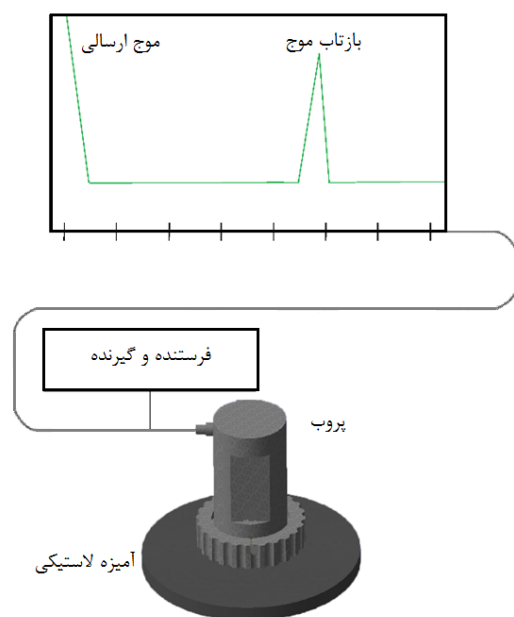
## Investigation of Rubber Formulation by Measuring Ultrasonic Propagation Velocity

M. Taheri<sup>1\*</sup>, A. Foorginejad<sup>2</sup>, M. Shiva<sup>3</sup>, SM. Emam<sup>2</sup>, A. Haddadi<sup>4</sup><sup>1</sup> BS.c, Mech. Eng., Birjand University of Technology, Birjand, Iran.<sup>2</sup> Assist. Prof., Mech. Eng., Birjand University of Technology, Birjand, Iran.<sup>3</sup> Assist. Prof., Chem. Eng., Birjand University of Technology, Birjand, Iran.<sup>4</sup> Department of Sciences, Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

## Abstract

Non-destructive tests can identify and investigate the defects and properties of the test piece without changing the physical and mechanical properties of the sample. In this study, the non-destructive inspection method of ultrasonic waves was used to investigate the rubber formulation. In this method, the time between the transmission and the reflection of ultrasonic waves is measured and using this time propagation velocity is calculated. As components percent of the rubber are changed the physical and mechanical properties of rubber are altered and as a result, the velocity of ultrasonic propagation is changed. To investigate the rubber formulation at first 12 samples with different formulations were prepared and for each of the samples the propagation velocity of the longitudinal sound waves was measured. In order to establish the mathematical model between used elements percent in the rubber formulation and longitudinal wave velocity the multiple linear regression was used. To evaluate the accuracy another sample with a new formulation was developed and longitudinal wave velocity was measured. The comparison between the results of the test and those of the regression model showed a low error in the predicted result by the proposed model; therefore, the ultrasonic waves can be used to investigate the rubber formulation and the rubber production lines can use this non-destructive test to control tire quality online.

**Keywords:** Non-destructive Test; Ultrasonic; Rubber Formulation; Regression Model.



شکل ۱- طرح‌واره آزمون فراصوت

جایاکومار و همکاران [۶]، با استفاده از پارامترهای فراصوت هنگام عملیات حرارتی خواص مکانیکی آلیاژ نیمونیک را مورد ارزیابی قرار دادند، آن‌ها سرعت انتشار امواج فراصوتی را روی تغییرات ریزساختار اندازه‌گیری کردند و با استفاده از نتایج به دست آمده، نوع عملیات حرارتی و خصوصیات فاز دوم را در آلیاژ نیمونیک مشخص کردند. واسکن کلووس و همکاران [۷]، مناسب بودن روش سرعت انتشار امواج فراصوتی برای بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی گرانیات در اندازه محدوده بین ۰/۱-۴ میلی‌متر و ۰/۳-۱۶/۵ میلی‌متر را مورد ارزیابی قرار دادند. خواص مکانیکی شامل، مقاومت و مدول الاستیسیته فشاری و کششی و خواص فیزیکی شامل، چگالی و تخلخل مورد ارزیابی قرار گرفت که برای این منظور، اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی با فرکانس طبیعی متمایز از مبدل، روی نمونه‌ها با اندازه و شکل‌های مختلف انجام شد. همبستگی آماری بین سرعت انتشار امواج فراصوتی و خواص مکانیکی و فیزیکی گرانیات و عواملی که موجب تغییرات در سرعت فراصوت شده نیز، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که سرعت انتشار امواج فراصوتی را می‌توان به طور موثر به عنوان یک روش غیرمخرب ساده و مقرون به صرفه برای پیش‌بینی اولیه از خواص مکانیکی و فیزیکی استفاده کرد و همچنین به

## ۱- مقدمه

به منظور بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی مواد، روش‌های آزمایش متعددی وجود دارد، اکثر آزمایش‌ها نیاز به نمونه‌گیری از قطعه مورد بررسی داشته که منجر به تخریب قطعه کار می‌شود. آزمون‌های غیر مخرب<sup>۱</sup> روشی از بازرسی می‌باشند که قطعه هنگام بازرسی آسیب ندیده، نمونه قابل استفاده باقی می‌ماند. این موضوع، گرایش به سمت آزمون‌های غیرمخرب در آشکارسازی عیوب و تعیین خواص مواد را افزایش داده است. با استفاده از آزمون فراصوت<sup>۲</sup> که یک روش اندازه‌گیری غیرمخرب است، می‌توان برخی خصوصیات ماده را از طریق اندازه‌گیری زمان فرستادن امواج فراصوتی و دریافت امواج برگشتی تعیین کرد [۱]. بررسی کیفیت و تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی مواد، با بکارگیری محاسبه تغییرات سرعت امواج فراصوتی، در گستره وسیعی از مواد و کاربردها استفاده شده است. به عنوان مثال، می‌توان به پژوهش‌هایی اشاره کرد که به بررسی کیفیت میوه‌ها [۲]، تعیین خواص سنگ آهک در ساختمان‌های تاریخی [۳] و بررسی کیفیت جوش در جوشکاری اغتشاشی آلومینیوم [۴] پرداخته‌اند. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، امواج فراصوتی و بازتاب آن‌ها روی نمایشگر نمایان می‌شوند که با تفسیر این علائم، می‌توان به داده‌های مورد نیاز دست یافت. در این روش، با استفاده از تغییرات صورت پذیرفته روی ارتفاع پالس دریافتی و زمان برگشت آن، می‌توان برخی اطلاعات را در مورد قطعه مورد آزمون بدست آورد.

تاکنون پژوهش‌های بسیاری برای تعیین خواص مکانیکی و فیزیکی مواد با استفاده از بررسی تغییرات سرعت امواج فراصوتی انجام گردیده است. آزمون فراصوت، جهت بررسی خواص انواع مختلف مواد مانند، فلزات، پلاستیک و یا حتی چوب و برای تعیین ضخامت قطعات و نیز تشخیص ویژگی مواد براساس اندازه‌گیری میزان سرعت و میرایی امواج و هم چنین برای پیدا کردن عیوب سطحی، زیرسطحی و داخلی به کار می‌رود [۵]. همچنین از این روش، برای تعیین خواص مکانیکی و فیزیکی آلیاژها استفاده می‌شود.

<sup>۱</sup> Non-destructive Tests

<sup>۲</sup> Ultrasonic Test

درصد لاستیک خشک را در محلول‌های شیرابه‌ای مشخص کردند. حجازی و همکاران [۱۲]، با استفاده از تکنیک پالس اکو، داده‌های مدول الاستیسیته را برای لاستیک‌های پلی استایرن بوتادین با دانستن جرم حجمی به دست آوردند. آن‌ها همچنین نشان دادند، افزودن پرکننده‌ای مانند فیبرهای شیشه‌ای، منجر به افزایش مدول الاستیسیته می‌شود.

بررسی فرمول‌بندی محصولات تولید شده و خواص فیزیکی و مکانیکی آن، یکی از چالش‌های خطوط تولید محسوب می‌شود. پژوهش‌های بسیاری برای استفاده از عناصر مختلف مانند، سیلیکا و دوده به عنوان پرکننده در آمیزه‌های لاستیکی تیر انجام شده است که مقدار عناصر روی کیفیت نهایی لاستیک تولید شده تاثیر مستقیم دارد؛ به عنوان مثال، استفاده از سیلیکای رسوبی، منجر به کاهش اصطکاک و پدیده گرمایی و افزایش مقاومت در برابر خستگی در آمیزه‌ها است [۱۳]. خواص مورد انتظار از لاستیک تولید شده زمانی تامین می‌شود که لاستیک با ترکیب عناصر مورد نظر، تولید شود و تغییر در درصد عناصر بکار رفته در لاستیک، خواص را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

در این پژوهش، به منظور ارزیابی فرمول‌بندی لاستیک، سرعت انتشار امواج صوتی طولی در لاستیک اندازه‌گیری گردید. همچنین فرض گردید که در صورت عدم تغییر عناصر تشکیل‌دهنده، سرعت انتشار امواج صوتی تغییری نخواهد کرد. به عبارت دیگر، در صورت وجود تغییر در سرعت انتشار امواج صوتی می‌توان به تغییر در ترکیب عناصر لاستیک پی برد. روش پیشنهادی قادر به تفکیک عناصر نبوده، فقط در صورت تغییر در سرعت، وجود تغییرات در فرمول‌بندی را نشان می‌دهد که در کنترل کیفیت لاستیک تولید شده، کاربردی محسوب می‌شود.

## ۲- آزمایش‌های تجربی

### ۲-۱- مواد

برای ساخت آمیزه‌ها از کائوچوی استایرن بوتادین، کائوچوی بوتادین سیس، دوده، سیلیکای با قابلیت پخش بالا<sup>۲</sup>، روغن آروماتیک، گوگرد، شتاب دهنده سولفنامید، بازدارنده<sup>۳</sup>

عنوان یک ابزار برای ارزیابی تغییرات آب و هوایی که در طول عمر گرانیته رخ داده، استفاده کرد. آن‌ها با استفاده از روش های آماری نشان دادند که بین سرعت انتشار امواج فراصوتی و خواص مکانیکی، یعنی استحکام کششی، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و شکست، ارتباط معناداری وجود دارد. واتنابه و همکاران [۸]، با توجه به این‌که برای تخمین خوردگی میلگرد درون بتن نیاز به حذف پوشش بتنی است، استفاده از آزمون غیرمخرب فراصوت برای تخمین میزان خوردگی را مورد ارزیابی قرار دادند که با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان از آزمون فراصوت به عنوان روشی جایگزین به منظور تخمین خوردگی میلگرد استفاده کرد.

عفیفی و همکاران [۹]، سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی و عرضی را در آمیزه لاستیکی کائوچوی طبیعی اپوکسی<sup>۱</sup> با درصد وزنی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ از کائوچوی اتیلن پروپیلن را توسط امواج فراصوتی در فرکانس ۲ مگاهرتز و دمای اتاق با استفاده از روش بازتاب امواج فراصوتی بررسی کردند؛ 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.

در پژوهش انجام شده توسط الحادک [۱۰]، از امواج فراصوتی برای تعیین همگنی صفحات لاستیکی استفاده گردید، برای دستیابی به هدف اشاره شده، الحادک از روش پالس اکو استفاده کرد. 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 روی قیمت تمام شده، کردونگمی و همکاران [۱۱] با استفاده از امواج فراصوتی،

<sup>2</sup> High Dispersible Silica (HDS)

<sup>3</sup> PVI

<sup>1</sup> Epoxidized Natural Rubber- Ethylene Propylene Diene Monomer

موج از میان محیط است. در این مطالعه تجربی با توجه به اثر تضعیف شدیدتر در لاستیک‌ها [۵]، برای تعیین سرعت امواج فراصوتی از کاوه‌ای با بسامد ۴ مگاهرتز استفاده گردید.

سرعت انتشار امواج طولی فراصوت برای نمونه‌های مختلف، با اندازه‌گیری زمان سپری شده بین ارسال امواج و بازتاب آن و سپس ظاهر شدن روی صفحه نمایش‌گر توسط مدار الکترونیکی استاندارد، اندازه‌گیری شده است که سامانه اندازه‌گیری امواج فراصوتی، در شکل ۲ نشان داده شده است و دقت اندازه‌گیری سرعت ۱ متر بر ثانیه است. با توجه به اینکه زمان محاسبه شده مابین ارسال و دریافت موج شامل، زمان‌های عبور موج از داخل کاوه و جفت کننده در هریک از مراحل رفت و برگشت موج است. زمان محاسبه شده، دارای مقداری خطا بوده که در نتیجه سبب به وجود آمدن خطا در محاسبه سرعت انتشار امواج می‌شود. در ابتدا با استفاده از بلوک استاندارد، زمان عبور امواج فراصوتی طولی از میان کاوه و جفت‌کننده اندازه‌گیری و از محاسبات بکار 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، در جدول شماره ۳ سرعت طولی امواج درون آمیزه‌ها گزارش شده است.

### ۳- مدل رگرسیون

در پژوهش حاضر، از رگرسیون چندگانه خطی برای مدل کردن ارتباط بین فرمول‌بندی لاستیک و سرعت انتشار امواج صوتی طولی استفاده گردید. در تحقیقاتی که از تحلیل رگرسیون استفاده می‌شود، هدف معمولاً پیش‌بینی یک یا چند متغیر با استفاده از یک یا چند متغیر پیش‌بین است. این مدل قادر به ارائه رابطه‌ای بین متغیرهای وابسته و غیر وابسته است [۱۴]. چنان‌چه هدف به دست آوردن یک متغیر ملاک از چند متغیر پیش‌بین باشد، از مدل رگرسیون چندگانه استفاده می‌شود. در صورتی که هدف، پیش‌بینی همزمان چند متغیر ملاک از متغیرهای پیش‌بین یا زیر مجموعه‌ای از آنها باشد، از مدل رگرسیون چند متغیری استفاده می‌شود. در تحقیقات رگرسیون چندگانه، هدف پیدا کردن متغیرهای پیش‌بینی است که تغییرات متغیر ملاک را چه به تنهایی و چه مشترک پیش‌بینی کند.

سیلان استفاده شد، همچنین از آنتی ازانات، آنتی اکسیدانت و واکس به عنوان محافظت‌کننده استفاده شده است.

### ۲-۲- دستگاه‌ها

در این پژوهش، از تجهیزات شامل بنوری آزمایشگاهی ۲ لیتری ساخت پومینی، آسیاب دو غلتکی مدل R-۳۰۵×۱۵۲ E Mccin ساخت برگامو ایتالیا برای اختلاط مواد، پرس پخت آزمایشگاهی ۱۰۰ تن ساخت ژاپن برای پخت آمیزه‌های لاستیکی و رتومتر ساخت شرکت آلفا انگلیس برای تعیین خصوصیات پخت استفاده گردید.

### ۲-۳- تهیه آمیزه‌ها

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی ارتباط بین فرمول‌بندی لاستیک و سرعت انتشار امواج فراصوتی، تعداد ۱۲ نمونه لاستیک با فرمول‌بندی‌های متفاوت تولید گردید که فرمول‌بندی آن‌ها در جدول ۱ ارائه گردیده است و در همه نمونه‌ها، به مقدار ۱۰٪ وزنی سیلیکا که از نوع با قابلیت پخش بالا است، از سیلان استفاده شده است.

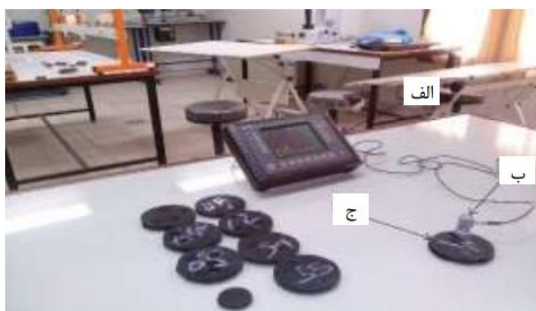
آمیزه‌ها در بنوری آزمایشگاهی دو لیتری تحت شرایط یکسان تهیه شدند، دور روتور در مراحل اضافه کردن کائوچو، مواد شیمیایی و پرکننده ثابت و برابر ۲۰ دور بر دقیقه بود. برای اطمینان از انجام کامل واکنش سیلانیزاسیون دور روتور در مراحل پایانی، اختلاط به صورت متغیر در نظر گرفته شد تا دمای اختلاط به مدت طولانی در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

### ۲-۴- آزمون فراصوت

به منظور بررسی ارتباط فرمول‌بندی لاستیک با سرعت انتشار امواج فراصوت، سرعت انتشار امواج طولی برای هر نمونه اندازه‌گیری شد. بدین منظور از دستگاه آزمون فراصوت تروسونیک استفاده گردید که مشخصات دستگاه، نمونه‌ها و کاوه در جدول شماره ۲ نشان داده شده است. 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 صوتی هنگام حرکت

جدول ۱- فرمول‌بندی آمیزه‌ها

آمیزه	سیلیکای با قابلیت پخش بالا	دوده	کائوچوی مصنوعی	کائوچوی مصنوعی بوتادین	کائوچوی مصنوعی استایرن بوتادین	استایرن بوتادین محلولی	استایرن بوتادین محلولی	استایرن بوتادین محلولی	کائوچوی مصنوعی بوتادین
	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr
W1	۲۰	۲۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
W2	۲۰	۲۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
W3	۲۰	۲۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
W4	۲۰	۲۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
W5	۲۰	۲۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
W6	۴۰	۲۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
W7	۴۰	۲۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
W8	۴۰	۲۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
W9	۴۰	۲۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
W10	۶۰	۲۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
W11	۶۰	۲۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
W12	۶۰	۲۰	۳۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰



شکل ۲- سامانه اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوت:

الف- دستگاه فراصوت، ب- کاوه و ج- نمونه آمیزه لاستیکی

برای این مدل از رگرسیون، از نرم افزار آماری SPSS استفاده شده، به منظور رفع اختلاف ابعادی دو سوی معادله، داده‌ها قبل از استفاده توسط رابطه (۱)، نرمال سازی و در جدول شماره ۴ نمایش داده شده تا هم داده‌ها در بازه معینی قرار گیرند و هم رابطه به دست آمده بی بعد باشد.

بر این اساس، رابطه (۲) نرمال شده سرعت امواج صوتی طولی درون آمیزه را در این فرآیند مدل می‌کند.

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

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

جدول ۲- مشخصات دستگاه، کاوه و نمونه‌ها

شماره	شرکت سازنده
۱۲	tr-u-sonic
۴	قطر کاوه (mm)
۴۱	بسامد کاوه (MHz)
۶	قطر نمونه (mm)
	ضخامت نمونه (mm)

جدول ۳- سرعت انتشار امواج صوتی طولی در آمیزه‌های لاستیکی

شماره نمونه	سرعت انتشار امواج صوتی طولی m/s	شماره نمونه	سرعت انتشار امواج صوتی طولی m/s
W1	۱۴۸۵	W7	۱۵۲۴
W2	۱۵۰۵	W8	۱۵۵۰
W3	۱۴۹۸	W9	۱۵۲۷
W4	۱۵۰۹	W10	۱۵۵۴
W5	۱۴۹۹	W11	۱۵۰۲
W6	۱۵۳۰/۵	W12	۱۵۳۸

جدول ۴- مقادیر نرمال شده عناصر بکار رفته در ترکیب نمونه‌ها

آمیزه	سرعت انتشار امواج صوتی طولی	سیلیکای با قابلیت پخش بالا	دوده	کائوچوی مصنوعی سیس بوتادین	کائوچوی مصنوعی استایرن بوتادین 1712	استایرن بوتادین محلولی C6450 SL	استایرن بوتادین محلولی 5220M	استایرن بوتادین محلولی 5270M	کائوچوی مصنوعی استایرن بوتادین 1500
W1	۰/۹۵۶	۰/۳۳۳	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱
W2	۰/۹۶۸	۰/۳۳۳	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰
W3	۰/۹۶۴	۰/۳۳۳	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰
W4	۰/۹۷۱	۰/۳۳۳	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰
W5	۰/۹۶۵	۰/۳۳۳	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰
W6	۰/۹۸۵	۰/۶۶۷	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱
W7	۰/۹۸۱	۰/۶۶۷	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰
W8	۰/۹۹۷	۰/۶۶۷	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰
W9	۰/۹۸۳	۰/۶۶۷	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰
W10	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱
W11	۰/۹۶۷	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰
W12	۰/۹۹۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰

همان‌طور که در رابطه (۲) دیده می‌شود، سرعت امواج طولی از بین ۸ ماده شیمیایی موجود در فرمول‌بندی به ۵ ماده بستگی دارد که دوده و کائوچوی مصنوعی سیس بوتادین به دلیل یکسان بودن مقدار آن‌ها در تمام فرمول‌بندی‌ها خود مدل آن‌ها را حذف نموده، کائوچوی مصنوعی استایرن بوتادین ۱۵۰۰ را نیز خود مدل رگرسینون با توجه با تاثیر کم آن در سرعت امواج طولی درون آمیزه حذف کرده است.

#### ۴- منابع ایجاد خطا

در این پژوهش، خطاها را می‌توان در دو بخش مدل پیش‌بین و خطای ناشی از اندازه‌گیری بررسی کرد که در این بخش، خطاهای اندازه‌گیری محاسبه می‌شوند. هنگامی که کمیتی مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد، به دلایل متعدد نتیجه بدست آمده با خطا همراه است. در پژوهش حاضر نیز، برای بررسی ترکیب شیمیایی لاستیک تولید شده سرعت امواج صوتی طولی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت؛ لذا به منظور بررسی خطا در اندازه‌گیری، عوامل ایجاد آن بررسی می‌شود.

$$v_c = 0.955 - 0.013A - 0.001B + 0.010C - 0.001D + 0.038E \quad (2)$$

که در این رابطه

A استایرن بوتادین محلولی 5270M<sup>۱</sup>

B استایرن بوتادین محلولی 5220 M<sup>۲</sup>

C استایرن بوتادین محلولی C6450 SL<sup>۳</sup>

D کائوچوی مصنوعی استایرن بوتادین 1712<sup>۴</sup>

E سیلیکای با قابلیت پخش بالا می‌باشند.

با مقایسه ضرایب معادله (۲) با همدیگر، اولویت و میزان

تاثیر هر یک از عوامل مشخص می‌شود. در این تحلیل، از ۱۲ نمونه استفاده شد که سرعت انتشار امواج صوتی طولی به عنوان متغیر وابسته و درصد عناصر بکار رفته در فرمول‌بندی آمیزه‌ها، به عنوان متغیرهای غیر وابسته در نظر گرفته شده است.

- 1 SBR SOL 5270M
- 2 SBR SOL 5220 M
- 3 SBR SOL C6450 SL
- 4 SBR1712

۶ میلی‌متر و سرعت انتشار امواج صوتی طولی میانگین برابر با ۱۵۲۰ متر بر ثانیه، مقدار خطا برحسب سرعت برابر با ۲/۲۳ متر بر ثانیه خواهد بود.

### ۵- بحث و نتایج

امواج صوتی از نوع امواج الاستیک محسوب می‌شود. خواص الاستیک مواد بر اساس نیروهای بین اتمی تمام اتم‌های آن‌ها تخمین زده می‌شود؛ بنابراین کوچکترین انحلال اتم‌ها یا تغییر موقعیت آن‌ها روی خواص الاستیکی آن‌ها اثر خواهد گذاشت و در نتیجه آن، مقدار سرعت انتشار امواج صوتی تحت تاثیر قرار خواهد گرفت [۱۶]. در پژوهش حاضر، به منظور بررسی فرمول‌بندی آمیزه‌های لاستیکی از روش غیرمخرب فراصوتی استفاده شد. برای مدل کردن مقدار سرعت انتشار امواج صوتی طولی، از رگرسیون چندگانه خطی استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش و مدل پیشنهادی به همراه میزان خطای مدل پیشنهادی در تخمین سرعت انتشار امواج طولی در جدول ۵ آمده است. در شکل ۳، مقادیر بدست آمده سرعت انتشار امواج صوتی طولی هر نمونه نشان داده شده است. میانگین مقدار خطای مدل رگرسیون چندگانه خطی در پیش‌بینی مقدار سرعت انتشار امواج صوتی طولی در ۱۲ نمونه مورد آزمایش، برابر ۰/۶۵ درصد است. بررسی مقادیر خطا، نشان از مناسب بودن مدل پیشنهادی در تخمین سرعت انتشار امواج صوتی در آمیزه‌های لاستیکی دارد.

بررسی ضرایب مدل رگرسیون چندگانه بدست آمده نشان می‌دهد که سیلیکای با قابلیت پخش بالا از بالاترین ضریب برخوردار بوده، به تبع آن بیشترین تاثیر را روی تغییرات سرعت انتشار امواج صوتی طولی خواهد داشت. از سیلیکای با قابلیت پخش که نوعی سیلیکا با قابلیت پخش بالا در بستر پلیمری است، در آمیزه‌های لاستیکی به منظور افزایش مقاومت در مقابل پارگی لاستیک، استفاده می‌شود [۱۷].

استفاده از سیلیکای رسوبی برای تقویت‌کنندگی در حال افزایش است، ولی اگر از آن به تنهایی استفاده شود که دوده حذف شود، به علت مشکلاتی که در زمینه فرآوری و پخت به وجود می‌آورد، سبب اختلال در تقویت‌کنندگی می‌شود و به

در این پژوهش، برای بدست آوردن سرعت امواج صوتی طولی از روش بازتابی استفاده شد. سرعت امواج از محاسبه زمان رفت و برگشت امواج و تعیین ضخامت نمونه بدست می‌آید. منابع ایجاد خطا از یک سو می‌تواند ناشی از عدم اختلاط کامل مواد در بنبوری و از سوی دیگر، در اندازه‌گیری ضخامت نمونه و زمان رفت و برگشت امواج صوتی طولی باشد. ضخامت مایع جفت‌کننده در صورت تغییر کردن هنگام اندازه‌گیری، باعث ایجاد خطا در محاسبه زمان می‌شود. برای اندازه‌گیری ضخامت از میکرومتر با دقت ۰/۰۰۵ میلی‌متر استفاده شد که خطای زمانی معادل ۳/۶۷ نانو ثانیه در محاسبات زمان ایجاد می‌نماید.

دستگاه اندازه‌گیری فراصوت مورد استفاده نیز، از قابلیت اندازه‌گیری زمان با دقت ۱۰ نانوثانیه برخوردار است. منابع ایجاد خطا به دو دسته اتفاقی و سیستماتیک تقسیم می‌شوند. تغییر ضخامت مایع جفت‌کننده، جزء خطاهای اتفاقی و خطا در اندازه‌گیری ضخامت و خطای دستگاه اندازه‌گیری سرعت امواج صوتی نیز، جزء خطاهای سیستماتیک محسوب می‌شوند.

مقدار خطای اتفاقی در اثر تغییرات در ضخامت مایع جفت‌کننده در حد ۰/۵ نانوثانیه است [۱۵]. در بررسی منابع خطای اتفاقی، خطای ناشی از عدم اختلاط کامل در نظر گرفته نشده است که سبب ناهمسانگردی ماده می‌شود. خطای سیستماتیک زمان دیواره پستی برای قطعه‌ای با ضخامت ۹ میلی‌متر، حدود ۴/۵ نانوثانیه برآورد می‌شود [۱۵].

خطای سیستماتیک طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$E_s^2 = E_{bw}^2 + E_{th}^2 + E_{me}^2 \quad (3)$$

که در این رابطه

$E_{bw}$ ، مقدار خطای دیواره پستی

$E_{th}$ ، مقدار خطای اندازه‌گیری ضخامت

$E_{me}$ ، مقدار خطای دستگاه اندازه‌گیری می‌باشند.

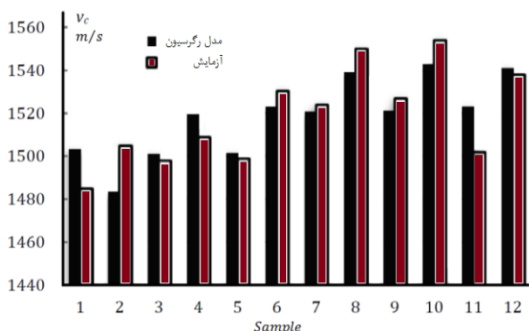
خطای کل در اندازه‌گیری زمان با استفاده از مقادیر خطای سیستماتیک و خطای اتفاقی بر اساس رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$E_T^2 = E_s^2 + E_P^2 \quad (4)$$

بنابراین مقدار خطا در اندازه‌گیری زمان برابر با ۱۱/۶ نانوثانیه خواهد بود و با در نظر گرفتن ضخامت میانگین نمونه‌ها برابر

جدول ۵- سرعت امواج طولی به دست آمده از آزمایشات و

شماره نمونه	مدل رگرسیون		درصد خطا
	سرعت امواج صوتی بدست آمده از آزمایش m/s	سرعت امواج صوتی بدست آمده از مدل رگرسیون m/s	
W1	۱۴۸۵	۱۵۰۳/۳۷۵	۱/۲۳۷۴
W2	۱۵۰۵	۱۴۸۳/۷۰۵	۱/۴۱۵۰
W3	۱۴۹۸	۱۵۰۱/۱۳۵	۰/۲۰۹۳
W4	۱۵۰۹	۱۵۱۹/۶۱۵	۰/۷۰۳۴
W5	۱۴۹۹	۱۵۰۱/۵۵۵	۰/۱۷۰۴
W6	۱۵۳۰/۵	۱۵۲۳/۱۵۵	۰/۴۷۹۹
W7	۱۵۲۴	۱۵۲۰/۹۱۵	۰/۲۰۲۴
W8	۱۵۵۰	۱۵۳۹/۳۹۵	۰/۶۸۴۲
W9	۱۵۲۷	۱۵۲۱/۳۳۵	۰/۳۷۱۰
W10	۱۵۵۴	۱۵۴۲/۹۳۵	۰/۷۱۲۰
W11	۱۵۰۲	۱۵۲۳/۲۶۵	۱/۴۱۵۸
W12	۱۵۳۸	۱۵۴۱/۱۱۵	۰/۲۰۲۵



شکل ۳- سرعت انتشار امواج صوتی طولی در آمیزه‌های لاستیکی

رابطه مستقیمی با سرعت انتشار امواج صوتی در آمیزه‌های لاستیکی دارد. از طرف دیگر، یعنی با افزایش مقدار سیلیکای با قابلیت پخش بالا سرعت انتشار امواج افزایش می‌یابد. وجود گروه‌های سیلانول سطح، باعث ناسازگاری با پلیمر بوده، 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 پلیمری افزایش می‌یابد؛ هرچه بستر پلیمری همگن‌تر باشد، سرعت انتشار امواج درون آن نیز بیشتر می‌شود. نتایج بدست آمده از آزمایش نیز، گواه

این دلیل در کنار آن از پیونددهنده سیلانی استفاده می‌شود [۱۷].

با توجه به اهمیت مقدار سیلیکای با قابلیت پخش بالا بکار رفته در تخمین سرعت انتشار امواج صوتی طولی، فرمول‌بندی آمیزه‌هایی که در آن‌ها فقط این مقدار تغییر کرده بود، مورد بررسی قرار گرفت. دو دسته از نمونه‌ها دارای فرمول‌بندی مشابه بوده که فقط در آن‌ها مقدار سیلیکای با قابلیت پخش بالا تغییر کرده است. دسته اول شامل، نمونه‌های ۱ و ۶ و ۱۰ و دسته دوم شامل، نمونه‌های ۵ و ۹ و ۱۲ هستند. مقادیر سرعت انتشار امواج بدست آمده برای هر دسته در جداول ۶ و ۷ آورده شده است.

امواج فراصوتی از جنس امواج الاستیک بوده که در اثر انتقال ارتعاش بین ذرات انتشار می‌یابند. موارد زیادی روی سرعت انتشار امواج فراصوتی تاثیرگذار می‌باشند که یکی از مهم‌ترین عوامل، چگالی ماده است که نشان‌دهنده تراکم ذرات در ماده است. با افزایش تراکم ماده، فاصله بین ذرات کمتر شده و در نتیجه آن سرعت انتشار امواج افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، ارتعاش مواد در ارتباط با خاصیت کشسانی ماده بوده، در نتیجه آن، سرعت انتشار امواج طولی در یک محیط به مدول الاستیسیته، به ماده‌ای که امواج در آن منتشر می‌شوند، ربط پیدا می‌نماید. سرعت انتشار امواج فراصوت طولی در جامدات طبق رابطه (۵) بدست می‌آید [۵].

$$V_c = \left( \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

مقایسه ضرایب بدست آمده از معادله (۲)، نشان می‌دهد سیلیکا که در فرمول‌بندی ترکیبات از جرم حجمی بالاتری نسبت به لاستیک برخوردار است، تاثیر بیشتری روی تغییرات سرعت امواج فراصوت دارد. یا به عبارت دیگر، این ماده با افزایش چگالی لاستیک، تراکم ذرات را در لاستیک بالا برده، به تبع آن سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی در لاستیک افزایش یافته است. استایرن بوتادین محلولی ۵۲۷۰M در لاستیک‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که ترکیب سیلیکا جایگزین دوده صنعتی به عنوان پرکننده می‌شود. این ماده، با تاثیر قرار دادن باندهای لاستیکی، باعث توزیع یکنواخت‌تر پرکننده‌ها گردیده؛ در نتیجه آن، سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی افزایش می‌یابد. همان‌طور که شکل ۴ نشان می‌دهد، مقدار سیلیکای با قابلیت پخش بالا،



### ۶- نتیجه‌گیری

بررسی فرمول‌بندی آمیزه‌های لاستیکی با توجه به اینکه تاثیر مستقیمی روی خواص لاستیک دارند، در مباحث کنترل کیفیت محصول تولید شده، از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این مقاله، روشی ارائه گردیده که بر پایه آن امکان بررسی فرمول‌بندی لاستیک تولید شده وجود دارد. در این روش، از آزمون غیرمخرب فراصوتی استفاده شده است. سرعت انتشار امواج صوتی در چند آمیزه لاستیکی اندازه‌گیری گردید و از رگرسیون چندگانه خطی برای تعیین ارتباط بین سرعت انتشار امواج صوتی طولی و فرمول‌بندی لاستیک استفاده شد. با کمک مدل بدست آمده می‌توان برای یک آمیزه جدید، سرعت انتشار امواج صوتی طولی را تخمین زد و در صورت متفاوت بودن مقدار سرعت انتشار امواج صوتی طولی در آمیزه ساخته شده با سرعت انتشار امواج صوتی طولی در آمیزه هدف، می‌توان نتیجه گرفت که درصد عناصر در ترکیب ساخته شده تغییر کرده است و به تبع آن خواص لاستیک نیز، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. درصد خطای پایین (کمتر از یک درصد) در صحت‌سنجی روش پیشنهادی، نشان از کاربردی بودن این روش در کنترل کیفیت لاستیک‌های تولید شده دارد.

### ۷- قدردانی

نویسندگان بدین‌وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از شرکت محترم کویر تاپر اعلام می‌دارند که همکاری همه جانبه‌ای در این پژوهش، در تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها به‌عمل آوردند.

### ۸- مراجع

- [1] Yılmaz T, Ercikdi B, Karaman K, Külekçi G (2014) Assessment of strength properties of cemented paste backfill by ultrasonic pulse velocity test. *Ultrasonics* 54(1): 1386-1394.
- [2] Morrison D, Abeyratne U (2014) Ultrasonic technique for non-destructive quality evaluation of oranges. *J Food Eng* 141(1): 107-112.
- [3] Vasanelli E, Colangiuli D, Calia A, Sileo M, Antonietta Aiello M (2015) Ultrasonic pulse velocity for the evaluation of physical and mechanical properties of a highly porous building limestone. *Ultrasonics* 60(1): 33-44.

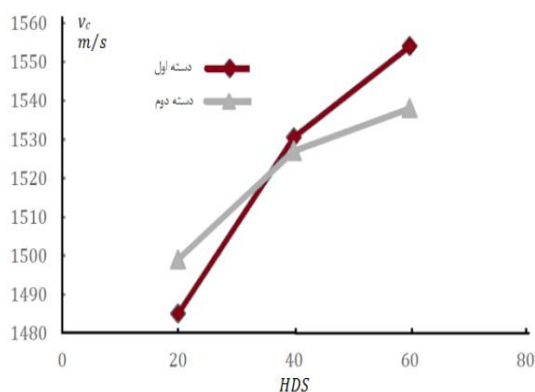
همین موضوع است. به منظور صحت‌سنجی مدل پیشنهادی آمیزه لاستیکی دیگری با ترکیب وزنی ۶۰ گرم سیلیکای با قابلیت پخش بالا، ۲۰ گرم دوده، ۳۰ گرم کائوچوی مصنوعی سیس بوتادین و ۷۰ گرم استایرن بوتادین 5220 M ساخته شد و سپس سرعت انتشار امواج صوتی طولی در آمیزه لاستیکی اندازه‌گیری گردید. مقدار سرعت انتشار امواج صوتی طولی بدست آمده از آزمایش و مدل رگرسیون چند گانه خطی برای نمونه ساخته شده به ترتیب برابر، ۱۵۴۲ و ۱۵۴۰/۶۹۵ متر بر ثانیه می‌باشند. برای نمونه صحت‌سنجی، مقدار خطا ۰/۰۸۴۶ درصد است. مقدار خطای کم در تخمین سرعت انتشار امواج صوتی طولی، نشان از کاربردی بودن روش پیشنهادی برای ارزیابی فرمول‌بندی آمیزه‌های لاستیکی دارد.

جدول ۶- سرعت و HDS نمونه‌های ۱ و ۶ و ۱۰ (دسته اول)

HDS	سرعت انتشار امواج صوتی طولی m/s	شماره نمونه
۲۰	۱۴۸۵	۱
۴۰	۱۵۳۰/۵	۶
۶۰	۱۵۵۴	۱۰

جدول ۷- سرعت و HDS نمونه‌های ۵ و ۹ و ۱۲ (دسته دوم)

HDS	سرعت انتشار امواج صوتی طولی m/s	شماره نمونه
۲۰	۱۴۹۹	۵
۴۰	۱۵۲۷	۹
۶۰	۱۵۳۸	۱۲



شکل ۴- تغییرات سرعت انتشار امواج صوتی طولی در اثر تغییر مقدار سیلیکا در آمیزه‌های دسته‌های اول و دوم

- solution using an ultrasonic pulse. *Meas Sci Rev* 14(5): 252-256.
- [12] Higazy AA, Afifi H, Khafagy AH, El-Shahawy MA, Mansour AM (2006) Ultrasonic studies on polystyrene/styrene butadiene rubber polymer blends filled with glass fiber and talc. *Ultrasonics* 44(1): 1439-1445.
- [13] Ghoreishy MHR, Taghvaei S, Zafar Mehrabian R (2011) The effect of silica/carbon black filler systems on the fatigue properties of the tread compound in passenger tires. *Iran J Polym Sci Technol* 24(4): 329-337. (in Persian)
- [14] Uyanik G, Guler N (2013) A study on multiple regression analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 106(1): 234-240.
- [15] Charlesworth JP, Temple JAG (1989) Engineering application of ultrasonic time-of-flight diffraction. Hertfordshire: Research Studies Press Ltd. 75-112.
- [16] Hamidnia M, Honarvar F, Khorsand H (2012) Accurate measurement of mechanical properties of tempered microstructures of AISI D6 alloy steel by ultrasonic nondestructive method. *Modares Mech Eng* 12(4): 48-58. (in Persian)
- [17] Atashi H, Sobhanmanesh K, Shiva M (2005) Improvement of physical and mechanical properties of butadiene rubber with silica/silane reinforcement system. *Iran J Polym Sci Technol* 17(5): 281-290. (in Persian)
- [4] RajeshJesudoss Hynes N, Nagaraj P, Angela Jennifa Sujana J (2014) Ultrasonic evaluation of friction stud welded AA 6063/AISI 1030 steel joints. *Mater Design* 62(10):118-123.
- [5] Hall B, John V (1988) Non destructive testing. London: Macmillan Education. 63-95.
- [6] Jayakumar T, Raj B, Willems H, Arnold W (1991) Influence of microstructure on ultrasonic velocity in nimonic alloy PE16. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 1*: 1691-1699.
- [7] Vasconcelos G, Lourenco PB, Alves CAS, Pamplona J (2008) Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites. *Ultrasonics* 48(1): 453-466.
- [8] Watanabe T, Thi Huyen Trang H, Harada K, Hashimoto C (2014) Evaluation of corrosion-induced crack and rebar corrosion by ultrasonic testing. *Constr Build Mater* 67(2): 197-201.
- [9] Afifi A, El Sayed M (2003) Ultrasonic properties of ENR-EPDM rubber blends. *Polym Bull* 50(1): 115-122.
- [10] El-Hadek M (2014) Fracture mechanics of rubber epoxy composites. *Metall Mater Trans A* 45(9): 4046-4054.
- [11] Kerdongmee P, Pumdaung C, Danworaphong S (2014) Quantifying dry rubber content in latex