

استفاده از امواج فراصوتی برای اندازه‌گیری ویژگی جبهندگی آمیزه‌های

لاستیکی

Using ultrasonic waves to measure the resilience of rubber compounds

چکیده:

در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های فراصوتی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی مواد به دلیل ماهیت غیر مخرب، سریع و ارزان بودن، و حجم و وزن کم تجهیزات و قابل حمل و نقل بودن آن‌ها، توسعه‌ی قابل ملاحظه‌یی یافته است. در این پژوهش برای اندازه‌گیری ویژگی جبهندگی یک ترکیب لاستیکی، روش غیرمخرب فراصوتی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ۱۵ نمونه آمیزه‌ی لاستیکی تقویت شده با نانورس با ترکیب‌های متفاوت ساخته شد. برای هر یک از نمونه‌های ساخته شده، درصد جبهندگی با استفاده از دستگاه تریسومتر اندازه‌گیری شد. همچنین سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی نیز در تمام نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. به منظور برقراری ارتباط بین جبهندگی و سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی، از مدل رگرسیون خطی پس از نرمال سازی داده‌ها استفاده شد. با وجود خطای کم مدل بدست آمده، برای اطمینان از عملکرد مدل رگرسیون پیشنهاد شده، نمونه‌ی دیگری به منظور صحت‌سنجی روش ارائه شده ساخته شد. خطای ۱/۴۲۵۷ آمیزه‌ی صحت‌سنجی و مقایسه‌ی نتیجه‌های به‌دست آمده از هر دو روش، نشان‌دهنده‌ی قابلیت خوب روش فراصوتی در اندازه‌گیری جبهندگی ترکیب‌های لاستیکی در بازه فرمولاسیون پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی: امواج فراصوتی، ترکیب لاستیکی، جبهندگی، مدل رگرسیون.

نوع مقاله: پژوهشی

مقدمه:

می‌گذارد، انتخاب یک فرمول مشخص الزاماً ویژگی‌های مدنظر را در پی نخواهد داشت و لازم است که در انتهای تولید آمیزه، ویژگی‌های آن اندازه‌گیری شود. تأثیرها به دلیل وجود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی متفاوت، به نحوی عمل می‌کنند که بهبودی یک یا چند ویژگی آن منجر به کاهش یا افزایش سایر ویژگی‌های آن می‌شود. یکی از

یکی از اجزای مهم خودروها، تأیر است که نقش مهمی در ایمنی و راحتی سرنشینان ایفا می‌کند. بنابراین دستیابی به ویژگی‌های مطلوب فیزیکی و دینامیکی آمیزه‌ی اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. با توجه به این‌که عوامل مختلفی روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آمیزه‌ها اثر

مرتضی طاهری^(۱)، ابوالفضل فورگی‌نژاد^(۲) و مهدی شیوا^(۳)
۱- دانش‌آموخته کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند
۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند
۳- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

* عهده دار مکاتبات:

foorginejad@birjandut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۸

تاریخ بازنگری: ۹۵/۸/۲۸

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱/۱۶

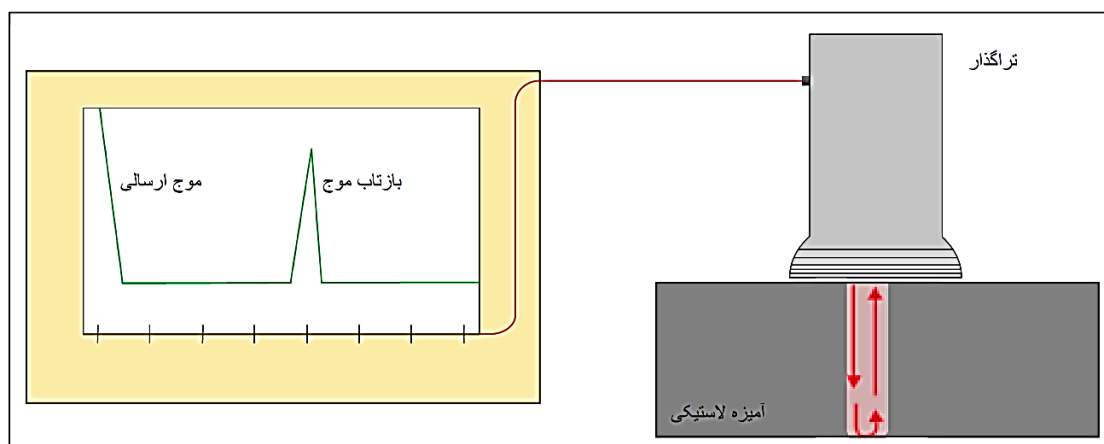
ویژگی‌های دینامیکی مورد توجه پژوهش‌گران که دستیابی به مقدار مطلوب آن در کنار سایر ویژگی‌ها، مهم و دارای اهمیت است، پدیده‌ی جهندگی^(۱) است که پیرامون آن می‌توان به پژوهش‌های زیر اشاره کرد:

احمدی و یزدانی [۱] تأثیر استفاده از ریکلیم تاپرهای ضایعاتی به عنوان پرکننده‌ی ارزان قیمت بر ویژگی‌های فیزیکی، دینامیکی و فرایندی آمیزه را ارزیابی کرده‌اند. نتیجه‌ها نشان داده که وجود کائوچوی بازیافتی در یک آمیزه‌ی لاستیکی باعث بهبود سرعت پخت، بهبود مقاومت در برابر رشد ترک و مقاومت پارگی، و نیز بهبود فرایندپذیری آمیزه می‌شود. البته استحکام کششی و جهندگی این آمیزه اندکی کاهش می‌یابد.

آتشی و همکاران [۲] به بررسی سازوکارهای بهبود مقاومت پارگی در دو سامانه‌ی تقویت‌کننده، یعنی دوده/سیلیکا، و دوده/سیلیکا/سیلان با مطالعاتی فرایندهای اتلافی و برهمکنش‌های پرکننده - پلیمر، به کمک آزمون‌های جهندگی، مدول و لاستیک پیوندی پرداختند. نتیجه‌ها نشان داد در مجاورت سیلیکا و در غیاب عامل پیوند سیلانی، به دلیل کاهش جهندگی بوتادین‌ان، سازوکار مصرف انرژی پارگی از راه اتلاف انرژی به شکل گرما در فرایندهای بازگشت ناپذیر،

یک سازوکار غالب در بهبود مقاومت در برابر پارگی است. با استفاده از آزمون فراصوت^(۳) که یک روش اندازه‌گیری غیرمخرب است، می‌توان برخی ویژگی‌های ماده را از طریق اندازه‌گیری زمان فرستادن امواج فراصوتی و دریافت امواج برگشتی تعیین کرد [۳]. بررسی کیفیت و تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مواد با به کارگیری تغییرات سرعت امواج فراصوتی، در گستره‌ی وسیعی از مواد و کاربردها استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، امواج فراصوتی و بازتاب آن‌ها روی نمایشگر نمایان می‌شود که با تفسیر این علائم می‌توان به داده‌های مورد نیاز دست یافت. در این روش با استفاده از تغییرات صورت پذیرفته بر روی ارتفاع پالس دریافتی و زمان برگشت آن می‌توان برخی اطلاعات را در مورد قطعه‌ی مورد آزمون به دست آورد.

پژوهش‌های بسیار زیادی در زمینه‌ی استفاده از امواج فراصوتی به منظور تعیین ویژگی‌های مواد انجام شده است، که در اینجا به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. واسکن‌کوس و همکاران [۴] مناسب بودن روش سرعت انتشار امواج فراصوتی برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی گرانیات در ابعاد محدوده بین ۰٫۱ تا ۴ میلی‌متر و ۰٫۳ تا ۱۶٫۵ میلی‌متر را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. آن‌ها



شکل ۱- شکل شماتیک آزمون فراصوتی

ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت و مدول الاستیسیته‌ی فشاری و کششی، و ویژگی‌های فیزیکی شامل چگالی و تخلخل را مورد ارزیابی قرار دادند 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. سپس همبستگی آماری بین سرعت انتشار امواج فراصوتی و ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی گرانیات و عواملی که موجب تغییرات در سرعت فراصوت شده نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که سرعت انتشار امواج فراصوتی را می‌توان به‌طور مؤثر به‌عنوان یک روش غیرمخرب ساده و مقرون به صرفه، برای پیش‌بینی اولیه‌ی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی استفاده کرد، همچنین از آن به عنوان یک ابزار برای ارزیابی تغییرات آب و هوایی که در طول عمر گرانیات رخ داده، بهره برد. آن‌ها با استفاده از روش‌های آماری نشان داده‌اند که بین سرعت انتشار امواج فراصوتی و ویژگی‌های مکانیکی، یعنی استحکام کششی، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و شکست ارتباط معناداری وجود دارد.

عفی و همکاران [۵] سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی و عرضی را در آمیزه‌ی کائوچوی طبیعی اپوکسیده^(۱) همراه با ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد وزنی (پارت) کائوچوی اتیلن پروپیلن، توسط امواج فراصوتی در فرکانس ۲ مگاهرتز و دمای اتاق با استفاده از روش بازتاب امواج فراصوتی بررسی کرده‌اند. آن‌ها همچنین ویژگی‌های مکانیکی آمیزه‌ی لاستیکی از قبیل چگالی، مدول طولی، مدول برشی، مدول یانگ، نسبت پواسون و سختی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتیجه‌ها نشان می‌دهد با افزایش درصد وزنی کائوچوی اتیلن پروپیلن تا ۷۵٪ در آمیزه، سرعت امواج فراصوتی افزایش می‌یابد، ولی این سرعت در نسبت ۷۵٪ تا ۱۰۰٪ کائوچوی اتیلن پروپیلن کاهش می‌یابد که این امر، وقوع تعامل

بین مولکولی قوی‌تری در اجزای آمیزه‌ی کائوچوی طبیعی اپوکسیده شده را تا ۷۵٪ وزنی کائوچوی اتیلن پروپیلن نشان می‌دهد، و بیان این که، ویژگی‌های مکانیکی مناسب در محدوده‌ی ۰٪ تا ۷۵٪ پارت از کائوچوی اتیلن پروپیلن با کائوچوی طبیعی اپوکسیدار شده قرار دارد.

در پژوهش انجام شده توسط الحادک [۶] از امواج فراصوتی برای تعیین همگنی صفحات لاستیکی استفاده شده است. برای دستیابی به این هدف، الحادک از روش پالس اکو استفاده کرده است. براساس پژوهش‌های وی، ورق‌های لاستیکی با درصد تغییرات ± 20.5 درصد در سرعت امواج طولی، همگن محسوب می‌شود.

هارتسون و هیوز [۷] ضمن بررسی ویژگی‌های مکانیکی دینامیکی و رفتار سرعت آوایی آمیزه‌های پلی‌استایرن، به این نتیجه رسیدند که سازگاری آمیزه‌های پلیمری را می‌توان با اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج "فرا آوایی" تعیین کرد.

بخش تجربی

روش تهیه و مواد

کائوچوها به طور مرسوم توسط الیاف کوتاه، دوده‌ی صنعتی^(۲) و سیلیکات‌ها تقویت می‌شود. به عنوان مثال، با افزودن ده پارت سیلیکات در نقش پرکننده به آمیزه‌ی کائوچوی طبیعی^(۳)، افزایش چشمگیری در مدول الاستیسیته‌ی آن به وجود می‌آید [۸]. با این وجود، بدون در نظر گرفتن استثنایی مانند دوده، اثر تقویت‌کنندگی مواد پرکننده با توجه به اندازه‌ی ذرات و امکان انباشتگی^(۴) یا توده‌ی شدن آن‌ها محدود است.

دوده به عنوان مهم‌ترین تقویت‌کننده، به‌طور وسیعی در صنایع لاستیکی به کار می‌رود. در حدود ۹۰ درصد از تولید جهانی دوده در صنعت تایر مورد استفاده قرار می‌گیرد. ذرات دوده‌ی کربن با ساختار و اندازه‌ی ذرات مناسب،

1. Epoxidized Natural Rubber- Ethylene Propylene Diene Monomer

2. Carbon Black (CB)

3. Natural Rubber (NR)

4. Agglomeration

ویژگی‌های مطلوبی را به آمیزه‌های لاستیکی می‌بخشد که این پدیده به جهت نانو سائز بودن ذرات دوده است.

ویژگی‌های برجسته‌ی الاستومرها با وجود تقویت‌کننده‌ی نانوکلی به پراکنش نانومتری لایه‌های سیلیکاتی در فاز پیوسته‌ی لاستیکی و برهم‌کنش‌های قوی ایجاد شده بین نانوذرات و زنجیره‌های پلیمری نسبت داده می‌شود. بهبود ویژگی‌های نانوکامپوزیت، زمانی به حداکثر خود می‌رسد که ذرات در مقیاس نانو در فاز پیوسته‌ی لاستیکی پراکنده شود. حالت ورقه‌یی ایده‌آل ساختاری است که زنجیره‌های پلیمری بین صفحات سیلیکا نفوذ کرده و باعث لایه لایه شدن آن‌ها می‌شود.

به منظور افزایش فاصله‌ی بین صفحات نانوکلی که طبیعتاً منجر به افزایش حجم آن می‌شود، اقدام به اصلاح نانوکلی شد. ۷ گرم نانو کلی در ۲۵۰ سی سی آب ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حل شد و به مدت ۹۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه هم زده شد. ۲۰۵ گرم استارات روی در ۱۲۵ سی سی آب ۷۰ درجه حل شد و به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه هم زده شد. بعد از این مدت ۱۰۰۵ سی سی اسید کلریدریک ۱۲ مولار را به طور آهسته به محلول اضافه شد و عمل هم زدن به مدت ۵ دقیقه‌ی دیگر ادامه یافت. بعد از گذشت زمان ۹۰ دقیقه برای ظرف یک، محلول ظرف ۲ را به ظرف یک اضافه شد و محلول جدید به مدت ۹۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰ دور در دقیقه هم زده شد. پس از گذشت این زمان، محلول توسط سود ۶ مولار تیترا شد تا pH محیط در حدود ۷ قرار گیرد. سپس محلول صاف شد و پس از صاف کردن، رسوب حاصل با ۵۰۰ سی سی آب ۵۰ درجه شست‌وشو شد. در نهایت رسوب به‌دست آمده به مدت ۴۸ ساعت در اون با دمای ۷۰ درجه قرار داده شد. برای تولید آمیزه از روش اختلاط مذاب استفاده شد.

این روش که از بسیاری جهات شبیه به فرآیند آمیزه‌سازی مذاب‌های پلیمری با مواد افزودنی و ذرات پودری است، یکی از مهم‌ترین و از نظر ماتریس مورد استفاده، از انعطاف‌پذیرترین روش‌های تولید کامپوزیت محسوب می‌شود. در این روش با توجه به حالت مذاب ماتریس، از مخلوط کننده‌هایی که توانایی ایجاد میدان‌های برشی و کششی قوی دارند مانند اکسترودرهای دارای یک یا دو اسکرو (screw)، و مخلوط کننده‌های داخلی و اکسترودرهای نیدردار استفاده می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که در این روش به غیر از پارامترهای ترمودینامیکی، نوع و شدت میدان‌های جریان و یا نیروهای هیدرودینامیکی نقش مهمی در مکانیزم تشکیل ریزساختار ایفا کند [۹].

دنيس و همکارانش [۱۰] اثر شرایط فرآیند مذاب را روی ورقه‌یی شدن خاک رس بررسی کرده و مشاهده کردند که فاکتورهایی مثل زمان اختلاط و شدت برش نقش اساسی در تعیین پراکنش ذرات خاک رس در ماتریس پلیمری دارد. کائوچوها به دلیل جرم مولکولی بسیار بالایی که دارند در حالت اختلاط مذاب، ویسکوزیته‌ی بسیار بالایی از خود نشان می‌دهند و از این رو می‌توانند در زمان اختلاط نیروی برشی قابل توجهی ایجاد کنند که موجب شکستن ساختار صفحات سیلیکاتی و جدا شدن لایه‌ها از یکدیگر می‌شود. از این رو روش اختلاط مذاب یک روش مناسب برای تهیه‌ی نانوکامپوزیت‌های بر پایه‌ی ماتریس کائوچویی است [۱۱]. البته در صورت استفاده از روش اختلاط مذاب به منظور دستیابی به ریزساختار مناسب، استفاده از سازگارکننده ضروری است.

در پژوهش حاضر به منظور بررسی ارتباط بین جهندگی ترکیب کائوچویی تقویت شده با نانورس و سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی، تعداد ۱۶ نمونه آمیزه با فرمولاسیون‌های متفاوت ساخته شد. از این میان ۱۵ نمونه

جدول ۲- فرمولاسیون نهایی آمیزه‌ها

شماره‌ی نمونه	S (g)	CBS (g)	OBTS (g)	Master (g)
۱	۵/۵۶	۱/۳۵	۱/۲۳	۴۹۱/۸۶
۲	۵/۶۷	۱/۳۸	۱/۲۶	۴۹۱/۶۹
۳	۵/۵۶	۱/۳۵	۱/۲۳	۴۹۱/۸۷
۴	۵/۱۸	۱/۳۷	۱/۲۵	۴۹۲/۲۱
۵	۵/۵۶	۱/۳۵	۱/۲۳	۴۹۱/۸۶
۶	۶/۳۱	۱/۳۵	۱/۲۳	۴۹۱/۱۲
۷	۵/۴۵	۱/۳۳	۱/۲۱	۴۹۲/۰۳
۸	۶/۰۸	۱/۳۷	۱/۲۵	۴۹۱/۳۱
۹	۶/۰۸	۱/۳۷	۱/۲۵	۴۹۱/۳۱
۱۰	۴/۸۱	۱/۳۵	۱/۲۳	۴۹۲/۶
۱۱	۵/۹۳	۱/۳۴	۱/۲۲	۴۹۱/۵۱
۱۲	۵/۵۶	۱/۳۵	۱/۲۳	۴۹۱/۸۶
۱۳	۵/۰۵	۱/۳۴	۱/۲۲	۴۹۲/۳۹
۱۴	۵/۱۸	۱/۳۷	۱/۲۵	۴۹۲/۲۱
۱۵	۵/۰۵	۱/۳۴	۱/۲۲	۴۹۲/۳۹

برای تعیین ارتباط فرمولاسیون و سرعت امواج مورد استفاده قرار گرفت و یک نمونه نیز برای صحت‌سنجی نتیجه‌های به دست آمده استفاده شد. تهیه‌ی آمیزه‌ها در دو مرحله انجام شد. در مرحله‌ی اول برای هریک از ۱۵ نمونه یک مستریج طبق جدول (۱) آماده شد و با ترکیب مستریج با عناصر مندرج در جدول (۲)، ترکیب نهایی آمیزه‌ها به دست آمد.

دستگاهها

تجهیزات مورد استفاده در این پژوهش شامل تریپسومتر دانلپ شرکت Wallace برای تعیین میزان جهندگی، و دستگاه آزمون فراصوت تروسونیک با بسامد پروب ۴ MHZ بوده است

آزمون جهندگی

جهندگی؛ توانایی الاستومتر برای نخیره کرن و بازگشت

جدول ۱- فرمولاسیون پایه‌ی آمیزه‌ی تقویت شده با نانورُس

شماره‌ی نمونه	REOWAX (g)	6PPD (g)	ANOX (g)	ZnO (g)	S/A (g)	OIL (g)	NC (g)	N335 (g)	BR cis (g)	SBR1500 (g)	SMR20 (g)
۱	۱۲/۳۴	۹/۰۴	۶/۱۷	۲۴/۶۹	۱۲/۳۴	۴۸/۸۸	۳۰/۵۵	۲۴۴/۹۱	۶۴/۱۶	۲۴۴/۹۱	۳۰/۱۹۹
۲	۱۲/۶	۹/۲۳	۶/۳	۲۵/۲	۱۲/۶	۲۸/۹۳	۳۱/۱۹	۲۵۰/۰۵	۶۵/۵۱	۲۵۰/۰۵	۳۰/۸۳۲
۳	۱۲/۳۴	۹/۰۴	۶/۱۷	۲۴/۶۹	۱۲/۳۴	۴۸/۸۸	۳۰/۵۵	۲۴۴/۹۱	۶۴/۱۶	۲۴۴/۹۱	۳۰/۱۹۹
۴	۱۲/۵	۹/۱۶	۶/۲۵	۲۴/۹۹	۱۲/۵	۳۷/۱۲	۳۰/۹۳	۲۴۷/۹۴	۸۶/۶۱	۲۴۷/۹۴	۲۸۴/۰۷
۵	۱۲/۳۴	۹/۰۴	۶/۱۷	۲۴/۶۹	۱۲/۳۴	۴۸/۸۹	۳۰/۵۵	۲۴۴/۹۳	۱۰۰/۱۴	۲۴۴/۹۳	۲۶۵/۹۵
۶	۱۲/۳۴	۹/۰۴	۶/۱۷	۲۴/۶۹	۱۲/۳۴	۴۸/۸۸	۳۰/۵۵	۲۴۴/۹۱	۶۴/۱۶	۲۴۴/۹۱	۳۰/۱۹۹
۷	۱۲/۱	۸/۸۶	۶/۰۵	۲۴/۱۹	۱۲/۱	۶۸/۰۴	۲۹/۹۴	۲۳۹/۹۹	۶۲/۸۷	۲۳۹/۹۹	۲۹۵/۹۱
۸	۱۲/۵	۹/۱۶	۶/۲۵	۲۴/۹۹	۱۲/۵	۳۷/۱۲	۳۰/۹۳	۲۴۷/۹۴	۸۶/۶۱	۲۴۷/۹۴	۲۸۴/۰۷
۹	۱۲/۵	۹/۱۶	۶/۲۵	۲۴/۹۹	۱۲/۵	۳۷/۱۲	۳۰/۹۳	۲۴۷/۹۴	۴۳/۳	۲۴۷/۹۴	۳۲۷/۳۷
۱۰	۱۲/۳۴	۹/۰۴	۶/۱۷	۲۴/۶۹	۱۲/۳۴	۴۸/۸۸	۳۰/۵۵	۲۴۴/۹۱	۶۴/۱۶	۲۴۴/۹۱	۳۰/۱۹۹
۱۱	۱۲/۱۹	۸/۹۳	۶/۱	۲۴/۳۹	۱۲/۱۹	۶۰/۳۷	۳۰/۱۸	۲۴۱/۹۶	۸۴/۵۲	۲۴۱/۹۶	۲۷۷/۲۱
۱۲	۱۲/۳۴	۹/۰۴	۶/۱۷	۲۴/۶۹	۱۲/۳۴	۴۸/۸۸	۳۰/۵۵	۲۴۴/۹۱	۶۴/۱۶	۲۴۴/۹۱	۳۰/۱۹۹
۱۳	۱۲/۱۹	۸/۹۳	۶/۱	۲۴/۳۹	۱۲/۱۹	۶۰/۳۷	۳۰/۱۸	۲۴۱/۹۶	۴۲/۲۶	۲۴۱/۹۶	۳۱۹/۴۷
۱۴	۱۲/۵	۹/۱۶	۶/۲۵	۲۴/۹۹	۱۲/۵	۳۷/۱۲	۳۰/۹۳	۲۴۷/۹۴	۴۳/۳	۲۴۷/۹۴	۳۲۷/۳۷
۱۵	۱۲/۱۹	۸/۹۳	۶/۱	۲۴/۳۹	۱۲/۱۹	۶۰/۳۷	۳۰/۱۸	۲۴۱/۹۶	۸۴/۵۲	۲۴۱/۹۶	۲۷۷/۲۱

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 باعث به وجود آمدن خطا در محاسبه‌ی 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 به کار رفته در تخمین سرعت انتشار امواج طولی حذف شد و پس از آن سرعت انتشار امواج طولی در نمونه‌ها محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل آماری

در پژوهش حاضر از رگرسیون خطی برای مدل کردن ارتباط بین جهندگی لاستیک و سرعت انتشار امواج صوتی طولی استفاده شد. در پژوهش‌هایی 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 ارائه‌ی رابطه‌ی بین متغیرهای وابسته و غیر وابسته است [۱۶]. برای مدل رگرسیونی، از نرم افزار آماری SPSS استفاده شد و به منظور رفع اختلاف ابعادی دو سوی معادله، داده‌ها قبل از استفاده توسط رابطه‌ی (۲) نرمال سازی شد تا هم داده‌ها در بازه معینی قرار گیرند و هم رابطه‌ی به دست آمده بی بُعد باشد.

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (2)$$

نتیجه‌ها و بحث:

در این پژوهش به منظور بررسی جهندگی آمیزه‌های لاستیکی، از روش غیرمخرب فراصوتی استفاده شد. داده‌های حاصل از آزمایش برای درصد جهندگی و سرعت امواج فراصوتی طولی آمیزه‌ها همراه با مقادیر نرمال شده در جدول (۳) گزارش شده است.

دائن انرژی به هنگام قرار گرفتن در معرض تغییر شکل سریع است. مقدار کشسانی و قابلیت ذخیره‌ی انرژی آمیزه‌ها معیاری از مقدار جهندگی‌ست، به طوری که هرچه آمیزه کشسان‌تر و مقدار جهندگی آن بیش‌تر باشد، اتلاف انرژی در آن (گرمایی) کمتر است [۱۲]. از سوی دیگر، کشسانی آمیزه‌ها و چگالی پیوندهای عرضی به شدت به یکدیگر وابسته است [۱۳]. به صورتی که با کاهش پیوندهای عرضی، ویژگی کشسانی آمیزه‌ها بهبود می‌یابد. در این پژوهش، مقدار جهندگی آمیزه‌ها پس از پخت به شکل درصد جهندگی از معادله‌ی (۱) محاسبه شده است [۱۴].

$$R(\%) = \frac{1 - \cos \theta_2}{1 - \cos \theta_1} \times 100 \quad (1)$$

که در رابطه‌ی بالا، θ_1 زاویه‌ی تغییر مکان پاندول دستگاه تریپسومتر (۴۵ درجه)، و θ_2 زاویه‌ی برگشت است.

آزمون فراصوتی

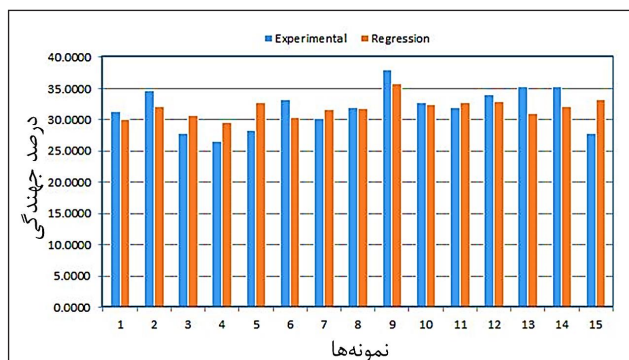
امواج فراصوتی که از میان ماده انتشار می‌یابد، همواره بخشی از انرژی خود را به سبب پراکندگی در فصل مشترک‌های میکروسکوپی و همچنین اثر اصطکاک‌های درونی در ماده از دست می‌دهد. اثر تضعیف در واقع افت انرژی امواج صوتی در حین حرکت موج از میان محیط است. در این مطالعه‌ی تجربی با توجه به اثر تضعیف شدیدتر در لاستیک‌ها [۱۵]، برای تعیین سرعت امواج فراصوتی از کاوه‌ی با بسامد ۴ مگاهرتز استفاده شد.

سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی برای نمونه‌های مختلف، با اندازه‌گیری زمان سپری شده میان ارسال امواج و بازتاب آن، و سپس ظاهر شدن روی صفحه‌ی نمایشگر توسط مدار الکترونیکی استاندارد اندازه‌گیری شده است. دقت اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی ۱ متر بر ثانیه است. با توجه به این‌که زمان محاسبه شده میان ارسال و

جدول ۳- جهندگی و سرعت امواج فراصوتی طولی درون آمیزه‌های لاستیکی

شماره‌ی نمونه	درصد جهندگی	مقدار نرمال شده‌ی درصد جهندگی	سرعت امواج فراصوتی $(\frac{m}{s})$	مقدار نرمال شده‌ی امواج فراصوتی طولی
۱	۳۱/۴	۰/۸۲۶۳	۱۵۵۵/۵	۰/۹۶۷۷
۲	۳۴/۶	۰/۹۱۰۵	۱۵۷۵	۰/۹۷۹۸
۳	۲۷/۸	۰/۷۳۱۶	۱۵۶۱	۰/۹۷۱۱
۴	۲۶/۶	۰/۷۰۰۰	۱۵۵۱/۶۶۷	۰/۹۶۵۳
۵	۲۸/۳	۰/۷۴۴۷	۱۵۸۰/۵	۰/۹۸۳۲
۶	۳۳/۳	۰/۸۷۶۳	۱۵۵۹	۰/۹۶۹۸
۷	۳۰/۲	۰/۷۹۴۷	۱۵۷۰/۳۳	۰/۹۷۶۹
۸	۳۲	۰/۸۴۲۱	۱۵۷۱/۶۶۷	۰/۹۷۷۷
۹	۳۸	۱/۰۰۰۰	۱۶۰۷/۵	۱/۰۰۰۰
۱۰	۳۲/۷	۰/۸۶۰۵	۱۵۷۸	۰/۹۸۱۶
۱۱	۳۲	۰/۸۴۲۱	۱۵۸۰/۳۳	۰/۹۸۳۱
۱۲	۳۴	۰/۸۹۴۷	۱۵۸۱/۵	۰/۹۸۳۸
۱۳	۳۵/۳	۰/۹۲۸۹	۱۵۶۴/۶۶۷	۰/۹۷۳۴
۱۴	۳۵/۳	۰/۹۲۸۹	۱۵۷۴	۰/۹۷۹۲
۱۵	۲۷/۸	۰/۷۳۱۶	۱۵۸۴/۳۳	۰/۹۸۵۶

آزمایش و مدل رگرسیون برای ۱۵ نمونه آمیزه‌ی لاستیکی نشان داده شده است.



شکل ۲- درصد جهندگی آمیزه‌های لاستیکی

جدول ۴- فرمول آمیزه‌ی صحت‌سنجی و درصد جهندگی و سرعت امواج فراصوتی طولی

ترکیب نمونه	مقدار عناصر موجود در ترکیب	درصد جهندگی (نرمال شده)	سرعت امواج فراصوتی $(\frac{m}{s})$ (نرمال شده)
REOWAX (g)	۳۱۹/۴۷	۳۴ (۰/۸۹۴۷)	۱۵۸۷/۳۳ (۰/۹۸۷۵)
6PPD (g)	۲۴۱/۹۶		
ANOX (g)	۴۲/۲۶		
ZnO (g)	۲۴۱/۹۶		
S.A (g)	۳۰/۱۸		
OIL (g)	۶۰/۳۷		
NC (g)	۱۲/۱۹		
N335 (g)	۲۴/۳۹		
SMR20 (g)	۶/۱		
SBR1500 (g)	۸/۹۳		
BR cis (g)	۱۲/۱۹		
OBTS (g)	۱/۲۲		
CBS (g)	۱/۳۴		
S (g)	۵/۹۳		

برای مدل کرن مقدار ارتباط بین درصد جهندگی و سرعت انتشار امواج صوتی طولی از رگرسیون استفاده شد. بر این اساس، رابطه‌ی (۳) نرمال شده، درصد جهندگی را به صورت تابعی از سرعت امواج فراصوتی طولی درون آمیزه، در این فرآیند مدل می‌کند.

$$R = 4/624 \times V - 3/684 \quad (3)$$

که در این رابطه، R درصد جهندگی و V سرعت امواج فراصوتی درون آمیزه‌ی لاستیکی ست.

به منظور صحت‌سنجی مدل پیشنهادی، آمیزه‌ی لاستیکی جدیدی ساخته شد و سپس درصد جهندگی و سرعت انتشار امواج صوتی طولی در آن اندازه‌گیری شد. فرمول آمیزه‌ی صحت‌سنجی و درصد جهندگی و سرعت امواج فراصوتی طولی درون آمیزه در جدول (۴) گزارش شده است. در شکل (۲) اختلاف بین درصد جهندگی به دست آمده از

مقدار جهندگی به دست آمده از آزمایش و مدل رگرسیون خطی برای نمونه‌ی صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۳۴ و ۳۳/۵۱۵۳ است. بنابراین برای نمونه‌ی صحت‌سنجی، مقدار خطا ۱/۴۲۵۷ درصد است. مقدار خطای کم در تخمین

درصد جهندگی، نشان از کاربردی بودن روش پیشنهادی برای اندازه‌گیری درصد جهندگی آمیزه‌های لاستیکی دارد.

نتیجه‌گیری

یکی از ویژگی‌های دینامیکی مهم در فرایند طراحی فرمول آمیزه‌های لاستیکی، ویژگی جهندگی‌ست. در این پژوهش با استفاده از آزمون غیرمخرب فراصوتی، به بررسی ارتباط میان درصد جهندگی و سرعت امواج فراصوتی طولی درون ۱۵ نمونه آمیزه‌های لاستیکی تقویت شده با نانورس پرداخته شده است تا در صورت صحت‌سنجی رابطه‌ی موجود بین این دو پدیده، از این ارتباط به عنوان رهیافتی برای تعیین درصد جهندگی در آمیزه‌های لاستیکی استفاده شود. پس از دستیابی به مدل رگرسیونی خطی بر مبنای ۱۵ نمونه‌ی اولیه، یک نمونه آمیزه با فرمول متفاوت تهیه شد و با استفاده از سرعت امواج فراصوتی، درصد جهندگی محاسبه

شد. مقایسه‌ی مقدار به دست آمده از مدل با مقدار به دست آمده از دستگاه آزمون جهندگی، خطایی برابر ۱/۴۲۵۷ درصد دارد که این مقدار کم نشان از کاربردی بودن مدل رگرسیونی ارائه شده دارد.

مقایسه‌ی نتیجه‌های به‌دست آمده از دستگاه تریسومتر و روش فراصوتی نشان داد که در محدوده‌ی فرمولاسیون بررسی شده در این پژوهش، می‌توان روش فراصوتی را جایگزینی برای اندازه‌گیری جهندگی دانست. با توجه به سرعت بالای روش پیشنهادی در اندازه‌گیری جهندگی لاستیک، از آن می‌توان در خطوط تولید برخی فراورده‌های لاستیکی به شکل برخط برای اندازه‌گیری این ویژگی استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود روش ارائه شده برای سایر فرمولاسیون‌های لاستیکی نیز آزمایش شود تا جامعیت آن مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

1. Ahmadi, M., Yazdani, R.; Surveying the Influence of Reclaimed Rubber and Rubber Powder on Physical, Dynamical and Processing Properties of NR/BR Compound; Polymer Science and Technology; 3, 217-223, 2009.
2. Atashi, H., Sobhanmanesh, K., Shiva, M.; Improvement of Physical and Mechanical Properties of Butadiene Rubber with Silica/ Silane Reinforcement System; Polymer Science and Technology; 5, 281-290, 2004.
3. Yılmaz, T., Ercikdi, B., Karaman, K., Külekçi, G.; Assessment of strength properties of cemented paste backfill by ultrasonic pulse velocity test; ultrasonics; 54, 1386-1394, 2014.
4. Vasconcelos, G., Lourenco, P.B., Alves, C.A.S., Pamplona, J.; Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites; Ultrasonics; 48, 453-466, 2008.
5. Afifi, A., El Sayed, M.; Ultrasonic properties of ENR-EPDM rubber blends; Polymer Bulletin; 50, 115-122, 2003.
6. El-Hadek, M.; Fracture mechanics of rubber epoxy composites; Metallurgical and Materials Transactions A; 45, 4046-4054, 2014.
7. Hourston, D. J., Hughes, I. D.; Dynamic mechanical and sonic velocity behavior of polystyrene poly(vinyl methyl ether) blends; POLYMER; 19, 1978.
8. Varghese, S., Karger-Kocsis, J.; Natural rubber-based nano composites by latex compounding with layered silicates; Polymer; 44, 4921-4927, 2003,

9. Hocine, N.A., Mederic, P., Aubry, T.; Mechanical properties of polyamide-layered silicate nano composite and their relation with structure; Polymer Testing; 27, 330-339, 2008.
10. Dennis, H.R., Hunter, D.L., Chang, D., Kim, S., White, J.L., Cho, J.W., Paul, D.R.; Effect of melt processing conditions on the extent of exfoliation in organoclay-base nanocomposite; Polymer; 42, 9513-9522, 2001.
11. Lopez-Manchado, M.A., Herrero, B., Arroyo, M.; Preparation and characterization of organoclaynanocomposites based on natural rubber; Polymer International; 52, 1070-1077, 2003.
12. Donnet J.B., Custodero E.; Reinforcement of Elastomers by Particulate Fillers; Science and Technology of Rubber; Mark J.E., Erman B., and Eirich F.R. (Eds.), 3rd ed., Elsevier Academic, London, Chapt. 8, 367-400, 2005.
13. Hoffman W.; Rubber Technology Handbook; 2nd ed., Hanser, Munich, 1989 (Translated by Abaiee M., Ebrahimi P., Eslami P. and Abedini Z., Persian, 359-360, Rubber Industries Engineering & Research Co., Iran Yasa Tire & Rubber Co., 2000).
14. Gerard Kraus, Reinforcement of Elastomers, John Wiley and Sons, NewYork, 70-123, 1965.
15. Hall, B., John, V.; Non destructive testing; 63-95, London: Macmillan Education, 1988.
16. Uyanik, G., Guler, N.; A study on multiple regression analysis; Procedia - Social and Behavioral Sciences; 106, 234-240, 2013.



Mount Damavand

مانت دماوند

وارد کننده و توزیع کننده مواد اولیه لاستیکی

No. 2 Golshan Ave, Khoramshahr St. TEHRAN-IRAN
Tel: 88769297 Fax: 88747985

تهران، خیابان خرمشهر، خیابان گلشن، پلاک ۲
تلفن: ۸۸۷۶۹۲۹۷ فاکس: ۸۸۷۴۷۹۸۵



Using ultrasonic waves to measure the resilience of rubber compounds

M. Taheri¹, A. Foorgi-Nejad^{2,*} and M. Shiva³

1. B.S. Student, mechanical engineering, University of Birjand
2. Assistant Prof. of Mechanical Engineering, University of Birjand
3. Assistant Prof. of Chemical Engineering, University of Birjand

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

Received: August 2016, Revised: November 2016, Accepted: March 2017

Abstract: Non destructive ultrasonic test has been used in many researches to study different material properties such as mechanical and structural properties. In this study, the Non destructive ultrasonic testing method has been employed to investigate the resilience of nonoclay reinforced rubber compounds. Fifty samples with different formulations were prepared and were tested for measuring the compound resilience percent and longitudinal ultrasonic wave velocity through the samples. After the data normalization, in the next step, a regression model for resilience according to the longitudinal ultrasonic wave velocity was developed. For the model validation, the another sample with different formulation was prepared and tested for resilience and ultrasonic wave velocity. The regression model had predicted the compound resilience with slight error of 1.4257 that shows the applicability of the developed model.

Keywords: Ultrasonic waves, Rubber, Resilience, Developed model.