

# استفاده از امواج فراصوتی و پردازش تصویر در تحلیل فرمول بندی لاستیک تقویت شده با نانورس

ابوالفضل فورگی نژاد\*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

سید محمد امام

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

مرتضی طاهری

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

## چکیده

نانورس به منظور تقویت خواص مکانیکی لاستیک به ترکیب آن افزوده می‌شود. در این پژوهش از روش غیر مخرب آزمون فراصوتی برای بررسی فرمول بندی لاستیک تقویت شده با نانورس استفاده شده است. در این روش زمان بین ارسال و بازتاب امواج صوتی با بسامد بالا اندازه گیری می‌شود. سرعت انتشار امواج طولی از تقسیم طول نمونه بر زمان رفت و برگشت امواج بدست می‌آید. در مطالعه حاضر با توجه به انعطاف پذیری مواد لاستیکی، برای اندازه گیری ضخامت نمونه از روش پردازش تصویر استفاده گردید. با تغییر درصد عناصر تشکیل دهنده لاستیک تقویت شده با نانورس، خواص فیزیکی و مکانیکی آن تغییر نموده و در نتیجه آن سرعت انتشار امواج صوتی در لاستیک تقویت شده با نانورس تغییر خواهد نمود. به منظور بررسی فرمول بندی لاستیک تقویت شده با نانورس، ابتدا تعدادی نمونه با فرمول بندی های متفاوت تهیه گردید و برای هر کدام از نمونه ها، سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی اندازه گیری گردید. به منظور صحت سنجی نمونه دیگری با فرمول بندی جدید ساخته شد و سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی در آن اندازه گیری گردید. بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش ها و مدل رگرسیونی پیاده سازی شده نشان داد که می توان با داشتن فرمول بندی لاستیک تقویت شده با نانورس سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی را در لاستیک ها بدست آورد. دستاورد بدست آمده از نتایج پژوهش در آنالیز لاستیک های تولید شده و حفظ فرمول بندی مد نظر خطوط تولید کاربرد دارد.

**واژه های کلیدی:** لاستیک، نانورس، آزمون فراصوتی، پردازش تصویر، مدل رگرسیون.

## Analysis of Nanoclay Reinforced Rubber Formulation Using Ultrasonic and Image Processing

A. Foorginejad

Faculty of Mechanical and Materials, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

S. M. Emam

Faculty of Mechanical and Materials, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

M. Taheri

Faculty of Mechanical and Materials, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

## Abstract

Nanoclay is added to rubber formulation to enhance mechanical properties of rubber. In this study, the non-destructive inspection method of ultrasonic waves was used to investigate the nanoclay reinforced rubber formulation. In this method, the time between the transmission and the reflection of ultrasonic waves is measured. Longitudinal propagation velocity is obtained by the thickness of sample divided on time. In this study, an image processing method was used to measure the sample thickness due to the flexibility of rubber materials. By changing raw material composition of the rubber, the physical and mechanical properties of nanoclay reinforced rubber are altering and as a result, the velocity of ultrasonic propagation is changing. To investigate the nanoclay reinforced rubber formulation at first samples with different formulations were prepared and for each of the samples, the propagation velocity of the longitudinal sound waves was measured. Another sample with a new formulation was developed and longitudinal wave velocity was measured for validation of proposed method. The results show that the proposed method can accurately predict longitudinal wave propagation velocity in reinforced rubber formulation. Thus, this method can be used for validation of compound formulation in rubber production lines.

**Keywords:** Rubber, Nanoclay, Ultrasonic, Image processing, Regression Model.

## ۱- مقدمه

طبیعی افزایش چشمگیری در مدول الاستیسیته آن به وجود می‌آید [۱]. ذرات دوده ای کربن با ساختار و اندازه ذرات مناسب، خواص مطلوبی را به ترکیبات لاستیکی می‌بخشد که این به جهت نانو سایز بودن ذرات دوده می‌باشد. اما استفاده از دوده مشکلاتی را به همراه دارد که از آن جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

الف- تولید دوده باعث آلودگی هوا می‌گردد.

ب- استفاده از دوده باعث سیاه شدن محصولات لاستیکی می‌گردد.

خواص منحصر به فرد لاستیک ها به خصوص قابلیت بالای آنها در تغییر شکل که نشاندهنده رفتار ویسکوالاستیک آنها می‌باشد، بزرگترین اعتبار صنعتی این دسته از پلیمرها بشمار می‌رود. مدول الاستیسیته پایین و دوام کم، لاستیک ها را نیازمند استفاده از پرکننده ها به جهت استفاده های کاربردی و صنعتی نموده است. لاستیک ها بطور مرسوم توسط الیاف کوتاه، دوده و سیلیکات ها تقویت می‌شوند. به عنوان مثال با افزودن ده درصد سیلیکات در نقش پرکننده به ترکیب کائوچوی

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: foorginejad@birjandut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۲

تحقیقات نشان داده که ساختار، ویژگی‌های سطحی و به ویژه اندازه ذرات پرکننده، فاکتورهای اساسی در تعیین میزان تقویت کامپوزیت می‌باشند. لذا در چند دهه اخیر کامپوزیت‌هایی که با نانو ذرات پر شده و به نانو کامپوزیت معروف هستند توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است. انتظار می‌رود نانو ذرات به علت نسبت ابعادی (نسبت سطح به حجم) بالاتر در ماتریس بهینه‌تر پراکنده شده و نانو کامپوزیت حاصله خواص فیزیکی- مکانیکی بهتری را بدست آورد. در کامپوزیت‌های پلیمری متداول که از مواد غیرآلی مثل الیاف تقویت‌کننده و مواد معدنی برای تقویت کردن ماتریس پلیمری استفاده می‌شود برهمکنش‌های ضعیفی بین اجزای آلی و غیرآلی وجود داشته که منجر به جدایی فازی می‌شود. لذا به منظور بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی، فیلرهای غیرآلی باید به مقدار زیاد به پلیمر اضافه شوند [۳-۲]. بهبود خواص نانو کامپوزیت، زمانی به حداکثر خود می‌رسد که ذرات در مقیاس نانو در فاز پیوسته لاستیکی پراکنده شوند. حالت ورقه‌ای ایده‌آل ساختاری است که زنجیرهای پلیمری بین صفحات نفوذ کرده و باعث لایه لایه شدن آنها می‌شوند [۴].

روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری خواص محصولات و بررسی کیفیت آنها وجود دارد. در این روش‌ها، علاوه بر اندازه‌گیری‌های ابعادی و بررسی شکل ظاهری محصولات خواص فیزیکی و مکانیکی محصول نیز به منظور بر خورداری از کیفیت لازم مورد آزمایش قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های متداول که در تعیین خواص مواد نیز کاربرد دارد، آزمون فراصوتی می‌باشد. آزمون غیرمخرب فراصوتی 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 گرمایی مواد استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر امواج فراصوتی و اندازه‌گیری میرایی برای ارزیابی کمی میکروساختارها و خواص مکانیکی مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. 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 [۶] سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی و عرضی را 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.

در پژوهش انجام شده توسط الحادک [۷] از امواج فراصوتی برای تعیین همگنی صفحات لاستیکی استفاده گردید، برای دستیابی به هدف اشاره شده، الحادک از روش پالس اکو استفاده 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 [۸] با استفاده از امواج فراصوتی، درصد لاستیک خشک را در محلول‌های شیرابه‌ای مشخص نمودند. حجازی و همکاران [۹] 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. طاهری و همکاران [۱۰] در ارزیابی فرمول‌بندی لاستیک استایرن بوتادین 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.

در این مقاله از روش آزمون غیرمخرب فراصوتی جهت بررسی فرمول‌بندی لاستیک تقویت شده با نانورس استفاده شده است. با توجه به انعطاف‌پذیری لاستیک و عدم امکان اندازه‌گیری ضخامت با دقت بالا توسط وسایل اندازه‌گیری مرسوم تماسی، از روش غیرتماسی مثلث بندی لیزری استفاده شده است.

## ۲- آزمایش‌های تجربی

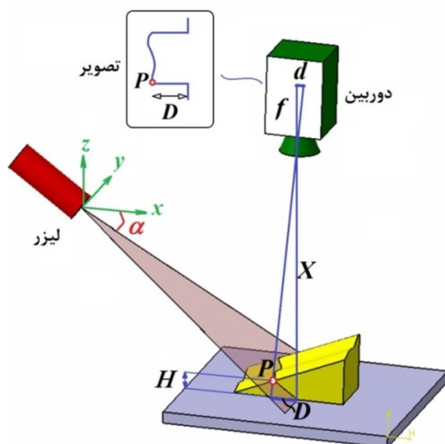
در اختلاط عمدتاً از دو روش خشک و مذاب استفاده می‌شود، در روش خشک مواد به صورت پودر در می‌آیند و سپس اختلاط صورت می‌گیرد. در روش مذاب مواد یا در مخلوط‌کن و یا در اکسترودر به مستریچ افزوده می‌گردند. به منظور تولید لاستیک از روش اختلاط مذاب استفاده گردید. این روش که از بسیاری جهات شبیه به فرآیند آمیزه‌سازی مذاب‌های پلیمری با مواد افزودنی و ذرات پودری می‌باشد یکی از مهمترین و از نظر ماتریس مورد استفاده، از انعطاف پذیرترین روش‌های تولید کامپوزیت محسوب می‌شود. در این روش با توجه به حالت مذاب ماتریس از مخلوط‌کننده‌هایی که توانایی میدان‌های برشی و کششی قوی دارند مانند اکسترودرهای تک پیچه و دوپیچه و مخلوط‌کننده‌های داخلی و اکسترودرهای نیدر دار استفاده می‌گردد. بنابراین انتظار می‌رود که در این روش به غیر از پارامترهای ترمودینامیکی نوع و شدت میدان‌های جریان و یا نیروهای هیدرودینامیکی نقش مهمی در مکانیسم تشکیل ریزساختار ایفا نمایند [۱۱]. لاستیک‌ها 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 تهیه نانو کامپوزیت‌های بر پایه‌ی ماتریس لاستیکی می‌باشد [۱۲].

برای تهیه آمیزه‌های لاستیکی در ابتدا به منظور افزایش فاصله بین صفحات نانورس اقدام به اصلاح نانورس گردید. بدین منظور ۷ گرم نانورس در ۲۵۰ سی سی آب ۸۰ درجه سلسیوس حل شد و به مدت ۹۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه هم زده شد. ۲/۵ گرم استارات روی را در ۱۲۵CC آب ۷۰ درجه سلسیوس حل گردید و به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه هم زده شد و بعد از این مدت CC ۱/۰۵ اسید کلریدریک ۱۲ مولار را بطور آهسته به محلول اضافه

از مزایای اسکنرهای نوری می‌توان به سرعت و دقت بالا اشاره نمود. همچنین با توجه به عدم تماس مکانیکی بین قطعه و اسکنر، خطای اندازه‌گیری به‌طور قابل ملاحظه کاهش می‌یابد.

### ۳-۱- اسکنر لیزری به روش مثلث‌بندی

یکی از معروفترین روش‌های اسکنر نوری، روش مثلث‌بندی نوری می‌باشد [۱۴]. در شکل ۲ طرحواره این اسکنر نشان داده شده است. تغییر شکل پرتو نور بستگی به هندسه سطح جسم در زیر نور لیزر دارد. این پرتو نوری در طول جسم حرکت نمود و مختصات سه بعدی جسم استخراج می‌شود. در این روش تغییرات خط لیزر نسبت به یک سطح مبنای تخت که در زیر قطعه قرار دارد، سنجیده می‌شود.



شکل ۲- ساختار اسکنر مثلث بندی نوری فعال [۱۵]

با توجه به شکل ۲ با داشتن فاصله کانونی دوربین و همچنین فاصله سطح مبنا نسبت دوربین که در قسمت کالیبراسیون محاسبه می‌شود، می‌توان مقدار ارتفاع جسم (H) را در نقاط مورد نظر بدست آورد. به عنوان مثال، مقدار ارتفاع در نقطه P با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد [۱۵].

$$\frac{D}{X} = \frac{d}{f} \Rightarrow D = \frac{Xd}{f} \quad (1)$$

در رابطه فوق f فاصله کانونی و  $\alpha$  زاویه تابش لیزر نسبت به افق می‌باشد

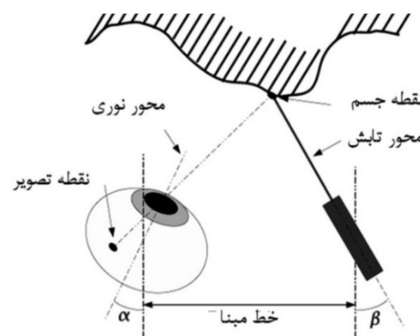
گردید و عمل هم زدن را به مدت ۵ دقیقه دیگر ادامه یافت. اکنون بعد از گذشت زمان ۹۰ دقیقه ظرف یک، محلول ظرف ۲ را به ظرف یک اضافه شد و محلول جدید را به مدت ۹۰ دقیقه دیگر با سرعت ۴۰۰ دور در دقیقه هم زده شد. پس از گذشت این زمان محلول را توسط سود ۶ مولار تیتیر کرده تا PH محیط در حدود ۷ قرار گیرد. اکنون مبادرت به صاف کردن محلول کرده و پس از صاف کردن، رسوب حاصل را با ۵۰۰CC آب ۵۰ درجه سلسیوس شستشو داده شد. در نهایت رسوب به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. اصلاح نانورس منجر به افزایش حجم آن می‌گردد که برای یک ماده با ماهیت پرکنندگی مفید محسوب می‌شود.

در پژوهش حاضر به منظور بررسی ارتباط بین فرمول‌بندی لاستیک تقویت شده با نانورس و سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی تعداد ۱۶ نمونه لاستیک با فرمول‌بندی‌های متفاوت تولید گردید. از این میان ۱۵ نمونه برای تعیین ارتباط فرمول‌بندی و سرعت امواج مورد استفاده قرار گرفت و یک نمونه نیز برای صحت‌سنجی نتایج بدست آمده استفاده می‌شود. تهیه آمیزه‌ها در دو مرحله انجام گردید.

در مرحله اول برای هریک از ۱۵ نمونه یک مستریج<sup>۱</sup> طبق جدول ۱ آماده گردید و با ترکیب مستریج با عناصر مندرج در جدول ۲ ترکیب نهایی آمیزه‌ها بدست آمد.

### ۳- تعیین ضخامت نمونه‌ها با پردازش تصویر

با توجه به انعطاف‌پذیری لاستیک در هنگام اندازه‌گیری ضخامت، استفاده از ابزار مکانیکی مثل کولیس یا میکرومتر باعث ایجاد خطا خواهد گردید. لذا در این مقاله به منظور کاهش منابع خطا، با استفاده از اسکنر غیرتماسی اندازه‌گیری انجام شده است. در این نوع اسکنرها، با استفاده از منابع مختلف انرژی مثل امواج صوتی و یا نوری، ابعاد قطعات استخراج می‌شود [۱۳]. شکل ۱ اصول کار یک اسکنر نوری را نشان می‌دهد. پس از برخورد نور با سطح قطعه، دوربین از جسم تصویر تهیه می‌کند. چشم انسان قادر به محاسبه فاصله به طور نسبی (و نه دقیق) و همچنین تشخیص مشخصات بافت سطح قطعه است، در حالیکه سیستم‌های نوری مختصات دقیق قطعه را بازبایی می‌کنند.

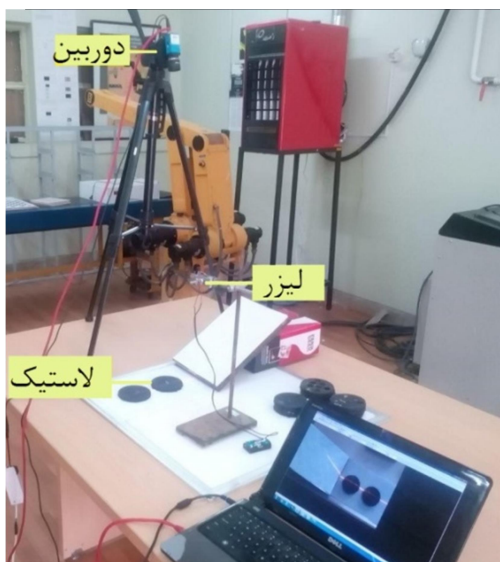


شکل ۱- اصول کار اسکنر نوری

<sup>1</sup> Masterbatch

جدول ۱- فرمول بندی پایه لاستیک تقویت شده با نانورس

| شماره نمونه | REOWAX | 6PPD | ANOX | ZnO   | S.A   | OIL   | NC    | N335   | BR cis | SBR1500 | SMR20  |
|-------------|--------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|--------|
|             | gr     | gr   | gr   | gr    | gr    | gr    | gr    | gr     | gr     | gr      | gr     |
| ۱           | 12.34  | 9.04 | 6.17 | 24.69 | 12.34 | 48.88 | 30.55 | 244.91 | 64.16  | 244.91  | 301.99 |
| ۲           | 12.6   | 9.23 | 6.3  | 25.2  | 12.6  | 28.93 | 31.19 | 250.05 | 65.51  | 250.05  | 308.32 |
| ۳           | 12.34  | 9.04 | 6.17 | 24.69 | 12.34 | 48.88 | 30.55 | 244.9  | 28.19  | 244.9   | 338.02 |
| ۴           | 12.5   | 9.16 | 6.25 | 24.99 | 12.5  | 37.12 | 30.93 | 247.94 | 86.61  | 247.94  | 284.07 |
| ۵           | 12.34  | 9.04 | 6.17 | 24.69 | 12.34 | 48.89 | 30.55 | 244.93 | 100.14 | 244.93  | 265.95 |
| ۶           | 12.34  | 9.04 | 6.17 | 24.69 | 12.34 | 48.88 | 30.55 | 244.91 | 64.16  | 244.91  | 301.99 |
| ۷           | 12.1   | 8.86 | 6.05 | 24.19 | 12.1  | 68.04 | 29.94 | 239.99 | 62.87  | 239.99  | 295.91 |
| ۸           | 12.5   | 9.16 | 6.25 | 24.99 | 12.5  | 37.12 | 30.93 | 247.94 | 86.61  | 247.94  | 284.07 |
| ۹           | 12.5   | 9.16 | 6.25 | 24.99 | 12.5  | 37.12 | 30.93 | 247.94 | 43.3   | 247.94  | 327.37 |
| ۱۰          | 12.34  | 9.04 | 6.17 | 24.69 | 12.34 | 48.88 | 30.55 | 244.91 | 64.16  | 244.91  | 301.99 |
| ۱۱          | 12.19  | 8.93 | 6.1  | 24.39 | 12.19 | 60.37 | 30.18 | 241.96 | 84.52  | 241.96  | 277.21 |
| ۱۲          | 12.34  | 9.04 | 6.17 | 24.69 | 12.34 | 48.88 | 30.55 | 244.91 | 64.16  | 244.91  | 301.99 |
| ۱۳          | 12.19  | 8.93 | 6.1  | 24.39 | 12.19 | 60.37 | 30.18 | 241.96 | 42.26  | 241.96  | 319.47 |
| ۱۴          | 12.5   | 9.16 | 6.25 | 24.99 | 12.5  | 37.12 | 30.93 | 247.94 | 43.3   | 247.94  | 327.37 |
| ۱۵          | 12.19  | 8.93 | 6.1  | 24.39 | 12.19 | 60.37 | 30.18 | 241.96 | 84.52  | 241.96  | 277.21 |



شکل ۳- اجزاء سخت افزاری اسکنر لیزری

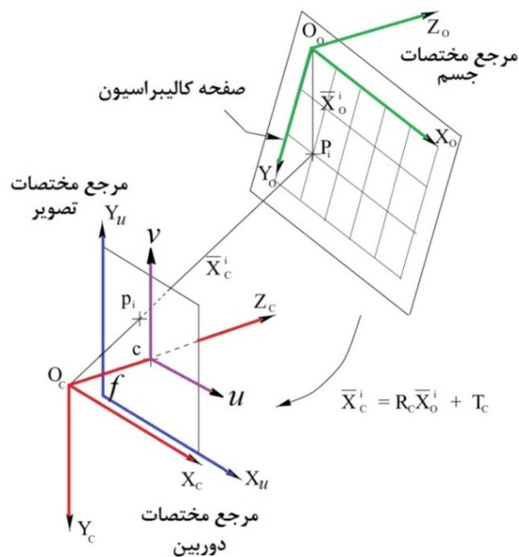
جدول ۲- فرمول بندی نهایی لاستیک

| شماره نمونه | S    | CBS  | OBTS | Master |
|-------------|------|------|------|--------|
|             | gr   | gr   | gr   | gr     |
| ۱           | 5.56 | 1.35 | 1.23 | 491.86 |
| ۲           | 5.67 | 1.38 | 1.26 | 491.69 |
| ۳           | 5.56 | 1.35 | 1.23 | 491.87 |
| ۴           | 5.18 | 1.37 | 1.25 | 492.21 |
| ۵           | 5.56 | 1.35 | 1.23 | 491.86 |
| ۶           | 6.31 | 1.35 | 1.23 | 491.12 |
| ۷           | 5.45 | 1.33 | 1.21 | 492.03 |
| ۸           | 6.08 | 1.37 | 1.25 | 491.31 |
| ۹           | 6.08 | 1.37 | 1.25 | 491.31 |
| ۱۰          | 4.81 | 1.35 | 1.23 | 492.6  |
| ۱۱          | 5.93 | 1.34 | 1.22 | 491.51 |
| ۱۲          | 5.56 | 1.35 | 1.23 | 491.86 |
| ۱۳          | 5.05 | 1.34 | 1.22 | 492.39 |
| ۱۴          | 5.18 | 1.37 | 1.25 | 492.21 |
| ۱۵          | 5.05 | 1.34 | 1.22 | 492.39 |

۲-۳- پیاده سازی سیستم اسکنر مثلث بندی

در شکل ۳ اجزاء سخت افزاری جهت ساخت سیستم اسکنر لیزری نشان داده شده است.

در این مقاله از دوربین GigeE مدل DFK 23GX236 با آرایه سنسور CMOS استفاده شده است که یک دوربین ویدیویی رنگی با سنسور ۱/۲.۸ اینچ و اندازه ۲۹(H)×۲۹(D)×۵۷(W) میلی متر مکعب و عکس های گرفته شده توسط آن دارای رزولوشن ۱۹۲۰(H)×۱۲۰۰(V) می باشد. برای دوربین از لنز Computar مدل M0814-MP2 استفاده شده است که این لنز از نوع C-mount با فاصله کانونی ۸ میلی متر می باشد. مطابق شکل ۴، یک لیزر با الگوی تابش خطی از مدل UHL5-G10-635-90 انتخاب شده است.



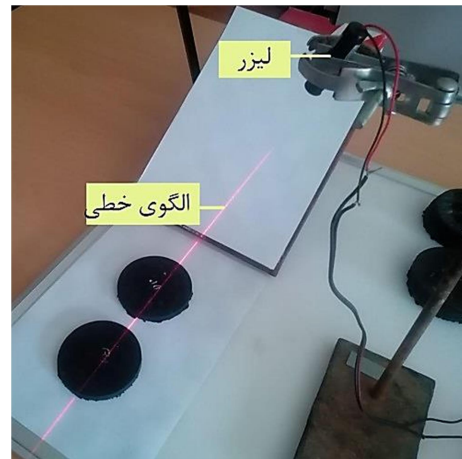
شکل ۵- تبدیلات پرسپکتیو در فرایند کالیبراسیون [۱۵]

با استفاده از ماتریس دوران  $R_c$  و ماتریس انتقال  $T_c$ ، نقاط واقع در صفحه شطرنجی از مرجع مختصات واقع در آن به مرجع مختصات دوربین انتقال می‌یابد، رابطه (۲).

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R_c \times \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + T_c \quad (2)$$

$(x_c, y_c, z_c)$  مختصات هر نقطه در مرجع دوربین و  $(x_0, y_0, z_0)$  موقعیت نقطه متناظر آن در دستگاه مختصات صفحه کالیبراسیون می‌باشد. یکی از مهمترین منابع خطا در حین فرایند کالیبراسیون، اعوجاج لنز می‌باشد که باعث بروز خطای شعاعی و مماسی در حین انتقال نقاط از مرجع مختصات صفحه کالیبراسیون به صفحه تصویر می‌شود. در خطای شعاعی با توجه به کاهش دقت ساخت لبه‌های لنز نسبت به مرکز آن، نقاط تصویر در راستای شعاع لنز جابجا خواهند شد (کشیدگی تصویر). از سوی دیگر به دلیل قرار نگرفتن محور اپتیکی دو طرف لنز در یک راستا، خطای مماسی در حین ثبت نقاط تصویر بروز خواهد داد. در این مقاله از روش ترکیبی هیکیلا و فاگراس برای کالیبراسیون استفاده شده است [۱۵].

برای استخراج پارامترهای کالیبراسیون شامل ماتریس انتقال و ماتریس دوران با دقت قابل قبول، با توجه به صفحه کالیبراسیون انتخاب شده مطابق شکل ۶، از ۴۸ نقطه موجود در آن استفاده شده است.

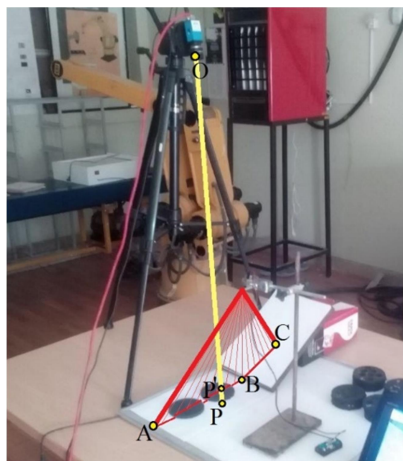


شکل ۴- لیزر با الگوی تابش خطی

این دیود نوری دارای زاویه لنز ۹۰ درجه و طول موج ۶۳۵ نانومتر می‌باشد. کلاس ایمنی لیزر II و دارای شدت روشنایی گوسی است. با استفاده از لیزر انتخاب شده، می‌توان در فاصله کاری ۳ متر، خط اثری با طول ۶ متر ایجاد نمود.

### ۳-۳- کالیبراسیون دوربین

مهمترین بخش، قبل از بازیابی مدل با استفاده از روش‌های اپتیکی، عملیات کالیبراسیون می‌باشد. با انجام این مرحله امکان تبدیل مختصات جسم از واحد تصویر (پیکسل) به واحد متریک مورد نظر، امکان‌پذیر می‌باشد. طی فرایند کالیبراسیون، عوامل بیرونی و درونی نسبت به سیستم مختصات جهانی تعیین می‌شوند. عوامل بیرونی شامل بردار موقعیت و ماتریس چرخش مبدأ دوربین نسبت به مبدأ مختصات کلی می‌باشد. عوامل درونی شامل فاصله کانونی  $f$ ، مرکز تصویر، نسبت تصویر و پارامترهای تصحیح خطای سخت‌افزاری می‌باشند. یکی از متداولترین روش‌های کالیبراسیون، استفاده از صفحه شطرنجی مطابق شکل ۵ و برقراری ارتباط بین نقاط واقع در آن و نقاط متناظرشان در تصویر می‌باشد.



شکل ۸- استخراج عمق نقطه P با استفاده از روش مثلث بندی

با توجه به شکل ۸ نقاط A و B بر روی خط حاصل از برخورد صفحه تابش لیزر با صفحه کالیبراسیون اول و نقطه C روی خط ایجاد شده از تداخل با صفحه کالیبراسیون دوم می باشد. بنابراین صفحه ای که از این سه نقطه می گذرد، همان صفحه تابش لیزر است. صفحه ای که از سه نقطه A، B و C می گذرد، با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه می باشد.

$$N_x x + N_y y + N_z z - N_x A_x - N_y A_y - N_z A_z = 0$$

$$N = (\overline{BA} \times \overline{CA}) = (N_x, N_y, N_z) \quad (3)$$

بردار نرمال  $\vec{N}$  این صفحه با استفاده از ضرب خارجی بردار BA و CA محاسبه می شود. خط OP از نقطه واقع بر روی صفحه کالیبراسیون (تصویر نقاط مورد نظر جهت اندازه گیری بر روی صفحه کالیبراسیون) و نقطه مرجع تصویربرداری که در زمان کالیبراسیون بدست آمده، عبور می کند. با استفاده از رابطه (۴) معادله پارامتری خط OP محاسبه می شود.

$$x = O_x + t(P_x - O_x)$$

$$y = O_y + t(P_y - O_y)$$

$$z = O_z + t(P_z - O_z) \quad (4)$$

از برخورد خط OP و صفحه تابش ABC مختصات نقطه متناظر بر روی تصویر P در فضای سه بعدی P' استخراج خواهد شد. بنابراین با جایگذاری رابطه (۴) در رابطه (۳) مقدار t با استفاده از رابطه (۵) بدست خواهد آمد.

$$t = \frac{N_x A_x + N_y A_y + N_z A_z - N_x O_x - N_y O_y - N_z O_z}{N_x (P_x - O_x) + N_y (P_y - O_y) + N_z (P_z - O_z)} \quad (5)$$

مختصات نقطه واقع بر روی خط که در معادله صفحه صدق می کند با استفاده از رابطه (۵) قابل محاسبه است.

در شکل ۹ عکس اولیه قبل از انجام هرگونه پردازشی نشان داده شده است. پس از لبه یابی و حذف نویز، تصویر خروجی از این مرحله به صورت باینری تبدیل شده و به عنوان ورودی به بخش محاسبات فرستاده می شود.

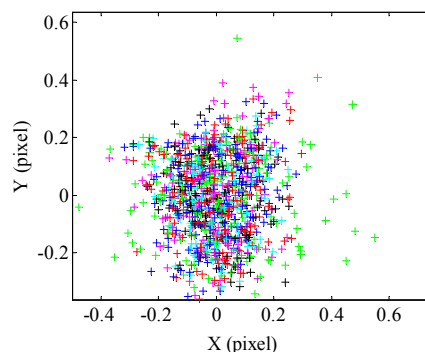


شکل ۶- خطای کالیبراسیون برای نقاط صفحات کالیبراسیون

در نهایت با جایجا کردن صفحه کالیبراسیون در ۲۰ موقعیت مختلف، محدوده فضایی که قرار است در آن اندازه گیری انجام شود کالیبره خواهد شد. پس از یافتن پارامترهای کالیبراسیون و برقراری رابطه مجدد بین نقاط متناظر در صفحه کالیبراسیون و تصویر، برای تمام نقاط، مقدار خطای بین محل واقعی نقاط تصویر و نقاط استخراج شده بر حسب پیکسل در شکل ۷ نشان داده شده است. مقدار میانگین خطا در راستای X و Y به ترتیب برابر ۰/۱۶۳۹ پیکسل و ۰/۱۸۷۶ پیکسل می باشد.

### ۳-۴- روابط ریاضی جهت محاسبه ضخامت نمونه ها

برای محاسبه عمق با استفاده از الگوریتم مثلث بندی، می بایست موقعیت زاویه ای لیزر را استخراج نمود. استفاده از وسایل مکانیکی جهت یافتن زاویه لیزر با خطا قابل ملاحظه ای همراه است، بنابراین در این مقاله مطابق شکل ۶ از دو صفحه کالیبراسیون استفاده شده است. با توجه به شکل ۸ مشاهده می شود که از برخورد صفحه تابش لیزر با هر صفحه کالیبراسیون، یک خط ایجاد می شود. بنابراین با استفاده از هندسه صفحه ای که از این دو خط (یا سه نقطه ای که بر روی این دو خط قرار دارد) خواهد گذشت امکان تعیین زاویه تابش لیزر و بازیابی مدل امکان پذیر خواهد شد.

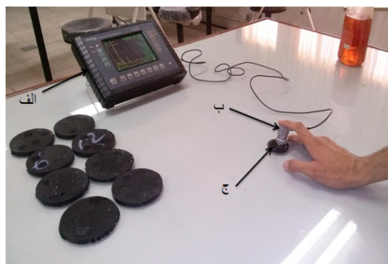


شکل ۷- خطای کالیبراسیون برای نقاط صفحات کالیبراسیون

لاستیک‌ها [۱۶]، 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 ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به این که 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 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 ۳ سرعت امواج فراصوتی طولی درون آمیزه‌ها گزارش شده است.



شکل ۱۱- سامانه اندازه‌گیری سرعت امواج فراصوتی: الف- دستگاه فراصوتی، ب- تراگذار و ج- نمونه آمیزه لاستیکی.

برای مدل رگرسیونی، از نرم افزار آماری SPSS استفاده شده و به منظور رفع اختلاف ابعادی دو سوی معادله، داده‌ها قبل از استفاده توسط رابطه (۶) نرمال سازی شده تا هم داده‌ها در بازه معینی قرار گیرند و هم رابطه به دست آمده بی بعد باشد.

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (6)$$

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

بر این اساس، رابطه (۷) نرمال شده سرعت امواج فراصوتی طولی درون آمیزه را در این فرآیند مدل می‌نماید.

$$v_c = 0.91 - 1.813A - 0.57B + 0.004C + 1.288D + 0.021E \quad (7)$$

که در این رابطه

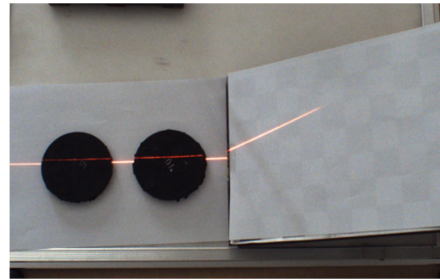
6PPD .A

ZnO .B

SMR20 .C

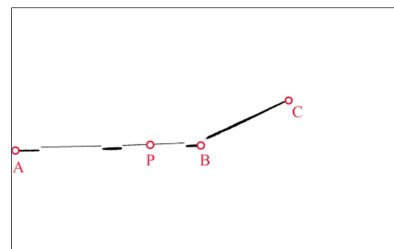
OBTS .D

S, E می‌باشند.



شکل ۹- تصویر اولیه قبل از پردازش تصویر

با اعمال پردازش تصویر و بکارگیری فیلترهای مناسبی مثل هموارسازی، نقاط روی سطح نمونه‌ها برای محاسبه عمق استخراج می‌گردند. شکل ۱۰ تصویر نهایی پس از اتمام مراحل پردازش را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با توجه به اختلاف در شدت روشنایی نور لیزر از بقیه تصویر، استخراج پروفیل جسم (خط لیزر) امکان‌پذیر می‌باشد.



شکل ۱۰- تصویر اولیه قبل از پردازش تصویر

بعد از انجام فرایند کالیبراسیون که در بخش کالیبراسیون دوربین ارائه گردید، پارامترهای لازم جهت تبدیل موقعیت نقاط (P) در تصویر نهایی (پس از اعمال پردازش تصویر)، از واحد پیکسل به مختصات واقعی استخراج می‌شود.

#### ۴- آزمون فراصوتی

به منظور بررسی ارتباط فرمول‌بندی لاستیک تقویت شده با نانورس با سرعت انتشار امواج فراصوتی، سرعت انتشار امواج طولی برای هر نمونه اندازه‌گیری شد. بدین منظور از دستگاه آزمون فراصوتی با نام تجاری تروسونیک<sup>۱</sup> استفاده گردید. سرعت انتشار امواج از تقسیم ضخامت نمونه‌ها بر نصف زمان رفت و برگشت امواج بدست می‌آید. ضخامت نمونه‌ها با کمک پردازش تصویر بدست می‌آید 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

<sup>1</sup> Tru-sonic

با مقایسه ضرایب رابطه (۷) با هم‌دیگر اولویت و میزان تاثیر هر یک از عوامل مشخص می‌شود. بزرگی ضرایب نشان‌دهنده میزان تاثیر عناصر بر سرعت انتشار امواج دارد. عناصر دارای ضریب مثبت باعث افزایش سرعت انتشار امواج می‌شوند و ضرایب منفی کاهش سرعت را در پی خواهند داشت.

## ۵- بحث و نتایج

امواج صوتی از نوع امواج الاستیک محسوب می‌گردد. خواص الاستیک مواد بر اساس 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 صوتی تحت تاثیر قرار خواهد گرفت [۱۷]. در پژوهش حاضر به منظور بررسی فرمول‌بندی آمیزه‌های لاستیک تقویت شده با نانورس از روش غیر مخرب فراصوتی استفاده شد.

جدول ۳- سرعت امواج طولی به دست آمده از آزمایش و مدل

| رگرسیون     |                    |                 |
|-------------|--------------------|-----------------|
| شماره نمونه | سرعت امواج فراصوتی | مقدار نرمال شده |
|             | بدست آمده از       | سرعت انتشار     |
|             | آزمایش m/s         |                 |
| ۱           | 1555.5             | 0.967652        |
| ۲           | 1575               | 0.979782        |
| ۳           | 1561               | 0.971073        |
| ۴           | 1551.667           | 0.965267        |
| ۵           | 1580.5             | 0.983204        |
| ۶           | 1559               | 0.969829        |
| ۷           | 1570.33            | 0.976877        |
| ۸           | 1571.667           | 0.977709        |
| ۹           | 1607.5             | 1               |
| ۱۰          | 1578               | 0.981649        |
| ۱۱          | 1580.33            | 0.983098        |
| ۱۲          | 1581.5             | 0.983826        |
| ۱۳          | 1564.667           | 0.973354        |
| ۱۴          | 1574               | 0.97916         |
| ۱۵          | 1584.33            | 0.985586        |

جدول ۴- سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی به دست آمده از

| آزمایش و مدل رگرسیون |                                     |                                          |
|----------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|
| شماره نمونه          | سرعت امواج صوتی بدست آمده از آزمایش | سرعت امواج صوتی بدست آمده از مدل رگرسیون |
|                      | m/s                                 | m/s                                      |
| ۱                    | 1555.5                              | 11569.105                                |
| ۲                    | 1575                                | 1577.791                                 |
| ۳                    | 1561                                | 1569.79                                  |
| ۴                    | 1551.667                            | 1572.69                                  |
| ۵                    | 1580.5                              | 1568.419                                 |
| ۶                    | 1559                                | 1573.117                                 |
| ۷                    | 1570.33                             | 1574.064                                 |
| ۸                    | 1571.667                            | 1577.505                                 |
| ۹                    | 1607.5                              | 1578.328                                 |
| ۱۰                   | 1578                                | 1565.092                                 |
| ۱۱                   | 1580.33                             | 1577.929                                 |
| ۱۲                   | 1581.5                              | 1569.105                                 |
| ۱۳                   | 1564.667                            | 1574.025                                 |
| ۱۴                   | 1574                                | 1573.513                                 |
| ۱۵                   | 1584.33                             | 1573.221                                 |

یکی از منابع ایجاد خطا در اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج در لاستیک‌ها اندازه‌گیری ضخامت نمونه‌ها با استفاده از وسایل مکانیکی، بدلیل انعطاف‌پذیر بودن آن‌ها است. در این پژوهش برای اندازه‌گیری سرعت انتشار امواج فراصوتی در آمیزه‌ها از پردازش تصویر استفاده شد تا این منبع ایجاد خطا حذف گردد. 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 شماره ۴ آمده است. میانگین مقادیر خطا در پیش‌بینی سرعت انتشار امواج برابر ۰/۶۸ درصد است. بررسی مقادیر خطا نشان از مناسب بودن مدل پیشنهادی در تخمین سرعت انتشار امواج صوتی در آمیزه‌های لاستیکی دارد.

صحت‌سنجی مدل پیشنهادی با بررسی سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی در آمیزه لاستیکی دیگری با فرمول‌بندی متفاوت انجام گردید. فرمول‌بندی لاستیک تقویت شده با نانورس که برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت در جدول شماره ۵ آمده است. مقدار سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی به دست آمده از آزمایش و مدل رگرسیون چند گانه خطی برای نمونه ساخته شده به ترتیب برابر ۱۵۸۷/۳۳ و ۱۵۷۸/۷۳ متر بر ثانیه می‌باشند. درصد خطای پیش‌بینی سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی برای نمونه صحت‌سنجی برابر ۰/۵۴ می‌باشد.

## ۷- قدردانی

نویسندگان بدینوسیله از شرکت محترم کویر تایر که در تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها همکاری لازم را اتخاذ نموده است، کمال تشکر را دارند.

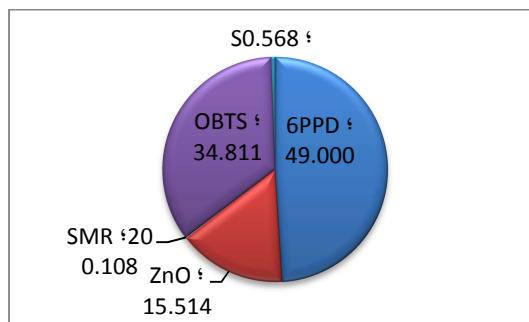
## ۸- مراجع

- [1] Varghese, S., Karger-Kocsis, J., Natural rubber-based nanocomposites by latex compounding with layered silicates, *Polymer*, Vol. 44, pp. 4921-4927, 2003.
- [2] Lee, K.Y., Goettler, L. A., Structure-property relationships in polymer blend nanocomposite, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 44, pp. 1103-1111, 2004.
- [3] Mathew, S., Varghese, S., Rajamal, G., Thomas, P.C., Dipping characteristics of layered silicates-natural rubber latex nanocomposites, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.104, pp. 58-65, 2007.
- [4] Lu, Y.L., Li, Z., Yu, Z.Z., Tian, M., Zhang, L.Q., Mai, Y.W., Microstructure and properties of highly filled rubber/clay nanocomposites prepared by melt blending, *Composites Science and Technology*, 67, pp. 2903-2913, 2007.
- [5] Rajendran V., Muthu Kumaran S., Jayakumar T., Palanichamy P., Shankar P., Baldev, Microstructure and ultrasonic behaviour on thermal heat-treated Al-Li 8090, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 478, pp.147-153, 2009.
- [6] Afifi A., El Sayed M., Ultrasonic properties of ENR-EPDM rubber blends, *Polymer Bulletin*, Vol. 50, No. 1, pp. 115-122, 2003.
- [7] El-Hadek M., Fracture mechanics of rubber epoxy composites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 45, No. 9, pp. 4046-4054, 2014.
- [8] Kerdtongmee P., Pumdang C., Danworaphong S., Quantifying Dry Rubber Content in Latex Solution Using an Ultrasonic Pulse, *Measurement Science Review*, Vol. 14, No. 5, pp.252-256, 2014.
- [9] Higazy A.A., Afifi H., Khafagy A.H., El-Shahawy M.A., Mansour A.M., Ultrasonic studies on polystyrene/styrene butadiene rubber polymer blends filled with glass fiber and talc, *Ultrasonics*, Vol. 44, No. 1, pp.1439-1445, 2006.
- [10] Taheri M., Foorginejad A., Shiva M., Emam S. M., Haddadi A., Investigation of rubber formulation by measuring ultrasonic propagation velocity, *Journal of solid and fluid mechanics*, Vol. 6, No. 2, pp.285-294, 2016.
- [11] Hocine, N.A., Mederic, P., Aubry, T., Mechanical properties of polyamide-layered silicate nanocomposite and their relation with structure, *Polymer Testing*, 27, pp. 330-339, 2008.
- [12] Lopez-Manchado, M.A., Herrero, B., Arroyo, M., Preparation and characterization of organoclaynanocomposites based on natural rubber, *Polymer International*, 52, pp. 1070-1077, 2003.
- [13] Bi Z. M., Lihui W., Advances in 3d data acquisition and processing for industrial applications, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 26, pp. 403-413, 2010.
- [14] Basaca-Preciado L.C., Sergiyenko O.Y., Rodriguez-Quinonez J.C., Rivas-Lopez M., Optoelectronic 3D laser scanning technical vision system based on dynamic triangulation, *Photonics Conference (IPC)*, pp:648-649, 2012.
- [15] Khalil, Kh., Khatibi, S., & Emam, S. M. Improving the Accuracy of Laser Scanning using Dithering Technique and Simultaneous Laser and Camera Calibration. *Journal of the Mechanical Engineering*, The university of Tarbiat Modares, 13(2), 79-92, 2013. (in Persian).
- [16] Hall B., John V., Non-destructive testing, pp. 63-95, London: Macmillan Education, 1988.
- [17] Hamidnia M., Honarvar F., Khorsand H., 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).

جدول ۵- فرمول بندی آمیزه صحت‌سنجی

| ترکیب نمونه  | مقدار عناصر موجود در ترکیب | مقدار نرمال شده عناصر موجود در ترکیب |
|--------------|----------------------------|--------------------------------------|
| REOWAX (gr)  | 319.47                     | 0.9675                               |
| 6PPD (gr)    | 241.96                     | 0.9675                               |
| ANOX (gr)    | 42.26                      | 0.9683                               |
| ZnO (gr)     | 241.96                     | 0.9679                               |
| S.A (gr)     | 30.18                      | 0.9675                               |
| OIL (gr)     | 60.37                      | 0.8873                               |
| NC (gr)      | 12.19                      | 0.9676                               |
| N335 (gr)    | 24.39                      | 0.9676                               |
| SMR20 (gr)   | 6.1                        | 0.9451                               |
| SBR1500 (gr) | 8.93                       | 0.9676                               |
| BR cis (gr)  | 12.19                      | 0.4220                               |
| OBTS (gr)    | 1.22                       | 0.9683                               |
| CBS (gr)     | 1.34                       | 0.9710                               |
| S (gr)       | 5.93                       | 0.9398                               |

میزان تاثیر مواد بکار رفته در فرمول بندی لاستیک تقویت شده با نانورس بر روی سرعت انتشار امواج فراصوتی طولی طبق رابطه (۷) مشخص می‌شود که مقدار تاثیر هر یک از مواد در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- عناصر تاثیرگذار بر روی سرعت انتشار امواج صوتی و میزان تاثیر آن‌ها

## ۶- نتیجه‌گیری

عناصر تشکیل‌دهنده فرمول بندی لاستیک تاثیر بسزایی بر روی خواص مکانیک و فیزیکی لاستیک داشته و با تغییر مقدار آن‌ها در فرمول بندی لاستیک خواص لاستیک تحت تاثیر قرار گرفته و تغییر می‌کنند. بنابراین حفظ فرمول بندی لاستیک در خطوط تولید برای حفظ خواص مد نظر تولیدکننده امری حیاتی محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر به منظور حفظ فرمول بندی لاستیک استفاده از امواج فراصوتی و بررسی سرعت انتشار آن‌ها به کمک تکنیک پردازش تصویر پیشنهاد گردید و بر روی لاستیک تقویت شده با نانورس روش پیشنهادی ارزیابی گردید. نتایج حاصل از آزمایش‌ها و صحت‌سنجی صورت پذیرفته نشان داد که روش ارائه شده با دقت مناسبی قادر به تشخیص صحت فرمول بندی است و اگر فرمول بندی لاستیک تغییر نماید در نتیجه آن سرعت انتشار امواج فراصوتی تغییر خواهد نمود. خطای کم بدست آمده در نمونه صحت‌سنجی شده نشان از کاربردی بودن روش ارائه شده دارد.