

Numerical evaluation of hyperelastic material models in order to estimate the experimentally measured longitudinal ultrasonic wave in polyurethane specimen

Mohammad Khorami Neishaboort¹  | Shahram Etemadi Haghighi¹  | Mohammadhossein Soorgee²  | Adel Maghsoudpour¹ 

1. Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran. E-mail: setemadi@srbiau.ac.ir
2. Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: mh_soorgee@sbu.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 09 May 2025

Revised 23 August 2025

Accepted 19 Feb. 2026

Keywords:

Intelligent pig,
Hyperelastic polyurethane disc,
Ultrasonic Material Evaluation,
Finite Element Modeling.

ABSTRACT

In this research, ultrasonic wave propagation and velocity measurement in a hyperelastic material is performed both experimentally and numerically, in order to develop a methodology for curing quality assessment and defect characterization in polyurethane discs used in oil and gas pipeline pigs. A polyurethane cylinder, some density measurement samples and some tensile test specimens have been produced, followed by extracting the density and tensile test results from experimental Lab. tests. Moreover, a through transmission ultrasonic test using a set of longitudinal 120 kHz probes has been performed and wave velocity in the polyurethane specimen has been measured several times. In order to develop a proper numerical model for further studies on defects effect on ultrasound wave, the hyperelastic material model and Poisson ratio effect on ultrasonic wave features must be studied. In this research, three material models, including Neo-Hook, Mooney Rivlin and Yeoh have been fitted to the tensile test results, followed by numerical simulation of ultrasonic wave propagation and velocity measurement. The material model and Poisson ratio outcome on ultrasonic wave velocity have been studied, while other wave features like amplitude and attenuation have not been considered. Results shows that for the employed polyurethane material, with available density and tensile test results from experimental Lab. test, the Yeoh and Mooney Rivlin hyperelastic models provides compatible numerical results with the experimentally measured wave speed

Cite this article: Khorami Neishaboort, M., Etemadi Haghighi, S., Soorgee, M. & Maghsoudpour, A. (2026). Numerical evaluation of hyperelastic material models in order to estimate the experimentally measured longitudinal ultrasonic wave in polyurethane specimen. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 4 (2), 1-9.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.520329.1163>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

ارزیابی عددی مدل‌های رفتاری ماده‌های پیرالاستیک به منظور تخمین سرعت موج فراصوتی طولی تجربی در نمونه پلی‌یورتانی

محمد خرمی نیشابور^۱ | شهرام اعتمادی حقیقی^۱ | محمد حسین سورگی^۲، عادل مقصود پور^۱

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، رایانامه:

setemadi@srbiau.ac.ir

۲. دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، رایانامه: mh_soorgee@sbu.ac.ir

چکیده:

در این پژوهش به منظور تدوین یک روش بازرسی فراصوتی برای اطمینان از کیفیت پخت و عدم وجود نقص در دیسک‌های پلی‌یورتانی توپک‌های مورد استفاده در صنعت خط لوله انتقال نفت و گاز، مبانی انتشار امواج فراصوتی و اندازه‌گیری سرعت این امواج در نمونه‌ای تجربی و سپس مدلی عددی بررسی می‌گردد. یک استوانه پلی‌یورتانی، تعدادی نمونه چگالی سنجی و تعدادی نمونه آزمون کشش تولید شده و خواص کششی با استفاده از آزمون کشش تک محوره و همچنین چگالی نمونه به صورت تجربی با استفاده از اندازه‌گیری حجم و جرم اندازه‌گیری گشته است. سپس سرعت موج طولی به روش فراصوتی و با آرایش ارسال دریافت به صورت تجربی با تراگذارهای با فرکانس ۱۲۰ کیلوهرتز استخراج می‌گردد. به منظور توسعه مدل شبیه‌سازی مناسب جهت مطالعات بعدی و مطالعه اثر عیوب مختلف در مدل شبیه‌سازی، ابتدا می‌بایست اثر مدل‌های رفتاری مختلف ماده‌های پیرالاستیک و همچنین ضریب پواسون بر شاخص‌های انتشار موج بررسی گردد. به این منظور، سه مدل رفتاری یوه، نئو هوک و مونی ریولین به داده‌های آزمون کشش تک محوره برازش شده، و سپس سرعت موج در شبیه‌سازی عددی با استفاده از این سه مدل، استخراج گشته و با نتایج آزمون تجربی فراصوتی مقایسه گردیده است. در این پژوهش اثر مدل رفتاری ماده و ضریب پواسون بر سرعت موج بررسی گردیده و سایر شاخص‌ها مانند دامنه و استهلاک در این پژوهش بررسی نگردیده است. نتایج نشان می‌دهد برای ماده پلی‌یورتان استفاده شده، با داشتن چگالی و منحنی آزمون کشش تک محوره، مدل رفتاری یوه و سپس مونی ریولین نتایج نزدیکتری به آزمون تجربی را از نظر تطابق سرعت موج طولی، با خطای کمتر از یک درصد، در بردارد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۲/۱۹

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۱۱/۳۰

کلیدواژگان:

توپک هوشمند،

دیسک پلی‌یورتانی

هایپرالاستیک،

ارزیابی فراصوتی مواد،

شبیه‌سازی اجزاء محدود

استناد: خرمی نیشابور، محمد؛ اعتمادی حقیقی، شهرام؛ سورگی، محمد حسین و مقصود پور، عادل. (۱۴۰۴). ارزیابی عددی مدل‌های رفتاری ماده‌های پیرالاستیک به منظور تخمین سرعت موج فراصوتی طولی تجربی در نمونه پلی‌یورتانی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۴ (۲)، ۹-۱.

© نویسندگان

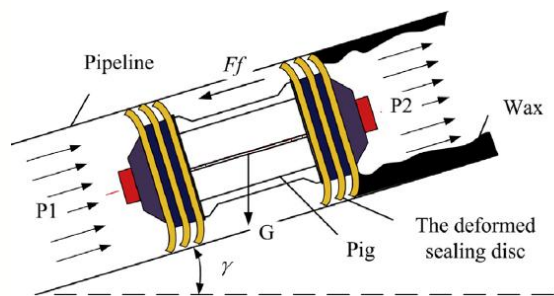
ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.520329.1163>



۱- مقدمه

روش عمده برای ارزیابی خواص مکانیکی دیسک‌های پلی یورتانی وجود دارد که روش‌های مخرب مانند آزمون کشش، آزمون برش و آزمون سایش است و دسته دوم روش‌های غیر مخرب مانند استفاده از آزمون فراصوتی است. برای استفاده از آزمون غیر مخرب فراصوتی در پلی‌یورتان، می‌بایست ابتدا اصول و مبانی انتشار امواج فراصوتی در ماده هایپراالاستیک مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۱. نمای شماتیکی از یک توپک درون خط لوله با المان‌های پلیمری تغییر شکل داده شده [۲]

انتشار امواج فراصوتی در مواد تراکم ناپذیر هایپراالاستیک در پژوهش‌های متعددی از جمله در پژوهش کوبایاشی^۴ و واندریای^۵ [۶]، جیانگ^۶ و همکاران [۷] و همچنین راتر^۷ و لامرینگ^۸ [۸] مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی مهم انتشار امواج فراصوتی حجمی در مواد هایپراالاستیک، مساله پاشندگی ذاتی به دلیل غیرخطی بودن ماده، میرایی بالا و همچنین بوجود آمدن هارمونیک‌های بالا به دلیل رفتار غیرخطی ماده است. مطالعه و بررسی بیشتر انتشار امواج فراصوتی در پلیمرها، به کمک شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود میسر است. این موضوع در پژوهشی توسط لاماپاتربان^۹ و گوپالاکریشنان^{۱۰} [۹] و همچنین دالمورا^{۱۱} و همکاران [۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی رفتار موج فراصوتی در مواد هایپراالاستیک، مستلزم انتخاب مدل رفتاری مناسب برای ماده هایپراالاستیک است. مدل‌های رفتاری مختلف مواد هایپراالاستیک توسط ملی^{۱۲} و همکاران [۱۱] و نیز دال^{۱۳} و همکاران [۱۲] مرور شده‌اند.

صنعت خط لوله از صنایع مهم و حیاتی کشورهای دارای منابع نفت و گاز است. خطوط لوله مانند شاهرگ‌های حیاتی انتقال انرژی بوده که روزانه میلیون‌ها متر مکعب انواع هیدروکربن‌های خام و فرآوری شده را انتقال می‌دهند. یکی از موضوعات مهم در صنعت خط لوله، عملیات توپکرانی است که به دو منظور بازرسی و تشخیص عیوب در خطوط لوله و همچنین تمیزکاری خطوط لوله انجام می‌شود. این امر به وسیله تجهیز موسوم به توپک انجام می‌گیرد. است که به روش‌های مختلف صورت می‌گیرد. معرفی انواع توپک‌ها و مروری بر اصول آن در کتاب هلیشر^۱ و همکاران [۱] قابل دستیابی است. از مهمترین اجزای اصلی یک توپک، اعم از هوشمند یا تمیزکننده، می‌توان به المان‌های پلیمری آب‌بند آن اشاره کرد که عموماً از پلی‌یورتان ساخته می‌شوند. در شکل ۱ نمونه‌ای از یک توپک درون خط لوله نشان داده شده است که المان‌های پلیمری آن دچار تغییر شکل شده‌اند. کیفیت تولید و خواص مکانیکی هایپراالاستیک این المان‌های پلیمری نقش بسزایی در اختلاف فشار رانش و رفتار مکانیکی توپک دارد که در پژوهش‌های مختلف، توسط ژو^۲ و همکاران [۲]، هندریکس^۳ و همکاران [۳] و صحاف نائینی و سورگی [۴] به آن پرداخته شده است.

روش تولید المان‌های پلیمری توپک‌ها، ریخته‌گری در قالب روباز است و پس از ریخته‌گری پلیمر، المان پلیمری اعم از دیسک یا کاپ می‌بایست درون کوره پخت و رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب نظیر استحکام کششی، استحکام برشی، خواص سایشی و مانایی فشار برسد [۵]. از مهمترین عوامل نرسیدن پلی یورتان به خواص مطلوب می‌توان به پخت نامناسب، ترکیب نامناسب مواد و وجود رطوبت و گرد و غبار در محیط اشاره کرد. از این رو، کنترل کیفیت محصولات تولیدی به روش ریخته‌گری در قالب رو باز می‌بایست به دقت صورت گیرد تا از خواص مکانیکی اطمینان حاصل شود. دو

⁸ Lammering

⁹ Ramabathiran

¹⁰ Gopalakrishnan

¹¹ Dalmora

¹² Melly

¹³ Dal

¹ Hlitscher

² Zhu

³ Hendrix

⁴ Kobayashi

⁵ Vanderby

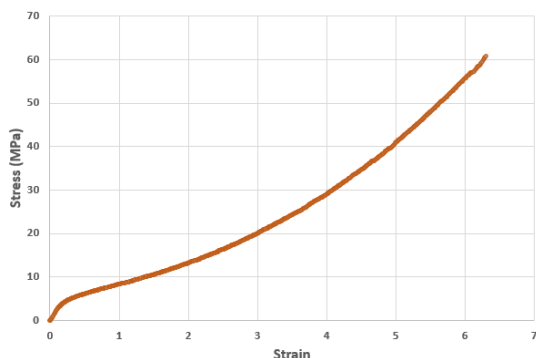
⁶ Jiang

⁷ Rauter

همان شرایط محیطی، یک ورق پلی یورتانی به ضخامت ۲ میلیمتر برای تولید نمونه‌های آزمون کشش و همچنین تعدادی قرص برای اندازه‌گیری چگالی نیز تولید شده است. تصویر نمونه‌های تولید شده در شکل ۳ نشان داده شده است. ابعاد نمونه‌ها بر اساس حداقل ماده مورد نیاز برای اطمینان از همگن بودن نمونه و حذف اثر ماده مانده در شلنگ‌های تزریق، با توجه تفاوت زمانی تزریق نمونه‌های بعدی، و امکان ژل شدن پلی یورتان در این زمان، در نظر گرفته شده است.

۳- آزمون تجربی

پس از تولید نمونه‌ها، ابتدا چگالی اندازه‌گیری گردید. اندازه‌گیری چگالی برای ۱۰ عدد قرص تولید شده با اندازه‌گیری ابعاد با کولیس دیجیتال با دقت ۰.۰۱ میلیمتر و همچنین ترازو با دقت ۰.۰۱ گرم صورت گرفته است. میانگین چگالی نمونه‌ها 1.22 ± 0.02 گرم بر سانتی متر مکعب تعیین گردید. سپس با انجام آزمون کشش، منحنی آزمون کشش برای ماده تولید شده استخراج گردید که در شکل ۴ نشان داده شده است. آزمون کشش نیز برای سه نمونه گرفته شده از یک ورق تولید شده صورت گرفت و میانگین داده‌ها به عنوان نتیجه آزمون کشش مورد استفاده قرار گرفته است. منحنی آزمون کشش به منظور استفاده برای بررسی مدل‌های رفتاری مختلف ماده های پیرالاستیک استخراج گردیده است، زیرا به منظور انتخاب بهترین مدل رفتاری های پیرالاستیک برای یک ماده، برازش یک مدل رفتاری بر داده‌های آزمون مطمئن ترین روش است.

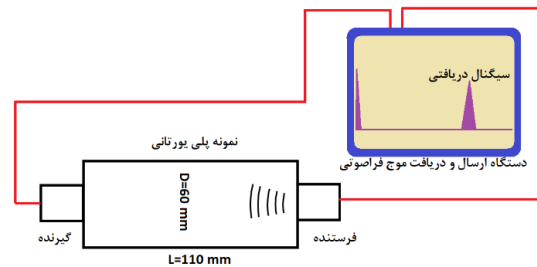


شکل ۴. نتیجه آزمون کشش تک محوره نمونه پلی یورتان ساخته شده با سختی Shore-A ۸۵

در این پژوهش، به منظور تدوین روش بازرسی دیسک‌های پلی یورتانی به روش فراصوتی، یک آزمایش تجربی بر روی انتشار موج در نمونه پلی یورتانی صورت گرفته و سپس با شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود، اثر مدل‌های مختلف رفتاری ماده بر انتشار موج بررسی شده تا مدل رفتاری که منجر به نتایج نزدیک تر به نتایج آزمون تجربی می‌گردد، یافت شود.

۲- تعریف مساله

مساله اصلی در این پژوهش، مطالعه و بررسی انتشار موج فراصوتی در یک نمونه پلی یورتان و یافتن مدل رفتاری مناسب در شبیه‌سازی عددی برای رسیدن به سرعت انتشار موج شبیه‌سازی به مقدار آزمون تجربی است. شماتیکی از روش بررسی مساله در شکل ۲ نشان داده شده است.



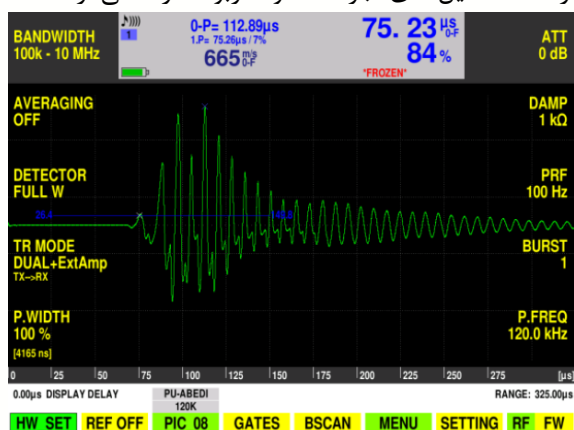
شکل ۲. شماتیکی از مساله مورد مطالعه در پژوهش



شکل ۳. نمونه آزمون پلی یورتانی و نمونه‌های آزمون کشش و قرص های اندازه گیری چگالی

یک استوانه پلی یورتانی به سختی Shore-A ۸۵ به قطر ۶۰ میلیمتر و طول ۱۱۰ میلیمتر به روش ریخته‌گری قالب باز تولید شده است و همزمان با آن و از همان ماده و در

بروز پدیده‌های غیرخطی، از بررسی آن خودداری می‌گردد. در ادامه تحلیل‌های اجزاء محدود مربوطه ارائه می‌گردد.



شکل ۶. سیگنال دریافتی در گیرنده در آزمون نمونه پلی یورتانی با تراگذارهای ۱۲۰ کیلوهرتز موج طولی

۴- شبیه سازی به روش اجزاء محدود

شبیه سازی عددی مساله در نرم افزار آباکوس به روش اجزاء محدود صورت گرفته است. مساله اصلی در شبیه سازی عددی، انتخاب مدل رفتاری مناسب برای ماده است. رابطه تنش و کرنش در مواد هایپرالاستیک، از یک تابع انرژی کرنشی حاصل می‌شود و مشتق نسبی انرژی کرنشی نسبت به تنش، مولفه کرنش را می‌دهد و بالعکس. همانگونه که پیشتر ذکر گردید، مدل‌های رفتاری مواد هایپرالاستیک در مراجع [۱۱ و ۱۲] معرفی شده‌اند. برای بیان رفتار این مواد از توابع انرژی کرنشی غیرخطی و پیچیده‌ای استفاده می‌شود. در استخراج روابط انرژی کرنشی آن از روابط (۱) تا (۴) استفاده می‌شود که در این روابط، \bar{F} گرادیان تغییر شکل، \bar{B} تانسور کوشی-گرین چپ و \bar{I}_1 ها ناوردهای تانسور B هستند. دو فرم کلی انرژی کرنشی بر اساس ناوردهای تانسور B نوشته می‌شوند، چند جمله‌ای^۳ و چند جمله‌ای کاهش یافته^۴ نامیده می‌شوند که به ترتیب در روابط (۵) و (۶) ارائه شده‌اند.

$$F = F_{ij} = I + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad J = \det(F) \quad (1)$$

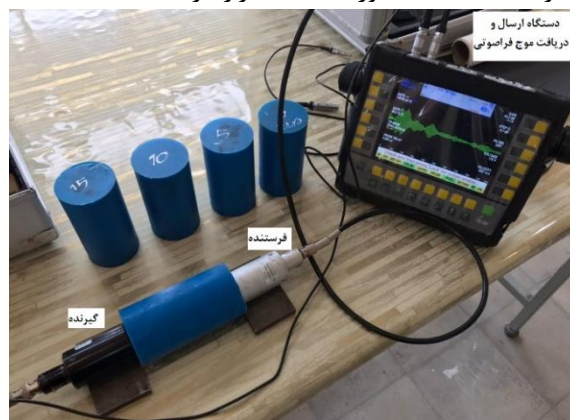
$$\bar{F} = J^{-\frac{1}{3}} F \quad (2)$$

$$\bar{B} = \bar{F} \cdot \bar{F}^T \quad (3)$$

³ Polynomial

⁴ Reduced polynomial

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمون‌های کشش و چگالی سنجی، آزمون فراصوتی به صورت آرایش ارسال-دریافت مطابق شکل ۵ بر روی نمونه انجام شده است. از تراگذارهای فراصوتی غیر متمرکزکننده با فرکانس ۱۲۰ کیلوهرتز استفاده شده است، زیرا استفاده از تراگذارهای موج طولی با فرکانس دو و چهار مگاهرتز، دریافت سیگنالی در بر نداشت که به دلیل استهلاک و میرایی زیاد ماده پلی یورتانی می‌باشد. همچنین به دلیل عدم دسترسی به سایر تراگذارها با فرکانسی بین ۱۲۰ کیلوهرتز تا ۲ مگاهرتز و دارای مدار تقویت کننده داخلی، تنها از همین فرکانس استفاده شده است. از دستگاه فراصوتی Starman DIO LF برای آزمون فراصوتی استفاده شده است. آزمون تجربی به دفعات بر روی نمونه انجام گرفته است و نهایتاً با متوسط گیری از زمان رسیدن موج به گیرنده، زمان پرواز موج به روش عبور از خط صفر^۱ به مقدار اولین قله موج در زمان ۷۱/۰۶ میکروثانیه ثبت گردیده است که با مسافت طی شده ۱۱۰ میلیمتری، سرعت موج حدود ۱۵۴۷ متر بر ثانیه بدست می‌آید. شایان ذکر است که روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری زمان رسیدن موج فراصوتی به حس‌گر وجود دارد که توسط اسلیواینیس^۲ [۱۴] مرور گشته‌اند. از آن میان، اولین عبور از صفر با شیب مثبت، مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۵. بستر آزمون فراصوتی ارسال-دریافت بر روی نمونه پلی یورتانی با تراگذارهای ۱۲۰ کیلوهرتز موج طولی

در این پژوهش هدف اول، رسیدن به مدل رفتاری مناسب ماده برای یکسان بودن سرعت موج منتشره است، لذا علیرغم وجود هارمونیک‌های بالاتر در سیگنال دریافتی و

¹¹ Zero Crossing

² Slivainis

پژوهش بازکیایی و همکاران در مرجع [۱۳] بدانها پرداخته شده است. از آنجاییکه داده های آزمون کشش تک محوره در دسترس است، از مدل های مونی ریولین^۱، یوه^۲ و نئو هوک^۳ استفاده شده است.

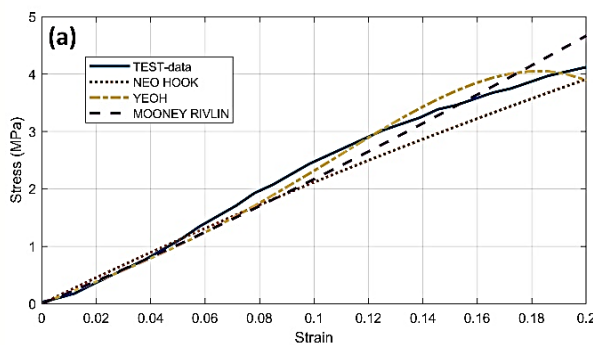
تابع انرژی پتانسیل در مدل نئو هوک، به شکل رابطه (۷) می باشد. همچنین تابع انرژی کرنشی مدل های مونی ریولین و یوه در روابط (۸) و (۹) ارائه شده اند.

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 \quad (7)$$

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 \quad (8)$$

نتیجه برازش این مدل ها بر داده های آزمون کشش تک محوره و خطای نسبی برازش در شکل ۷ نشان داده شده است. شایان ذکر است که از آنجاییکه در انتشار امواج فراصوتی در ماده، محدوده تنش و کرنش بسیار کوچک بوده، مدل رفتاری ماده تنها تا حد کرنش ۰.۲ بر داده ها برازش شده است. اثر محدوده کرنش لازم برای در نظر گرفتن در برازش داده ها در پژوهش مجزا بررسی خواهد شد. همچنین مقدار متوسط خطای برازش مدل ها، در نمودار شکل ۷-b نوشته شده است.

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{30}(\bar{I}_1 - 3)^3 + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 + \frac{1}{D_2}(J - 1)^4 + \frac{1}{D_3}(J - 1)^6 \quad (9)$$



$$\bar{I}_1 = \text{trace } \bar{B} \quad (4)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} (\bar{I}_1^2 - \text{trace}(\bar{B} \cdot \bar{B}))$$

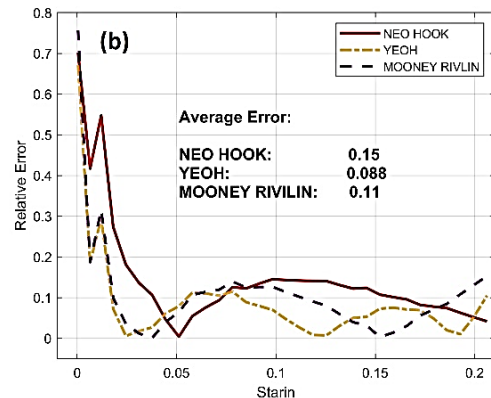
$$\bar{I}_3 = \det(\bar{B}) = J^2$$

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij}(\bar{I}_1 - 3)^i(\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i}(J - 1)^{2i} \quad (5)$$

$$U = \sum_{i=1}^N C_{i0}(\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i}(J - 1)^{2i} \quad (6)$$

در روابط (۵) و (۶) ثابت های C_{ij} و D_i همان ثابت های نشان دهنده رفتار ماده هستند، مانده ضریب الاستیسیته و پواسون در مواد الاستیک خطی، و در واقع در دو ماده های پیرالاستیک متمایز، این ثابت ها متمایزند. تفاوت اصلی مدل های چند جمله ای با چند جمله ای کاهش یافته، وجود یا عدم وجود I_2 در رابطه انرژی کرنشی است که در [۱۱] و [۱۲] مورد بررسی قرار گرفته اند.

برای شبیه سازی عددی رفتار مواد های پیرالاستیک، بسته به کششی بودن مود غالب بارگذاری به صورت کششی یا فشاری بودن آن، داده های آزمون انتخاب می گردد که در



شکل ۷. (a) مدل های رفتاری مختلف برازش شده به داده های آزمون تجربی کشش تک محوره تا کرنش ۰.۲. (b) توزیع خطای نسبی و مقدار متوسط خطای نسبی

³ Neo Hook

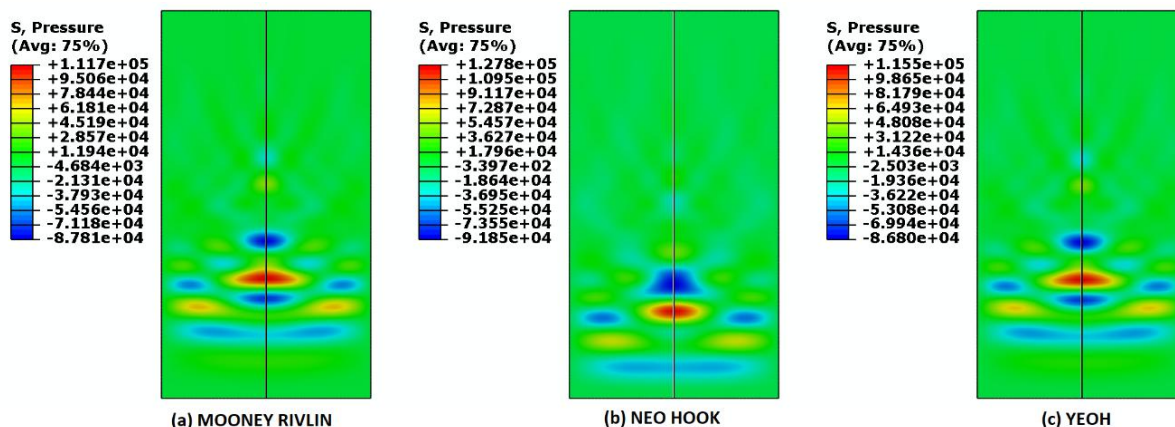
¹ Mooney Rivlin

² Yeoh

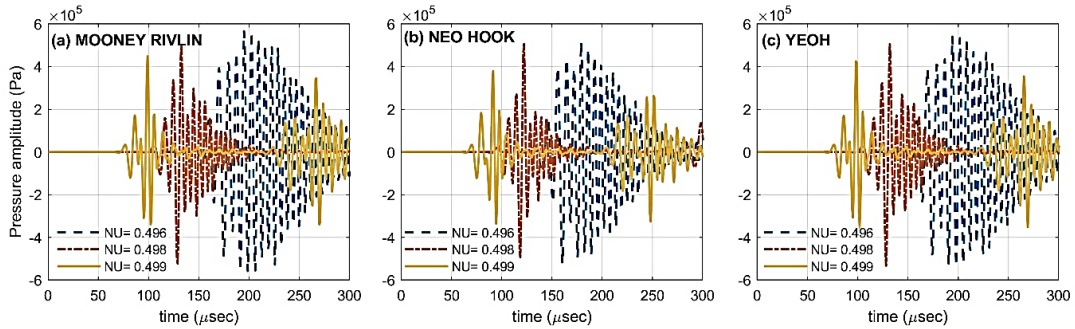
برای محاسبه سرعت مورد استفاده قرار گرفته است که هنوز انعکاس دیواره به حسگر نرسیده است. در مقایسه ظاهری سیگنال‌های شکل ۱۰ با شکل ۶، مشاهده می‌گردد که شکل سیگنال‌ها دقیقاً مطابق هم نیستند. در سیگنال دریافتی از آزمون تجربی که در شکل ۶ نشان داده شده است، همانگونه که قبلاً نیز اشاره شد، فرکانس‌های (هارمونیک‌های) بالاتر و همچنین پدیده پاشندگی مشاهده می‌گردد، حال آنکه در سیگنال‌های شبیه سازی این موارد کمتر مشاهده می‌گردند. دلیل این تفاوت می‌تواند ناشی از عدم مدلسازی استهلاک، عدم در نظر گرفتن ماده واسط و همچنین ضعف مدل رفتاری در تخمین صحیح رفتار پاشنده و آثار غیرخطی باشد که موضوع این مقاله نیست و در واقع تمرکز اصلی این پژوهش، در یافتن مدل مناسب برای تخمین سرعت موج است. در پژوهش‌های مجزا به بررسی اثر مدل رفتاری در تخمین رفتار پاشنده (تابعیت سرعت از فرکانس) و همچنین آثار غیرخطی موج (هارمونیک‌های بالاتر) پرداخته خواهد شد.

همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، زمان اولین عبور از صفر با شیب مثبت، برای مدل‌های یوه، مونی ریولین و نئوهوک به ترتیب $71/83$ ، $72/33$ و $66/33$ میکروثانیه می‌باشد. سرعت موج در ماده برای سه مدل به شرح جدول ۱ حاصل می‌گردد. نهایتاً به نظر می‌رسد مدل‌های رفتاری مونی ریولین و یوه بر اساس شاخص سرعت موج، تطابق بهتری با آزمون تجربی دارند. البته با فرض اینکه ضریب پواسون ماده در هر سه مدل یکسان باشد که طبیعتاً اینگونه است.

مشاهده می‌گردد که مدل یوه خطای کمتری در برازش داده‌های آزمون تجربی نمونه‌های موجود دارد. حال نتایج شبیه‌سازی انتشار امواج فراصوتی ارئه می‌گردد. در نرم‌افزار آباکوس یک مدل تقارن محوری در حل گر ضمنی شبیه سازی شده است و نوع المان از نوع المان هیبرید برای مدل‌سازی مواد تقریباً تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است. داده‌های آزمون کشش به عنوان داده‌های ماده به نرم افزار داده شده است و مدل‌های سه گانه فوق‌الذکر به ترتیب به این داده‌ها برازش شده است. همچنین ضریب پواسون، برای هر مدل از مقدار 0.496 تا 0.499 ، بر اساس توصیه راهنمای نرم افزار ABAQUS، تغییر داده شده است. فشار نرمال به عنوان سیگنال عملگر و همین فشار در المان‌های گیرنده به عنوان سیگنال گیرنده دریافت شده است. سیگنال‌های دریافتی در حس‌گر، برای سه مدل رفتاری ذکر شده و برای سه ضریب پواسون در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، با افزایش ضریب پواسون و نزدیک‌تر شدن به ماده تراکم ناپذیر (ضریب پواسون برابر با ۰.۵) سرعت موج در همه مدل‌ها به سرعت موج در آزمون تجربی نزدیک می‌شود. برای مقایسه بهتر، کانتور فشار آکوستیکی در شکل ۸ و سیگنال‌های دریافتی برای حالت ضریب پواسون 0.499 برای هر سه مدل در شکل ۹ رسم شده است. با توجه به زاویه واگرایی میدان فشار آکوستیکی در جسم، امکان بازتاب موج برخوردی به دیواره و ظاهر شدن آن در سیگنال حسگر وجود دارد، کما اینکه الگوی میدان فشار آکوستیکی این مساله را نشان می‌دهد، اما برای پرهیز از خطا در محاسبه سرعت، اولین عبور از صفر سیگنال (به عبارتی ابتدای سیگنال دریافتی)



شکل ۸. کانتور میدان فشار آکوستیکی در ماده در لحظه ۷۲ میکروثانیه، برای سه مدل مورد مطالعه



شکل ۹. سیگنال دریافتی از حسگر در مساله شبیه سازی شده: (a) مدل مونی ریولین (b) مدل نئو هوک (c) مدل یوه

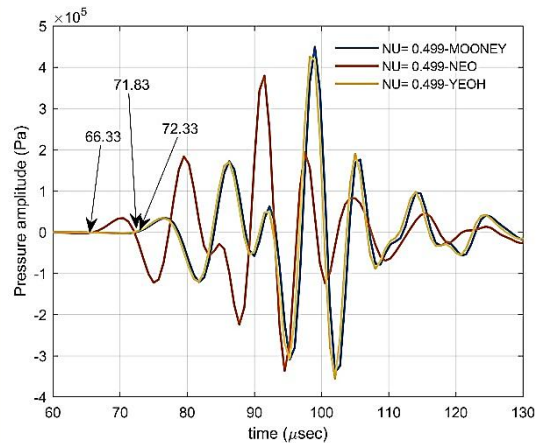
به صورت تجربی با تراگذارهای با فرکانس ۱۲۰ کیلوهرتز اندازه گیری گردید. به منظور توسعه مدل شبیه سازی مناسب جهت مطالعات بعدی و مطالعه اثر عیوب مختلف در مدل شبیه سازی، ابتدا می بایست اثر مدل های رفتاری مختلف ماده های پیرالاستیک و همچنین ضریب پواسون بر شاخص های انتشار موج بررسی گردد. در این پژوهش اثر مدل های رفتاری ماده و ضریب پواسون بر سرعت موج بررسی گردید و سایر شاخص ها مانند دامنه و استهلاك در این پژوهش بررسی نگردید. نتایج نشان می دهد برای ماده پلی یورتان استفاده شده، با داشتن چگالی و منحنی آزمون کشش تک محوره، مدل رفتاری یوه و سپس مونی ریولین نتایج نزدیکتری به آزمون تجربی را در اندازه گیری سرعت موج طولی در بردارند.

۶- تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷- منابع

- [1] Hiltcher, G., Mühlthaler, W., & Smits, J. (2006). INDUSTRIAL PIGGING TECHNOLOGY: FUNDAMENTALS, COMPONENTS, APPLICATIONS. John Wiley & Sons.
- [2] Zhu, X., Zhang, S., Li, X., Wang, D., & Yu, D. (2015). NUMERICAL SIMULATION OF CONTACT FORCE ON BI-DIRECTIONAL PIG IN GAS PIPELINE: AT THE EARLY STAGE OF PIGGING. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 23, 127–138.
- [3] Hendrix, M. H. W., Graafland, C. M., & Van Ostayen, R. A. J. (2018). FRICTIONAL FORCES FOR DISC-TYPE PIGGING OF PIPELINES. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171, 905–918.
- [4] Naeni, H. S., & Soorgee, M. H. (2021). EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON SPHERE PIG



شکل ۱۰. سیگنال دریافتی از حسگر در مساله شبیه سازی شده با ضریب پواسون ۰.۴۹۹ برای سه مدل ماده

جدول ۱. مقایسه سرعت موج در آزمون تجربی و شبیه سازی با سه مدل ماده

نام مدل	مونی ریولین	یوه	نئو هوک
سرعت در شبیه سازی (m/s)	۱۵۲۱	۱۵۳۱	۱۶۵۸
سرعت در آزمون تجربی (m/s)	۱۵۴۷	۱۵۴۷	۱۵۴۷
درصد خطای نسبی	-۱/۶۸	-۱	۷/۱۷

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور تدوین یک روش بازرسی برای اطمینان از کیفیت پخت و عدم وجود نقص در نمونه های پلی یورتانی که به روش ریخته گری قالب باز تولید می شوند، مبنای انتشار امواج فراصوتی و اندازه گیری سرعت این امواج در نمونه های تجربی بررسی گردید. خواص کششی و همچنین چگالی نمونه به صورت تجربی اندازه گیری شده، و سپس سرعت موج طولی به روش فراصوتی و با آرایش ارسال دریافت

- [14] Svilainis, L. (2013). REVIEW OF HIGH-RESOLUTION TIME OF FLIGHT ESTIMATION TECHNIQUES FOR ULTRASONIC SIGNALS. In *Proceedings of the International Conference of NDT, Slovenia*, 1–12.
- MOVEMENT IN MULTIPLE THICKNESS PIPE. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 95, 104152.
- [5] Akindoyo, J. O., Beg, M. D. H., Ghazali, S., Islam, M. R., Jeyaratnam, N., & Yuvaraj, A. R. (2016). POLYURETHANE TYPES, SYNTHESIS AND APPLICATIONS: A REVIEW. *RSC Advances*, 6(115), 114453–114482.
- [6] Kobayashi, H., & Vanderby, R. (2007). ACOUSTOELASTIC ANALYSIS OF REFLECTED WAVES IN NEARLY INCOMPRESSIBLE, HYPERELASTIC MATERIALS: FORWARD AND INVERSE PROBLEMS. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(2), 879–887.
- [7] Jiang, Y., Yuan, M., Ji, X., Zhang, Y., & Li, M. (2023). ULTRASONIC NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF THE BONDING STRENGTH OF POLYURETHANE COATINGS BASED ON FEEDFORWARD COMB FILTERING EFFECT. *Ultrasonics*, 131, 106960.
- [8] Rauter, N., & Lammering, R. (2015). NUMERICAL SIMULATION OF ELASTIC WAVE PROPAGATION IN ISOTROPIC MEDIA CONSIDERING MATERIAL AND GEOMETRICAL NONLINEARITIES. *Smart Materials and Structures*, 24(4), 045027.
- [9] Ramabathiran, A. A., & Gopalakrishnan, S. (2012). TIME AND FREQUENCY DOMAIN FINITE ELEMENT MODELS FOR AXIAL WAVE ANALYSIS IN HYPERELASTIC RODS. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 19(1–3), 79–99.
- [10] Dalmora, A., Imperiale, A., Imperiale, S., & Moireau, P. (2024). A TIME-DOMAIN SPECTRAL FINITE ELEMENT METHOD FOR ACOUSTOELASTICITY: MODELING THE EFFECT OF MECHANICAL LOADING ON GUIDED WAVE PROPAGATION. *Wave Motion*, 129, 103328.
- [11] Melly, S. K., Liu, L., Liu, Y., & Leng, J. (2021). A REVIEW ON MATERIAL MODELS FOR ISOTROPIC HYPERELASTICITY. *International Journal of Mechanical System Dynamics*, 1(1), 71–88.
- [12] Dal, H., Açıkğöz, K., & Badienia, Y. (2021). ON THE PERFORMANCE OF ISOTROPIC HYPERELASTIC CONSTITUTIVE MODELS FOR RUBBER-LIKE MATERIALS: A STATE-OF-THE-ART REVIEW. *Applied Mechanics Reviews*, 73(2), 020802.
- [13] Bazkiaei, A. K., Shirazi, K. H., & Shishesaz, M. (2020). A FRAMEWORK FOR MODEL BASE HYPER-ELASTIC MATERIAL SIMULATION. *Journal of Rubber Research*, 23, 287–299.