



CFD Simulation of Transit-time Ultrasonic Flowmeter with PZT-5J Piezoelectric Sensor for Light, Heavy, and Medium Crude Oil

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sharifi B.¹ MSc,

Hashemabadi S.H.^{*1} PhD

How to cite this article

Sharifi B, Hashemabadi S.H. CFD Simulation of Transit-time Ultrasonic Flowmeter with PZT-5J Piezoelectric Sensor for Light, Heavy, and Medium Crude Oil. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(6):1337-1346.

ABSTRACT

In the present study, CFD simulation of Transit-time ultrasonic flowmeter with the PZT-5J piezoelectric sensor was modeled for light, heavy, and medium crude oil by the wave equation in the acoustic wave propagation path and finite element solving method in the unsteady state and it was implemented, using COMSOL Multiphysics 5.3 software. Different samples of light, heavy, and medium crude oil at different temperatures were modeled and simulated under constant pressure, using CFD tools. The maximum received voltage and speed of sound in samples were calculated by the proposed model. To evaluate the accuracy of the proposed model, the simulation results were compared with the empirical data obtained from the experimental work of the researchers. The average values of the maximum voltage of received signals for an ultrasonic flowmeter containing light, heavy, and medium light crude oil samples are 0.9491, 1.0115, and 0.943 v, respectively. The difference between the simulation results and the experimental data for the speed of sound in the light, heavy, and medium crude oil samples was at most about 0.2336%, 0.4339%, and 0.1378%, respectively. Therefore, the high costs of designing and optimizing the transit-time ultrasonic flowmeter for crude oil can be reduced, using the proposed model.

Keywords Transit-Time Ultrasonic Flowmeter; PZT-5J Piezoelectric Sensor; Crude Oil Sample; CFD Simulation; Speed of Sound

¹Chemical Engineering Department, Engineering Faculty, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Chemical Engineering Department, Engineering Faculty, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran. Postal Code: 1684613114

Phone: +98 (21) 77240376

Fax: +98 (21) 77240495

hashemabadi@iust.ac.ir

Article History

Received: August 15, 2018

Accepted: January 17, 2019

ePublished: June 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Design, and fabrication of a transit time ultrasonic flow meter [2] Design and fabrication of a four-path ultrasonic flowmeter using the time-difference method [3] Finite element modeling of piezoelectric ultrasonic transducers [4] Study of acoustic transducer protrusion and recess effects on ultrasonic flowmeter measurement by numerical simulation [5] Numerical simulation of transit-time ultrasonic flowmeters: Uncertainties due to flow profile and fluid turbulence [6] Electrical power transmission system engineering: Analysis and design [7] Further studies of the accuracy of clamp-on transit-time ultrasonic flowmeters for liquids [8] Ultrasonic metering of flow velocity based on transit time differentials [9] Guidelines for the use of ultrasonic non-invasive metering techniques [10] Vibration control of civil structures using piezoceramic smart materials: A review [11] Introduction to piezoelectric actuators and transducers [12] Acoustics: An introduction to its physical principles and applications [13] Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis [14] Elastic, dielectric, and piezoelectric losses in piezoceramics: How it works all together [15] Phononic crystals containing piezoelectric material [16] Equation of state of crude oil samples

شبیه‌سازی CFD عملکرد فلومتر اولتراسونیک زمان‌گذر با سنسور پیزوالکتریک [PZT-5J] برای نفت خام سبک، سنگین و متوسط

بهمن شریفی MSC

گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سیدحسن هاشم‌آبادی PhD

گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی CFD عملکرد فلومتر اولتراسونیک زمان‌گذر با سنسور پیزوالکتریک [PZT-5J] برای نفت خام سبک، سنگین و متوسط با استفاده از معادله موج در مسیر انتشار موج آکوستیک و روش حل المان محدود در شرایط ناپایا مدل‌سازی و با نرم‌افزار COMSOL Multiphysics 5.3 انجام شد. نمونه‌های مختلف نفت خام سبک، سنگین و متوسط در دماهای متفاوت تحت فشار ثابت با استفاده از ابزارهای CFD مدل‌سازی و شبیه‌سازی شدند. ماکزیمم ولتاژ دریافتی و سرعت صوت در نمونه‌ها توسط مدل ارائه شده محاسبه شد. برای ارزیابی دقت مدل ارائه شده، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی به دست آمده از کار تجربی پژوهشگران، مورد مقایسه قرار گرفت. میانگین ماکزیمم ولتاژ سیگنال‌های دریافتی برای فلومتر اولتراسونیک حاوی نمونه‌های نفت خام سبک، سنگین و متوسط به ترتیب برابر با ۰/۹۴۹۱، ۱/۰۱۱۵ و ۰/۹۷۴۳ ولت هستند. اختلاف بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های تجربی برای سرعت صوت در نمونه‌های نفت خام سبک، سنگین و متوسط حداکثر حدود ۰/۲۳۳۶٪، ۰/۴۳۳۹٪ و ۱/۳۷۸٪ بود. بنابراین می‌توان با استفاده از مدل ارائه شده، هزینه‌های سنگین طراحی و بهینه‌سازی کنتور اولتراسونیک زمان‌گذر را برای نفت خام کاهش داد.

کلیدواژه‌ها: فلومتر اولتراسونیک زمان‌گذر، سنسور پیزوالکتریک [PZT-5J]، نمونه نفت خام، شبیه‌سازی CFD، سرعت صوت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۷

نویسنده مسئول: hashemabadi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

ایران به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان و مصرف‌کننده‌های نفت و گاز جهان و نیز به‌عنوان کشوری پهناور در زمینه کشاورزی است و مباحث مرتبط با تامین آب، همواره برای اندازه‌گیری جریان سیالات، نیاز به استفاده از فلومترهای مناسب دارد. در سال ۱۹۵۵، اولین دبی‌سنج بدون تماس اولتراسونیک در یک آزمایشگاه نصب شد که جریان عبوری از یک لوله پلاستیکی را اندازه‌گیری می‌کرد. اولین کاربردهای این دبی‌سنج‌ها محدود به اندازه‌گیری جریان آب در لوله‌های با قطر بزرگ بوده است. گستره کاربرد فلومترهای گاز و مایع در صنایع نفت، گاز، پالایش، پتروشیمی، نیروگاهی و آب به‌حدی وسیع است که بی‌شک فلومترها را در زمره تجهیزات استراتژیک قرار می‌دهد. بین انواع فلومترها، فلومترهای اولتراسونیک به دلیل مزایای بسیار و البته فناوری پیچیده‌تر از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. استفاده از جریان‌سنج‌های اولتراسونیک برای کاربرد در نفت مایع از قبیل انتقال موقت یا مختص اندازه‌گیری، در حال به‌دست‌آوردن مقبولیت گسترده جهانی توسط صنعت نفت است. تکنولوژی اولتراسونیک به‌خوبی رشد کرده و استفاده از این تکنولوژی برای ساخت کنتورهای پرتابل، کاملاً نوین و تازه است [1]. این فلومترها به لحاظ دقت، کاربرد، ایمنی، تعمیر و نگهداری، نصب، سهولت استفاده و غیره، از سایر فلومترها

مناسب‌ترند و علی‌رغم قیمت‌های بالا، مورد توجه اغلب بهره‌برداران هستند. ایران با توجه به صادرات قابل توجه نفت خام، گاز، میعانات گازی و سایر فرآورده‌های نفتی از مصرف‌کنندگان عمده این گونه دبی‌سنج‌ها است که تماماً از منابع خارجی تامین می‌شوند. وابستگی به تامین‌کنندگان خارجی در کنار تحریم‌های بین‌المللی، مشکل مضاعفی برای صنایع نفت و گاز ایران محسوب می‌شود. لذا پژوهش در این خصوص می‌تواند ضمن رفع وابستگی، صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌های انتقال و صادرات نفت، گاز و مشتقات آنها داشته باشد. اهمیت این حسگرها مد نظر محققان داخلی نیز بوده و در این خصوص، طراحی و ساخت یک دبی‌سنج فراصوت از نوع تک‌مسیره توسط محققان در داخل ایران گزارش شده است [2]. لیکن در مورد تاثیر ترکیب نمونه‌های نفت خام روی عملکرد سنسورهای پیزوالکتریک درون فلومترهای اولتراسونیک زمان‌گذر مایع، هیچ‌گونه گزارش داخلی مشاهده نشده است.

در سال ۲۰۱۱ میلادی، نایگرن در کار خود به مدل‌سازی المان محدود مبدل‌های اولتراسونیک پیزوالکتریک پرداخت. وی در کار خود به‌منظور شبیه‌سازی از نرم‌افزار COMSOL بهره برد و نتایج را با نرم‌افزار Xtrans مقایسه نمود. او در این پژوهش هدایت ظاهری لایه پیزوالکتریک و سرعت متوسط درون لایه تطبیق‌گر امپدانس را از هر دو نرم‌افزار به دست آورد و نتایج آنها را در قالب شکل منتشر نمود [3]. ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ میلادی در کار خود برای بررسی اثر برآمدگی و تورفتگی مبدل درون دبی‌سنج اولتراسونیک از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده نمودند [4]. در این کار شبیه‌سازی، دبی‌سنجی با قطر ۵۰۰ و ۱۸ میلی‌متر مسیر آکوستیک استفاده شد. همچنین نرم‌افزار مورد استفاده برای این شبیه‌سازی FLUENT بوده و برای مدل‌کردن اغتشاشات نیز از مدل k-ε استفاده شده است. در پایان، نتیجه گرفته شده این است که در حالت تورفتگی، مبدل‌ها کمترین میزان خطا در اندازه‌گیری زمان‌گذر بین مبدل‌ها را خواهند داشت [4]. در سال ۲۰۰۲، یک روش عددی برای تخمین خطاهای احتمالی جریان‌سنج اولتراسونیک زمان‌گذر ناشی از انحراف مسیرهای صوتی از خطوط مستقیم، توسط یوس و همکاران ارائه شد. آنها در مدل ساده‌شده خود دریافتند که نرخ جریان حدود ۰/۳۵٪ بیشتر تخمین زده می‌شود که این ناشی از تاثیرات پروفایل سرعت میانگین است و میدان دمایی میانگین، تاثیر چندانی ندارد [5].

شبیه‌سازی‌های CFD امروزه به‌عنوان ابزاری قدرتمند قادرند که مشکلات بسیار پیچیده را به‌اندازه کافی دقیق و در زمان قابل قبول برای استفاده عملی حل نمایند. در پژوهش حاضر، ابتدا مراحل شبیه‌سازی، عملکرد سنسور پیزوالکتریک [PZT-5J] در فلومتر اولتراسونیک زمان‌گذر مایع و سپس تاثیر ترکیب نمونه‌های نفت خام سبک، سنگین و متوسط (مخلوط) روی عملکرد سنسور که حاصل از انجام شبیه‌سازی است، ارائه می‌شود. انجام این کار برای اولین بار در ایران بوده و سابقه قبلی نداشته است. برای دستیابی به این هدف، ابتدا مروری بر مبانی کار دبی‌سنج‌های اولتراسونیک آورده می‌شود. در ادامه به توسعه مدل برای پیش‌بینی و بررسی تاثیر ترکیب نمونه‌های نفت خام سبک، سنگین و متوسط (مخلوط) روی عملکرد سنسور پیزوالکتریک [PZT-5J] در فلومتر اولتراسونیک زمان‌گذر مایع و همچنین نحوه انتشار امواج آکوستیک در فلومترهای اولتراسونیک با استفاده از شبیه‌سازی CFD پرداخته شده است. در مرحله پایانی با استفاده از داده‌های (زمان‌های پرواز) حاصل از شبیه‌سازی عددی، سرعت صوت در نمونه‌های مختلف نفت خام تحت دماهای مختلف در فشار

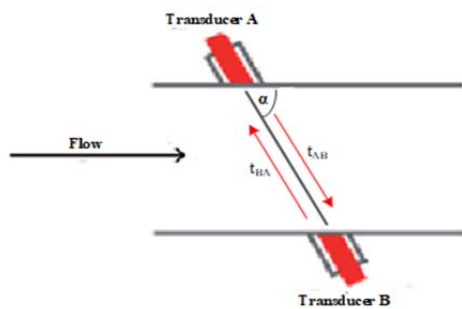
طی شده برای سیگنال در جهت رسیدن به ترانسدیوسر گیرنده مورد استفاده قرار گرفت. این معادله به معادله زمان‌گذر سیگنال اولتراسونیک معروف است [10].

$$T_{A \rightarrow B} = \frac{L}{c + v \cdot \cos \alpha} \quad (1)$$

$$T_{B \rightarrow A} = \frac{L}{c - v \cdot \cos \alpha} \quad (2)$$

$T_{A \rightarrow B}$ ، فاصله زمانی طی شده برای اینکه پالس اولتراسونیک از مبدل A به مبدل B برود (فرستنده به گیرنده).

$T_{B \rightarrow A}$ ، فاصله زمانی طی شده برای اینکه پالس اولتراسونیک از مبدل B به مبدل A برود (گیرنده به فرستنده).



شکل ۱) ترانسدیوسرهای واقع شده در مقابل هم

توجه کنید که سرعت سیال بر خلاف سیگنال اولتراسونیک عمل می‌کند، زیرا بر خلاف جهت جریان حرکت می‌کند. L ، فاصله طی شده توسط سیگنال اولتراسونیک است. c سرعت صوت در سیال، v سرعت سیال و α زاویه انتشار التراسوند میان سیال است. برای به دست آوردن اختلاف زمان عبوری، همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌کنید، میان این دو شکل موج، یک زمان عبور به سادگی از دیگری کم می‌شود.

$$\Delta T = T_{B \rightarrow A} - T_{A \rightarrow B} = \frac{L}{c - v \cdot \cos \alpha} - \frac{L}{c + v \cdot \cos \alpha} \quad (3)$$

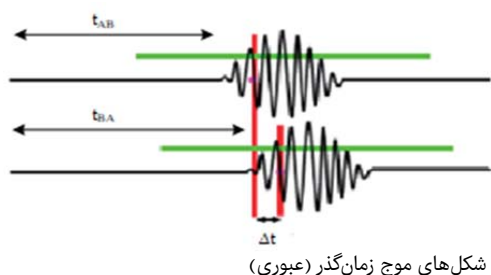
$$\Delta T = \frac{2L \cdot v \cdot \cos \alpha}{c^2 + v^2 \cdot (\cos \alpha)^2} \quad (4)$$

معمولاً اختلاف زمان عبوری در حد چندنانوثانیه است. در نتیجه، سرعت متوسط در طول مسیر انتشار موج به شکل زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$v = \frac{L}{\Delta T \cdot \cos \alpha} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\Delta T^2 c^2}{L^2}} \right) \quad (5)$$

نرخ حجمی جریان (دبی: Q) نیز با استفاده از سرعت متوسط جریان قابل محاسبه است. برای یک خط لوله با سطح مقطع دایره‌ای رابطه‌ای به شکل زیر خواهیم داشت [10, 11]:

$$Q = v \cdot A = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{L}{\Delta T \cdot \cos \alpha} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\Delta T^2 c^2}{L^2}} \right) \quad (6)$$



شکل ۲) شکل‌های موج زمان‌گذر (عبوری)

اتمسفریک، محاسبه و با داده‌های آزمایشگاهی موجود در مقالات پژوهشگران مختلف مقایسه می‌شود. مهم است که به‌طور دوره‌ای، گزارش سرعت صوت توسط دستگاه مورد ارزیابی و تایید قرار گیرد و با مقداری که از استاندارد به دست می‌آید، مقایسه شود. به همین دلیل برای به دست آوردن سرعت صوت در سیالات، سیال به صورت ساکن در نظر گرفته می‌شود تا از صحت عملکرد فلومتر اطمینان حاصل شود. این مقایسه، محدودیت‌های به‌کارگیری این سیستم را مشخص می‌کند که براساس آن می‌توان اقداماتی برای بهینه‌سازی و افزایش دقت به عمل آورد. نکته مهم در این مرحله، نحوه مدل‌سازی و به‌کارگیری شرایط مرزی مناسب برای محاسبه میزان جریان سیال و سرعت صوت در سیالات مذکور است، چرا که غالباً روش محاسبه توسط سازندگان این گونه تجهیزات محرمانه نگه داشته می‌شود. با توجه به تجربیات حاصل از این تحقیق می‌توان در مراحل بعدی، اقدام به بهینه‌سازی و افزایش دقت سیستم مزبور نمود.

۲- معادلات بنیادین فلومتر اولتراسونیک

انواع مختلف و زیادی از تکنیک‌های اولتراسونیک برای اندازه‌گیری جریان مایع و گاز وجود دارد. فلومترهای اولتراسونیک زمان عبوری بر مبنای تفاوت ظاهری سرعت صوت در جهت جریان و خلاف جهت جریان هستند. با توجه به سادگی اصول اندازه‌گیری، این یکی از رایج‌ترین تکنیک‌ها در صنایع کاربردی است [5]. یک دبی‌سنج اولتراسونیک نوعی دبی‌سنج است که سرعت جریان سیال را با توجه به مکانیک فراصوت برای محاسبه جریان حجمی سیال به کار می‌گیرد. این دبی‌سنج‌ها با استفاده از مبدل‌های اولتراسونیک می‌توانند سرعت متوسط را در طول خط انتشار موج فراصوت و با استفاده از متوسط‌گیری سرعت انتقال پالس‌های فراصوت منتشرشده به دست آورند. دبی‌سنج‌های اولتراسونیک تحت تاثیر خواص آکوستیک جریان هستند و عواملی همچون دما، دانسیته، ویسکوزیته و ذرات معلق روی اندازه‌گیری آنها تاثیرگذارند. این دبی‌سنج‌ها بر خلاف دبی‌سنج‌های مکانیکی دارای قسمت متحرک نیستند [6].

برای جریان تک‌فاز، با استفاده از دبی‌سنج زمان عبوری می‌توان زمان انتقال (پرواز) پالس‌های موج صوتی را در دو حالت بالادستی و پایین‌دستی جریان محاسبه و سپس مقایسه نمود و بدین ترتیب، سرعت جریان متوسط در مسیر انتشار موج را به دست آورد [7, 8]. زمان عبوری در این روش به صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. در این کار هدف، تحقیق روی دبی‌سنج‌های اولتراسونیک به روش زمان گذشته بوده، لذا در ادامه، تمرکز مطالب بیشتر روی این روش و همچنین روش مهاری است.

زمان پرواز (عبوری) به این معنی است که زمان صرف شده برای یک موج اولتراسونیک برای حرکت از مقطع لوله فقط به سرعت صوت (c) در آن میدان وابسته نیست، بلکه به سرعت حرکت جریان واقعی سیال خود نیز وابسته است. معادلات زیر چگونگی اینکه می‌توان سرعت را از اندازه‌گیری‌های زمان عبوری استخراج کرد، نشان می‌دهد. در شکل ۱، اصولاً به یک حالت مستقیم اشاره دارد. موج اولتراسونیک فقط باعث گذر (حرکت) در مقطع لوله می‌شود [9]. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ترانسدیوسر A یک پالس اولتراسونیک را از مقطع خط لوله با زاویه α ارسال می‌کند که توسط ترانسدیوسر B دریافت می‌شود. همان گونه که C برای میدان جریان و L فاصله میان ترانسدیوسرها بوده که برابر با $(L = \frac{D}{\sin \alpha})$ است، معادلات ساده‌ای برای محاسبه زمان

۳- معادلات حاکم بر شبیه‌سازی کنتور در حالت سیال ساکن

۳-۱- معادلات حاکم بر انتشار امواج آکوستیک

این مدل، انتشار امواج صوتی در دامنه فرکانس و دامنه زمانی معادله هلمولتز را حل می‌کند. برای محاسبه تغییرات فشار در شرایط محیطی ساکن، این معادله هنگام مدل‌سازی انتشار امواج صوتی در مایعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل برای شبیه‌سازی‌های وابسته به زمان مناسب است و می‌تواند برای مدل‌سازی آکوستیک‌های خطی و غیرخطی و برای توصیف هر چه بهتر توسط متغیر فشار عددی مورد استفاده قرار گیرد. مسایل آکوستیک فشار شامل تغییرات جزئی فشار صوتی (P)، در فشار جریان محیط ساکن (P_0) است. از نظر ریاضی، خطی‌سازی (بسط پارامتر جزئی)، متغیرهای وابسته به مقادیر جریان سیال ساکن را نشان می‌دهد. معادلات حاکم بر مساله جریان سیال تراکم‌پذیر بدون اتلاف (بدون رسانش گرمایی یا بدون ویسکوزیته) شامل معادله بقای جرم (معادله پیوستگی)، معادله بقای مومنوم (معادله اولر) و معادله انرژی (معادله آنتروپی) است. در نهایت، معادله حاکم بر امواج صوتی در محیط جریان بدون اتلاف به دست می‌آید [12]:

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p - \mathbf{q}_d) \right) = Q_m \quad (7)$$

که ρ دانسیته سیال و c سرعت صوت در سیال است. منبع دامنه تک‌قطبی (Q_m): این منبع مربوط به یک منبع جرم در سمت راست معادله پیوستگی است.

منبع دامنه دوقطبی (\mathbf{Q}_d): این منبع مربوط به دامنه منبع نیروی در سمت راست معادله مومنوم است.

عبارت ρc^2 ، مدول حجمی آدیاباتیک نامیده و عموماً با K_S نشان داده می‌شود. معکوس مدول حجمی آدیاباتیک برابر با ضریب تراکم‌پذیری آدیاباتیک $\beta_S = \frac{1}{K_S} = 1/\rho c^2$ است.

اگر هر دو منبع (چشمه) دامنه برابر با صفر در نظر گرفته شوند و دانسیته ثابت باشد، در نهایت می‌توان به معادله استاندارد موج رسید [12].

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p \quad (8)$$

۳-۲- معادلات حاکم بر مکانیک جامدات

معادلات حاکم بر مکانیک جامدات، متداول‌ترین روش‌ها را به‌منظور مدل‌سازی مسایل مکانیک ساختاری ارائه می‌کند و براساس اصول کلی مکانیک محیط‌های پیوسته، فرموله شده است. مدل ارائه شده شامل بیشترین تعداد مدل مواد و پیشرفته‌ترین شرایط مرزی است. همچنین تنها مدل فیزیکی است که تجزیه و تحلیل‌های مربوط به اتصال دو ماده جامد به یکدیگر را اثبات می‌کند. معادله حاکم بر تغییر شکل و جابه‌جایی‌های ناشی از ارتعاش پیزوالکتریک و لایه تطبیق‌گر امپدانس، بیشتر با نام معادله حرکت شناخته و در مراجع علمی ارائه می‌شود [13].

با استفاده از اولین تانسور تنش پیولا-کیرشف، معادله حرکت را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{F}_V \quad (9)$$

که چگالی ρ ، مربوط به دانسیته ماده در حالت اولیه (قبل از تغییر شکل) است. در معادله ۹، \mathbf{u} میدان جابه‌جایی، $\boldsymbol{\sigma}$ تنش کوشی و \mathbf{F}_V بردار نیروی حجمی است.

۳-۳- معادلات حاکم بر پیزوالکتریک

اثر پیزوالکتریک را می‌توان با استفاده از مجموعه‌ای از معادلات

اساسی پیش‌بینی کرد. روابط سازنده برای جریان محیط پیزوالکتریک است که باعث کوپل بین بخش‌های مکانیکی و الکتریکی سیستم می‌شود. رابطه بین تنش، کرنش، میدان الکتریکی و میدان جابه‌جایی الکتریکی را می‌توان به دو صورت بار-تنش یا بار-کرنش بیان نمود و ارایه داد [14]:

$$T = c_E S - e^T E \quad (10)$$

$$D = eS + \epsilon_S E \quad (11)$$

فرم بار-کرنش:

$$S = s_E T + d^T E \quad (12)$$

$$D = dT + \epsilon_T E \quad (13)$$

معادلات ۱۰-۱۳، اثرات مستقیم و معکوس پیزوالکتریک درون مبدل اولتراسونیک را مدل‌سازی می‌کنند. در روابط فوق، نام‌گذاری براساس استاندارد نام‌گذاری که در نظریه پیزوالکتریک مورد استفاده قرار می‌گیرد، صورت می‌گیرد.

۳-۴- معادلات حاکم بر الکترواستاتیک مساله

معادلات حاکم بر الکترواستاتیک، برای محاسبه میدان الکتریکی، میدان جابه‌جایی الکتریکی و توزیع پتانسیل (فشار) در دی‌الکتریک‌ها تحت شرایطی مورد استفاده قرار می‌گیرند که مقدار توزیع بار الکتریکی صریحاً معین باشد. این معادلات، قانون گاوس را برای میدان الکتریکی با استفاده از پتانسیل الکتریکی عددی به‌عنوان متغیر وابسته حل می‌کند [15]:

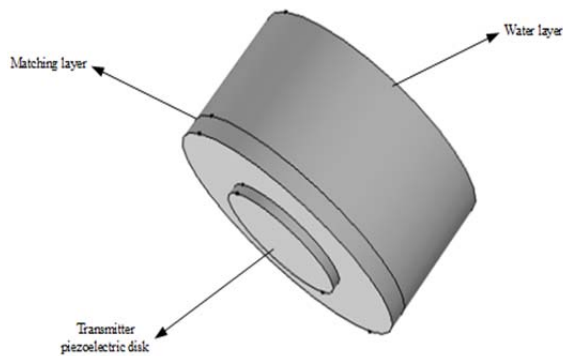
$$-\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla V - \mathbf{P}) = \rho_V \quad (14)$$

در معادله ۱۴، ϵ_0 ثابت دی‌الکتریک (ضریب گذردهی) خلأ و \mathbf{P} بردار قطبش الکتریکی است. ρ_V تراکم بار الکتریکی فضایی و D جابه‌جایی الکتریکی است. این معادله، میدان الکترواستاتیک را در مواد دی‌الکتریک توصیف می‌کند.

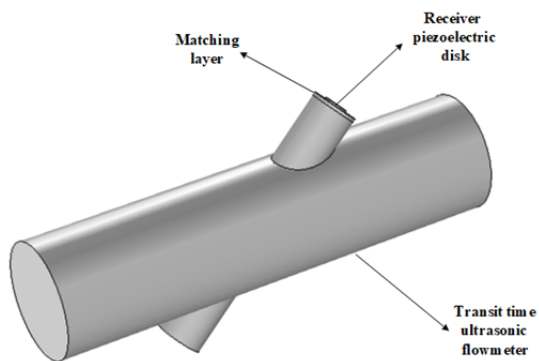
۴- روش مدل‌سازی و شبیه‌سازی

در بخش‌های قبلی، مقالاتی که در مورد نحوه انتشار موج صوتی درون مبدل و همین‌طور محیط اطراف آن بود، مورد بررسی قرار گرفتند. همان‌طور که پیداست، تاکنون بررسی رفتار موج اولتراسونیک و مدل‌سازی رفتار آن به‌شکلی یکپارچه برای یک مبدل اولتراسونیک به‌همراه یکنواخت‌ساز امپدانس (مچینگ) و محیط انتشار موج آکوستیک صورت نپذیرفته است. در صورت رسیدن به این شکل یکپارچه و شبیه‌سازی آن با نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مهندسی می‌توان نحوه عملکرد یک دی‌سنج اولتراسونیک تحت شرایط مختلف محیطی نظیر تاثیر ترکیب نمونه‌های نفت خام سبک، سنگین و متوسط (مخلوط) روی عملکرد سنسور پیزوالکتریک [PZT-5] را بررسی نمود. برای این کار، ابتدا پیزوسرامیک به‌همراه محیط مایع ساکن اطراف آن مدل و شبیه‌سازی می‌شود و تاثیر پارامترهای مختلف از جمله دمای سیال تحت فشار اتمسفریک و نوع (ترکیب) سیال روی عملکرد سنسور پیزوالکتریک [PZT-5] درون فلومتر زمان‌گذر مایع بررسی می‌شوند. سپس خود پیزوسرامیک به‌همراه تطبیق‌گر (مچینگ) امپدانس و همچنین اثر ماده تطبیق‌گر روی عملکرد سنسور پیزوالکتریک، شبیه‌سازی و بهینه می‌شوند. کل مدل به سه زیرمدل تقسیم می‌شود. از یک کوپل یک‌طرفه روش المان محدود (FEM) به گالرکین گسسته (DG) برای فرستادن موج از فرستنده استفاده می‌شود و از یک کوپل یک‌طرفه DG به FEM برای فرستادن موج از دریافت‌کننده استفاده می‌شود. یک سیگنال ولتاژ ورودی اعمال شده به فرستنده منجر به تغییر شکل مکانیکی مبدل

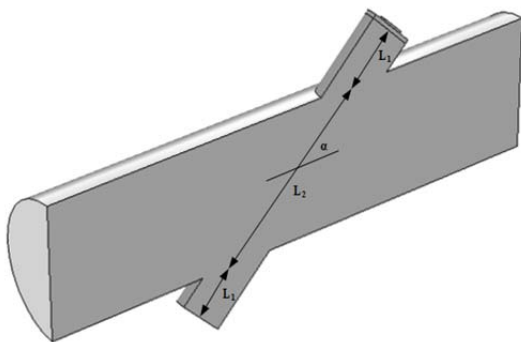
پیزوالکتریک فرستنده و هندسه دیگر شامل جریان‌سنج است که خود دارای بدنه کنتور و کانال انتشار سیگنال اولتراسونیک و پیزوالکتریک گیرنده هستند)، استفاده شد. این سه زیرمدل برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی استفاده شده است. جزئیات مربوط به دو هندسه در شکل‌های ۳ و ۴ و جدول ۱ به تفصیل ارائه شده است.



شکل ۳) نمای سه‌بُعدی از هندسه سنسور فرستنده در فلومتر اولتراسونیک



(الف)



(ب)

شکل ۴) نمای سه‌بُعدی از هندسه بدنه و سنسور گیرنده در فلومتر اولتراسونیک و موقعیت L_1 و L_2 در فلومتر اولتراسونیک؛ (الف) نمای سه‌بُعدی از هندسه بدنه و سنسور گیرنده در فلومتر اولتراسونیک، (ب) موقعیت L_1 و L_2 در فلومتر اولتراسونیک

جدول ۱) مشخصات مربوط به هندسه کنتور، سنسورهای گیرنده و فرستنده

نام	شرح	مقدار
D	قطر فلومتر اولتراسونیک	$5 \times 10^{-3} \text{ m}$
D_1	قطر مبدل فرستنده و گیرنده	$2 \times 10^{-3} \text{ m}$
D_2	قطر مبدل فرستنده و گیرنده	$1 \times 10^{-3} \text{ m}$
L'	طول فلومتر اولتراسونیک	$2 \times 10^{-3} \text{ m}$
$2L_1 + L_2$	طول مسیر انتشار موج	$1/1610.2 \times 10^{-3} \text{ m}$
L_3	ضخامت لایه تطبیق‌گر امپدانس	$1/481 \times 10^{-3} \text{ m}$
L_4	ضخامت دیسک پیزوالکتریک	$7/40.5 \times 10^{-3} \text{ m}$
α	میزان زاویه لوله و مبدل	45°

پیزوالکتریک می‌شود که به دلیل اثر پیزوالکتریک معکوس است. در مازول آکوستیک، اکثر معادلات بر مبنای روش المان محدود هستند. البته استثنائاتی هم مانند معادله موج جابه‌جایی وجود دارد که از روش متدوال گالرکین گسسته (DG-FEM) استفاده می‌کند. حل مدل با استفاده از FEM نیاز به مش محاسباتی دارد. حل در هر المان مش (المان‌های محدود) با یک تابع شکل (یک مبنای محلی یا تابع درون‌یابی) تقریب زده می‌شود. تقسیم توصیف‌شده کل مدل به سه زیرمدل دارای یک زمینه مشخص است. قسمت‌هایی که مبدل‌های پیزوالکتریک را مدل می‌کنند، از FEM معمولی استفاده می‌کنند، در حالی که انتشار موج اولتراسونیک توسط روش DG مدل‌سازی می‌شود. حل‌کننده‌های وابسته به زمان برای هر دو روش متفاوت است که باعث می‌شود کوپل مستقیم FEM به DG یا DG به FEM، غیرممکن شود. راه‌حل مورد بحث در این پژوهش، مبتنی بر کوپل یک‌طرفه غیرمستقیم بین مدل‌هایی است که از طرح‌های عددی متفاوت استفاده می‌کنند. بدین ترتیب، اپراتورها نتایج بین زیرمدل‌ها را نمایش و کوپل‌های لازم را ارائه می‌دهند. این کار از طریق اپراتورهای کوپل نگاشت همانی انجام می‌شود. این‌ها به ترتیب روی مدل‌های فرستنده-سیال و گیرنده-سیال استفاده می‌شوند. همه معادلات بر این سه زیرمدل (آکوستیک، الکترواستاتیک، مکانیک جامدات، معادله موج جابه‌جایی و فاز سیال) به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار تجاری COMSOL Multiphysics 5.3 حل خواهد شد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای محاسبه مقدار ماکزیمم ولتاژ ایجادشده توسط مبدل‌ها و سرعت صوت درون سیال به‌منظور صحت‌سنجی عملکرد فلومتر استفاده خواهد شد. حل معادلات در شبیه‌سازی به صورت پردازش موازی و روی یک سیستم با مشخصات Intel (R) Core (TM) i7 CPU 920 @ 2.67 GHz, 8 core Windows 10 pro روی سیستم عامل انجام شده است.

۴-۱- هندسه فلومتر اولتراسونیک

شبیه‌سازی به صورت سه‌بُعدی انجام می‌شود. تصاویر اساسی از جریان‌سنج اولتراسونیک مدل‌شده (با استفاده از یک خط متقارن) با حاشیه‌نویسی و هندسه در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. جریان‌سنج شامل یک لوله اصلی (طول کنتور) و یک لوله سیگنال کوچک‌تر (مسیر انتشار پالس‌های صوتی) است که در یک زاویه α نسبت به بدنه کنتور قرار می‌گیرد. قطر کنتور D ، 5 mm بوده، در حالی که قطر لوله سیگنال (مسیر انتشار موج‌های صوتی) 2 mm است و نسبت به بدنه کنتور (طول کنتور) $\alpha = 45^\circ$ ، زاویه دارد. طول مسیر انتشار سیگنال‌های اولتراسونیک برابر با $L = 2L_1 + L_2$ بوده که در شکل ۴-الف به آن اشاره شده است. مقدار مربوط به L در جدول ۱ به تفصیل ارائه شده است. دو مبدل پیزوالکتریک که هر دو در انتهای لوله سیگنال قرار می‌گیرند، به‌عنوان فرستنده و گیرنده عمل می‌کنند.

همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، این مدل، انتشار موج آکوستیک را مورد مطالعه قرار می‌دهد که ابتدا در شرایط ساده ساکن است. این مدل مساله کامل سه‌بُعدی را با شرایط متقارن اعمال شده بر صفحه سهمی ساختار شامل پدیده‌های فیزیکی زیر از قبیل انتشار موج، معادلات حاکم بر پیزوالکتریک و غیره است. از آنجایی که این مدل به سه زیرمدل تقسیم می‌شود، برای سادگی مدل‌سازی و همچنین بررسی هر چه بهتر پدیده‌های آکوستیک، از دو جزء که هر کدام شامل یک هندسه جداگانه هستند (یک هندسه شامل

۴-۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

نحوه انتشار موج در سیال ساکن درون فلومتر اولتراسونیک تحت فشار اتمسفریک و دمای $20-70^{\circ}\text{C}$ قابل مشاهده باشد) که برای تبدیل بین امواج الکتریکی و مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیگنال ورودی اعمال شده به فرستنده یک پالس ولتاژ سینوسی (هم‌ساز) با دامنه ولتاژ $V_0=5.0\text{V}$ ، فرکانس رزونانس $f_0=2/5\text{MHz}$ و دوره $2\mu\text{s}$ است. شرایط عملیاتی فلومتر اولتراسونیک زمان‌گذر و اطلاعات مربوط به سیالات مورد شبیه‌سازی و لایه تطبیق‌گر به صورت مفصل و دقیق در جدول‌های ۴-۲ آورده شده است.

جدول ۲) سیالات بررسی شده و شرایط عملیاتی مربوط به آنها

نوع سیال	بازه دمای عملیاتی سیال ($^{\circ}\text{C}$)	بازه فشار عملیاتی سیال (atm)
نفت خام سبک	۲۰-۷۰	۱
نفت خام سنگین	۲۰-۷۰	۱
نفت خام متوسط	۲۰-۷۰	۱

جدول ۳) ماده پیزوالکتریک بررسی شده، خواص فیزیکی و شرایط عملیاتی مربوط به آن

نوع ماده پیزوالکتریک	فرکانس رزونانس (MHz)	نسبت قطر به ضخامت دیسک پیزوالکتریک	جنس لایه تطبیق‌گر امپدانس
PZT-5J	۲/۵	۱۳/۵۰۴۴	آکرلیک پلاستیک

جدول ۴) نوع لایه مچینگ بررسی شده، خواص فیزیکی و شرایط عملیاتی مربوط به آنها

نوع لایه تطبیق‌گر	مدول یانگ (GPa)	چگالی (Kg/m^3)	نسبت پواسون
آکرلیک پلاستیک	۳/۲	۱۱۹۰	۰/۳۵

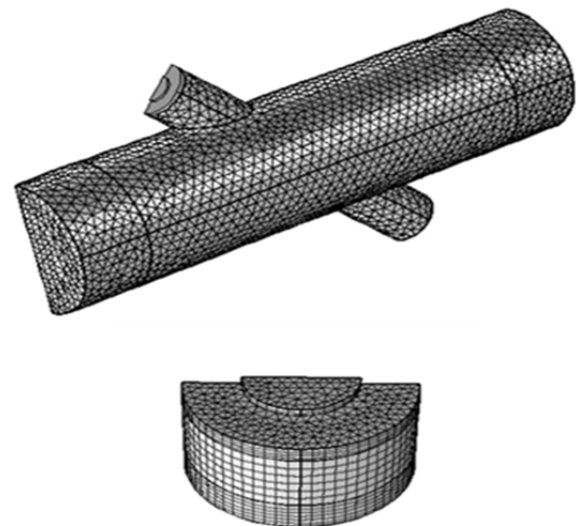
۵- تجزیه و تحلیل نتایج

۵-۱- بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی محاسباتی

برای اینکه خطاهای حاصل از شبیه‌سازی کاهش پیدا کند، بایستی در ابتدا شبکه مناسبی برای حل معادلات حاکم بر مساله انتخاب شود. هدف از انجام شبیه‌سازی‌ها در این قسمت، حاصل‌کردن اطمینان از استقلال نتایج از شبکه‌بندی و همچنین اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از مقایسه آنها با داده‌های آزمایشگاهی است. در پژوهش حاضر از پنج شبکه با تراکم‌های مختلف و روش مشابه در تولید برای یافتن بهترین شبکه محاسباتی استفاده شد. جدول ۵ به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی فلومتر اولتراسونیک زمان‌گذر در حالت سیال ساکن با پنج شبکه با تراکم‌های مختلف و مقایسه آنها با داده‌های آزمایشگاهی^[16] برای نمونه نفت خام سبک در دمای 20°C و فشار اتمسفریک می‌پردازد و همچنین پارامتر سرعت صوت در نمونه نفت خام سبک، به‌عنوان معیار انتخاب شبکه‌بندی انتخاب می‌شود.

در ابتدا با افزایش مش، متوسط خطا به‌صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد، اما در ادامه بر خلاف تصور، برای این هندسه خاص همان‌طور که از جدول ۵ مشخص است، افزایش دانسیته مش نه‌تنها تغییر چندانی در نتایج ایجاد نمی‌کند، بلکه متوسط خطا نیز نسبت به دو مش اولیه تغییر آنچنانی از خود نشان نمی‌دهد و تقریباً ثابت می‌ماند. برای هر هندسه شبکه‌بندی بهینه‌ای وجود دارد که بیش از آن سبب افزایش زمان محاسباتی می‌شود و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. در نتیجه برای شبیه‌سازی مورد نظر در این پژوهش، از نظر دقت و زمان محاسباتی، شبکه‌بندی با تراکم 624×0.5 با زمان محاسباتی ۱۱ ساعت، به‌عنوان شبکه‌بندی بهینه انتخاب شد.

برای انجام شبیه‌سازی تاثیر ترکیب نمونه‌های نفت خام سبک، سنگین و متوسط (مخلوط) روی عملکرد سنسور پیزوالکتریک [PZT-5J] در فلومتر اولتراسونیک زمان‌گذر، هندسه مورد نظر در داخل خود نرم‌افزار تجاری COMSOL Multiphysics 5.3 ایجاد شد و عمدتاً توسط مش ساختاریافته چهارضلعی منفصل و قسمت‌های مربوط به هندسه پیزوالکتریک (مبدل‌ها) با مش ساختاریافته مثلثی منفصل و مش خمیده، شبکه‌بندی شده است. سپس هندسه ایجاد شده برای حل مدل‌های فیزیکی مختلف (آکوستیک، الکترواستاتیک و غیره) و میدان جریان وارد دامنه محاسباتی مدل‌های فیزیکی COMSOL Multiphysics شد. نمونه‌های نفت خام سبک، سنگین و متوسط به‌عنوان سیال در این شبیه‌سازی‌ها به کار گرفته می‌شوند. نحوه انتشار موج و عملکرد سنسور پیزوالکتریک در این سیالات سنجیده می‌شوند و زمان‌های سیگنال انتشاری و سرعت صوت در این سیالات به دست می‌آیند و با مقالات اعتبارسنجی می‌شوند. راه‌حل مورد بحث در این مقاله مبتنی بر کوپل یک‌طرفه غیرمستقیم بین مدل‌هایی است که از طرح‌های عددی متفاوت استفاده می‌کنند. دامنه شبیه‌سازی و همچنین نمونه‌ای از شبکه‌بندی انجام شده برای دو بخش اصلی کنتور اولتراسونیک در شکل ۵ آورده شده است.



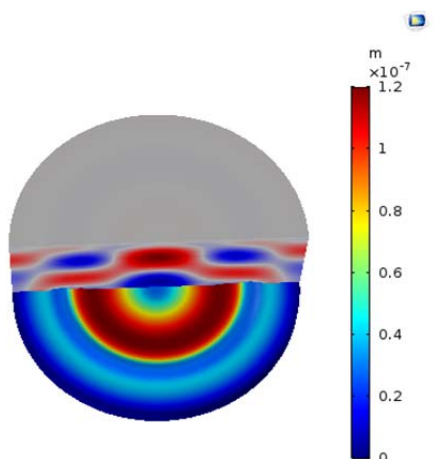
شکل ۵) شبکه‌بندی در فلومتر اولتراسونیک، مبدل‌های پیزوالکتریک و دامنه محاسباتی

از آنجایی که سیال درون فلومتر اولتراسونیک زمان‌گذر، در این پژوهش در حالت ساکن مورد بررسی قرار می‌گیرد، شرایط مرزی برای ورودی و خروجی در نظر گرفته نمی‌شود (به‌عبارتی سرعت سیال برابر با صفر است) و همچنین دیواره فلومتر یک شرط مرزی ثابت (سخت) صوتی به حساب می‌آید که جزء نرمال شتاب (و در نتیجه سرعت) صفر است. سایر شرایط مرزی با توجه به معادلات حاکم بر مساله در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics به‌صورت پیش‌فرض موجود است یا با توجه به شرایط عملیاتی تعریف می‌شود که در ادامه به آن خواهیم پرداخت. فرستنده و گیرنده می‌توانند به‌طور متناوب به‌جای یکدیگر مورد استفاده قرار بگیرند. بنابراین، اصول ساخت آنها یکسان است. قسمت اصلی دیسک شبیه‌سازی شده از مواد پیزوالکتریک است (در این قسمت از مطالعه، یک نمونه ماده پیزوالکتریک PZT-5J انتخاب می‌شود تا

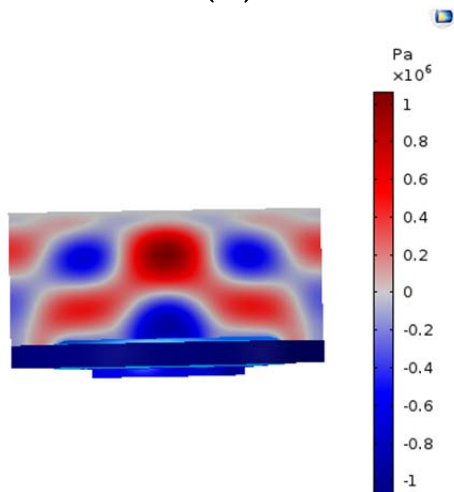
پیزوالکتریک‌ها در اثر همین ارتعاشات و جابه‌جایی‌ها موجی ایجاد می‌کنند که این موج از جنس فشار است. کانتور سمت راست در شکل ۶، تغییرات فشار مربوط به موج آکوستیک اولتراسونیک را درون نمونه‌های نفت خام (که در شکل ۶ برای آشنایی بیشتر با مفاهیم، نمونه نفت خام سبک انتخاب شده است) در نزدیک فرستنده، نشان می‌دهد که از مرتبه مگاپاسکال است. ماکزیمم جابه‌جایی ایجاد شده در لایه تطبیق‌گر برابر با ۰/۱۲ میکرومتر و همچنین ماکزیمم فشار مربوط به موج صوتی درون نفت سبک برابر با ۱/۰۷ مگاپاسکال است.

انتشار موج صوتی اولتراسونیک روی سطح متقارن فلومتر با مبدل پیزوالکتریک از نوع [PZT-5J] برای نمونه نفت خام سبک در حالت ساکن تحت فشار اتمسفریک و دمای ۲۰°C در شکل ۷ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، فشار موج صوتی ایجاد شده در نزدیک فرستنده از مرتبه ۱۰^۶ پاسکال است، اما بعد از گذشت لحظاتی (۳ گام زمانی)، از مقدار فشار امواج صوتی اولتراسونیک کاسته می‌شود و به مرتبه ۱۰^۵ پاسکال می‌رسد و به‌نوعی پالس‌های صوتی ضعیف می‌شوند. مدت زمانی که طول می‌کشد تا سیگنال فشار به مبدل گیرنده برسد، برابر با $t=12\mu s$ است.



(الف)



(ب)

شکل ۶ انتشار موج آکوستیک اولتراسونیک از فرستنده در حالت جریان ساکن برای نمونه نفت خام سبک؛ (الف) کانتور جابه‌جایی‌های پیزوالکتریک در اثر ارتعاشات، (ب) کانتور تغییرات فشار امواج صوتی در نزدیکی فرستنده

جدول ۵ بررسی نتایج استقلال از شبکه‌بندی برای سرعت صوت در نفت سبک

تراکم شبکه‌بندی	سرعت صوت تجربی (m/s)	سرعت صوت شبیه‌سازی شده (m/s)	متوسط خطا (%)	زمان انجام محاسبات (h)
۱۹۸۷۵	۱۴۲۰	۱۴۰۹/۶۸۴۵۲	۰/۷۲۶۴۴	۴
۳۷۱۲۴	۱۴۲۰	۱۴۱۲/۱۱۰۱۴	۰/۵۵۵۶۲	۸/۵
۶۲۴۰۵	۱۴۲۰	۱۴۱۳/۷۸۶۶۸	۰/۴۳۷۵۵	۱۱
۷۹۶۲۷	۱۴۲۰	۱۴۱۳/۷۸۶۷۸	۰/۴۳۷۵۰	۱۳/۵
۹۹۲۲۸	۱۴۲۰	۱۴۱۳/۷۸۷۸۲	۰/۴۳۷۴۷	۱۶

۲-۵- اعتبارسنجی مدل و داده‌های شبیه‌سازی

در این مطالعه برای اعتبارسنجی مدل عددی از داده‌های ارایه شده توسط جورج و همکاران برای سرعت صوت در نمونه‌های نفت خام استفاده شد^[16]. با توجه به اینکه فلومترهای اولتراسونیک تحت تاثیر خواص آکوستیک سیال هستند و عواملی همچون ترکیب سیال، دما و دانسیته روی اندازه‌گیری آنها تاثیرگذارند، اعتبارسنجی برای سرعت صوت (تابعی از دما) در سه نمونه نفت خام (سبک، سنگین و متوسط) انجام شد که در بازه عملیاتی مربوط به کنتور هستند. ویژگی بارز و خوب ناحیه عملیاتی مربوط به کنتور اولتراسونیک و سه نمونه نفت خام مورد استفاده درون کنتور در حالت سیال ساکن، این است که خطای کنتور به‌منظور تخمین سرعت صوت در سیالات نام‌برده برای حصول اطمینان از عملکرد صحیح کنتور، در این ناحیه کم و تقریباً خطی است. به همین دلیل توصیه می‌شود که همیشه کنتور در این بازه کار کند که معمولاً دمای سیال بین ۲۰-۷۰°C است. جدول ۶ مقایسه نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی CFD و داده‌های تجربی^[16] را نشان می‌دهد.

جدول ۶ مقایسه نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی^[16] برای سرعت صوت سیال در کنتور اولتراسونیک

نوع سیال	دمای عملیاتی سیال (°C)	سرعت صوت تجربی (m/s)	سرعت صوت شبیه‌سازی شده (m/s)	متوسط خطا (%)
نفت سبک	۲۰	۱۴۲۰	۱۴۱۳/۷۸۶۶۸	۰/۴۳۷۵
نفت سنگین	۴۰	۱۴۳۲	۱۴۲۵/۲۵۸۶۸	۰/۴۷۰۷
نفت متوسط	۶۰	۱۲۹۲	۱۲۹۰/۳۴۷۶۸	۰/۱۲۷۸

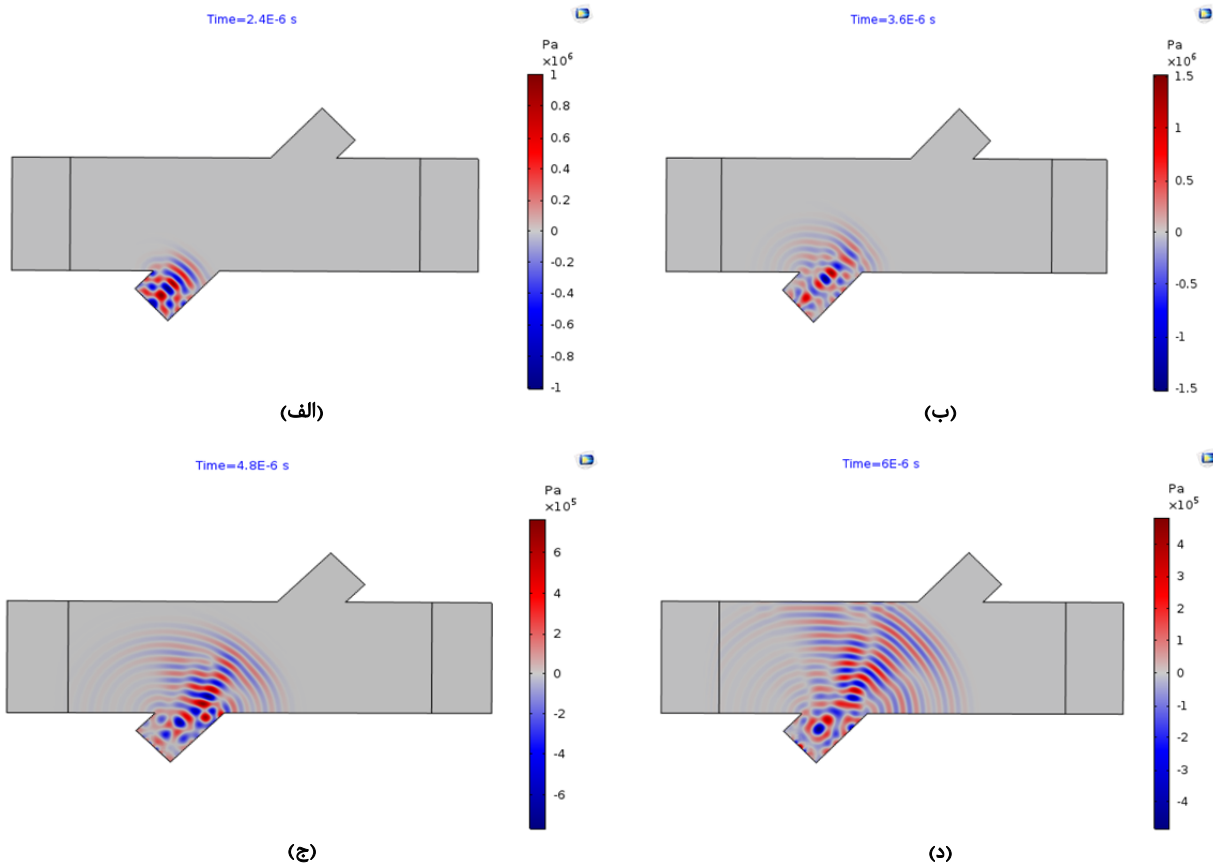
خطای نسبی و میانگین خطای وزنی (WME) ارایه شده در جدول ۶ از روابط ۱۴ و ۱۵ محاسبه می‌شود.

$$ER\% = \left| \frac{C_{exp} - C_{simulated}}{C_{exp}} \right| \times 100 \quad (15)$$

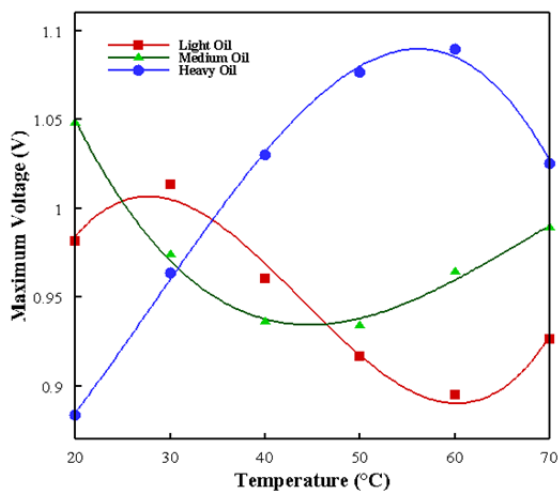
$$WME = \frac{\sum_i^n X_i E_i}{\sum_i^n X_i} \quad (16)$$

۳-۵- نحوه انتشار موج صوتی اولتراسونیک

انتشار موج صوتی اولتراسونیک نزدیک فرستنده در زمان $t=2/4\mu s$ در شکل ۶- الف و ب نشان داده شده است. برای اینکه نحوه انتشار موج آکوستیک درون نمونه‌های نفت خام به‌خوبی دیده شود، دامنه محاسباتی برای نمونه نفت خام سبک در دمای ۲۰°C تحت فشار اتمسفریک در نزدیکی فرستنده به‌صورت محدود انتخاب شد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، جابه‌جایی‌ها و تغییر شکل ایجاد شده در لایه تطبیق‌گر امپدانس روی سنسور فرستنده، به‌علت وجود اثر معکوس پیزوالکتریک بوده که از مرتبه ۱۰^{-۷} است.



شکل ۷ انتشار سیگنال فشار آکوستیک در چهار گام زمانی برای نمونه نفت خام سبک در حالت سیال ساکن؛ الف) $0.2/4 \mu\text{s}$ ب) $0.3/6 \mu\text{s}$ ج) $0.4/8 \mu\text{s}$ د) $6 \mu\text{s}$



نمودار ۸ تغییرات ماکزیمم ولتاژ سیگنال‌های الکتریکی دریافتی برای سنسور پیزوالکتریک [PZT-5] برحسب دمای نمونه‌های نفت خام (سبک، سنگین و متوسط؛ $70-20^\circ\text{C}$) در فشار ۱atm

۵-۵- بررسی تاثیر دمای سیال بر عملکرد سنسور پیزوالکتریک

در این قسمت، تاثیر دمای نمونه‌های نفت خام روی عملکرد سنسور پیزوالکتریک [PZT-5] در فلومتر اولتراسونیک مایع در حالت ساکن مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شرایط عملیاتی انتخاب شده برای نمونه‌های نفت خام (سبک، سنگین و متوسط) براساس داده‌های گزارش شده^[16]، تاثیرات دمای نمونه‌های نفت خام در بازه دمایی $20-70^\circ\text{C}$ تحت فشار اتمسفریک روی عملکرد سنسور پیزوالکتریک [PZT-5] درون فلومتر اولتراسونیک زمان‌گذر مایع در حالت ساکن بررسی شد. با توجه به پژوهش صورت‌گرفته

۵-۴- بررسی تاثیر ترکیب سیال بر عملکرد سنسور پیزوالکتریک

در نمودار ۸، تغییرات ماکزیمم ولتاژ سیگنال‌های الکتریکی دریافتی برای سنسور پیزوالکتریک [PZT-5] برحسب دمای نمونه‌های نفت خام سبک، سنگین و متوسط نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، میانگین ماکزیمم ولتاژ سیگنال‌های الکتریکی دریافتی برای فلومتر اولتراسونیک حاوی نمونه نفت خام سنگین بیشتر از بقیه است. به عبارت دقیق‌تر، میانگین ماکزیمم ولتاژ سیگنال‌های دریافتی برای فلومتر اولتراسونیک حاوی نمونه‌های نفت خام سبک، سنگین و متوسط به ترتیب برابر با 0.9491 ، 0.9743 و 1.0115 ولت هستند. این در حالی است که ماکزیمم ولتاژ دریافتی برای نفت خام سبک در دمای 30°C برابر با 1.0136 ، برای نمونه نفت خام سنگین در 60°C برابر با 1.0895 و برای نمونه نفت خام متوسط در 20°C برابر با 1.0482 است.

با توجه به نمودار ۸، تغییرات ماکزیمم ولتاژ سیگنال‌های الکتریکی دریافتی برای سنسور پیزوالکتریک [PZT-5] در سه نمونه نفت خام به وضوح نشان می‌دهد که حرکت موج صوتی به‌طور عمده به حرکت (دینامیک) مولکولی داخلی در هر نمونه نفتی بستگی دارد. در طول مسیر انتشار موج آکوستیک، به‌خصوص در مورد سیال مایع، اتلاف انرژی وجود دارد که وابسته به دما، نوع مایع، چگالی سیال و فشار سیال عبوری است. به همین دلیل، شدت انرژی ارسال شده توسط حسگر اول برای حس شدن توسط حسگر دوم یک مقدار کمینه دارد. به‌منظور ارسال چنین موجی برای شرایط محیطی مختلف محیط انتشار، می‌بایست پیزوسرامیک حداقل توانایی ارسال آن مقدار کمینه انرژی را داشته باشد. به همین منظور باید پارامترهای ساخت سرامیک پیزو بهینه شوند.

همان‌طور که در نمودار ۲ مشاهده می‌شود، در قسمت الف، ب و ج با افزایش دمای نمونه‌های نفت خام سبک، سنگین و متوسط، مقدار خطاهای سرعت صوت شبیه‌سازی شده رفته‌رفته کاهش می‌یابد. میزان خطای میانگین برای همه نقاط شبیه‌سازی شده نسبت به داده‌های آزمایشگاهی در نمونه‌های نفت خام سبک، سنگین و متوسط به ترتیب ۰/۲۳۳۳۶، ۰/۴۳۳۳۹ و ۰/۱۳۳۷۸٪ است.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد فلومتر اولتراسونیک زمان‌گذر با سنسور پیزوالکتریک PZT-5J برای نفت خام سبک، سنگین و متوسط (مخلوط) با استفاده از معادله موج در مسیر انتشار موج آکوستیک و روش حل المان محدود در شرایط ناپایا مدل‌سازی و با استفاده از نرم‌افزار تجاری COMSOL Multiphysics 5.3 شبیه‌سازی شد. برای این کار، ابتدا پیزوسرامیک به‌همراه محیط مایع ساکن اطراف آن مدل و شبیه‌سازی شد و اثر پارامترهای مختلف از جمله دمای سیال، فشار سیال و نوع (ترکیب) سیال روی عملکرد سنسور پیزوالکتریک PZT-5J درون فلومتر اولتراسونیک زمان‌گذر مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ارایه شده توسط پژوهشگران برای سرعت صوت در نمونه‌های نفت خام سبک، سنگین و متوسط اعتبارسنجی انجام شد و خطای نسبی به ترتیب حدود ۰/۲۳۳۳۶، ۰/۴۳۳۳۹ و ۰/۱۳۳۷۸٪ به دست آمد. لذا شبیه‌سازی CFD صورت‌گرفته توانایی پیش‌بینی نسبتاً خوبی را داراست و می‌توان به نتایج به‌دست‌آمده از آن در کنتورهای اولتراسونیک زمان‌گذر اعتماد نمود. خروجی این پژوهش، ارایه مدل عددی است که می‌توان از آن در مطالعه پارامتری کنتور اولتراسونیک، کاهش هزینه‌های سنگین آزمایشگاهی و بررسی طرح‌های جدید یا اصلاح کنتور بهره برد.

تشکر و قدردانی: از آزمایشگاه تحقیقاتی CFD و پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات واقع در دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه علم و صنعت، کمال سپاس را داریم.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تعارض منافع: هیچگونه تعارضی در منافع این مقاله وجود ندارد.

سهم نویسندگان: بهمن شریفی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناسی/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۸۰٪)؛ سیدحسن هاشم‌آبادی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۰٪)

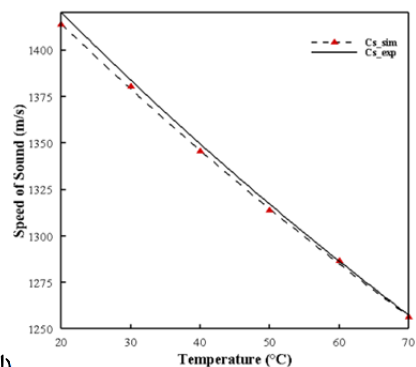
منابع مالی: پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات، کلیه هزینه‌های این مطالعه را بر عهده گرفته است.

۷- پی‌نوشت

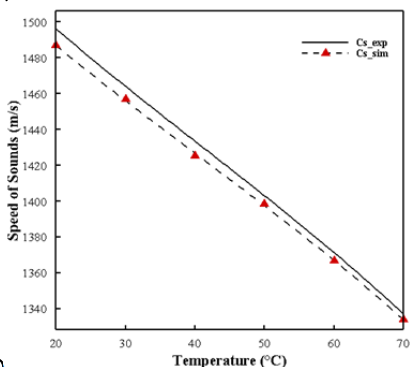
- c سرعت صوت در سیال (m/s)
- c_E مولفه‌هایی از تانسور ثابت سختی الاستیک (کششی) در میدان الکتریکی ثابت (Nm^{-2})
- D مولفه‌های میدان جابه‌جایی الکتریکی (Cm^{-2})
- d مولفه‌های تانسور ثابت پیزوالکتریک در فرم بار- کرنش (Cm^{-2})
- d^T مولفه‌های تانسور ثابت پیزوالکتریک در فرم بار- کرنش در تنش ثابت (Cm^{-2})
- E مولفه‌های بردار میدان الکتریکی (Vm^{-2})
- e مولفه‌های تانسور ثابت پیزوالکتریک در فرم بار- تنش (Cm^{-2})
- e^T مولفه‌های تانسور ثابت پیزوالکتریک در فرم بار- تنش تحت تنش ثابت (Cm^{-2})
- F_V بردار نیروی حجمی (N)
- L فاصله طی‌شده توسط سیگنال اولتراسونیک (m)
- P فشار صوتی (Pa)

توسط پژوهشگران و داده‌های تجربی گزارش شده توسط آنها، سرعت صوت تابعی از دما است و با افزایش دما از $20-70^\circ\text{C}$ ، مقدار مربوط به آن کاهش می‌یابد. طبق رابطه ۱ و با توجه به ثابت‌بودن فاصله بین دو سر مبدل گیرنده و فرستنده، رابطه‌ای معکوس بین سرعت صوت در نمونه نفت خام سبک و زمان طی‌شده توسط سیگنال‌های اولتراسونیک وجود دارد. به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت صوت، زمان پرواز بین دو سر مبدل کاهش می‌یابد.

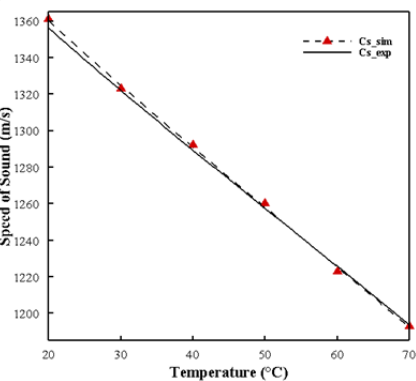
سرعت‌های صوت شبیه‌سازی شده در نمونه‌های نفت خام سبک، سنگین و متوسط به‌عنوان تابعی از دما در مقایسه با داده‌های تجربی در نمودار ۲ ارایه شده است. داده‌های سرعت صوت در سه نمونه نفت خام به‌وضوح نشان می‌دهد که حرکت موج صوتی به‌طور عمده به حرکت (دینامیک) مولکولی داخلی در هر نمونه نفتی بستگی دارد. از آنجایی که سرعت صوت در نفت خام سنگین، بزرگ‌تر از دو نمونه نفتی دیگر است، احتمالاً نشانه‌ای از برهم‌کنش درون‌مولکولی قوی بین مولکول‌های خاص در نفت خام سنگین وجود دارد. این روش (برهم‌کنش بین مولکول‌ها) توضیح می‌دهد که چرا مقدار سرعت صوت در نفت خام مخلوط (نفت متوسط) متوسط بین مقادیر مربوطه در نفت سبک و سنگین نیست.



(الف)



(ب)



(ج)

نمودار ۲ تغییرات سرعت صوت تجربی و شبیه‌سازی شده در نمونه‌های نفت خام به‌عنوان تابعی از دما تحت فشار ثابت (atm): الف) نفت سبک، ب) نفت سنگین، ج) نفت متوسط

measurement by numerical simulation. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2011;22(5):488-493.

5- Iooss B, Lhuillier C, Jeanneau H. Numerical simulation of transit-time ultrasonic flowmeters: Uncertainties due to flow profile and fluid turbulence. *Ultrasonics*. 2002;40(9):1009-1015.

6- Gonen T. *Electrical power transmission system engineering: Analysis and design*. 3rd Edition. Boca Raton: CRC press; 2015.

7- Mahadeva DV, Baker RC, Woodhouse J. Further studies of the accuracy of clamp-on transit-time ultrasonic flowmeters for liquids. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2009;58(5):1602-1609.

8- Tabin J. Ultrasonic metering of flow velocity based on transit time differentials. *Journal of Physics E Scientific Instruments*. 1987;20(5):559-561.

9- Sanderson ML, Yeung H. Guidelines for the use of ultrasonic non-invasive metering techniques. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2002;13(4):125-142.

10- Song G, Sethi V, Li HN. Vibration control of civil structures using piezoceramic smart materials: A review. *Engineering Structures*. 2006;28(11):1513-1524.

11- Uchino K. *Introduction to piezoelectric actuators and transducers* [Internet]. Unknown:Unknown Publisher?; 2003 [cited 10 Jan 2018]. Available from: <http://yon.ir/KslXK>

12- Pierce AD, Beyer RT. *Acoustics: An introduction to its physical principles and applications*. 1989 Edition. The Journal of the Acoustical Society of America. 1990;87(4):1826-1827.

13- Bonet J, Wood RD. *Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis*. 1st Edition. Cambridge: Cambridge University Press; 1997.

14- Mezheritsky AV. Elastic, dielectric, and piezoelectric losses in piezoceramics: How it works all together. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*. 2004;51(6):695-707.

15- Hou Z, Wu F, Liu Y. Phononic crystals containing piezoelectric material. *Solid State Communications*. 2004;130(11):745-749.

16- George AK, Singh RN, Arafin S. Equation of state of crude oil samples. *Journal of Petroleum and Environmental Biotechnology*. 2013;4(6):1000162.

P	بردار قطبش الکتریکی (Cm^{-2})
P_0	فشار جریان محیط ساکن (Pa)
Q	نرخ حجمی جریان (m^3s^{-1})
Q_m	منبع دامنه تک قطبی (s^{-2})
q_d	منبع دامنه دو قطبی (Nm^{-3})
S	مولفه‌های تانسور کرنش مکانیکی (بدون بعد)
S_E	مولفه‌هایی از تانسور کرنش فشاری در میدان الکتریکی ثابت (Pa^{-1})
T	مولفه‌های تانسور تنش مکانیکی (Nm^{-2})
$T_{A \rightarrow B}$	فاصله زمانی طی شده توسط سیگنال اولتراسونیک از مبدل فرستنده به گیرنده (s)
$T_{B \rightarrow A}$	فاصله زمانی طی شده توسط سیگنال اولتراسونیک از مبدل گیرنده به فرستنده (s)
u	میدان جابه‌جایی (m)
V	سرعت سیال (m/s)

علامه یونانی

α	زاویه انتشار التراسوند میان سیال ($^\circ$)
β_S	ضریب تراکم‌پذیری آدیاباتیک (Pa^{-1})
ϵ_0	ضریب گذردهی خلأ (Fm^{-1})
ϵ_S	مولفه‌هایی از تانسور ثابت دی‌الکتریک در کرنش ثابت (Fm^{-1})
ϵ_T	مولفه‌هایی از تانسور ثابت دی‌الکتریک در تنش ثابت (Fm^{-1})
K_S	مدول حجمی آدیاباتیک (Pa)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
ρ_V	تراکم بار الکتریکی فضایی (Cm^{-3})
σ	تنش کوشی (P)

زیرنویس‌ها

v	حجمی
exp	تجربی
sim	شبیه‌سازی

منابع

1- Hojjat Y, Ghane AR, Mirzamohamadi SH. Design, and fabrication of a transit time ultrasonic flow meter. *Modares Mechanical Engineering*. 2013;13(5):153-156. [Persian]

2- Orvatinia M, Gharibi A. Design and fabrication of a four-path ultrasonic flowmeter using the time-difference method. *Journal of Control*. 2017;11(2):55-62. [Persian]

3- Nygren MW. *Finite element modeling of piezoelectric ultrasonic transducers* [Dissertation]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology; 2011.

4- Zheng D, Zhang P, Xu T. Study of acoustic transducer protrusion and recess effects on ultrasonic flowmeter