

ارائه یک روش فرکانس پایین و دستگاه مربوطه به منظور اندازه‌گیری

سرعت صوت در مایعات

کامیار موقرنژاد*

عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی شیمی

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

k-movaghar@nit.ac.ir

امیرحسین تقی‌پور

دانشجوی دکتری مهندسی شیمی

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

A.H.taghipour@stu.nit.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶

چکیده

امواج صوتی از نوع امواج مکانیکی هستند که به کمک ارتعاش مولکول‌ها در سیالات جابه‌جا می‌شوند، از این رو سرعت صوت به پارامترهای عملیاتی از قبیل دما، فشار، دانسیته و ویسکوزیته سیال وابسته است. با توجه به وابستگی سرعت صوت به پارامترهای ترمودینامیکی مختلف سیالات و سهولت دستیابی به این پارامتر به خصوص در شرایط ترمودینامیکی بحرانی اندازه‌گیری این پارامتر از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه یک روش اندازه‌گیری سرعت صوت با فرکانس پایین ارائه شده است. اساس کار این روش بر مبنای روش اندازه‌گیری صوت به کمک پالس-اکو می‌باشد. در این پژوهش سیستم تولید پالس به کمک یک ژنراتور پالس کاملاً بومی و قابل برنامه‌نویسی کار می‌کند. به علاوه به منظور اطمینان از انرژی کافی پالس به منظور عبور از فضای نمونه، پالس تولید شده توسط یک مدار تقویت کننده، تقویت می‌شود. از سوی دیگر به دلیل تضعیف پالس‌های دریافتی در سوی دیگر سلول نمونه، پالس دریافتی طی سه مرحله تقویت می‌شود. به منظور اطمینان از عملکرد مناسب دستگاه ساخته شده، سرعت صوت در مایعاتی شامل آب، نرمال هگزان، نرمال هپتان در محدوده دمایی ۳۰۳/۱۵ تا ۳۳۳/۱۵ کلوین و در فشار اتمسفریک اندازه‌گیری و سپس مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر ارائه شده در مراجع مقایسه شد. درصد خطای نسبی مشاهده شده در محدوده ۱/۱ - و ۲/۷۴٪ قرار گرفت.

واژگان کلیدی: سرعت صوت، فرکانس پایین، تقویت کننده، زمان پرواز.

۱. مقدمه

امواج التراسونیک نوعی از امواج مکانیکی هستند که از طریق ارتعاش مولکول‌ها، اتم‌ها و یا اجزای دیگر در محیط منتشر می‌شوند. با توجه به توان و فرکانس منبع، امواج منتشر شده

میزان انرژی مشخصی را با خود حمل می‌کنند و این قابلیت در بسیاری از زمینه‌های علمی و صنعتی از قبیل: برش التراسونیک [۱۲]، تمیزکننده‌ها التراسونیک [۴] و حتی

خشک‌کن‌های التراسونیک [۵] مورد استفاده قرار گرفته است.

انتشار صوت در سیالات به عنوان یک پدیده فیزیکی شناخته می‌شود [۷] از این رو این خاصیت با سایر خواص ماده از جمله خواص ترمودینامیکی آن ارتباط دارد. ظرفیت حرارتی، دانسیته [۱۱] و ویسکوزیته [۹] از جمله این پارامترها می‌باشند. به علاوه محاسبه پارامتر سرعت صوت در شرایط بحرانی نسبت به محاسبه پارامترهای نظیر فشار و دانسیته بسیار ساده‌تر است. بر همین اساس برخی از محققین سعی کردند تا با جایگزینی این پارامتر با پارامترهای ترمودینامیکی دیگر اندازه‌گیری خواص ترمودینامیکی مواد را ساده‌تر کنند. از این جمله می‌توان ارائه یک معادله حالت جدید به شکل SVT به جای معادله حالت سنتی PVT اشاره کرد [۱۶]. حتی برخی دیگر از دانشمندان سعی کردند تا این پارامتر را به صورت تابعی از دما و فشار در مخلوط‌های دوتایی ارائه کنند [۱۸].

داده‌های سرعت صوت برای برخی مایعات خاص در حالت خالص و همین‌طور مخلوط دوتایی و چندتایی بسیاری از مایعات کمیاب می‌باشد، از این رو محاسبه این پارامتر در سیالات و به‌ویژه مخلوط‌های دو یا چندجزئی از اهمیت بالایی برخوردار است.

از زمان محاسبه سرعت صوت در هوا توسط نیوتن در قرن ۱۷ میلادی تا کنون، بسیاری از دانشمندان سعی در ارائه داده‌های سرعت صوت در سیالات مختلف و با دقت بیشتر کرده‌اند. پارامتر سرعت صوت در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته و از روش‌های مختلفی جهت ارائه این پارامتر در سیالات در مراجع علمی انتشار یافته است. به‌طور کلی می‌توان این روش‌ها را به دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد که شامل روش‌های تئوری [۱۵] و روش‌های آزمایشگاهی می‌باشند [۳]. روش‌های اندازه‌گیری سرعت صوت معمولاً از یک سنسور التراسونیک (پیزوالکتریک) جهت ارسال و دریافت امواج استفاده می‌کنند.

به این صورت که موج یا پالس ارسال شده پس از عبور از میان سیال مورد نظر و برخورد با یک سطح بازتابیده می‌شود و مجدداً توسط همان سنسور تشخیص داده می‌شود [۶]. روش دیگر استفاده از یک هیدروفون یا یک سنسور التراسونیک دیگر به جای سطح بازتاب‌کننده به منظور تشخیص موج ارسال شده است [۱۳]. مبنای کار هر دو روش به یک شکل است و از نظر فنی و فلسفه اندازه‌گیری سرعت صوت تفاوتی ندارند.

دستگاه ساخته شده در این مطالعه شباهت‌های بسیاری به دستگاه‌های دیگر دارد، اما با توجه به اینکه فرکانس کاری انتخاب شده نسبت به نمونه‌های ارائه شده در مراجع کم‌تر است (۱۰۰ کیلوهرتز [۱۴]، ۳ مگاهرتز [۱۰] و ۲ مگاهرتز [۱])، از نظر مکانیسم تولید و تشخیص امواج، تغییراتی در آن لحاظ شده است. در اغلب دستگاه‌های ساخته شده در این زمینه از یک تولید مبدل پالس به منظور تولید موج (مربعی، سینوسی و...) و تنظیم فرکانس و از یک اسیلوسکوپ به منظور رصد امواج دریافتی استفاده شده است [۸]، در حالی که در این مطالعه شکل موج تولیدی و فرکانس آن به کمک کد نویسی بدست آمده است. این امر باعث انعطاف پذیری بالایی در فرآیند ارسال امواج شده است. از سوی دیگر فرآیند دریافت پالس هم زمان با ارسال امواج تحت نظر قرار گرفته و نویزهای احتمالی حذف می‌شود. به‌علاوه فرآیند طراحی شده امکان تکرار یک سیکل ارسال و دریافت موج را در کسری از ثانیه دارد.

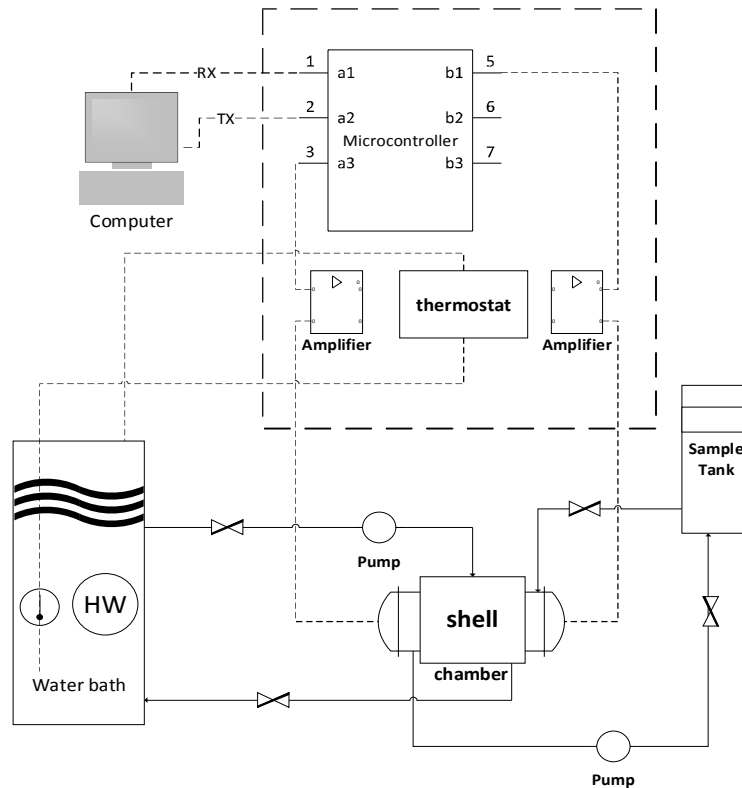
۲. مشخصات دستگاه ساخته شده

دستگاه ساخته شده در این تحقیق از سه بخش اصلی تشکیل شده است که شامل تولید کننده پالس، دریافت کننده پالس و کنترل کننده دما می‌باشد. شماتیک کلی دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است.

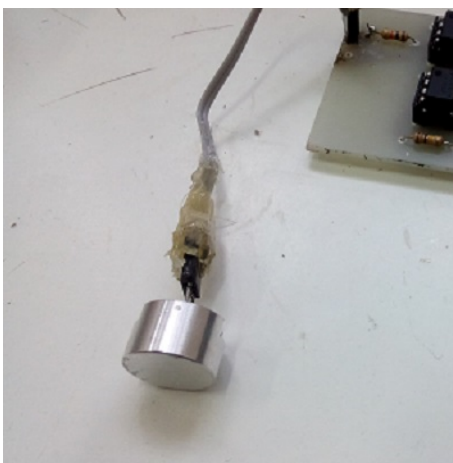
پیزوالکتریک استفاده شده در این دستگاه ساخت شرکت Changzhou Manorshi Electronics

به زبان ویژوال بیسیک^۱ استفاده شده است. با توجه به قدرت کم پالس تولید شده توسط میکروکنترلر، در مرحله بعد پالس تولیدی وارد یک تقویت کننده شده و سپس پالس با قدرت مناسب به سمت سنسور فرستنده ارسال می‌شود.

Co.Ltd و قطر آن ۱۶ میلی‌متر است که در شکل ۲ قابل مشاهده است. شکل ۳ شامل تصویر دستگاه ساخته شده (الف)، مخزن نمونه بسته شده (ب) و قسمت‌های مختلف مخزن نمونه (ج) و (د) است. به منظور تولید پالس در فرکانس ثابت (فرکانس انتخابی = ۴۰ کیلوهرتز)، از کدنویسی



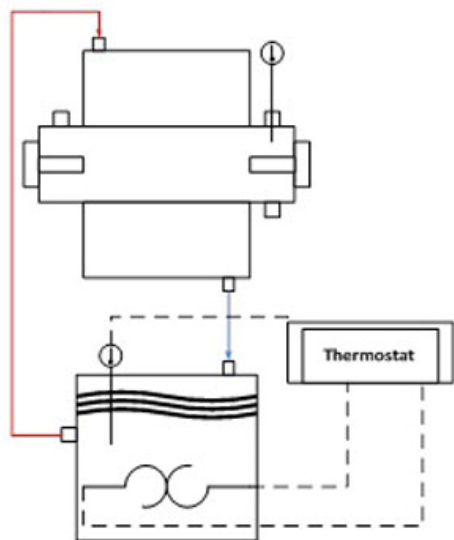
شکل ۱. شماتیک کلی دستگاه



شکل ۲. تصویر پیزوالکتریک به کاررفته در دستگاه ساخته شده

گیرنده پالس که در سمت دیگر مخزن نمونه تعبیه شده که شامل سه مرحله تقویت کننده است (مدار تقویت بر پایه آی سی LM741) که به صورت سری به هم متصل شده‌اند. پالس دریافتی پس از تقویت مجدداً توسط میکروکنترلر (ATmega32 ساخت شرکت Atmel) تشخیص داده می‌شود و با استفاده از تایمر داخلی میکروکنترلر اختلاف زمان بین ارسال و دریافت امواج به دست می‌آید.

درجه کلونین تغییر داد. پس از رسیدن دما به دمای مورد نظر سیستم اندازه‌گیری سرعت صوت کار خود را آغاز می‌کند.

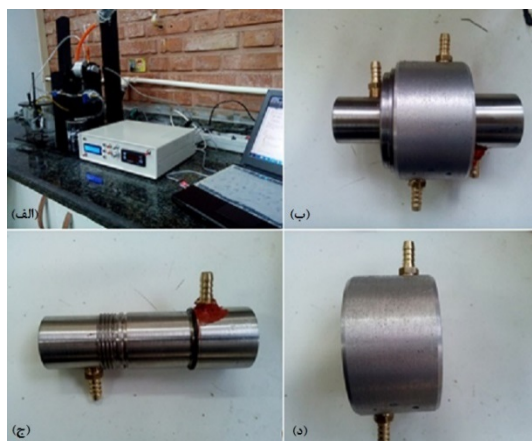


شکل ۴. شماتیک سیستم کنترل دمای نمونه

۳. بحث و ارائه نتایج

داده‌های سرعت صوت اندازه‌گیری شده در آب، نرمال هگزان و نرمال هپتان به کمک دستگاه ساخته شده به عنوان نمونه در این مقاله ارائه شده است. به منظور ارزیابی داده‌های به دست آمده، مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر ارائه شده در مراجع مقایسه شده است. جداول ۱ تا ۳ مقادیر سرعت صوت به دست آمده در این تحقیق، مقادیر ارائه شده در مراجع و درصد خطای نسبی را به ترتیب برای آب، نرمال هگزان و نرمال هپتان نشان می‌دهند.

در نهایت با توجه به مشخص بودن فاصله بین سنسور فرستنده و گیرنده، سرعت صوت در ماده مورد نظر با تقسیم مسافت بر زمان طی شده به دست می‌آید. کنترل کننده دمای طراحی شده در این مطالعه به‌طور کلی مانند یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای کار می‌کند.



شکل ۳. (الف)، (ب)، (ج) و (د) به ترتیب تصویر کلی از دستگاه، مخزن نمونه بسته شده و قسمت‌های مختلف مخزن نمونه

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، آب به عنوان سیال عامل به کمک یک مجموعه المنت گرمایی و ترموستات تا دمای مورد نظر گرم شده و سپس به سمت پوسته مخزن نمونه پمپ می‌شود. همراه با جریان آب در دمای مشخص در پوسته محفظه، نمونه موجود در لوله تا دمای مورد نظر گرم می‌شود. دمای نمونه نیز هم‌زمان اندازه‌گیری می‌شود. با این روش می‌توان دمای نمونه را از دمای محیط تا دمای

جدول ۱. مقادیر سرعت صوت اندازه‌گیری شده برای آب در دماهای مختلف و مقادیر ارائه شده در مراجع

T(K)	$C_{exp} / \text{m.s}^{-1}$	$C_{ref} / \text{m.s}^{-1}$ (E. W. Lemmon)	%ARD ^r
303.15	1500.99	1509.1699	-0.5414
308.15	1522.26	1519.8582	0.1585
313.15	1534.69	1528.9144	0.3780
318.15	1563.40	1536.4543	1.7543
323.15	1573.22	1542.5827	1.9862
328.15	1589.85	1547.3947	2.7437
333.15	1579.83	1550.9758	1.8605

جدول ۲. مقادیر سرعت صوت اندازه‌گیری شده برای نرمال هگزان در دماهای مختلف و مقادیر ارائه شده در مراجع

T(K)	$C_{exp} / \text{m.s}^{-1}$	$C_{ref} / \text{m.s}^{-1}$ (E.W. Lemmon)	%ARD
293.15	1130.82	-	-
298.15	1089.85	1078	1.0997
313.15	1020.35	1010.7	0.9550
333.15	911.515	921.8	-1.1157

جدول ۳. مقادیر سرعت صوت اندازه‌گیری شده برای نرمال هپتان در دماهای مختلف و مقادیر ارائه شده در مراجع

T(K)	$C_{exp} / \text{m.s}^{-1}$	$C_{ref} / \text{m.s}^{-1}$ (Dzida and Cempa)	%ARD
298.15	1274.57	1278.87	-0.3357
303.15	1255.42	1259.35	-0.3116
308.12	1232.78	1240.15	-0.5937
313.1	1222.76	1220.98	0.1461

۴. نتیجه‌گیری

شده نسبت به سایر مراجع که اندازه‌گیری خود را در محدوده فرکانس زیر ۱۰۰ کیلوهرتز انجام داده‌اند، بسیار پایین‌تر بوده که می‌توان آن را حاصل کنترل و رصد دقیق پالس ارسالی و دریافتی دانست.

در این مطالعه از یک روش اندازه‌گیری بر اساس مکانیسم پالس-اکو در فرکانس پایین به منظور اندازه‌گیری سرعت صوت در مایعات استفاده شد. سرعت صوت در آب، نرمال هگزان و نرمال هپتان در دماهای مختلف و فشار اتمسفر یک اندازه‌گیری و مقادیر به‌دست آمده با مقادیر ارائه شده در سایر مطالعات مقایسه شد. با در نظر گرفتن فرکانس کاری پایین استفاده شده در این تحقیق (۴۰ کیلوهرتز) و همچنین سطح انرژی پایین امواج تولید شده، درصد خطاهای گزارش

۵. سپاسگزاری

با سپاس فراوان از اعضای محترم باشگاه ربانیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل که در انجام این پژوهش ما را یاری کردند.

۶. مأخذ

- [1] Dzida, Marzena, and Magdalena Cempa., "Thermodynamic and acoustic properties of (heptane+dodecane) mixtures under elevated pressures." *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol.40, No.10, 2008, pp.1531-1541.
- [2] E.W. Lemmon, M.O. McLinden and D.G. Friend, "Thermophysical Properties of Fluid Systems" in *NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, Eds. P.J. Linstrom and W.G. Mallard, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 20899, doi: 10.18434/T4D303*, retrieved January 22, 2018.
- [3] Ewing, M. B., et al., "Thermophysical properties of alkanes from speeds of sound determined using a spherical resonator I. Apparatus, acoustic model, and results for dimethylpropane." *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol.19, No.7, 1987, pp.721-739.

- [4] Fuchs, F. John., "Ultrasonic Cleaning: Fundamental Theory and Application." *NASA. Marshall Space Flight Center, Aerospace Environmental Technology Conference*, 1995, pp. 369-378.
- [5] García-Pérez, J. V., et al., "Ultrasonic Drying for Food Preservation" *Power Ultrasonics*, Oxford: Woodhead Publishing, 2015, pp.875-910.
- [6] Gedanitz, Holger, et al., "An apparatus for the determination of speeds of sound in fluids." *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol.42, No.4, 2010, pp.478-483.
- [7] Gillespie, A. B., et al., "A new ultrasonic technique for the measurement of liquid level." *Ultrasonics*, Vol.20, No.1, 1982, pp.13-17.
- [8] Albo, PA Giuliano, et al., "High pressure density and speed-of-sound measurements in n-undecane and evidence of the effects of near-field diffraction." *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol.58, 2013, pp.95-100.
- [9] Gowrisankar, M., P. Venkateswarlu, and S. Sivarambabu., "Volumetric, speed of sound data and viscosity at (303.15 and 308.15) K for the binary mixtures of N, N-dimethylaniline+ aliphatic ketones (C3–C5), + 4-methyl-2-pentanone, + acetophenone, + cycloketones." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.20, No.2, 2014, pp.405-418.
- [10] Khasanshin, Talgat Salihovich, Vladimir Sergeevich Samuilov, and Alexandr Petrovich Shchemelev., "The sound velocity in liquid binary mixtures of n-alkanes." *High Temperature*, Vol.47, No.4, 2009, pp.527-532.
- [11] Lago, Simona, and PA Giuliano Albo. "Thermodynamic properties of acetone calculated from accurate experimental speed of sound measurements at low temperatures and high pressures." *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol.41, No.4, 2009, pp.506-512.
- [12] Lucas, M., et al., "Design and characterisation of ultrasonic cutting tools." *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol.50, No.1, 2001, pp.149-152.
- [13] Martin, Kevin, and David Spinks. "Measurement of the speed of sound in ethanol/water mixtures." *Ultrasound in medicine & biology*, Vol.27, No.2, 2001, pp.289-291.
- [14] Mosteiro, Laura, Lidia M. Casás, and José L. Legido., "Surface tension, density, and speed of sound for the ternary mixture {diethyl carbonate+p-xylene+ decane}." *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol.41, No.5, 2009, pp.695-704.
- [15] Pandey, J. D., et al. "Speed of sound, viscosity and refractive index of multicomponent systems: theoretical predictions from the properties of pure components." *Journal of molecular liquids*, Vol.81, No.2, 1999, pp.123-133.
- [16] Riazi, Mohammad R., and G. Ali Mansoori., "Use of the Velocity of Sound in Predicting the PVT Relations." *Fluid phase equilibria*, Vol.90, No.2, 1993, pp.251-264.
- [17] Van Itterbeek, A., G. J. Van den Berg, and W. Limburg., "Apparatus to measure the velocity of sound down to liquid helium temperatures with the optical method." *Physica*, Vol.20, No.1-6, 1954, pp.307-310.
- [18] Ye, Suyu, et al., "Speed of sound in binary mixtures as a function of temperature and pressure." *Fluid phase equilibria*, Vol.74, 1992, pp.177-202.

پی نوشت:

1. Visual Basic
2. Absolute Relative Deviation