Archive of SID

http://mjmec.ir

مجله علمی پژوهشی
مهندسی مکانیک مدرس
مرداد ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۵ ص‌ص ۱۵۳-۱۵۶

یادداشت تحقیقاتی
تاریخ دریافت ۹۱/۸/۹
تاریخ پذیرش ۹۱/۹/۱۶
ارائه در سایت ۹۲/۲/۳۰

**«یادداشت تحقیقاتی»**

# طراحی و ساخت دبی‌سنج آلتراسونیک زمان عبوری

**یوسف حجت[۱*]، علیرضا قانع[۲]، شاهد میرزامحمدی[۲]**

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، yhojjat@modares.ac.ir

**چکیده**- دبی‌سنج‌های آلتراسونیک بدون تماس با سیال، دبی را اندازه‌گیری می‌کنند که باعث افت فشار نمی‌شوند. در این پژوهش، یک دبی‌سنج آلتراسونیک براساس اندازه‌گیری زمان عبوری با تکنیک هترودین طراحی و ساخته شده است. در ابتدا مبانی عملکردی این نوع دبی‌سنج‌ها، نحوه انتخاب ترانسدیوسرهای فرستنده و گیرنده و چگونگی انتخاب فرکانس تحریک آن‌ها ارائه شده است. برای تست دبی‌سنج یک چرخه جریان سیال طراحی و ساخته شده است. آزمایش‌های انجام‌شده برای دبی‌های ۲۲ تا ۳۷ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد که خطای اندازه‌گیری دستگاه در بازه ۲/۷- تا ۴/۲+ درصد مقدار واقعی دبی قرار دارد.

**کلیدواژگان**: آلتراسونیک، دبی‌سنج، زمان عبوری، هترودین

**«Research Note»**

# Design and fabrication of a transit time ultrasonic flow meter

**Y. Hojjat[1*], A. R. Ghane[2], Sh. Mirzamohamadi[2]**

1- Assoc. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
2- MSc., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran
* P.O.B. 14115-143 Tehran, yhojjat@modares.ac.ir

**Abstract**- Ultrasonic flow meters are contactless so they don't cause pressure drop. In this article an ultrasonic flow meter based on transit time measurement by methodology of Heterodyne technic is designed and fabricated. Firstly, Functional principles of these kinds of flow meters, selection procedure of transmitter and receiver transducers and the excitation frequency of those are presented. A flow cycle has been designed in order to test the flow meter. The results present that the flow measurement in range of 22 up to 37 Liter per second contain errors in range of -2.7 up to +4.2 present of actual flow.
**Keywords:** Ultrasonic, Flow Meter, Transit Time, Heterodyne

www.SID.ir

Archive of SID



## ۱- مقدمه

سال ۱۹۵۵ اولین دبی‌سنج بدون تماس آلتراسونیک 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[۱]. در بسیاری از دبی‌سنج‌های بدون تماس اولیه از اصل دوپلر استفاده می‌شد، ولی دقت آن‌ها به این بستگی داشت که کدام قسمت جریان از شیفت دوپلر کمک بگیرد. روش دریچه طیفی دوپلر این مشکل را مرتفع کرد[۲] و توانست برای بهبود دقت دبی‌سنج‌های زمان عبوری نیز مورد استفاده قرار گیرد[۳]. دبی‌سنج‌های دوروشه (انعکاس+ارسال) در اواسط دهه ۱۹۹۰ ظاهر شدند. سال ۲۰۰۵ فوجی‌الکتریک دبی‌سنج دوروشه دوپلر (پالسی/زمان عبوری) را ارائه کرد[۲].

هدف این پژوهش شناخت فناوری و روند طراحی دبی‌سنج‌های آلتراسونیک و بررسی پارامترهای موثر بر عملکرد و قابلیت‌های این دبی‌سنج‌هاست. در ضمن زمینه کاری این پژوهش ایجاد و کنترل امواج آلتراسونیک، داده‌برداری و داده‌پردازی است.

## ۲- اصول طراحی دبی‌سنج آلتراسونیک

### ۲-۱-تئوری طراحی دبی‌سنج زمان عبوری

طبق شکل ۱، ترانسدیوسر A پالس کوتاهی با زاویه مشخص $\alpha$ نسبت به محور لوله برای ترانسدیوسر B ارسال می‌کند. زمان این ارسال و دریافت $t_{AB}$ می‌باشد. به‌طور مشابه $t_{BA}$ زمان عبور برای ارسال از ترانسدیوسر B به ترانسدیوسر A می‌باشد. بنابراین اختلاف زمان ارسال و دریافت برابر $\Delta t$ می‌باشد.

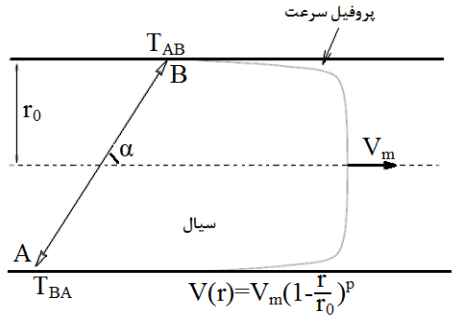
برای سیال یکنواخت با سرعت صوت ثابت (سیال بدون گرادیان دما)، سرعت سیال از رابطه زیر به‌دست می‌آید[۴]:

$$\nu = \frac{r_0}{\sin\alpha\ \cos\alpha}\left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}}\right) \qquad (۱)$$

که در آن $r_0$ شعاع لوله می‌باشد. برای سیال مغشوش پروفیل سرعت وابسته به عدد رینولدز می‌باشد، یعنی:

$$\mathrm{Re} = \frac{\nu_{moy}\ D}{\nu} \qquad (۲)$$

که در آن $v_{moy}$ سرعت متوسط جریان، $D$ قطر لوله و $\nu$ ویسکوزیته می‌باشد. برای سیال مغشوش توسعه‌یافته درون لوله پروفیل دوبعدی سرعت برابر است با:




**شکل ۱** اصول عملکرد دبی‌سنج آلتراسونیک زمان عبوری

$$\nu(r) = \nu_m\left(1-\frac{r}{r_0}\right)^p \qquad (۳)$$

$$p = 0.25 - 0.023\log_{10}\mathrm{Re} \qquad (۴)$$

که در آن $v_m$ سرعت در مرکز لوله، $r$ فاصله از مرکز لوله و $p$ متغیری وابسته به عدد رینولدز می‌باشد. سرعت $v$ در معادله (۱) سرعت متوسط با فرض مستقیم‌بودن مسیر انتشار می‌باشد. انتگرال‌گیری از پروفیل سرعت در معادله (۳) روی خط AB مقدار $v$ را می‌دهد.

$$\nu = \frac{\sin\alpha}{D}\int_A^B \nu_m\left(1-\frac{r}{r_0}\right)^p dr = \frac{\nu_m}{1+p} \qquad (۵)$$

با این انتگرال‌گیری از پروفیل سرعت در مقطع لوله، سرعت متوسط جریان $v_{moy}$ به‌دست می‌آید:

$$\nu_{moy} = \frac{\nu_m}{(1+p)(1+p/2)} \qquad (۶)$$

درنتیجه مقدار دبی عبارت است از:

$$Q = \pi r_0^2 \nu_{moy} \qquad (۷)$$

### ۲-۲- انتخاب ترانسدیوسرها

مهم‌ترین پارامترها در انتخاب ترانسدیوسرهای یک دبی‌سنج آلتراسونیک؛ فرکانس تحریک، زاویه تابش امواج، ملاحظات مربوط به پدیده تبدیل حالت و تطبیق امپدانس هستند. در این دستگاه از یک جفت ترانسدیوسر آلتراسونیک PZT با فرکانس مرکزی تحریک ۲MHz و پهنای باندی کمتر از ۱۰۰kHz و زاویه تابش ۴۵ درجه از کمپانی انگلیسی سوناتست[1] انتخاب و خریداری شد. سطح تابش این مبدل در محل تماس از جنس پرسپکس است، که امپدانس مناسبی جهت تطبیق با جدار لوله فولادی دارد.

1. SONATEST



www.SID.ir

Archive of SID



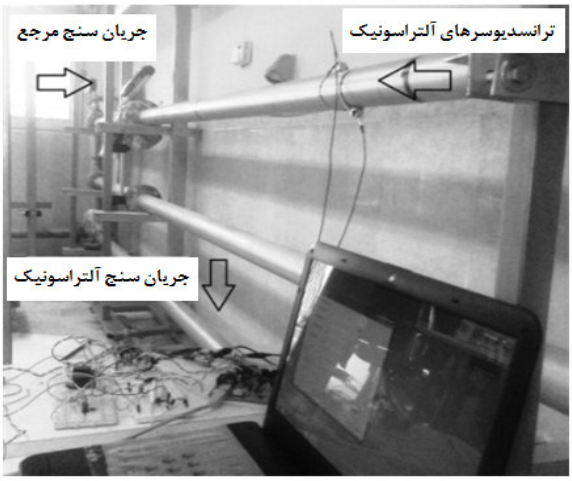
## ۳- آزمایش دبی‌سنج آلتراسونیک و نتایج

### ۳-۱ - کالیبراسیون مجموعه آزمایش

برای صحت‌سنجی و کالیبراسیون دبی‌سنج ساخته‌شده، دبی جریان عبوری از لوله می‌بایست مشخص باشد. برای این منظور از یک دبی‌سنج مغناطیسی دقیق و کالیبره‌شده در محدوده دبی مورد آزمایش، برای کالیبراسیون، استفاده شد. دبی‌سنج مغناطیسی مورد استفاده ساخت کمپانی آلمانی کرونه[1] مدل اپتی‌فلاکس۲۰۰۰[2] بود که دقتی در حد ۰/۰۲ درصد داشت. مجموعه آزمایش فوق در شکل ۲ نشان داده شده است. در این پژوهش، از لوله استاندارد نیمه‌صنعتی گرید SCH 60 استفاده شده که قطر نامی آن ۴ اینچ و ضخامت آن طبق استاندارد ASME B36.10M-2004 برابر ۰/۲۸۱ اینچ است. جنس لوله از آهن گالوانیزه معمولی است.

### ۳-۲- صحت مقادیر اندازه‌گیری شده

برای محاسبه صحت، دبی سیال آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد با چگالی ۱۰۰۰ گیلوگرم بر مترمکعب در سیکل جریان به‌صورت پله‌ای از مقدار ۲۲ لیتر بر ثانیه به ۳۶ لیتر بر ثانیه در ۶ پله افزایش داده شد و هر بار ۳ مقدار با فاصله زمانی ۳۰ ثانیه خوانده شد. دبی ۳۶ لیتر بر ثانیه بیشترین دبی قابل اعتماد پمپ بود و به‌دلیل اجبار در پربودن لوله هنگام اندازه‌گیری، امکان اینکه دبی کمتر از ۲۰ لیتر بر ثانیه انتخاب شود وجود نداشت.

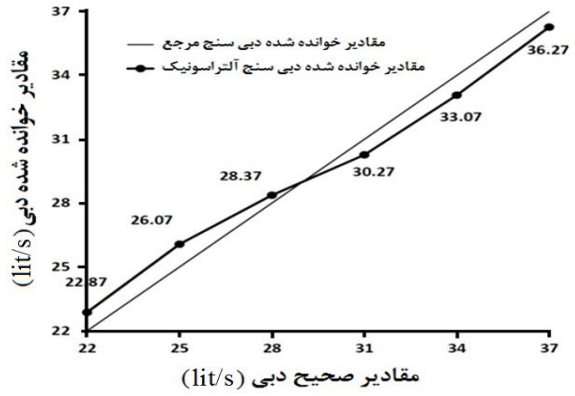



**شکل ۲** مجموعه آزمایش کالیبراسیون دبی‌سنج آلتراسونیک

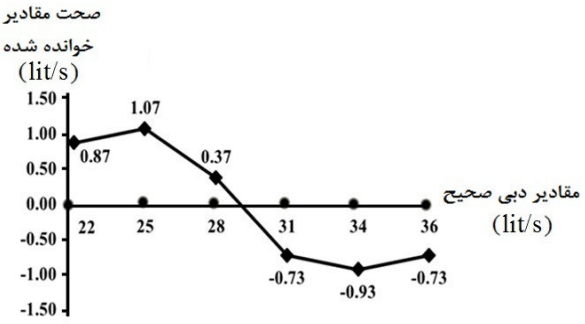
سپس میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده توسط دبی‌سنج آلتراسونیک با میانگین مقادیر خوانده‌شده از دبی‌سنج مرجع مقایسه شد، که نتایج آن را می‌توان در جدول ۱ و شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده نمود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بهترین صحت مربوط به دبی صحیح اندازه‌گیری‌شده ۲۸ لیتر بر ثانیه و بدترین آن در مقدار صحیح ۲۵ لیتر بر ثانیه است. باید توجه داشت که دبی‌سنج مرجع در دسترس نیز در این بازه کالیبره و تست شده بود و مقادیر اندازه‌گیری شده در این بازه توسط این دبی‌سنج قابل اعتماد است.

**جدول ۱** مقادیر دبی خوانده‌شده و صحت آن‌ها (lit/s)

| شماره آزمایش | دبی‌سنج مرجع | میانگین مقادیر | آزمایش اول | آزمایش دوم | آزمایش سوم | صحت |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۲ | ۲۲/۸۷ | ۲۲/۳ | ۲۲/۲ | ۲۴/۱ | ۰/۸۷ |
| ۲ | ۲۵ | ۲۶/۰۷ | ۲۵/۶ | ۲۶/۹ | ۲۵/۷ | ۱/۰۷ |
| ۳ | ۲۸ | ۲۸/۳۷ | ۲۸/۹ | ۲۸/۳ | ۲۷/۹ | ۰/۳۷ |
| ۴ | ۳۱ | ۳۰/۲۷ | ۳۰/۴ | ۳۰/۴ | ۳۰ | -۰/۷۳ |
| ۵ | ۳۴ | ۳۳/۰۷ | ۳۲/۸ | ۳۲/۱ | ۳۴/۳ | -۰/۹۳ |
| ۶ | ۳۶ | ۳۵/۲۷ | ۳۴/۶ | ۳۴/۹ | ۳۶/۳ | -۰/۷۳ |




**شکل ۳** مقایسه نتایج خوانده شده با نتایج دبی‌سنج مرجع




**شکل ۴** تغییرات صحت دستگاه به نسبت دبی سیال

1. KROHNE
2. OPTIFLUX2000


www.SID.ir

Archive of SID



### ۳-۳- دقت مقادیر اندازه‌گیری شده

در این مرحله برای تخمین دقت دستگاه، دبی سیال در دو مقدار صحیح ۲۵ لیتر بر ثانیه و ۳۴ لیتر بر ثانیه، ۱۰ بار توسط دبی‌سنج آلتراسونیک ساخته‌شده اندازه‌گیری شد و دورترین مقدار از بقیه مقادیر به‌دست آمده حذف شد. در اندازه‌گیری دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه مقدار خوانده شده از دستگاه در مرحله دوم و دهم هردو ۲۷/۱ لیتر بر ثانیه بود که هردو، به‌دلیل اختلاف فاحش با بقیه مقادیر، حذف شدند. همچنین بیشترین مقدار خوانده شده هنگام اندازه‌گیری دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه، در مرحله دهم و به مقدار ۳۶/۵ بود که آن نیز حذف شد. بقیه مقادیر در جدول ۲ نشان داده شده است.

باید درنظر داشت که دبی سیال ایجادشده به‌کمک پمپ در این دو مقدار (۲۵ و ۳۴ لیتر بر ثانیه) از پایداری بهتری برخوردار بود و به همین دلیل آزمایش‌های مربوط به دقت و تکرارپذیری در این دو مقدار انجام شد.

همان‌طور که در جدول ۲ درج شده، انحراف معیار در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، ۰/۶۱ لیتر بر ثانیه و در دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه، ۱/۲۴ لیتر بر ثانیه است. دقت برای دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه بهتر از ۲/۵ درصد و برای دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه بهتر از ۳/۵ درصد است که نشان می‌دهد دستگاه از تکرارپذیری قابل قبولی برخوردار است.

**جدول ۲** دقت مقادیر اندازه‌گیری‌شده دبی (lit/sec)

| | | |
|---|---|---|
| مرجع | ۲۵ | ۳۴ |
| اول | ۲۵/۶ | ۳۲/۸ |
| دوم | ۲۷/۱ | ۳۲/۱ |
| سوم | ۲۵/۷ | ۳۴/۳ |
| چهارم | ۲۵/۹ | ۳۲/۹ |
| پنجم | ۲۵ | ۳۲/۱ |
| ششم | ۲۵/۶ | ۳۳/۵ |
| هفتم | ۲۵/۶ | ۳۶ |
| هشتم | ۲۷ | ۳۴/۱ |
| نهم | ۲۵/۱ | ۳۴ |
| دهم | ۲۷/۱ | ۳۶/۵ |
| میانگین | ۲۵/۷ | ۳۳/۵ |
| انحراف | ۰/۶۱ | ۱/۲۴ |
| دقت | ٪۲/۵ | ٪۳/۵ |
| عدم قطعیت | ۰/۲۲ | ۰/۴۱ |

برای تعیین عدم قطعیت استاندارد[1] از رابطه زیراستفاده شده است[۵]:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \qquad (۸)$$

که در آن $n$ تعداد اندازه‌گیری‌ها در یک رشته و $s$ انحراف معیار است. در دبی مرجع ۲۵ لیتر بر ثانیه، $n$ برابر ۸ و در دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه، $n$ برابر ۹ است. بدیهی است که با افزایش تعداد اندازه‌گیری‌ها عدم قطعیت بهتری به‌دست خواهد آمد.

## ۴- نتیجه‌گیری

دبی‌سنج آلتراسونیک طراحی‌شده در این پژوهش دارای مشخصه‌های عملکردی مناسبی می‌باشد. دقت برای دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، در حد ۲/۵ درصد و برای دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه، حدود ۳/۵ درصد مشاهده شد، که در حد قابل قبولی است. بهترین صحت مربوط به دبی صحیح اندازه‌گیری‌شده ۲۸ لیتر بر ثانیه (۱/۳ درصد خطا) و بدترین آن در مقدار صحیح ۲۵ لیتر بر ثانیه (۴/۲ درصد خطا) و کمترین دبی قابل اندازه‌گیری یا همان رزولوشن اسمی دستگاه حدود ۰/۰۸ لیتر بر ثانیه است. مشخصات عملکردی دبی‌سنج آلتراسونیک فوق، که با تکنیک هترودین طراحی و ساخته شد، نشان‌دهنده دقت، صحت و رزولوشن مناسب این دستگاه می‌باشد.

## ۵- مراجع


[1] Lynnworth L. C., Liu Y., "Ultrasonic Flowmeters: Half-Century Progress Report, 1995-2005", *Ultrasonics*, Vol. 44, 2006, pp. 1371-1378.

[2] Yamamoto T., "The Best of Both World-Hybrid Ultrasonic Meter Combine UVP &Transit-Time Technology", *Flow Control*, Vol. XI , 2005, pp. 34-40

[3] Jacobson S., Lynnworth A. L. C., Korba J. M., "Differential Correlation Analyzer", US Patent 4787252, 1988.

[4] PANAMETRICS-NDT, "Ultrasonic Transducers Technical Notes", *OLYMPUS*, 2006, p. 40.

[5] Bell Stephanie, *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*, Centre for Basic, Thermal and Length Metrology,National Physical Laboratory, 2001


1. Standard Uncertainty



www.SID.ir