



## «یادداشت تحقیقاتی»

# طراحی و ساخت دبی سنج آلتراسونیک زمان عبوری

یوسف حجت<sup>۱\*</sup>، علیرضا قانع<sup>۲</sup>، شاهد میرزامحمدی<sup>۲</sup>

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-** دبی سنج‌های آلتراسونیک بدون تماس با سیال، دبی را اندازه‌گیری می‌کنند که باعث افت فشار نمی‌شوند. در این پژوهش، یک دبی سنج آلتراسونیک براساس اندازه‌گیری زمان عبوری با تکنیک هتروداین طراحی و ساخته شده است. در ابتدا مبانی عملکردی این نوع دبی سنج‌ها، نحوه انتخاب ترانسدیوسرهای فرستنده و گیرنده و چگونگی انتخاب فرکانس تحریک آن‌ها ارائه شده است. برای تست دبی سنج 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، دبی سنج، زمان عبوری، هتروداین

## «Research Note»

# Design and fabrication of a transit time ultrasonic flow meter

Y. Hojjat<sup>1\*</sup>, A. R. Ghane<sup>2</sup>, Sh. Mirzamohamadi<sup>2</sup>

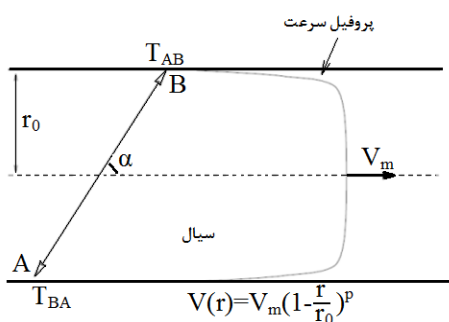
1- Assoc. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran

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 percent of actual flow.

**Keywords:** Ultrasonic, Flow Meter, Transit Time, Heterodyne



شکل ۱ اصول عملکرد دبی سنج آتراسونیک زمان عبوری

$$v(r) = v_m \left(1 - \frac{r}{r_0}\right)^p \quad (3)$$

$$p = 0.25 - 0.023 \log_{10} \text{Re} \quad (4)$$

که در آن  $v_m$  سرعت در مرکز لوله،  $r$  فاصله از مرکز لوله و  $p$  متغیری وابسته به عدد رینولدز می باشد. سرعت  $v$  در معادله (۱) سرعت متوسط با فرض مستقیم بودن مسیر انتشار می باشد. انتگرال گیری از پروفیل سرعت در معادله (۳) روی خط AB مقدار  $v$  را می دهد.

$$v = \frac{\sin \alpha}{D} \int_A^B v_m \left(1 - \frac{r}{r_0}\right)^p dr = \frac{v_m}{1+p} \quad (5)$$

با این انتگرال گیری از پروفیل سرعت در مقطع لوله، سرعت متوسط جریان  $v_{moy}$  به دست می آید:

$$v_{moy} = \frac{v_m}{(1+p)(1+p/2)} \quad (6)$$

در نتیجه مقدار دبی عبارت است از:

$$Q = \pi r_0^2 v_{moy} \quad (7)$$

## ۲-۲- انتخاب ترانسدیوسرها

مهم ترین پارامترها در انتخاب ترانسدیوسرهای یک دبی سنج آتراسونیک؛ فرکانس تحریک، زاویه تابش امواج، ملاحظات مربوط به پدیده تبدیل حالت و تطبیق امپدانس هستند. در این دستگاه از یک جفت ترانسدیوسر آتراسونیک PZT با فرکانس مرکزی تحریک ۲MHz و پهنای باندی کمتر از ۱۰۰kHz و زاویه تابش ۴۵ درجه از کمپانی انگلیسی سوناتست<sup>۱</sup> 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.

## ۱- مقدمه

سال ۱۹۵۵ اولین دبی سنج بدون تماس آتراسونیک در یک آزمایشگاه نصب شد که جریان عبوری از یک لوله پلاستیکی را اندازه گیری می کرد. اولین کاربردهای این دبی سنجها محدود به اندازه گیری جریان آب در لوله های با قطر بزرگ بوده است [۱]. در بسیاری از دبی سنجهای بدون تماس اولیه از اصل دوپلر استفاده می شد، 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 دبی سنجهای زمان عبوری نیز مورد استفاده قرار گیرد [۳]. دبی سنجهای دوروشه (انعکاس+ارسال) در اواسط دهه ۱۹۹۰ ظاهر شدند. سال ۲۰۰۵ فوجی الکتریک دبی سنج دوروشه دوپلر (پالسی/زمان عبوری) را ارائه کرد [۲].

هدف این پژوهش شناخت فناوری و روند طراحی دبی سنجهای آتراسونیک و بررسی پارامترهای موثر بر عملکرد و قابلیت های این دبی سنجهاست. در ضمن زمینه کاری این پژوهش ایجاد و کنترل امواج آتراسونیک، داده برداری و داده پردازی است.

## ۲- اصول طراحی دبی سنج آتراسونیک

### ۲-۱- تئوری طراحی دبی سنج زمان عبوری

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

برای سیال یکنواخت با سرعت صوت ثابت (سیال بدون گرادیان دما)، سرعت سیال از رابطه زیر به دست می آید [۴]:

$$v = \frac{r_0}{\sin \alpha} \left( \frac{1}{\cos \alpha} \frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \quad (1)$$

که در آن شعاع لوله می باشد. برای سیال مغشوش پروفیل سرعت وابسته به عدد رینولدز می باشد، یعنی:

$$\text{Re} = \frac{v_{moy} D}{v} \quad (2)$$

که در آن  $v_{moy}$  سرعت متوسط جریان،  $D$  قطر لوله و  $v$  ویسکوزیته می باشد. برای سیال مغشوش توسعه یافته درون لوله پروفیل دوبعدی سرعت برابر است با:

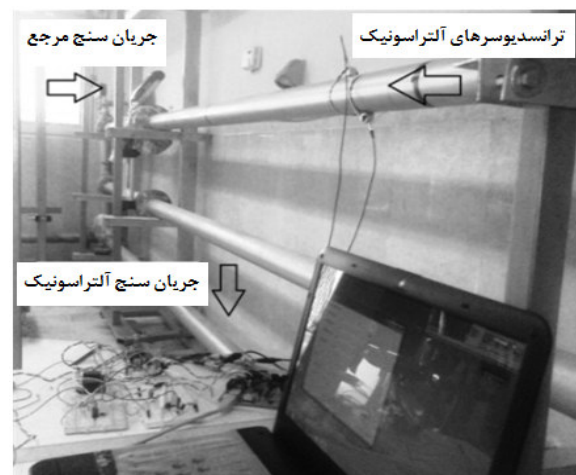
### ۳- آزمایش دبی سنج آلتراسونیک و نتایج

#### ۳-۱- کالیبراسیون مجموعه آزمایش

برای صحت سنجی و کالیبراسیون دبی سنج ساخته شده، دبی جریان عبوری از لوله می بایست مشخص باشد. برای این منظور از یک دبی سنج مغناطیسی دقیق و کالیبره شده در محدوده دبی مورد آزمایش، برای کالیبراسیون، استفاده شد. دبی سنج مغناطیسی مورد استفاده ساخت کمپانی آلمانی کرونه<sup>۱</sup> مدل اپتی فلاکس ۲۰۰۰<sup>۲</sup> 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 نیمه صنعتی 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 اندازه گیری شده

برای محاسبه صحت، دبی سیال آب ۲۵ درجه سانتی گراد با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در سیکل جریان به صورت پله ای 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 به دلیل اجبار در پر بودن لوله هنگام اندازه گیری، امکان اینکه دبی کمتر از ۲۰ لیتر بر ثانیه انتخاب شود وجود نداشت.

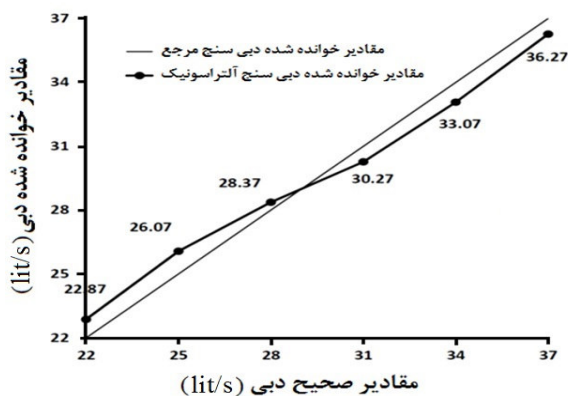


شکل ۲ مجموعه آزمایش کالیبراسیون دبی سنج آلتراسونیک

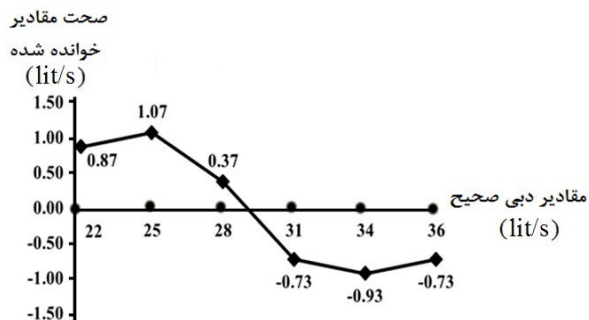
سپس میانگین مقادیر اندازه گیری شده توسط دبی سنج آلتراسونیک با میانگین مقادیر خوانده شده از دبی سنج مرجع مقایسه شد، که نتایج آن را می توان در جدول ۱ و شکل های ۳ و ۴ مشاهده نمود. همان طور که مشاهده می شود، بهترین صحت مربوط به دبی صحیح اندازه گیری شده ۲۸ لیتر بر ثانیه و بدترین آن در مقدار صحیح ۲۵ لیتر بر ثانیه است. باید توجه داشت که دبی سنج مرجع در دسترس نیز در این بازه کالیبره و تست شده بود و مقادیر اندازه گیری شده در این بازه توسط این دبی سنج قابل اعتماد است.

جدول ۱ مقادیر دبی خوانده شده و صحت آن ها (lit/s)

شماره آزمایش	مقدار 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 دبی سنج مرجع



شکل ۴ تغییرات صحت دستگاه به نسبت دبی سیال

1. KROHNE
2. OPTIFLUX2000

## 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 هر دو 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 در نظر 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.

برای تعیین عدم قطعیت استاندارد<sup>۱</sup> از رابطه زیر استفاده شده است [۵]:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (۸)$$

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 هترودااین 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

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	۳۲/۵
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

## 1. Standard Uncertainty