

# Ultrasonic Flowmeters (Time-Transition) for Measuring Flow in Pressure Pipes and Evaluation of Accuracy

*Araee, A.R.*

*Dept. of Mech. Eng., Faculty of Eng., Univer. of Tehran, IRAN.*

## **Abstract**

Technical advances in ultrasonic can significantly improve flow measurement in the continuous process industries. This technique exists for both liquid and gas flows, it also exists for wide range of pressure pipes (Full-Pipe) and channels with different sizes.

Ultrasonic flowmeter can be installed on the pipe wall without the need of cutting the pipe or interrupting the flow.

The manufactures claimed the accuracy is between (1 to 3)% of actual flow rate. This is a typical accuracy. However some of them improved this ultrasonic technology with five beam transducers. The test results show an accuracy range (0.15-0.2)% of actual flow. This accuracy is very important for oil industries and chemical factories.

In this paper the principle of sound waves and measuring by ultrasound were introduced and transient time flowmeter calculation were determined. Finally the clamp-on ultrasonic flowmeter manufactured by a private company in Iran were tested and the results compared to those obtained from the others.

# اصول کارکرد دبی سنج‌های فراصوتی برای اندازه‌گیری جریان داخل لوله‌های تحت فشار و بحث در مورد دقت آن‌ها

(دریافت ۸۰/۱۰/۲۵ پذیرش ۸۱/۵/۸)

علی‌رضا آرابی\*

## چکیده

دبی سنج‌های فراصوتی<sup>۱</sup> از نوع زمان‌گذر<sup>۲</sup> بر اساس پیشرفته‌ترین فناوری فراصوت جهت اندازه‌گیری گذر سیال (مایع-گاز) در لوله‌های تحت فشار و یا کانال‌ها طراحی و تولید شده است. بهره‌گیری از این دبی‌سنج‌ها به دلیل برتری‌های قابل توجه بر انواع دیگر دبی‌سنج‌ها، در عرصه تجهیزات ابزار دقیق در صنایع مختلف، در حال گسترش می‌باشد. برای دبی‌سنج‌های فراصوتی دقت اندازه‌گیری برای نوعی از سنسور که روی لوله نصب می‌گردد، به میزان ۱٪ جریان عبوری و برای حالتی که سنسور از داخل نصب می‌گردد، ۰/۵٪ جریان عبوری تثبیت گردیده است. دست‌یابی به دقت‌های بهتر مبتنی بر روش اندازه‌گیری فراصوتی در حال حاضر مورد پژوهش است و اخیراً برخی شرکت‌ها موفق شده‌اند دقت‌های اندازه‌گیری در حد ۰/۱۵٪ را با این فناوری پیشنهاد نمایند. این میزان دقت برای صنایع نفت که ۰/۲٪ را ملاک قرار داده‌اند نیز مطلوب می‌باشد. در این مقاله ضمن بررسی اصول اندازه‌گیری دبی مایعات به روش امواج فراصوتی پژوهش‌های صورت گرفته در مورد دقت و نیز چگونگی بهره‌گیری از این فناوری در صنایع آب و فاضلاب و نفت در کشور مورد ملاحظه قرار خواهد گرفت.

## مقدمه

دبی سنج‌های فراصوتی برای اندازه‌گیری جریان سیالات در لوله‌ها و کانال‌ها استفاده می‌شود. تغییر فرکانس امواج در برخورد با ذرات معلق همراه با مایع و اندازه‌گیری این تغییر که تابعی خواهد بود از سرعت عبور سیال، اساس کار دبی‌سنج نوع داپلر را تشکیل می‌دهد که با توجه به دقت کم (۰/۵٪) کاربرد این دبی‌سنج روز به روز کمتر می‌گردد.

اندازه‌گیری اختلاف زمان عبور سرعت امواج صوتی در حرکت، در مسیرهای هم‌جهت و مخالف جهت جریان سیال، در دبی‌سنج‌های فراصوتی زمان‌گذر که تابعی از سرعت عبور سیال در داخل لوله‌ها می‌باشد، مفهوم بنیادی در این سنجش را تشکیل می‌دهد. ویژگی‌های ممتازی نظیر دقت بالا، عدم افت جریان، نصب سریع و آسان بدون نیاز به برش یا سوراخ کردن لوله‌ها، عدم فرسایش مکانیکی،

پاسخ سریع و خروجی‌های متنوع، مهم‌ترین عوامل توسعه‌ی روزافزون کاربرد این دبی‌سنج‌ها در صنایع مختلف محسوب می‌شوند. نکته حائز اهمیت دیگر، توانایی پوشش دادن به اندازه‌گیری جریان در محدوده وسیعی از لوله‌ها با اندازه‌های مختلف (از قطر ۵۰ تا ۵۰۰۰ میلی‌متر) توسط این نوع دبی‌سنج‌ها می‌باشد. کارکرد این نوع دبی‌سنج‌ها در صنایع آب و فاضلاب کشور، و استخراج نتایج دقت‌های آن‌ها از چهار سایت مختلف از مارک خارجی و داخلی (یک شرکت داخلی تولیدکننده دبی‌سنج‌های فراصوتی از نوع زمان‌گذر در کشور وجود دارد که تا به حال ۲۰۰ دستگاه از این نوع را در شرکت‌های آب و فاضلاب کشور نصب نموده است) مد نظر قرار می‌گیرد.

\* عضو هیأت علمی گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

1- Ultrasonic Flowmeter  
2- Time Transition

## ماهیت امواج فراصوت

انواع امواج مکانیکی با فرکانس‌های مختلف در محیط‌های مادی الاستیک انتشار می‌یابند. امواج فراصوت یا التراسوند<sup>۱</sup> گروهی از امواج مکانیکی هستند که دارای باند فرکانسی بالاتر از حد شنوایی (۲۰KHz) می‌باشند. البته محدوده فرکانسی که معمولاً در دستگاه‌های سنجش فراصوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد دامنه ۱۰MHz تا ۱۰۰KHz می‌باشد. انتشار امواج فراصوتی در محیط‌های مادی از طریق حرکت نوسانی ذرات مادی که با پیوندهای الاستیک به یکدیگر متصل شده‌اند، صورت می‌پذیرد. انتقال حرکات نوسانی به ذرات همسایه، سبب ایجاد اغتشاشی در محیط مادی می‌شود که به صورت یک حرکت موجی با سرعت خاص  $c$ ، که به خواص فیزیکی محیط بستگی دارد، انتشار می‌یابد. لذا دو مشخصه مهم حرکت موجی، انتشار<sup>۲</sup> و انتقال انرژی بدون انتقال جرم می‌باشند. اگر امتداد نوسان ذرات مادی هم‌راستا با امتداد انتشار موج باشد، موج را طولی، و اگر عمود بر امتداد مزبور باشد، آن را عرضی می‌نامند. عامل تعیین‌کننده در این زمینه حالت فیزیکی محیط مادی (جامد، مایع یا گاز) می‌باشد.

اگر ذرات نوسان‌کننده از الگوی سینوسی حرکت پیروی کنند، نوسان‌ها را می‌توان با معادله موج زیر توصیف کرد:

$$\frac{\partial^2 a}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} \quad (1)$$

که  $a(m)$  جابجایی ذره مادی  $t(s)$  زمان،  $c(m/s)$  سرعت انتشار موج، و  $x(m)$  مختصه موقعیت است. یک حل خاص برای موج صفحه‌ای، معادله حرکت هارمونیک می‌باشد:

$$a = A \cdot \sin \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \quad (2)$$

که  $A(m)$  دامنه جابجایی، و  $\omega(rad/s)$  فرکانس دورانی یا زاویه‌ای است.

با تعریف زاویه فاز:

$$\phi = \frac{a\omega}{c}$$

<sup>1</sup> Ultrasound  
<sup>2</sup> Propagation

سرعت حرکت نوسانی ذره حول موقعیت تعادل که سرعت اکوستیکی نامیده می‌شود، از مشتق زمانی جابجایی لحظه‌ای  $a$  به دست می‌آید.

$$v = \frac{da}{dt} = \omega A \cos(\omega t - \phi) \quad (3)$$

اگر موج با سرعت  $c$  در محیط انتشار یابد، طول موج  $\lambda(m)$ ، زمان تناوب  $T(s)$ ، و فرکانس  $f(Hz)$  با رابطه زیر به هم مربوط می‌شوند:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \quad (4)$$

عبور موج فراصوت از درون یک محیط مادی، سبب ایجاد فشار اکوستیکی  $p(Pa)$  در آن محیط می‌گردد. فشار و سرعت اکوستیکی طبق رابطه زیر به یکدیگر مربوط می‌شوند:

$$p = zv \quad (5)$$

که  $z$  امپدانس اکوستیکی است. اگر فشار اکوستیکی متناظر با ولتاژ الکتریکی و امپدانس اکوستیکی متناظر با امپدانس الکتریکی در نظر گرفته شود، معادله فوق یادآور قانون اهم در الکتریسته خواهد بود. امپدانس اکوستیکی معمولاً به دلیل اختلاف فاز بین فشار و سرعت اکوستیکی، همانند امپدانس الکتریکی، یک عدد مختلط است. اما در حالت عبور موج از یک محیط نامحدود، امپدانس اکوستیکی دارای مقداری حقیقی است و مقاومت موج  $pc$  نامیده می‌شود.

اگر موج فراصوت با سرعت اکوستیکی معادله (۳) در محیطی با مقاومت موج  $pc$  انتشار یابد، سبب ایجاد فشار اکوستیکی زیر می‌گردد:

$$p = \omega A p c \cdot \cos \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \quad (6)$$

در نتیجه دامنه و فشار موثر اکوستیکی، و نیز دامنه و سرعت موثر اکوستیکی را می‌توان به شکل زیر تعریف نمود:

$$P = \omega A p c$$

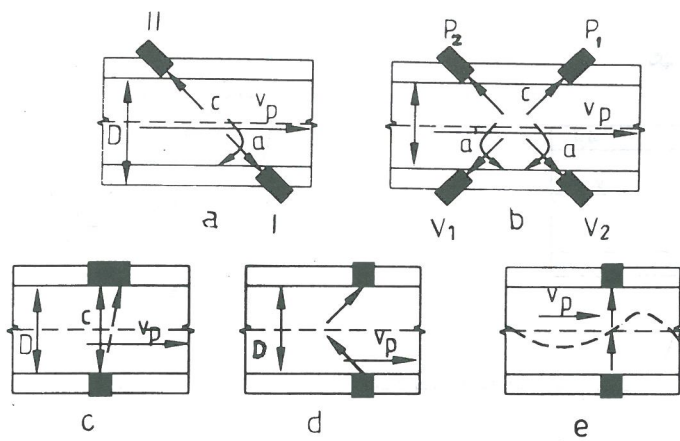
$$V = \omega A$$

$$P_{ef} = \frac{P}{\sqrt{2}}$$

$$v_{ef} = \frac{v}{\sqrt{2}}$$

با استفاده از این متغیرها، شدت موج فراصوت  $I(w/m^2)$  به صورت زیر تعریف می‌شود:





شکل ۱- روش‌های فراصوتی اندازه‌گیری دبی مایعات.

$$t_r = \frac{A}{c} + \frac{B}{c} + \frac{1}{c - v_p \cos \alpha} \quad (15)$$

در ارزیابی اختلاف فرکانس سیرکولاسیون<sup>۴</sup> پالس در دو جهت یا تفاوت زمان گذر امواج، رابطه پیچیده‌تر زیر به دست می‌آید:

$$\Delta t = t_r - t_l = \frac{1}{c - v_p \cos \alpha} - \frac{1}{c + v_p \cos \alpha} = \frac{2lv_p \cos \alpha}{c^2 - v_p^2 \cos^2 \alpha} \quad (16)$$

[فرمول‌های ۹ الی ۱۶ از مرجع ۲]

### تحلیل روابط اندازه‌گیری فراصوتی دبی مایعات

پیچیدگی روابط فوق علی‌رغم این که اثر سرعت انتشار حذف نشده است، لذا لازم است تغییرات سرعت انتشار ناشی از وابستگی به دما و ترکیب محیط نیز جبران شود. بدین منظور انتشار یک موج در امتداد عمود بر جریان محیط مورد استفاده قرار می‌گیرد. در چنین شرایطی، اثر جریان حذف می‌شود و زمان انتشار پالس به صورت کلی به فاصله مبدل‌ها، دما و ترکیب محیط بستگی خواهد داشت. سیگنال حاصل از این روش برای تصحیح سیگنال اندازه‌گیری جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تنها دو نوع دبی سنج فراصوتی، این معیار بنیادی را که کارایی سیستم نباید از تغییرات سرعت صوت تأثیر بپذیرد، ارضا می‌کنند. یکی از آن‌ها نوع کاملاً آنالوگ است که بر اساس اصل اختلاف فرکانس بین مسیرهای اکوستی در زمان‌های مجزا<sup>۵</sup> کار می‌کند و دیگری روشی اساساً دیجیتالی است که دبی (مساحت × سرعت) را در مسیرهای

در روش c، انحراف امواج فراصوت در اثر جریان محیط مورد استفاده قرار می‌گیرد. انتشار موج از فرستنده به گیرنده در صورتی که محیط ساکن باشد، در جهت عمود (کوتاه‌ترین مسیر) انجام می‌پذیرد. اما اگر محیط شروع به حرکت کند، پرتو دچار انحراف می‌شود و سیگنال دریافتی در گیرنده، متفاوت خواهد بود. نتایج این روش تنها ارزش کیفی دارند و بدین دلیل گسترش چندانی نیافته است.

روش d برای اندازه‌گیری جریان در محیطی شامل ذرات جامد مناسب است که امواج فراصوت را بازتاب می‌دهند. این روش مبتنی بر اثر داپلر است و به همین نام خوانده می‌شود. موج دریافتی به دلیل بازتابش از ذرات متحرک دارای فرکانسی متفاوت از موج تابشی است. این روش برای محیط‌های فاقد ذرات جامد مناسب نیست. در روش e سوپرپوزیشن فرکانسی فون کارمن<sup>۱</sup> بر امواج گذرنده از محیط به کار گرفته می‌شود.

این بررسی مختصر، ایده‌ای از اصول اندازه‌گیری و روش‌های پردازش سیگنال‌های فراصوت به دست می‌دهد. حذف اثر سرعت انتشار در نوع اختلاف فرکانس، این روش را بر سایر روش‌ها که در آن‌ها اثر مزبور به طور کامل حذف نمی‌شود، برتری می‌بخشد. اما مسئله به دلیل ضرورت غلبه بر ناحیه مرده<sup>۲</sup> توسط پالس فراصوت آسان نیست. نواحی مزبور در شرایط استفاده از مبدل‌های درون‌کار<sup>۳</sup> در خط لوله پدید می‌آیند. زمان انتشار در امتدادهای هم جهت و خلاف جهت جریان برابر است با:

$$t_l = \frac{A}{c} + \frac{B}{c} + \frac{1}{c + v_p \cos \alpha} \quad (14)$$

<sup>1</sup> Von Karman

<sup>2</sup> Dead Zones

<sup>3</sup> Built-in

جریان محیط به دست می‌آید. سرعت برآیند انتشار موج فراصوت در مکانی که محیط با سرعت vp جریان دارد، برابر جمع‌برداری سرعت انتشار c در محیط ساکن و سرعت vp است. لذا برای امواج فراصوت که به صورت متناوب از مبدل I و II و به عکس انتشار می‌یابند، سرعت برآیند موج برابر است با:

در حالت اول:  $c - v_p \cos \alpha$

در حالت دوم:  $c + v_p \cos \alpha$

این تغییرات در سرعت انتشار موج را، می‌توان با اندازه‌گیری زمان گذر موج از محیط اندازه‌گیری نمود. برای کاهش اثرات دما و ترکیب محیط به حداقل ممکن، تفاوت زمان گذر موج در امتدادهای هم جهت و خلاف جهت جریان ارزیابی می‌شود:

$$\Delta t = \frac{2l}{c^2} v_p \cos \alpha \quad (9)$$

که c سرعت انتشار موج فراصوت، vp سرعت جریان محیط، L فاصله مبدل‌ها، و  $\alpha$  زاویه بین امتدادهای انتشار موج فراصوت و جریان محیط هستند.

روش b روشی مشابه است و تنها تفاوت آن با روش a، در پردازش متفاوت سیگنال است. در هر دو روش a و b، که یک زاویه فاز بعد از عبور موج فراصوت از محیط محاسبه می‌شود، روابط زیر به ترتیب برای انتشار موج در امتدادهای هم جهت و خلاف جهت جریان برقرارند:

$$\phi_l = \omega t_l = \omega \frac{1}{c + v_p \cos \alpha} \quad (10)$$

$$\phi_r = \omega t_r = \omega \frac{1}{c - v_p \cos \alpha} \quad (11)$$

در حالت ارزیابی اختلاف فرکانس گسیل امواج در امتدادهای هم جهت و خلاف جهت جریان، رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$\Delta \phi = \phi_r - \phi_l = \frac{2\omega l \cos \alpha \cdot v_p}{c^2 - v_p^2 \cos^2 \alpha} \quad (12)$$

رابطه‌ی اخیر بر خلاف روابط پیشین به سرعت انتشار موج فراصوت بستگی ندارد و از این لحاظ حائز اهمیت است [۲، ۳ و ۴].

$$f = f_l - f_r = \frac{1}{t_l} - \frac{1}{t_r} = \frac{2v_p}{l} \cos \alpha \quad (13)$$

$$I = P_{ef} \cdot v_{ef} = \frac{1}{2} p \cdot v = \frac{p^2}{2\rho c} \quad (7)$$

و توان موج فراصوت گذرنده از سطح  $s(m^2)$  و  $N(w)$  عبارت است از:

$$N = I \cdot s = P_{ef} \cdot v_{ef} \cdot s \quad (8)$$

انتشار، بازتابش، شکست، تضعیف و تمرکز امواج فراصوت در محیط‌های جامد و مایع و گاز، تابع روابط ویژه‌ای هستند که تحلیل این روابط از نقطه نظر تئوریک و سپس کاربرد آن‌ها در طراحی حائز اهمیت خواهد بود. به دلیل گستردگی پارامترها و روابط بین آن‌ها در این مقاله امکان پرداختن به این روابط میسر نیست. [فرمول‌های ۱ الی ۸ از مرجع ۱].

### اندازه‌گیری فراصوتی دبی مایعات<sup>۱</sup>

انواع متفاوتی از دبی سنج‌های فراصوتی در سال‌های اخیر عرضه و به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این سیستم‌ها جذابیت‌های متعددی دارند، از جمله: اندازه‌گیری جریان را بدون نیاز به سوراخ کردن یا برش لوله امکان‌پذیر می‌کنند، مانعی در مقابل جریان ایجاد نمی‌کنند و لذا اتلاف فشاری در اثر اندازه‌گیری پدید نمی‌آید، به دلیل اندازه‌گیری غیر تماسی و عدم وجود قطعات متحرک، نیازمند تعمیر و نگهداری نیستند، ویسکوزیته مایع تأثیر ناچیزی بر اندازه‌گیری دارد، نیازی به رسانایی مایع وجود ندارد، و از آنجا که عملکرد اغلب سیستم‌های مزبور مستقل از سرعت صوت در مایع است، می‌توانند در دامنه وسیعی از کاربردها مورد استفاده قرار گیرند. مهم‌ترین مسئله این سیستم‌ها، پیچیدگی مدار الکترونیکی است که وظیفه پردازش سیگنال‌های حاوی اطلاعات را بر عهده دارد.

### روش‌های اندازه‌گیری فراصوتی دبی مایعات

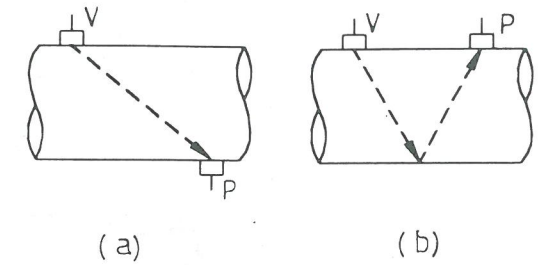
چنان که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، به طور کلی ۵ روش برای اندازه‌گیری فراصوتی جریان مایعات مورد استفاده قرار می‌گیرند که از نظر پردازش سیگنال‌های حاوی اطلاعات، متفاوتند. در روش a، سیگنال اندازه‌گیری از تغییر سرعت انتشار امواج فراصوت در اثر

<sup>1</sup> Clamp-on

<sup>4</sup> Circulation

<sup>5</sup> Time-Separated



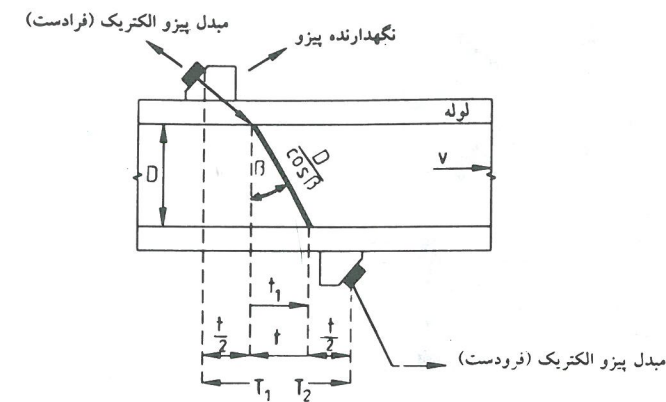


شکل ۲- روش های نصب مبدل به دیواره خارجی لوله.

فراصوتی متعدد محاسبه می‌نماید. از ملاحظات تئوریک، می‌توان فرض کرد که روش اختلاف فرکانس برای جریان کاملاً توسعه یافته‌ی محیط با عدد رینولدز بزرگتر از ۳۰۰۰۰ و سرعت متوسط کمتر از سرعت طبیعی صوت، مناسب‌تر است. در این شرایط و در یک محدوده دینامیک مفروض، تجهیزات اندازه‌گیری که از روش مزبور استفاده می‌کنند، نسبت به ابزارهای عمومی که اختلاف فشار را اندازه‌گیری می‌نمایند، کارآمدترند، زیرا وابستگی کمتری به خصوصیات یک مایع ایده‌آل دارند. نوع دوم دبی سنجهای فراصوتی برای دامنه‌ی بسیار گسترده‌تری از شرایط جریان، مناسب است اما نیازمند سیستم الکترونیک پیچیده‌تری برای دست‌یابی به دقت بالاتر و انعطاف‌پذیری بیشتر است که طبیعتاً به بهای بالاتر منجر می‌شود. اگر امتیازاتی مانند تفریق الکترونیکی، نیاز حداقل به نگهداری و عدم وجود اتلاف فشار لحاظ شوند، دبی سنجهای فراصوتی می‌توانند در مقایسه با دبی سنجهای عمومی و تجاری موفق‌تر باشند.

### چگونگی نصب مبدل‌ها و کاربرد روابط

دو روش متداول نصب مبدل‌ها بر روی لوله، در شکل ۲ معرفی شده‌اند. در حالت b هر دو مبدل در یک سمت لوله نصب می‌شوند و در نتیجه امواج فراصوت بازتابنده از دیواره داخلی لوله، توسط مبدل گیرنده دریافت می‌گردند. چنان‌که پیش‌تر ذکر شد، روش تعیین سرعت جریان بر اساس اندازه‌گیری زمان گذر پالس گسیل شده از مبدل فرادست به مبدل فرودست  $T_1$ ، و زمان گذر پالس گسیل شده از مبدل فرودست به مبدل فرادست  $T_2$ ، قرار دارد. این سیگنال‌های زمانی پس از پردازش مناسب، به پالس‌های الکتریکی تبدیل می‌شوند. بازه‌های زمانی  $T_1$  و



شکل ۳- مبانی اندازه‌گیری فراصوتی دبی با استفاده از مبدل‌های روکار.

$T_1$  را می‌توان جمع زمان‌های  $t_1$  و  $t_2$  که در طی آن‌ها پالس فراصوت از مایع عبور می‌کند و زمان  $\tau$  که از قسمت‌های الحاقی و دیواره‌ی لوله می‌گذرد، در نظر گرفت (شکل ۳).

$$T_1 = t_1 + \tau \quad \text{و} \quad T_2 = t_2 + \tau \quad (17)$$

در حالت کلی، زمان گذر موج فراصوت از مایع متحرک را در دو جهت، می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$t_1 = \frac{D}{c + v \cdot \sin \beta}, \quad t_2 = \frac{D}{c - v \cdot \sin \beta} \quad (18)$$

که  $D$  قطر داخلی لوله،  $\beta$  زاویه قائم انتشار موج فراصوت،  $c$  سرعت صوت در مایع، و  $v$  سرعت جریان مایع هستند [۵].

در معادله (۱۸) صورت کسر،  $D/\cos \beta$ ، نماینده مسافتی است که موج فراصوت در امتداد زاویه  $\beta$  نسبت به محور اصلی (جهت جریان) طی می‌کند و جمله  $v \cdot \sin \beta$  در مخرج کسر نماینده بردار سرعت جریان در جهت انتشار موج فراصوت می‌باشد. تغییر سرعت انتشار یک پالس فراصوت در یک مسیر مورب (با فرض سرعت انتشار ثابت  $c$  در محیط ساکن) تنها به سرعت جریان بستگی دارد. لذا تفاوت زمانی  $T$  بازه‌های زمانی  $T_1$  و  $T_2$  با سرعت جریان متناسب است، بنابراین با اندازه‌گیری اختلاف زمان ( $T$ ) در هر لحظه، متناسب با آن سرعت عبور مایع داخل لوله نیز به دست می‌آید.

### بحث در مورد دقت دستگاه‌های فراصوتی نوع دبی مایعات

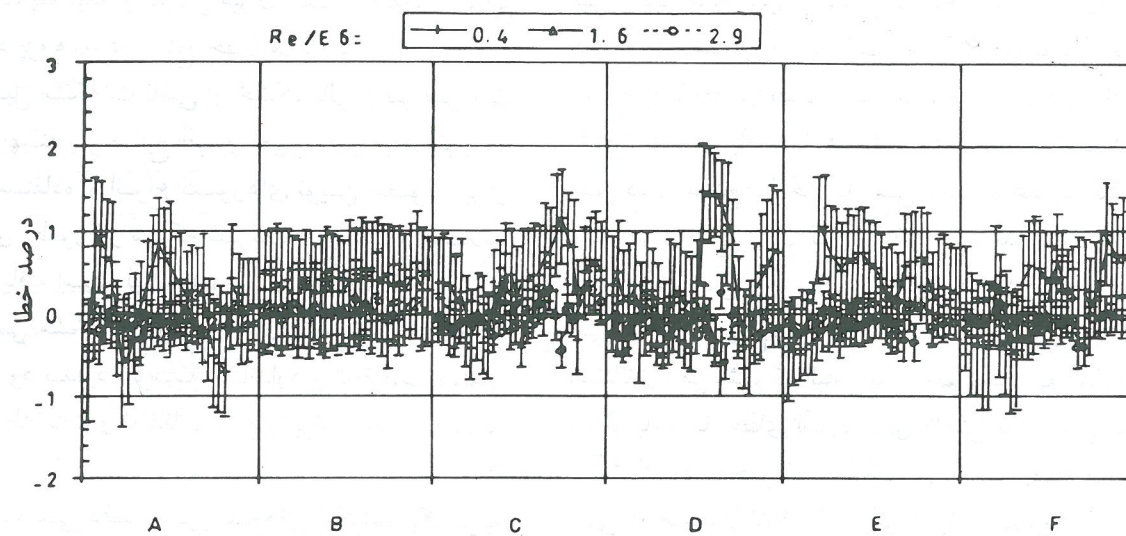
موسسه استاندارد و تکنولوژی ملی آمریکا (NIST) اخیراً دبی سنجهای فراصوتی تولیدی از پنج شرکت معتبر را جهت آزمون دقت انتخاب و تست‌های دقت و تکرارپذیری را روی آن‌ها انجام داده است [۷].

طبق منحنی‌های شکل ۴ و ۵ ترسیم شده از آزمایشات دقت و تکرارپذیری در دبی‌های مختلف با رژیم جریان‌های مختلف، در تقریباً تمامی اعداد رینولدز، نشان می‌دهد که دقت دبی سنجهای فراصوتی دبی مایعات و یک جفت ترانس دیوسر برای مایعات به طور معمولی ۲٪ از قرائت‌ها می‌باشد. بنابراین ادعای دقت ۳٪ تا ۱٪، که در کاتالوگ‌های تجاری این شرکت‌ها برای این نوع دبی سنجهای ذکر گردیده صحیح می‌باشد. شرکت‌هایی که دقت ۰/۵٪ را ذکر می‌نمایند، عملکرد دبی سنجهای فراصوتی خود را بزرگ‌نمایی کرده‌اند. نکته حائز اهمیت این است که، در پنج سال اخیر، برخی از شرکت‌ها با استفاده از سیستم پنج بیم (استفاده از ۵ جفت ترانس

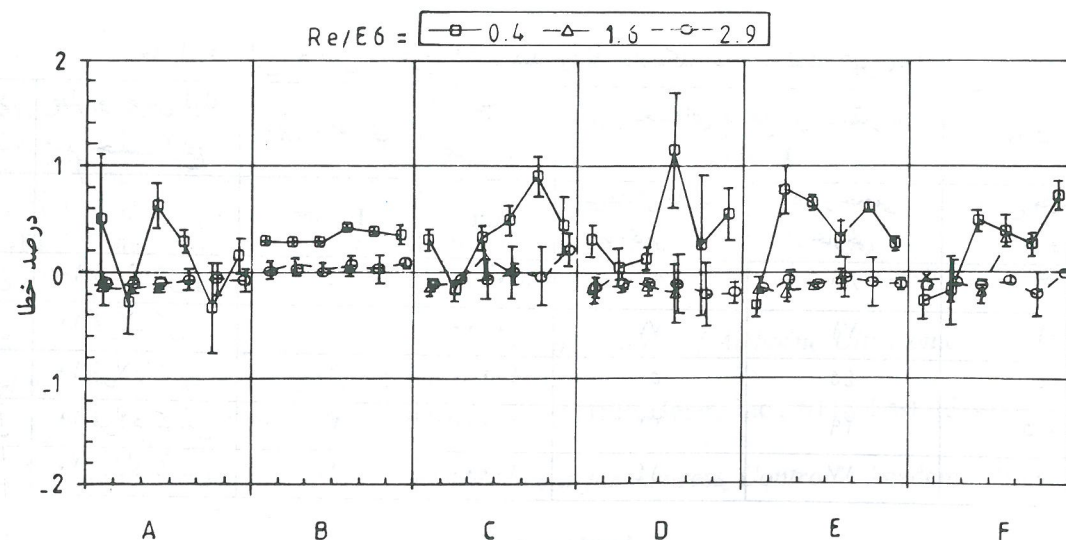
دیوسر) اولتراسونیک، موفق شده‌اند دقت‌های ۱۵٪ را با بهره‌گیری از فناوری فراصوتی کسب نمایند [۷، ۸ و ۹]. این موضوع در گزارش دی ماه سال ۷۹ اداره بازرسی بر نظارت و صادرات نفت ایران که از دبی سنجهای فراصوتی با پنج جفت سنسور به طور آزمایشی استفاده می‌نماید، مورد تأیید قرار گرفته است.

### نتایج میدانی اندازه‌گیری دقت دبی سنجهای فراصوتی

تاریخچه استفاده از دبی سنجهای فراصوتی در صنایع مختلف خصوصاً صنایع آب و فاضلاب کشور حدود ۱۰ سال بیشتر نمی‌باشد.



شکل ۴- نمودار درصد خطا کتورهای فراصوتی (تکرارپذیری).



شکل ۵- نمودار درصد خطا کتورهای فراصوتی (دقت اندازه‌گیری).



جدول ۲- نتایج حاصل در آزمایشگاه مرکز تحقیقات آب تهران.

درصد خطا	مقدار حجم قرائت شده Lit	مرجع دبی لحظه‌ای lit/sec		دبی لحظه‌ای کنتور فراصوتی داخلی lit/sec	قطر و جنس لوله بر حسب اینچ
		الکترومغناطیسی	سرریز مثلثی		
-۲	۲۰۰۰۰	۱۳۲/۷	۱۳۰	۱۳۰	۱۲ فولاد کربنی
-۶	۲۰۰۰۰	۱۰۹	۱۱۱	۱۰۶	۱۲ فولاد کربنی
-۳	۲۰۰۰۰	۸۹	۹۰	۸۷	۱۲ فولاد کربنی
-۲	۲۰۰۰۰	۷۷/۴	۷۶	۷۵	۱۲ فولاد کربنی
-۴	۲۰۰۰۰	۵۸/۵	۵۴	۵۴/۵	۱۲ فولاد کربنی
+۱	۲۰۰۰۰	۳۷/۴	۳۶	۳۷/۵	۱۲ فولاد کربنی

جدول ۳- نتایج حاصل در پایلوت شرکت آبفرا با حجم مخزن ۱۰۰۰ لیتر استاندارد.

درصد خطا	حجم قرائت شده مخزن Lit	حجم عبور آب قرائت شده با کنتور فراصوتی Lit	دبی لحظه‌ای کنتور فراصوتی داخلی lit/sec	قطر و جنس لوله بر حسب اینچ
-۵	۸۴۰	۸۰۰	۴۴-۴۷	۶ فولاد کربنی
-۳	۶۰۰	۵۸۰	۳۵/۵	۶ فولاد کربنی
-۱	۷۰۰	۶۹۰	۳۲	۶ فولاد کربنی
-۱	۸۱۰	۸۰۰	۴۶-۴۸	۶ فولاد کربنی
۰	۸۰۰	۸۰۰	تکرار	۶ فولاد کربنی

جدول ۴- نتایج حاصل در ایستگاه آبیگری سد لتیان تهران

درصد خطا	حجم تانکر مرجع Lit	حجم قرائت شده کنتور فراصوتی داخلی Lit	دبی لحظه‌ای کنتور فراصوتی داخلی lit/sec	قطر و جنس لوله بر حسب اینچ
+۳	۱۵۰۰۰	۱۵۴۵۰	۳۸-۳۹	۶ پلی اتیلن
-۰/۶	۱۵۰۰۰	۱۴۹۰۰	۳۵-۳۷	۶ پلی اتیلن
+۰/۶	۱۳۰۰۰	۱۳۱۰۰	۳۶-۳۸	۶ پلی اتیلن
+۰/۱	۳۰۰۰۰	۳۰۲۰۰	۳۵-۳۷	۶ پلی اتیلن
-۰/۱	۹۰۰۰	۸۸۹۰	۳۵-۳۷	۶ پلی اتیلن

### منابع و مراجع

- Holiday, D., Resnich, R., (1990). "Physics", Mc-Graw, Hill.
- Morfey, C.L., Howell, G.P., (1980). "Speed of Sound in Air as a Function of Frequency and Humidity", j. Acoust. Soc. Amer. 68, 1525-1527
- Moritz, W.E., Shreve, P.L., Mace, L.E., (1976). "Analysis of an Ultrasonic Spatial Locating System", IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, 25, No.1, 43-50.
- Kay, L., (1985). "Airborne Ultrasonic Imaging of Robot Workspace", Sensor Review, 5, No. 1, 8-12.
- Ahrens, U., (1985). "Solutions and Problems in Application of Airborne Ultrasonic in Assembly and Handling System", Robot System I, No. 1, 17-20.
- Commercial Press, "New ultrasonic Flowmeter", Badger Meter, Inc., 6116 East 15 street Tulsa Oklahoma, 74155, USA.
- Lynnworth, L.C., (1989). "Ultrasonic Measurement for Process Control", Academic Press Inc, New York.
- Http://www.cstl.nist.gov/div 836/836.01/publications.html
- Http://www.Krohne.com

انجام گرفته است که نتایج آن در جداول ۱، ۲، ۳ و ۴ آورده شده است:

- آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی مقایسه با کنتور فراصوتی مارک آمریکایی و کنتور حجمی.
- مرکز تحقیقات آب مقایسه با فلومتر الکترومغناطیسی و سرریز.
- پایلوت شرکت آبفرا مقایسه با مخزن حجمی.
- ایستگاه آبیگری سد لتیان و مقایسه با تانکرهای حجمی.

### نتایج

همان طور که در جداول ملاحظه می شود محدوده خطا برای دبی سنج های فراصوتی در محدوده ۱-۳ درصد قرار دارد و بر اساس آزمایشات انجام گرفته توسط نویسنده مقاله چنانچه در نصب دقت شود و جریان در داخل لوله کاملاً توسعه یافته باشد، دقت های بسیار مناسب تر نیز از این دبی سنج ها حاصل می گردد. به علاوه اغلب دبی سنج های نوع زمان گذر از نظر دقت اندازه گیری، اعم از مارک خارجی و یا داخلی، یکسان هستند. نتایج نیز نشان می دهد که مهم ترین ملاک مقایسه دقت بررسی، مخازن استاندارد می باشد که البته باید حجم مخزن به اندازه کافی بزرگ باشد تا خطای اندازه گیری کاهش یابد، این مشکلی است که در مخزن ۱۰۰۰ لیتری آبفرا به چشم می خورد. ولی در مخازن تانکرهای آبیگری با حجم زیاد، دقت های مناسب تری حاصل گردیده است.

یک دستگاه دبی سنج فراصوتی توسط سازمان آب منطقه‌ای تهران در سال ۱۳۷۰ خریداری و پس از آن در سال ۱۳۷۵، توسط شرکت آب و فاضلاب کشور، ۴۰ دستگاه از این نوع دبی سنج از یک شرکت آلمانی خریداری گردید و بین شرکت های آب و فاضلاب کشور توزیع شد. از سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۰ توسط یک شرکت ایرانی که تولید کننده این نوع دبی سنج ها می باشد، حدود ۲۰۰ دستگاه تولید و مورد بهره برداری واقع شده است. استفاده از این دستگاه ها با توجه به رضایت بهره برداران فراوان شده است. مهم ترین بحث در این مورد میزان دقت است که مورد اختلاف می باشد. اصولاً فلوسنجی در صنایع مختلف به دلیل دخالت پارامترهای بسیار زیاد یکی از موضوعات پیچیده و تعیین میزان دقت و ارتقای آن، هم چنان مورد پژوهش در سطح جهان می باشد. به دلیل مشکلات ناشی از خشک سالی و نیز ضرورت مدیریت بهینه بر منابع آب و تعیین دقیق میزان تولید و مصرف استفاده از انواع کنتورهای نوین خصوصاً برای لوله های قطور در شبکه شرکت های آب و فاضلاب گسترش یافته است، لیکن هنوز مرجع صاحب نظری برای تأیید رسمی مشخصات این نوع دبی سنج ها و میزان دقت آن ها وجود ندارد. موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران نیز اطلاعات و امکانات لازم را برای صدور تأیید در اختیار ندارد.

برای بررسی دقت دبی سنج های اولتراسونیک تولید داخل که مورد این بررسی است، آزمایشاتی در مراکز زیر

جدول ۱: نتایج حاصل در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی دانشگاه تهران.

میزان خطا	دبی لحظه‌ای مرجع مورد مقایسه Lit/sec		حجم عبور آب Lit	دبی لحظه‌ای Lit/sec	قطر و جنس لوله بر حسب اینچ	نوع کنتور مورد بررسی
	کنتور حجمی خارجی	فراصوتی مارک آمریکایی [۶]				
مرجع متوسط دو کنتور						
+۳	۸۵	۹۱	۱۰۰۰۰	۹۰	۱۰ فولاد کربنی	فراصوتی داخلی
+۲	۷۱	۷۷	۱۰۰۰۰	۷۵	۱۰ فولاد کربنی	فراصوتی داخلی
+۵	۴۵	۵۰	۱۰۰۰۰	۵۰	۱۰ فولاد کربنی	فراصوتی داخلی
-۰/۵	۲۹	۳۲	۱۰۰۰۰	۳۰	۱۰ فولاد کربنی	فراصوتی داخلی
-۱	۱۷	۱۴	۱۰۰۰۰	۱۵	۱۰ فولاد کربنی	فراصوتی داخلی