magiran.com

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 آرایی *

چکیده

دبی سنج‌های فراصوتی[1] از نوع زمان‌گذر[2] 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 دبی سنج‌ها، 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 (۵٪) کاربرد این دبی سنج روز به روز کمتر می‌گردد.

اندازه‌گیری اختلاف زمان عبور سرعت امواج صوتی در حرکت، در مسیرهای هم جهت و مخالف جهت جریان سیال، در دبی سنج‌های فراصوتی زمان گذر 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 دبی سنج‌ها 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 دبی سنج‌ها می‌باشد. کارکرد این نوع دبی سنج‌ها در صنایع آب و فاضلاب کشور، و استخراج نتایج دقت‌های آن‌ها از چهار سایت مختلف از مارک خارجی و داخلی (یک شرکت داخلی تولید کننده دبی سنج‌های فراصوتی از نوع زمان گذر 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 هیات علمی گروه مهندسی مکانیک- دانشکده فنی- دانشگاه تهران

1- Ultrasonic Flowmeter
2- Time Transition

magiran.com

ماهیت امواج فراصوت

انواع امواج مکانیکی با فرکانس‌های مختلف در محیط‌های مادی الاستیک انتشار می‌یابند. امواج فراصوت یا التراسوند[1] 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[2] 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 تعیین کننده در این زمینه حالت فیزیکی محیط مادی (جامد، مایع یا گاز) می‌باشد.

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

$$\frac{\partial^2 a}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} \qquad (۱)$$

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 :

$$a = A.\sin\omega(t - \frac{x}{c}) \qquad (۲)$$

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

با تعریف زاویه فاز :

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

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

$$v = \frac{da}{dt} = \omega A\cos(\omega t - \varphi) \qquad (۳)$$

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

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \qquad (٤)$$

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:

$$p=zv \qquad (۵)$$

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 ρc نامیده می‌شود.

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

$$p = \omega A\rho c.\cos\omega(t - \frac{x}{c}) \qquad (٦)$$

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

$$P = \omega A\rho c$$
$$V = \omega A$$
$$P_{ef} = \frac{P}{\sqrt{2}}$$
$$v_{ef} = \frac{v}{\sqrt{2}}$$

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

---

[1] Ultrasound
[2] Propagation

magiran.com

$$I = P_{ef}.v_{ef} = \frac{1}{2}p.v = \frac{p^2}{2\rho c} \qquad (۷)$$

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

$$N = I.s = P_{ef}.v_{ef}.s \qquad (۸)$$

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[1]

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 روش پردازش سیگنال‌های حاوی اطلاعات، متفاوتند. در روش a ، سیگنال اندازه‌گیری از تغییر سرعت انتشار امواج فراصوت در اثر 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 : $c-vp.\cos\alpha$

در حالت دوم : $c+vp.\cos\alpha$

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 :

$$\Delta t = \frac{2l}{c^2}v_p\cos\alpha \qquad (۹)$$

که c سرعت انتشار موج فراصوت،vp سرعت جریان محیط، L فاصله مبدل‌ها، و α 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:

$$\varphi_1 = \omega t_1 = \omega\frac{l}{c + v_p\cos\alpha} \qquad (۱۰)$$

$$\varphi_2 = \omega t_2 = \omega\frac{l}{c - v_p\cos\alpha} \qquad (۱۱)$$

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

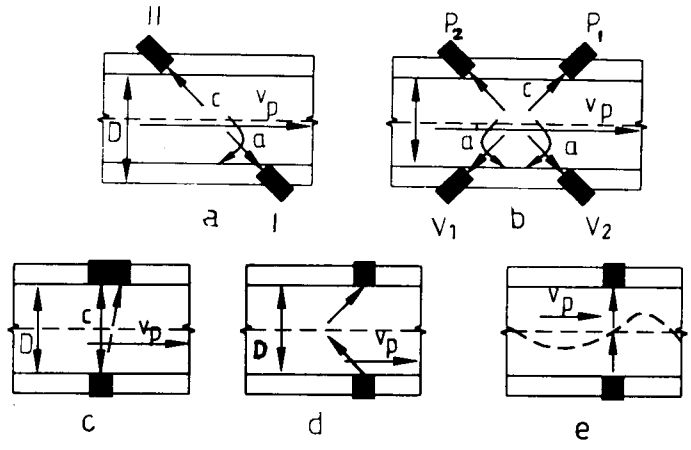
$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\omega l\cos\alpha.vp}{c^2 - v^2\cos^2\alpha} \qquad (۱۲)$$

رابطه‌ی اخیر بر خلاف روابط پیشین به سرعت انتشار موج فراصوت بستگی ندارد و از این لحاظ حائز اهمیت است [۲، ۳ و ٤].

$$f = f_1 - f_2 = \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{2v_p}{l}\cos\alpha \qquad (۱۳)$$

[1] Clamp-on

magiran.com



شکل ۱- روش‌های فراصوتی اندازه‌گیری دبی مایعات.

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[1] 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[2] توسط پالس فراصوت آسان نیست. نواحی مزبور در شرایط استفاده از مبدل‌های درون‌کار[3] در خط لوله پدید می‌آیند. زمان انتشار در امتدادهای هم جهت و خلاف جهت جریان برابر است با :

$$t_1 = \frac{A}{c} + \frac{B}{c} + \frac{1}{c + v_p \cos\alpha} \qquad (14)$$

$$t_2 = \frac{A}{c} + \frac{B}{c} + \frac{1}{c - v_p \cos\alpha} \qquad (15)$$

در ارزیابی اختلاف فرکانس سیرکولاسیون[4] پالس در دو جهت یا تفاوت زمان گذر امواج، رابطه پیچیده‌تر زیر به دست می‌آید:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{1}{c - v_p \cos\alpha} - \frac{1}{c + v_p \cos\alpha}$$

$$= \frac{2l v_p \cos\alpha}{c^2 - v_p^2 \cos^2\alpha} \qquad (16)$$

[فرمول‌های ۹ الی ۱۶ از مرجع ۲]

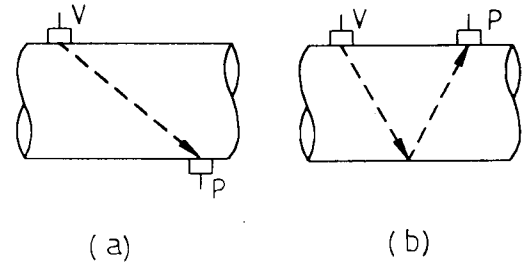
تحلیل روابط اندازه‌گیری فراصوتی دبی مایعات

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.

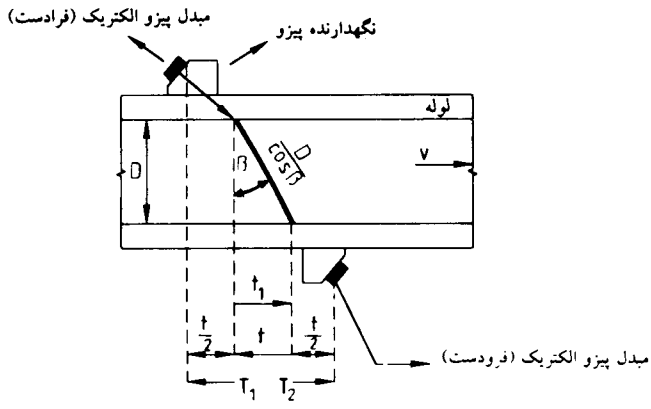
تنها دو نوع دبی سنج فراصوتی، این معیار بنیادی را که کارایی سیستم نباید از تغییرات سرعت صوت تأثیر بپذیرد، ارضا می‌کنند. یکی از آن‌هان نوع کاملاً آنالوگ است که بر اساس اصل اختلاف فرکانس بین مسیرهای اکوستی در زمان‌های مجزا[5] کار می‌کند و دیگری روشی اساساً دیجیتالی است که دبی (مساحت×سرعت) را در مسیرهای

[1] Von Karman
[2] Dead Zones
[3] Built-in
[4] Circulation
[5] Time-Separated

magiran.com



شکل ۲- روش‌های نصب مبدل به دیواره خارجی لوله.



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

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. چنان که 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_2 و T_1 را می‌توان جمع زمان‌های t_1 و t_2 که در طی آن‌ها پالس فراصوت از مایع عبور می‌کند و زمان τ که از قسمت‌های الحاقی و دیواره‌ی لوله می‌گذرد، در نظر گرفت شکل (۳).

$$T_1 = t_1 + \tau \quad \text{و} \quad T_2 = t_2 + \tau \qquad (۱۷)$$

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

$$t_1 = \frac{\frac{D}{Cos\beta}}{c + v.Sin\beta}, \quad t_2 = \frac{\frac{D}{Cos\beta}}{c - v.Sin\beta} \qquad (۱۸)$$

که D قطر داخلی لوله، β 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 زوایه β نسبت به محور اصلی (جهت جریان) طی می‌کند و جمله $v.Sin\beta$ 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].

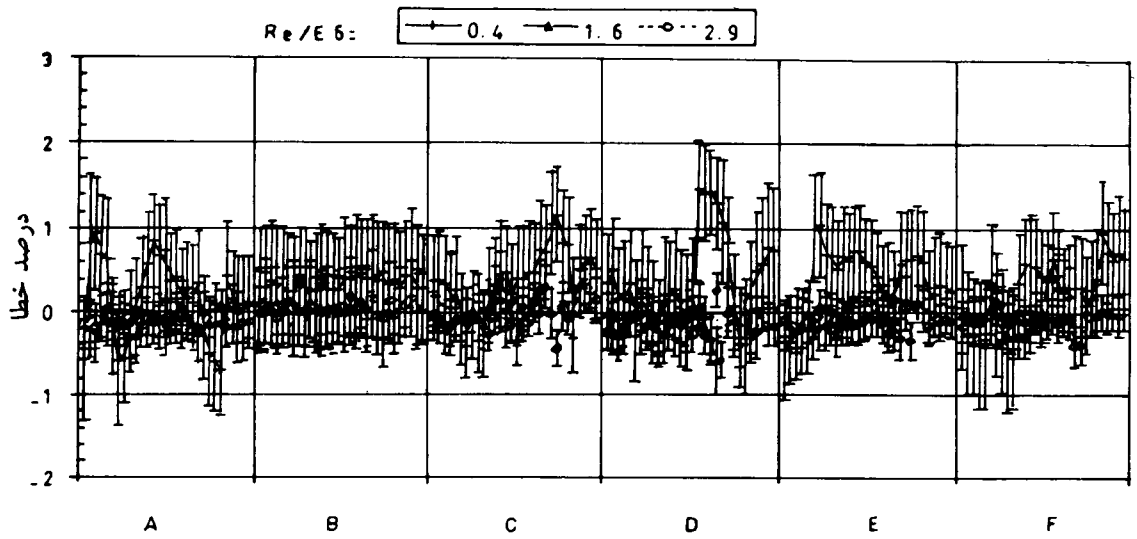
magiran.com

طبق منحنی‌های شکل ٤ و ٥ 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 سنج‌ها 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 ٥ جفت ترانس دیوسر) اولتراسونیک، موفق شده‌اند دقت‌های ٪۱۵ را با بهره‌گیری از فناوری فراصوتی کسب نمایند [۷، ۸ و ۹].

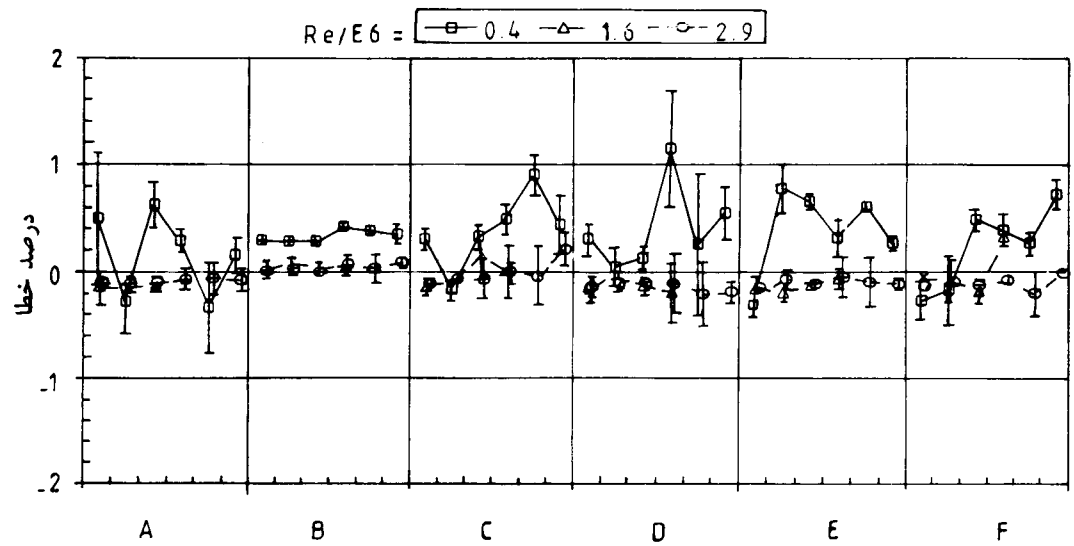
این موضوع در گزارش دی ماه سال ۷۹ اداره بازرسی بر نظارت و صادرات نفت ایران که از دبی سنج‌های فراصوتی با پنج جفت سنسور به طور آزمایشی استفاده می‌نماید، مورد تأیید قرار گرفته است.

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 ٤- نمودار درصد خطا کنتورهای فراصوتی (تکرارپذیری).



شکل ٥- نمودار درصد خطا کنتورهای فراصوتی (دقت اندازه‌گیری).

magiran.com

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، ٤٠ دستگاه از این نوع دبی سنج از یک شرکت آلمانی خریداری گردید و بین شرکت‌های آب و فاضلاب کشور توزیع شد. از سال ۱۳۷٦ تا ۱۳۸۰ توسط یک شرکت ایرانی که تولید کننده این نوع دبی سنج‌ها می‌باشد، حدود ۲۰۰ دستگاه تولید و مورد بهره‌برداری واقع شده است. استفاده از این دستگاه‌ها با توجه به رضایت بهره‌برداران فراوان شده است. مهم‌ترین بحث در این مورد میزان دقت است که مورد اختلاف می‌باشد. 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 می‌باشد.

به دلیل مشکلات ناشی از خشک‌سالی و نیز ضرورت مدیریت بهینه بر منابع آب و تعیین دقیق میزان تولید و مصرف استفاده از انواع کنتورهای نوین خصوصاً برای لوله‌های قطور در شبکه شرکت‌های آب و فاضلاب گسترش یافته است، لیکن هنوز مرجع صاحب‌نظری برای تأیید رسمی مشخصات این نوع دبی سنج‌ها و میزان دقت آن‌ها وجود ندارد. موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران نیز اطلاعات و امکانات لازم را برای صدور تأیید در اختیار ندارد.

برای بررسی دقت دبی سنج‌های اولتراسونیک تولید داخل که مورد این بررسی است، آزمایشاتی در مراکز زیر انجام گرفته است که نتایج آن در جداول ۱، ۲، ۳ و ٤ آورده شده است :

۱- آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده فنی مقایسه با کنتور فراصوتی مارک آمریکایی و کنتور حجمی.

۲- مرکز تحقیقات آب مقایسه با فلومتر الکترومغناطیسی و سرریز.

۳- پایلوت شرکت آبفر مقایسه با مخزن حجمی.

٤- ایستگاه آبگیری سد لتیان و مقایسه با تانکرهای حجمی.

نتایج

همان طور که در جداول ملاحظه می‌شود محدوده خطا برای دبی سنج‌های فراصوتی در محدوده ۳-۱ 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، دقت‌های بسیار مناسب‌تر نیز از این دبی سنج‌ها حاصل می‌گردد. به علاوه اغلب دبی سنج‌های نوع زمان گذر از نظر دقت اندازه‌گیری، اعم از مارک خارجی و یا داخلی، یکسان هستند. نتایج نیز نشان می‌دهد که مهم‌ترین ملاک مقایسه دقت بررسی، مخازن استاندارد می‌باشد که البته باید حجم مخزن به اندازه کافی بزرگ باشد تا خطای اندازه‌گیری کاهش یابد، این مشکلی است که در مخزن ۱۰۰۰ لیتری آبفر به چشم می‌خورد. ولی در مخازن تانکرهای آبگیری با حجم زیاد، دقت‌های مناسب‌تری حاصل گردیده است.

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

نوع کنتور مورد بررسی	قطر و جنس لوله بر حسب اینچ	دبی لحظه‌ای	حجم عبور آب	دبی لحظه‌ای مرجع مورد مقایسه Lit/sec		میزان خطا
		Lit/sec	Lit	فراصوتی مارک آمریکایی [٦]	کنتور حجمی خارجی	مرجع متوسط دو کنتور
فراصوتی داخلی	۱۰ فولاد کربنی	۹۰	۱۰۰۰۰	۹۱	۸۵	+۳
فراصوتی داخلی	۱۰ فولاد کربنی	۷۵	۱۰۰۰۰	۷۷	۷۱	+۲
فراصوتی داخلی	۱۰ فولاد کربنی	۵۰	۱۰۰۰۰	۵۰	٤۵	+۵
فراصوتی داخلی	۱۰ فولاد کربنی	۳۰	۱۰۰۰۰	۳۲	۲۹	-۰/۵
فراصوتی داخلی	۱۰ فولاد کربنی	۱۵	۱۰۰۰۰	۱٤	۱۷	-۱

magiran.com

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

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

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

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

جدول ۴- نتایج حاصل در ایستگاه آبگیری سد لتیان تهران

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

منابع و مراجع

1- Holiday, D., Resnich,: R., (1990). *"Physics"*, Mc-Graw, Hill.

2- 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

3-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.

4- Kay, L., (1985). *"Airborne Ultrasonic Imaging of Robot Workspace"*, Sensor Review, 5, No. 1,8-12.

5- Ahrens, U., (1985). *"Solutions and Problems in Application of Airborne Ultrasonic in Assembly and Handling System"*, Roboter System I, No. 1,17-20.

6- Commercial Press, *"New ultrasonic Flowmeter"*, Badger Meter, Inc., 6116 East 15 street Tulsa Oklahoma, 74155, USA.

7- Lynnworth, L.C., (1989). *"Ultrasonic Measurement for Process Control"*, Academic Press Inc, New York.

8- Http://www,cstl. nist.gov/div 836/836.01/publications.html

9- Http://www.Krohne.com