مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۱، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۶۲-۵۵

طراحی و پیاده سازی دبی‌سنج فراصوت چهارمسیره با استفاده از روش تفاضل زمانی

محمد عروتی نیا[۱]، عباس غریبی[۲]

[۱] دانشیار، دانشکده مخابرات- وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات، orvatinia@ictfaculty.ir

[۲] شرکت پایانه‌های نفتی ایران- وزارت نفت، a.gharibi@nioc-iotc.com

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۶/۳/۲۹، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۶/۶/۲۴)

چکیده: یک دبی‌سنج فراصوت چهار مسیره با نصب فرستنده/گیرنده‌های امواج فراصوت بر روی یک لوله ۸ اینچی طراحی و ساخته شد. با عبور کنترل شده سیال ازدرون دبی‌سنج ساخته شده، سرعت سیال در چهار لایه مختلف با استفاده از روش تفاضل زمانی(Time-difference) اندازه گیری شد. با استفاده از روش انتگرال گیری عددی به روش گاوس-لژاندر و اعمال تقریب مهندسی، نرخ شارش سیال بدست آمد. با مقایسه پاسخ دبی‌سنج ساخته شده با پاسخ یک دبی‌سنج تجاری مرجع، صحت عملکرد سیستم در نرخ جریانهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین با مقایسه پاسخ آن با پاسخ یک دبی‌سنج فراصوت تک مسیره معادل، خطای اندازه گیری آنها مقایسه گردید. نتیجه بیانگر خطای متوسط کمتر از ۳٪ در نرخ سرعتهای بالاتر از ۰/۵ m/s و خطای متوسط ۱۵٪ در سرعتهای کمتر از ۰/۳ m/s بود. متوسط خطای متوسط دبی‌سنج تک مسیره در تمام سرعتها حدود۲۰٪ بالاتر از خطای سرعت سنج چهار مسیره بود.

کلمات کلیدی: دبی‌سنج، فراصوت، روش تفاضل زمانی، روش گاوس-لژاندر.

Design and Fabrication of a Four-path Ultrasonic Flowmeter using the Time-difference Method

Mohammad Orvatinia, Abbas Gharibi

Abstract: A four-path ultrasonic flow meter was designed and fabricated by using of ultrasonic transmitter/receivers on an 8-inch pipe. By passing fluid through the flowmeter at a controlled rate, the velocity was measured in different layers using the time-difference method. Fluid flow rate was estimated by Gauss-Legendre numerical integration method and applying of the engineering approximation. By comparison of the results with the actual measurement done by a calibrated reference flow meter, the accuracy of the system was tested at various flow rates. It also was compared with the measurement of an equivalent one-path ultrasonic flowmeter, and the measurement errors were calculated. The test result represented that, the average error of measurement is less than 3% at the speeds of 0.5 m/s and more. The average error was more than 15% at the speeds below 0.3 m/s. The measurement error of the one-path flowmeter was 20% more than that of four path one.

Keywords: flow meter, ultrasonic, time difference method, method of Gauss-Legendre.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.2.5.4]

۱- مقدمه

دبی‌سنج‌های فراصوت (آلتراسونیک) بیش از ۴۰ سال است که در صنایع مختلف از جمله نفت،گاز، شیمی، مدیریت منابع آب و غیره به کار گرفته می‌شوند. در حال حاضر این دبی‌سنج‌ها به دلیل مزایای متعددی از نظر دقت، اندازه گیری بدون وقفه، نصب آسان، هزینه پایین و موارد دیگر، در حال تبدیل شدن به گزینه نخست برای اندازه گیری جریان سیالات می‌باشند.[۳-۱] پایداری و عدم استهلاک به دلیل نداشتن بخش مکانیکی یکی دیگر از ویژگیهای برجسته آنها است. اساس کار این دبی‌سنج‌ها برهم کنش بین امواج فراصوت و سیال متحرک است. برای استفاده از این دبی‌سنج‌ها ابتدا موج فراصوت را به محیط سیال تزریق نموده و پاسخ آن دریافت می‌گردد. برهم کنش با سیال باعث تغییر مشخصات امواج دریافتی می‌شود و مقدار تغییر وابسته به سرعت سیال است. بدین ترتیب با اندازه گیری تغییرات می‌توان سرعت حرکت سیال را محاسبه نمود. در صورت ثابت بودن سطح مقطع لوله، میزان جریان(دبی) سیال عبوری نیز با حاصلضرب سرعت در سطح مقطع بدست آید[۴].

دبی‌سنج‌های فراصوت به دو دسته دوپلری و تفاضل زمانی تقسیم بندی می‌شوند[۵]. مبنای کار دبی‌سنج‌های دسته اول اثر دوپلر است که در آن فرکانس موج دریافتی از منبع یا بازتابنده متحرک نسبت به ناظر تغییر می‌کند. برای استفاده از آنها باید سیال حاوی ذرات یا حباب گاز بازتابنده امواج صوتی باشد. این دبی‌سنج‌ها در مواردی که دقت مهم نباشد مناسب هستند. دسته دوم بر اساس تغییر سرعت موج صوتی درون محیط سیال متحرک کار می‌کنند و برای سیالات فاقد بازتابنده هم قابل استفاده هستند[۵]. همین ویژگی در کنار مزایای دیگری همچون پایداری و قابلیت اطمینان در اندازه گیری باعث شده است که دبی‌سنج‌های تفاضل زمانی مورد توجه خاصی در سیستم‌های اندازه گیری جریان سیالات با ارزش همچون نفت و گاز و مشتقات آنها باشند.

ملاحظات اقتصادی تولید کنندگان و مصرف کنندگان محصولات با ارزشی همچون نفت و گاز باعث شده است تا تحقیق و پژوهش به منظور افزایش دقت، قابلیت اطمینان و پایداری موضوع مورد علاقه برای سازندگان سیستم‌های اندازه گیری جریان باشد. حجم قابل توجه مبادلات نفتی در جهان و قیمت رو به رشد آن، صرف هزینه تحقیقاتی برای بهبود دقت این وسایل را توجیه پذیر می‌کند. در سالیان اخیر، ارتقای سخت افزارها و فناوریهای نوین پردازش سیگنال یکی از عوامل بهبود دقت اندازه گیری چنین سیستم‌هایی بوده است. در حال حاضر بالابردن دقت، نکته کلیدی در تحقیقات مربوط به دبی‌سنج های فراصوت است و تحقیق و پژوهش در این مورد همچنان ادامه دارد[۶]. لازم به ذکر است که دبی‌سنج‌های بسیار دقیق مکانیکی برای کاربرد کوتاه مدت و حجم سیالات کم هم اکنون دردسترس هستند، ولی به دلیل مشکلات نگهداری و تعمیرات و داشتن اجزاء مکانیکی متحرک، استفاده از آنها برای کار مستمر بلند مدت و در حجم‌های بسیار بزرگ مثل صادرات نفت توجیه پذیر نیست.

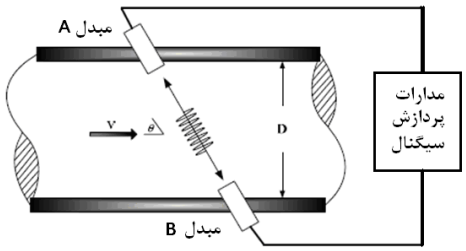
کشور ما با توجه به صادرات قابل توجه نفت خام، گاز، میعانات گازی و سایر فراورده‌های نفتی از مصرف کنندگان عمده اینگونه دبی‌سنج‌ها می‌باشد[۷] که تماماً از منابع خارجی تامین می‌شوند. وابستگی به تامین کنندگان خارجی در کنار تحریم‌های بین المللی مشکل مضاعفی برای صنایع نفت وگاز کشور محسوب می‌شود. لذا پژوهش در این خصوص می‌تواند ضمن رفع وابستگی، صرفه جویی قابل توجهی در هزینه‌های انتقال و صادرات نفت، گاز و مشتقات آنها داشته باشد. اهمیت این حسگرها مد نظر محققین داخلی نیز بوده است و در این خصوص طراحی و ساخت یک دبی سنج فراصوت از نوع تک مسیره توسط محققین در داخل کشور گزارش شده است[۸]. لیکن در مورد دبی سنج چند مسیره گزارش داخلی مشاهده نگردید.

در این تحقیق مراحل طراحی و ساخت یک دبی سنج فراصوت چهار مسیره ارائه می گردد. انجام این کار برای اولین بار در کشور بوده و سابقه قبلی نداشته است.برای حصول به این هدف ابتدا مروری بر مبانی کار دبی سنج های فراصوت آورده می شود. درادامه طراحی و ساخت یک دبی سنج چهار مسیره ادامه بااستفاده از چهار زوج مبدل فراصوت که در مکانهای مناسبی از یک لوله ۸ اینچی قرار دارند،گزاش می شود. در مرحله بعد با پیاده سازی یک سیستم تست که قابلیت گردش جریان سیال با سرعت قابل کنترل داشته باشد، دقت اندازه گیری آن بررسی و با دقت سایر دبی‌سنج‌ها مقایسه شده است. این مقایسه محدودیت‌های بکارگیری این سیستم را مشخص می کند؛ که براساس آن می توان اقداماتی برای بهینه سازی و افزایش دقت بعمل آورد. نکته مهم در این مرحله بکارگیری تقریب‌های مهندسی برای محاسبه میزان جریان سیال است، چراکه غالباً روش محاسبه توسط سازندگان اینگونه تجهیزات محرمانه نگه داشته می‌شود. باتوجه به تجربیات حاصل از این تحقیق می توان در مراحل بعدی اقدام به بهینه سازی و افزایش دقت سیستم مزبور نمود. دستاوردهای حاصل از انجام این مرحله تحقیق را می توان بصورت زیر خلاصه نمود:

الف- طراحی و ساخت عملی یک دبی‌سنج فراصوت چهار مسیره بر مبنای تفاضل زمانی

ب- بررسی صحت استفاده از تقریب‌های مهندسی برای محاسبه سرعت و میزان جریان سیال عبوری و مقایسه آن با مقدار واقعی که توسط دبی‌سنج مرجع دقیق اندازه گیری می‌شود. با اینکار خطای روشهای موجود مشخص خواهد شد.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.2.5.4]



شکل۱- نمای یک دبی‌سنج فراصوت تک مسیره

۲- مبانی نظری

نمایش کلی سیستم‌های غیرخطی افاین را در نظر بگیرید.

شمای دبی‌سنج تک مسیره فراصوت تفاضل زمانی در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این شکل واحدهای مبدل، که مشتمل بر یک فرستنده/گیرنده فراصوت هستند، در نقاط مناسبی از جداره لوله حاوی سیال تعبیه می‌شوند که در شکل بصورت A و B نشان داده شده اند. برای انجام سنجش ابتدا مبدل A یک یا چند پریود از موج سینوسی فراصوت با دامنه ثابت را تولید و به سمت گیرنده B ارسال می‌کند این امواج پس از عبور از سیال توسط گیرنده B دریافت شده و سیگنال پاسخ را تولید می کند. دامنه موج درون محیط ثابت نخواهد بود و در ابتدا به دلیل تداوم تحریک افزایشی بوده و در انتها به علت توقف تحریک بتدریج کاهشی می‌شود، که نتیجه آن تشکیل موجی متناوب با دامنه متغیر می باشد. در مرحله بعد مبدل B امواج را تولید و متقابلاً به سمت A ارسال کرده و پاسخ آن در A دریافت می‌شود. زمان انتشار عبارت است از فاصله زمانی بین یک نقطه از موج تولید شده توسط فرستنده و نقطه متناظر آن در موجی است که توسط گیرنده دریافت می شود.

از آنجا که سرعت صوت در داخل سیال به جهت حرکت سیال بستگی دارد بنابراین زمان مربوط به رفت و برگشت سیگنال متفاوت بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$t_{B\to A}=\frac{D}{u\cdot\sin(\theta)-V}\quad,\quad t_{A\to B}=\frac{D}{u\cdot\sin(\theta)+V} \qquad (۱)$$

که در آن D قطر لوله، u سرعت امواج فراصوت و V سرعت حرک سیال می‌باشد. با استفاده از رابطه ۱ اختلاف زمانی سیگنال رفت و برگشت بصورت زیر خواهد بود

$$T=t_{B\to A}-t_{A\to B}=D\frac{2V}{\left(u\cdot\sin(\theta)\right)^2-V^2} \qquad (۲)$$

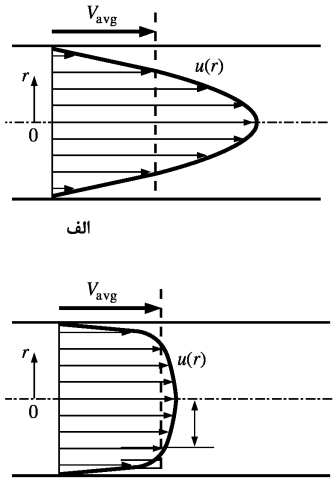
این رابطه مبنای عملکرد دبی‌سنج‌های تفاضل زمانی است که در آن با اندازه گیری T و داشتن ابعاد لوله و محل قرار گیری مبدل‌های A و B سرعت سیال را محاسبه می‌نماید. برای عملکرد بهتر در روش تفاضل زمانی سیال باید عاری از حباب گاز و ذرات جامد معلق باشد. ساختار فوق علیرغم سادگی عملکرد، دقت مناسبی ندارد چرا که در آن تنها سرعت یک لایه از سیال که در برگیرنده مسیر فراصوت است، اندازه گیری می‌شود. بررسی حرکت سیالات نشان می‌دهد که سرعت سیال در یک لوله ثابت نبوده و مطابق شکل ۲ از مقدار بیشینه در مرکز لوله تا سرعت صفر در بدنه آن متغیر است[۹]. بنابراین لازم است سرعت اندازه گیری شده از مرحله قبل با انجام تقریب مناسبی به سرعت متوسط V_{avg} تبدیل شود. متاسفانه محاسبه سرعت متوسط به سادگی امکان پذیر نبوده و به عوامل مختلفی مثل ویژگیهای سیال و لوله و حتی فشار و دمای محیط بستگی دارد[۱۰]. به عنوان مثال در جریان آرام(Laminar Flow) رابطه سرعت سیال در مقطع استوانه ای به فاصله r از مرکز لوله بصورت زیر است[۷].

$$v(r)=V_{\max}\left[1-(r/R)^2\right] \qquad (۳)$$

که در آن R شعاع لوله و V_{max} بیشینه سرعت در محور لوله است. اثبات می شود که در این حالت۲= V_{max}/V_{avg} است. در حالی که در جریان آشفته (Turbulent Flow) رابطه سرعت با فاصله r از مرکز لوله بصورت رابطه ۴ است[۹]. گذر از جریان آرام به جریان آشفته به کمیتی بدون بعد نام عدد رینولذر بستگی دارد. این عدد وابسته به مشخصات سیال، سرعت آن و طول مجرا است. با توجه به متفاوت بودن مشخصات سیالات مختلف، سرعت لازم برای تبدیل جریان آرام به آشفته نیز به نوع سیال بستگی خواهد داشت.

$$v(r)=V_{\max}\left[1-(r/R)\right]^{1/n} \qquad (۴)$$

که در آن n عددی ثابت وابسته به عدد رینولد است. بنابراین نسبت V_{max}/V_{avg} نیز به n بستگی پیدا می کند لذا به سادگی قابل محاسبه نیست[۱۱].



شکل ۲: توزیع جریان سیالات درون لوله در حالت (الف) جریان آرام و (ب) جریان آشفته

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.2.5.4]

برای محاسبه دبی سیال در حالت توزیع سرعت نامشخص مقطع لوله را بصورت شکل ۳ در نظر بگیرید. میزان سیال عبوری از یک لایه با ضخامت dr که در فاصله r از مرکز لوله قرار دارد، را بصورت زیر محاسبه می کنیم :

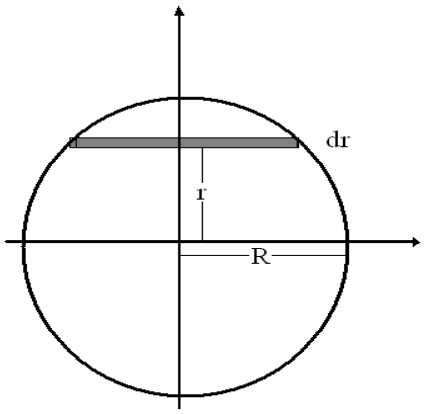
$$q(r) = D(r) \times V(r) \quad (۵)$$

که در آن V(r) سرعت متوسط سیال در لایه مورد نظر بوده و D(r) عرض لایه است که توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D(r) = 2\sqrt{R^2 - r^2} \quad (۶)$$

با انتگرال گیری از رابطه ۵ در کل سطح مقطع، دبی سیال عبوری از لوله محاسبه می‌شود:

$$Q = \int_{-R}^{R} q(r)dr = \int_{-R}^{R} D(r)V(r)dr \quad (۷)$$



شکل۳: نمای جانبی لوله حاوی سیال

بر اساس معادله۷ برای محاسبه نرخ عبور سیال بصورت عملی، لازم است سرعت(V(r در تعداد زیادی از لایه‌های بهم پیوسته در فواصل مختلف از مرکز لوله اندازه گیری شود. در حالت حدی تعداد لایه‌ها بی نهایت شده و تحقق این الزام را در عمل غیر ممکن می‌کند. راه حل عملی برای رفع این مشکل استفاده از تقریب‌های مهندسی است که در آن تعداد محدودی از لایه‌ها را انتخاب نموده و با استفاده از روشهای انتگرال گیری عددی نتیجه ای نزدیک به مقدار واقعی را بدست می‌آورند. روش مناسب برای انتگرال گیری عددی، روش گاوس است. که درآن انتگرال معین را با ارزیابی تابع در نقاط خاصی، که بیشترین دقت را داشته باشد، تخمین می‌زنند. لازم به یادآوری است که روش گاوس انواع مختلفی دارد که انتخاب هریک به شکل تابع مورد نظر وابسته است. همچنین بازه انتگرال گیری نیز باید دارای شرائط خاصی باشد[۱۲]. برای ادامه کار معادله ۷ را بصورت زیر تغییر می دهیم.

$$\begin{aligned} Q &= \int_{-R}^{R} 2\sqrt{R^2 - r^2}V(r)dr \\ &= \int_{-R}^{R} 2R^2\sqrt{1-(r/R)^2} \times V(r)d(r/R) \end{aligned} \quad (۸)$$

برای اینکار با تغییر متغیر x=r/R و انجام عملیات ریاضی بر روی معادله ۷ می‌توان معادله و شرایط مرزی آن را بصورت زیر مناسب انتگرال گیری عددی به روش گوس – لژاندر تبدیل نمود[۱۲]

$$Q = \int_{-1}^{1} 2R^2\sqrt{1-x^2} \times V(xR)dx \quad (۹)$$

در اینصورت با اعمال ضرائب مربوطه می‌توان جریان کل سیال عبوری Q درون لوله استوانه ای را بصورت زیر تقریب زد:

$$Q \cong \sum_{i=1}^{N} W_i \times V(r_i) \quad (۱۰)$$

که در آن $V(r_i)$ سرعت اندازه گیری شده در لایه iام به فاصله نسبی r_i از مرکز لوله است. N تعداد لایه‌های مورد نیاز برای تقریب بوده و W_iها ضرائب وزنی انتگرال عددی هستند که از رابطه زیر بدست می‌آیند

$$W_i = 2R^2\sqrt{1-x_i^2} \times A_i \quad (۱۱)$$

در رابطه اخیر $x_i=r_i/R$ محل نصب مبدل i ام است که ریشه i ام تابع لژاندر مرتبه N یعنی $P_N(x)$ بوده و به N بستگی دارد. A_iها نیز ضرائب ثابت مربوط به روش انتگرال گیری عددی گاوس–لژاندر هستند که درمنابع محاسبات عددی علاوه بر روابط ریاضی، بصورت جدول نیز در دسترس هستند [۱۳]. برای استفاده از این تقریب عددی لازم است که سرعت سیال در N لایه اندازه گیری شود. همانطور اشاره شد، محل لایه‌ها دلخواه نبوده و براساس الگوریتم انتگرال گیری عددی مورد نظر تعیین می گردند.

معادله ۱۰ مبنای اساسی پیاده سازی دبی‌سنج چند مسیره (Multi-Path) بصورت عملی است. انتخاب مسیرها و ضرائب وزنی به تعداد نقاط وابسته است و بر اساس روابط مشخص شده در روش گاوس–لژاندر بدست می‌آیند[۱۴]. هرچه تعداد مسیرها بیشتر باشد دقت اندازه گیری سرعت و در نتیجه دقت سنجش میزان سیال عبوری بیشتر خواهد بود.

دبی‌سنج پیشنهادی در فعالیت تحقیقی حاضر، چهار مسیره است(N=4). جدول ۱ موقعیت نصب مبدلها و ضرائب وزنی مربوطه بر اساس تقریب فوق را مشخص نموده است. جزئیات محاسبات مربوط به تعین مقادیر جدول خارج از بحث بوده و علاقمندان می‌توانند به مراجع مربوطه [۱۴و۴] مراجعه کنند.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.2.5.4]

جدول ۱: موقعیت مکانی حسگرها و ضرائب انتگرال گیری عددی به روش گاوس لژاندر برای ۴ نقطه

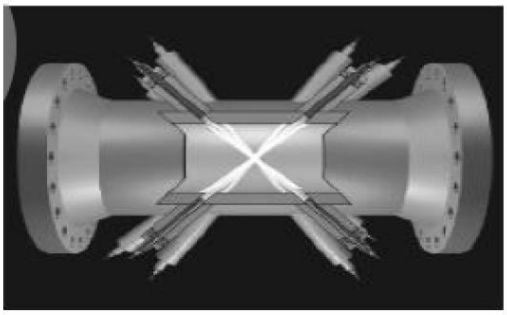
شماره لایه i	فاصله از مرکز لوله (r_i)	ضریب وزنی w_i
1	0.8611363R	0.3536808R²
2	0.3399810R	1.2265968R²
3	- 0.3399810R	1.2265968R²
4	- 0.8611363R	0.3536808R²

با جایگذاری مقادیر جدول ۱ در رابطه ۱۰ دبی سیال در دبی‌سنج چهار مسیره برابر است با:

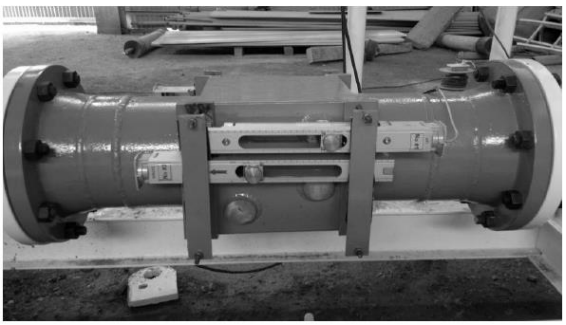
$$Q = R^2[0.3536808\,V(r_1) + 1.2265968\,V(r_2) + 1.2265968\,V(r_3) + 0.3536808\,V(r_4)] \quad (۱۲)$$

۳- طراحی سامانه و کار عملی

به منظور اعتبار سنجی مبانی نظری ارائه شده در بخش قبل، یک دبی‌سنج فراصوت ۴ مسیر با استفاده یک لوله ۸ اینچی (۲۰/۳۲cm) و چهار زوج مبدل فراصوت تجاری ازنوع .OPTISONIC 6300 محصول شرکت KROHNE Messtechnik GmbH & Co ساخته شد. طرح جزئیات ساخت را در متون دیگر گزارش کرده ایم[۱۵] شمای وسیله ساخته شده به همراه تصویر آن در شکل ۴ ارائه گردیده است. با لحاظ نمودن قطر لوله استفاده شده جدول۱، مکان نصب مبدلها برحسب فاصله عرضی از محور لوله مطابق جدول۲ محاسبه می‌شود. برای طراحی مدارات پردازشی به منظور اندازه گیری و ثبت زمانهای انتشار، تمهیدات خاصی لازم است، چراکه که سرعت انتشار امواج فراصوت در سیالات بسیار بالا بوده زمان انتشار آن در یک لوله ۲۰/۳۲cm بسیارکوتاه خواهد بود[۱۷-۱۶]. در شرایط آزمایشگاهی فراهم شده برای این فعالیت تحقیقی، به منظور رسیدن به دقت اندازه گیری ٪۰/۰۵ باید اختلاف زمانی قابل سنجش در حدود µs ۰/۱ باشد. این دقت لازم می‌دارد که فواصل زمانی نمونه برداری A/D از مرتبه چند ns باشد، بدین ترتیب دقت محاسبه اختلاف زمان رفت و برگشت امواج فراصوت منتشر شده در مرتبه نانو ثانیه و یا حتی پیکو ثانیه می‌گردد. برای اینکار مدار مبدل آنالوگ به دیجیتال هشت کاناله (LM96511) با امکان کاربری سیگنال های التراسونیک و رزولوشن 12-bit ، سرعت نمونه برداری 50~40 MSPS ، توان مصرفی بسیار پایین به همراه مدار مجتمع قابل برنامه ریزی FPGA از نوع به کار گرفته می شود. جزئیات بیشتری از طراحی بخش الکترونیکی در مراجع [۱۶و۱۵] موجود است. همچنین در آینده مقاله مستقلی در این خصوص توسط مولفین منتشر خواهد شد.



الف



ب

شکل ۴- الف: شمای دبی‌سنج فراصوت چهارمسیره. ب) تصویر واقعی از نمونه ساخته شده.

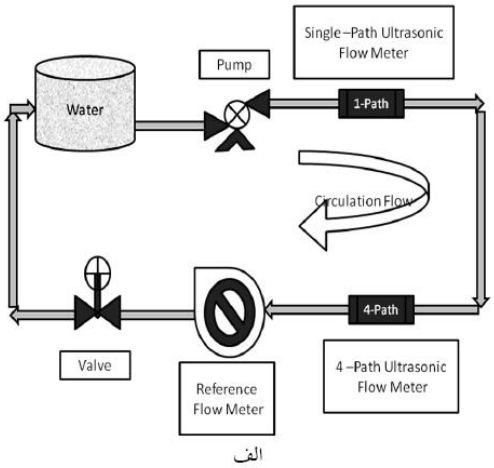
جدول ۲: موقعیت مکانی حسگرها و ضرائب انتگرال گیری عددی به روش گاوس لژاندر برای ۴ نقطه در لوله ۸ اینچی

شماره لایه i	فاصله از مرکز لوله (r_i)	ضریب وزنی w_i
1	8.7491448	0.003650891
2	3.454207	0.012661619
3	-3.454207	0.012661619
4	-8.749145	0.003650891

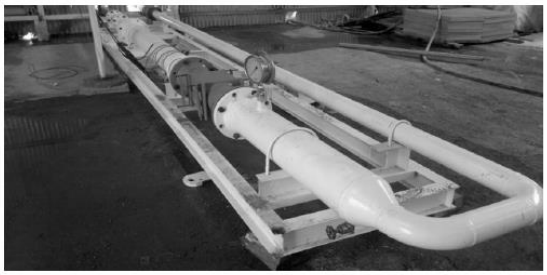
برای آزمایش عملی دبی‌سنج ساخته شده یک سامانه تست طراحی و ساخته شد. نمودار بلوکی سامانه به همراه تصویر واقعی آن به ترتیب در شکل‌های ۵-الف و ۵-ب آورده شده است. این سامانه تست یک حلقه بسته گردش آب است که به یک مخزن ذخیره، یک پمپ چرخشی، شیرکنترل سیال و تعدادی دبی‌سنج مجهز است. استفاده از آب برای تست دبی سنج ها به دلیل سادگی کار وآلایندگی کم، در همه آزمایشگاهها وکارگاههای تابعه شرکت های تولید و توزیع نفت مرسوم می باشد. در این حلقه یک دبی‌سنج مرجع دقیق مکانیکی بصورت متوالی با دبی‌سنج چهار مسیره ساخته شده قرار گرفته است. دبی‌سنج مرجع استفاده شده ازنوع گردشی(مکانیکی) با نام تجاری LF4-S3 PRIME، محصول شرکت Smith MeterTM می‌باشد. بر اساس گزارش کالیبراسیون، آن دقت اندازه گیری این محصول ٪۰/۱ می‌باشد. این نوع

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.2.5.4]

دبی‌سنج‌ها علیرغم دقت بالا بعلت داشتن اجزای مکانیکی متحرک، دارای استهلاک و هزینه نگهداری بالایی هستند. لذا استفاده از آنها صرفاً برای اندازه گیری حجم شارش کم و در زمانهای کوتاه توجیه پذیر است؛ ولی در اندازه گیری بدون وقفه حجم شارش بالا مثل صادرات نفت توصیه نمی شود. نرخ عبور سیال از درون لوله با استفاده از شیر کنترلی نصب شده در سامانه کنترل می‌شود. فواصل بین اجزا در حد طول ورودی انتخاب می‌شود تا از پایداری سیال اطمینان حاصل شود[۱۱]. بدین ترتیب سیستم فوق توانایی به گردش درآوردن سیال پایدار با نرخ شارش متفاوت را خواهد داشت.



الف



ب

شکل ۵- الف) بلوک دیاگرام پکیج تست دبی‌سنج آلتراسونیک . ب) تصویر سیستم واقعی

۳-۱ انجام تست و ثبت نتایج

برای انجام عملیات تست ابتدا پمپ روشن می‌گردد تا آب را درون سیستم به گردش درآورد. سپس با استفاده از شیر کنترلی میزان گردش آب در حد معینی تثبیت می‌شود. در تحقیق حاضر میزان جریان سیال اعمالی به سیستم طی ۲۷ مرحله از $11m^3/h$ تا $117\ m^3/h$ افزایش داده شد. با توجه به ثابت بودن مقطع لوله ۸ اینچی(۲۰/۳۲cm) سرعت سیال متناظر از ۰/۱m/s تا ۱/۰۱m/s متغیر می‌گردد. با توجه به اینکه دقت اندازه گیری به فشار و دما بستگی دارد، سعی بر آن شد که تمام آزمایشات در محیط با فشار و دمای ثابت انجام گرفته و از اندک تغییرات احتمالی آنها صرف نظر شده است.

با هر تغییر سرعت، مدت معینی جهت پایدار شدن گردش آب فرصت داده می‌شود؛ سپس با ارسال علائم فراصوت با فرکانس در حدود 400KHz درون سیال و دریافت پاسخ، زمانهای گذر اندازه گیری و ثبت می‌گردد. نمونه ای از پالسهای ارسالی و دریافتی که توسط اسیلواسکوپ دیجیتالی حافظه دار مدل(Scopix III, OX-7104) محصول شرکت Chauvin Arnoux Group ثبت شده، در شکل ۶ آورده شده است. امواج آلتراسونیک ارسالی سینوسی بوده و بر روی شانه ی موج مربعی سوار هستند. جزئیات پالسها در مرجع [۱۵]آمده است. به دلیل محدودیت تجهیزات ثبت و همچنین فاصله زمانی قابل توجه بین سیگنال های ارسال و دریافت، ثبت این پالس ها بصورت همزمان نبوده است. لذا در محورهای زمانی آنها مسئله تقدم و تاخر لحاظ نشده است؛ بلکه هرکدام جداگانه در حافظه اسکوپ ذخیره و نمایش داده شده اند.



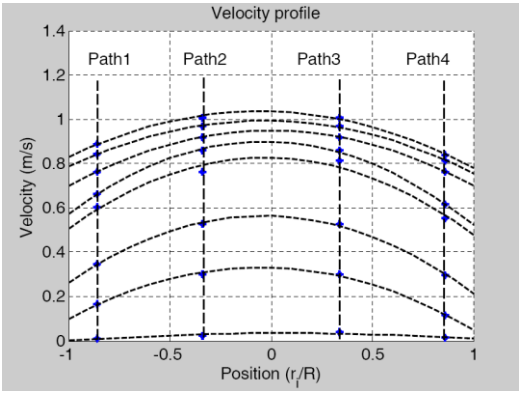
شکل ۶ شکل واقعی پالسهای فراصوت ارسالی و دریافتی

همانطور که دیده می‌شود دامنه سیگنال ارسالی از مرتبه ۱۰۰V بوده و دامنه سیگنال دریافتی از مرتبه ۱۰mV است. مبنای محاسبه زمان عبور می‌تواند هر نقطه از پالس ارسالی و نقطه متناظر آن در پالس دریافتی باشد. در تحقیق حاضر، زمان عبور از صفر پالسهای ارسالی و دریافتی مبنای محاسبه زمان هستند. لازم به ذکر است که هدف از ارائه تصویر پالسهای ارسالی و دریافتی، صرفاً نمایش شکل سیگنالها و زمانهای مربوطه است تا با توجه به آنها تمهیدات لازم برای طراحی سیستم ارسال، دریافت و ثبت داده‌ها پیش بینی شود. در عمل ثبت و محاسبه زمانها بصورت همزمان توسط مدارتA/D وپردازنده‌های سریع صورت می‌گیرد. زمانهای گذر بدست آمده برای محاسبه و ثبت سرعت سیال در لایه مختلف بکار می‌رود.

در شکل ۷ چند نمونه از سرعتهای محاسبه شده در لایه‌های چهارگانه آورده شده است. هر منحنی مربوط به یک سطح جریان سیال می‌باشد. در این شکل روش برازش منحنی برای تخمین سرعت سیال در کل مقطع استفاده شده است. نتیجه بیانگرآن است که در سرعتهای کم توزیع سرعت در لوله با دقت زیادی دارای تقارن سهمی شکل است. در

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.2.5.4]

سرعت‌های بالا توزیع سرعت به حالت جریان آشفته نزدیک تر می‌شود. اگرچه در روش انتگرال گیری عددی مورد استفاده، نیازی به دانستن نحوه توزیع سرعت نیست

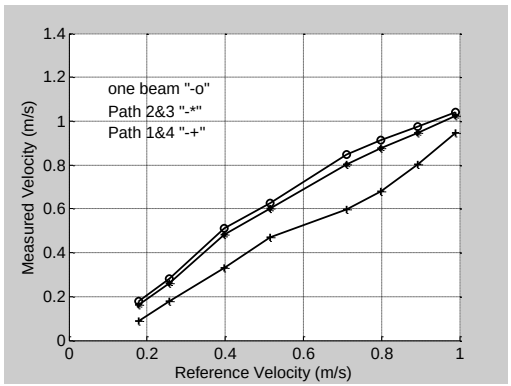


شکل ۷ نمونه ای از سرعتهای ثبت شده از لایه‌های مختلف

به منظور مقایسه عملکرد سیستم با یک دبی‌سنج تک مسیره، سرعت در مرکز لوله را با استفاده از درون یابی محاسبه می کنیم. با اینکار سرعت تقریبی دبی‌سنج تک مسیره را نیز خواهیم داشت سرعت در چهار لایه فوق به عنوان ورودی به بخش پردازشگر سیستم وارد می‌شود و در آن میزان دبی آب با استفاده از تقریبهای گوس – لژاندر محاسبه می گردد. بطور همزمان میزان دبی آب اندازه گیری شده توسط دبی‌سنج مرجع و تخمینی توسط دبی‌سنج تک مسیره نیز ثبت می‌گردد. بدین ترتیب پاسخ هرسه دبی‌سنج بطور همزمان قابل مقایسه خواهد بود.

۴ – نتایج و بحث

سرعتهای اندازه گیری شده توسط دبی‌سنج ۴ مسیره در لایه‌های مختلف بصورت شکل ۸ می‌باشد. این سرعت‌ها با افزایش مرحله ای نرخ سیال از ۱۱m^3/h تا ۱۱۷ m^3/h اندازه گیری شده است. برای مقایسه، سرعت اندازه گیری شده توسط دبی‌سنج مرجع و سرعت تقریبی دبی‌سنج تک مسیره نیز آورده شده است. هر نقطه از شکل با انجام چهار بار اندازه گیری و محاسبه متوسط بدست آمده است



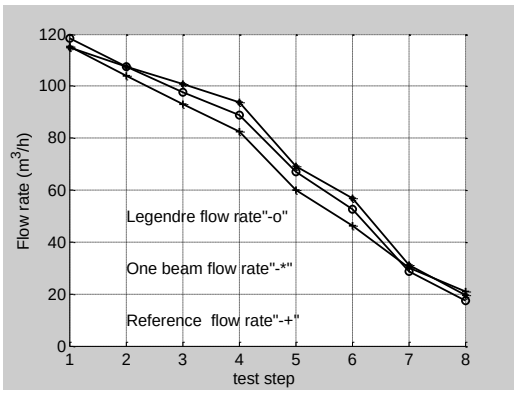
شکل۸– کاهش چند مرحله ای نرخ سیال و ثبت سرعت‌های لایه‌های مختلف سیال عبوری

بعد از ثبت سرعت در لایه‌های مختلف با استفاده از رابطه ۱۰ نرخ شارش درهریک از مراحل فوق محاسبه گردید. نتایج محاسبات فوق به همراه نرخ شارش اندازه گیری شده توسط دبی‌سنج مرجع و تک مسیره در شکل ۹ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهد می‌شود. نتایج اندازه گیری سرعت توسط دبی‌سنج ۴ مسیره نزدیکی قابل قبولی با نتایج حاصل از اندازه گیری توسط دبی‌سنج مرجع دارد. در حالی که در دبی‌سنج تک مسیره اختلاف خصوصاً در نرخ شارش کم بسیار قابل توجه است. خطای نسبی اندازه گیری را از رابطه زیر محاسبه می کنیم

$$e = \frac{f - f_r}{f_r} \times 100 \qquad (۱۰)$$

که در آن f نرخ شارش محاسبه شده و fr نرخ شارش اندازه گیری شده توسط دبی‌سنج مرجع می‌باشد. نتیجه محاسبه خطا در شکل۱۰ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ شارش دقت اندازه گیری بهتر می‌شود. این خصوصیت مشترک در دبی سنج هاست که دقت آنها با افزایش سرعت سیال بهبود می یابد. برای نرخ پایین باید تمهیدات دیگری اندیشیده شود[۱۷]. از طرف دیگر مقایسه دقت دبی‌سنج‌ها نشان از بهبود قابل توجه دقت دبی‌سنج چهار مسیره نسبت به تک مسیره دارد و این دقت اندازه گیری برای دبی‌سنج چهار مسیره آلتراسونیک در حدود ٪۳ ± بدست آمد. در حالی که خطای دبی‌سنج تک مسیره حدود۲۰ درصد بیشتر است.



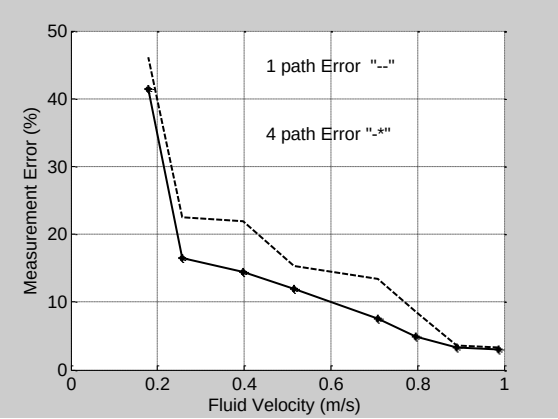
شکل ۹– نتایج اندازه گیری نرخ سیال در دبی‌سنج‌های تک مسیره و چهار مسیره و مقایسه آنها با مقدار مرجع

۵– نتیجه گیری

در این تحقیق یک دبی‌سنج فراصوت چهار مسیره برای اندازه گیری دبی سیالات طراحی و ساخته شده است. بر اساس یک مدل ساده میزان سیال عبوری از لوله به صورت یک انتگرال معین بدست آمد که با توجه به شکل معادله بدست آمده، استفاده از روش گاوس – لژاندر برای تقریب عددی انتگرال پیشنهاد شد. سپس با استفاده از سرعت اندازه

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.2.5.4]

گیری شده در چهار لایه از سیال، دبی آن در محدوده سرعت ۰/۱ m/s تا ۱ m/s محاسبه شده وبا نتایج اندازه گیری توسط دبی‌سنج مرجع مقایسه گردید. نتیجه بیانگر این است که دقت اندازه گیری در سرعتهای بالاتر۰/۸ m/s از کمتر از ۳٪ است. روند تغییرات دقت با سرعت سیال در شکل ۱۰ نشان می دهد که در سرعت‌های بالاتر خطای اندازه گیری می تواند به کمتر از ۱٪ هم برسد که با دقت دبی سنج های تجاری قابل مقایسه است[۱۹].از طرف دیگر در سرعتهای خیلی پایین خطا بصورت قابل توجهی افزایش می یابد. این یک خصوصیت مشترک در دبی‌سنج‌هاست که دقت آنها با افزایش سرعت سیال بهبود می‌یابد. علت این است که خطای مطلق اندازه گیری که به ابزارهای سنجش بستگی دارد، ثابت بوده و مستقل از سرعت سیال است. این واقعیت در شکل ۱۰ نیز به وضوح نشان داده شده است. بر اساس این نتیجه استفاده از سیستم در سرعتهای کمتر از۱ m/s توجیه نمی شود. مگر اینکه بتوانیم با انجام اصلاحاتی خطای سیستم‌های اندازه گیری و پردازش را کاهش داده و بدین ترتیب خطای نسبی سیستم در سرعتهای پایین را نیز بهبود ببخشیم.



شکل ۱۰- مقایسه درصد خطای اندازه گیری در دبی‌سنج تک و چهار مسیره

مراجع

[1] Yoder J, "Ultrasonic Flowmeter Market Is Expected To Grow Strongly", Pipeline & Gas Journal, April 2002

[2] Jacobson S., "New Developments in Ultrasonic Gas Analysis and Flowmetering", IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, pp. 508-512, 2008.

[3] Lynnworth L.C and Yi Liub, "Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005", Ultrasonics, Vol. 44, Supplement, pp. e-1371–e-1378, 2006.

[4] Yihong W. ,"Research of Measurement Mechanism of the Flow in Pipe Based on Multi-path Ultrasonic", 2010 8th IEEE International Conference on Control and Automation, Xiamen, China, June 9-11, pp. 709-712, 2010.

[5] Liptak. B.G. "Instrument engineers handbook, Process measurement and analysis", Chap.2, CRC press, 1995

[6] Mingwei L., Guosheng L. and Yanguo H., "Research on Improving the Accuracy of the Ultrasonic Flow-meter with time difference Method, International Conference on Electrical and Control Engineering, pp. 1704-1707, 2010.

[۷]-یوسف حجت، علیرضا قانع، شاهد میرزامحمدی" طراحی و ساخت دبی سنج آلتراسونیک زمان عبوری"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳ شماره ، ص ۱۵۳-۱۵۶، ۱۳۹۲.

[۸] ابوالفضل وروانی فراهانی "اندازه گیری جریان سیال با استفاده از امواج آلتراسونیک" ماهنامه اکتشاف و تولید نفت وگاز، شماره ۹۸ ، ص۴۱-۴۵ ، ۱۳۹۱

[9] Çengel Y. A., Cimbala J. M., "Fluid mechanics : fundamentals and applications", 1th ed. McGraw-Hill, New York, NY, ch.8, 2006.

[10] Yan-xia Wang., Zhi-hao Li, Ting-hu Zhang "Research of Ultrasonic Flow Measurement and Temperature Compensation System based on Neural Network", International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 268-271, 2010.

[11] Massey B. and Smith J. W. "Mechanics of Fluids", 8th edition, Taylor & Francis Group, pp.273, 2005.

[12] Milton Abramowitz, Iren A. Stegun, "Handbook of Math Functions", National bureau of standards USA, 10th print, pp. 887,1972.

[13] Burden R. L. and Faires J.D., "Numerical Analysis", 9th ed., Brooks/Cole, 2011.

[14] Olver F.W.J., Lozier D.W., Boisvert R.F. and Clark C.W., "NIST Handbook of Mathematical Functions", Cambridge University Press, pp. 80, 2010.

[۱۵] عباس غریبی."تحلیل و بررسی فلومیترهای آلتراسونیک و ارایه راهکارهایی برای بهینه سازی دقت اندازه گیری سیال" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد بوشهر، ایران، ۱۳۹۱.

[16] Xing-hong Zhang, Hui Zhang, Xian-quan Wang, Ji-qin Feng, Wei Cai, "Design and Implementation of the A/D Conversion Circuit for the High-Accuracy Ultrasonic Flowmeter", International Conference on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization, pp.155-158, 2010.

[17] Abraham K. George, Ram N Singh and Sayyadul A., "Equation of State of Crude Oil Samples", J Pet Environ Biotechnol Volume 4, Issue 6-000162, 2013.

[18] Ishikawa H., Takamoto M., Shimizu K., Monji H., Matsuj G., "Development of a new ultrasonic liquid flowmeter for very low flow rate applicable to a thin pipe", Proceedings of the The Ninth International Symposium on Semiconductor Manufacroring, Tokyo, pp383-386, 2000.

[19] http://www.euromag.com/en/ultrasonic-flowmeters.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1396.11.2.5.4]