

اندازه‌گیری جریان سیال با استفاده از امواج التراسونیک

ابوالفضل وروانی فراهانی^۱، مدیریت نظارت بر تولید نفت و گاز

مقدمه

کشور ما به دلیل تعدد مخازن هیدروکربوری و با داشتن رتبه چهارم در بین تولیدکنندگان نفت و رتبه سوم در بین تولیدکنندگان گاز دنیا از تنوع محصولات تولیدی بسیار زیادی برخوردار است. به منظور برخورداری از دقت کافی در اندازه‌گیری تولید و تحویل محصولات باید با توجه به مشخصات فرآیندی سیال، جریان‌سنج^۱ مناسبی در محل تعبیه کرد. جریان‌سنج‌های التراسونیک^۲ چند سالی است که تاییدیه‌های سازمان‌های معتبر جهانی را برای استفاده در نقل و انتقالاتی که مبنای مالی دارند (Custody Transfer) دریافت کرده است. اگر انتخاب این جریان‌سنج‌ها مناسب باشد و با دقت طراحی شده و مورد استفاده قرار گیرند، از دقت بسیار بالایی برخوردار خواهند بود. در حال حاضر تب استفاده از جریان‌سنج‌های التراسونیک در حال گسترش بوده و اکثریت بر این باورند که این نسل از تکنولوژی در هر کاربرد و هر محلی، از دقت بالایی برخوردار بوده و بر انواع دیگر جریان‌سنج‌های قدیمی ارجحیت دارد. در صورتی که اگر این نوع جریان‌سنج برای کاربرد مناسب استفاده نشده و یا در انتخاب، طراحی و

نصب آن دقت کافی وجود نداشته باشد، نه تنها از جریان‌سنج‌های قدیمی بهتر نخواهد بود بلکه عملکردی به مراتب ضعیف‌تر خواهد داشت. در این مقاله انواع جریان‌سنج‌های التراسونیک و نحوه انتخاب و بهره‌برداری، موارد استفاده و معایب و مزایای آنها مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۱- معرفی جریان‌سنج‌های التراسونیک

جریان‌سنج‌های التراسونیک به سه دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند که در هر سه دسته از امواج مافوق صوت استفاده می‌شود:
الف) جریان‌سنج التراسونیک از نوع زمان عبوری^۳
ب) جریان‌سنج التراسونیک از نوع مهاری^۴
ج) جریان‌سنج التراسونیک از نوع داپلر^۵

نوع نخست که عمده بحث این مقاله بر آن تمرکز دارد برای سیالات تک‌فازی استفاده شده، از دقت بالایی برخوردار بوده و قابلیت استفاده در مبادی انتقال و موارد حائز اهمیت از نظر مالی دارد. به عنوان مثال در ایران، جریان‌سنج التراسونیک از نوع زمان عبوری برای نخستین بار در سایت عسلویه و برای اندازه‌گیری میعانات صادراتی استفاده شد. این جریان‌سنج که به تازگی تست

و راه‌اندازی آن به اتمام رسیده، می‌تواند به عنوان مرجع استفاده از این نوع در کشور قرار گیرد. ضمن اینکه روی شناور نیز یکی از دقیق‌ترین سیستم‌های التراسونیک نصب شده که به زودی این شناور برای اندازه‌گیری تولیدات میادین سروش و نوروز در خلیج فارس مستقر خواهد شد. برای اندازه‌گیری جریان گاز نیز دو دستگاه جریان‌سنج التراسونیک چهار پرتوی در منطقه پارسیان، گاز خشک ارسالی به شبکه مصرف را اندازه‌گیری می‌کند (شکل-۱). نوع دوم این جریان‌سنج‌ها که مهاری نام گرفته، با همان مکانیزم زمان عبور کار می‌کند؛ با این تفاوت که این نوع، به جداره بیرونی خط متصل شده و دقت کمتری دارد.

اما نوع سوم این جریان‌سنج‌ها که دقت آن کمتر از دو نوع قبلی است برای سیالاتی که حاوی ناخالصی و ذرات جامد باشند، استفاده می‌شود. در این نوع جریان‌سنج وجود ذرات جامد در سیال جهت اندازه‌گیری الزامی است.

۲- جریان سنج التراسونیک از نوع زمان عبوری

اساس کار این نوع جریان‌سنج بدین صورت است که دو دستگاه مبدل^۶ که به طور هم‌زمان موج



صوتی از خود منتشر می کنند در دو طرف خط قرار داده می شوند. (شکل-۲). یکی از مبدلها در بالادست جریان و دیگری در پایین دست جریان قرار گرفته اند. به دلیل اینکه سرعت خطی موج صوتی که از مبدل بالادستی منتشر می شود در جهت سرعت سیال است، زودتر به مبدل پایین دستی برخورد می کند. ولی موج صوتی منتشر شده از مبدل پایین دستی به دلیل مخالفت سرعت جریان سیال با آن، دیرتر از قبلی به مبدل بالادستی می رسد و از روی همین اختلاف زمان دریافت موج، سرعت سیال اندازه گیری می شود. زمان ارسال موج از نقطه ۱ به نقطه ۲ و بالعکس به صورت زیر محاسبه می شود.

$$T_{12} = \frac{L}{C - V \cos \theta} \quad (1)$$

$$T_{21} = \frac{L}{C + V \cos \theta} \quad (2)$$

در روابط فوق T_{12} مدت زمان ارسال موج از نقطه ۱ به نقطه ۲، T_{21} مدت زمان ارسال موج از نقطه ۲ به نقطه ۱، C سرعت صوت، V سرعت سیال و θ زاویه بین محور لوله و خط فاصل دو مبدل می باشد.

با حذف C از دو رابطه فوق خواهیم داشت:

$$V = \frac{T_{12} - T_{21}}{T_{12} \times T_{21}} \times \frac{L}{2 \cos \theta} \quad (3)$$

با محاسبه سرعت جریان، از حاصل ضرب سرعت جریان در سطح مقطع عبوری مطابق رابطه-۴، شدت جریان متناظر با سرعت محاسبه می شود:

$$Q = A \times V \quad (4)$$

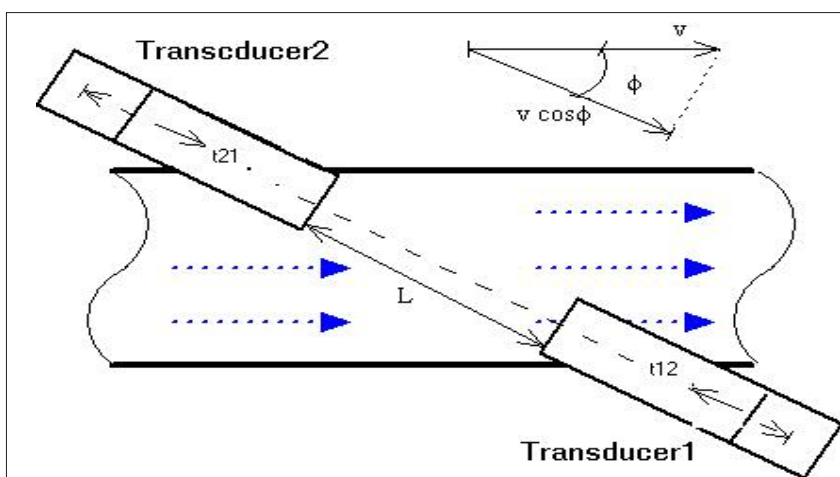
۲-۱- مراحل عملکرد جریان سنج التراسونیک زمان عبوری

عملکرد کلی جریان سنج التراسونیک نوع زمان عبوری را می توان به صورت زیر تشریح کرد:

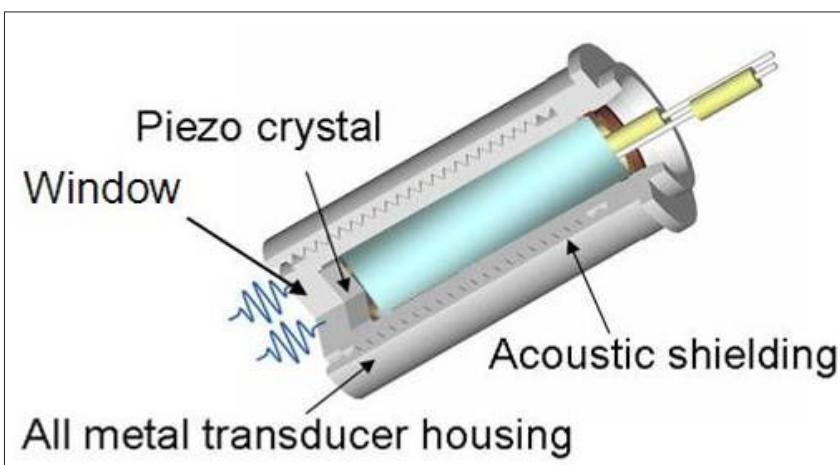
الف) ارسال موج: در مرحله اول واحد پردازش سیگنال (SPU) یک سیگنال الکتریکی به مبدل (کریستال پیزوالکتریک، شکل-۳) ارسال می کند و این امر سبب ارسال پالسی صوتی در داخل جریان توسط کریستال می شود.



شکل ۱ | جریان سنج التراسونیک چهار پرتوی



شکل ۲ | شماتیک چگونگی اندازه گیری شدت جریان در جریان سنج التراسونیک از نوع زمان عبوری



شکل ۳ | نمایی از یک مبدل پیزوالکتریک

شود. به علاوه وجود رسوبات داخل خطلوله هم بر دقت جریان سنج مؤثر خواهد بود. دقت این نوع جریان سنج با بهره گیری از ریزپردازنده‌های پیشرفته می‌تواند از ۱ تا ۳ درصد بهبود یابد. در حالت عادی با کمی انحراف مبدل‌ها، سیگنال صادر شده از یک مبدل، ممکن است به مبدل دریافت کننده دیگر برخورد نکند. در حال حاضر این نوع جریان سنج در بسیاری از شرکت‌های بهره‌برداری تابعه شرکت ملی نفت ایران (از جمله در میادین دارخوین، جفیر و یادآوران) استفاده می‌شود. محاسبات این سیستم مانند نوع التراسونیک زمان عبوری است.

۴- جریان سنج التراسونیک نوع داپلر

در سال ۱۸۴۲ کریستین داپلر کشف کرد که طول موج صدای دریافتی توسط دریافت کننده‌ای ساکن از یک ارسال کننده که به سمت آن حرکت می‌کند، کوتاه‌تر از طول موج صدای دریافتی توسط یک دریافت کننده از ارسال کننده‌ای است که از آن دور می‌شود. اساس کار جریان سنج‌های داپلر، استفاده از امواج صوتی با فرکانس حدود ۵/۰ MHz است که در اثر برخورد با ذرات معلق جامد در جریان، اختلاف فرکانسی بین موج ارسال شده و دریافت شده به وجود می‌آید که سرعت جریان توسط آن حاصل می‌شود.

$$V = \frac{\Delta F \cdot C_p}{2 f_0 \cos \theta} \quad (5)$$

$$\Rightarrow Q = V \cdot A \quad (6)$$

f_0 = فرکانس ارسال
 θ = زاویه ارسال و دریافت پرتو نسبت به افق
 C_p = سرعت صوت در سیال
 ΔF = اختلاف فرکانس ارسال و دریافت
 در صورتی که جنس لوله از موادی نظیر بتن، رس یا چدن متخلخل که انرژی صوت را جذب می‌کنند نباشد، جریان سنج نوع داپلر مستقل از جنس لوله عمل می‌کند.

۵- مزایا و معایب سیستم‌های اندازه‌گیری التراسونیک

از جمله مزایای کاربرد عملی سیستم‌های اندازه‌گیری التراسونیک، در می‌توان به مواردی هم چون سبک بودن و حجم کم آن، تنوع

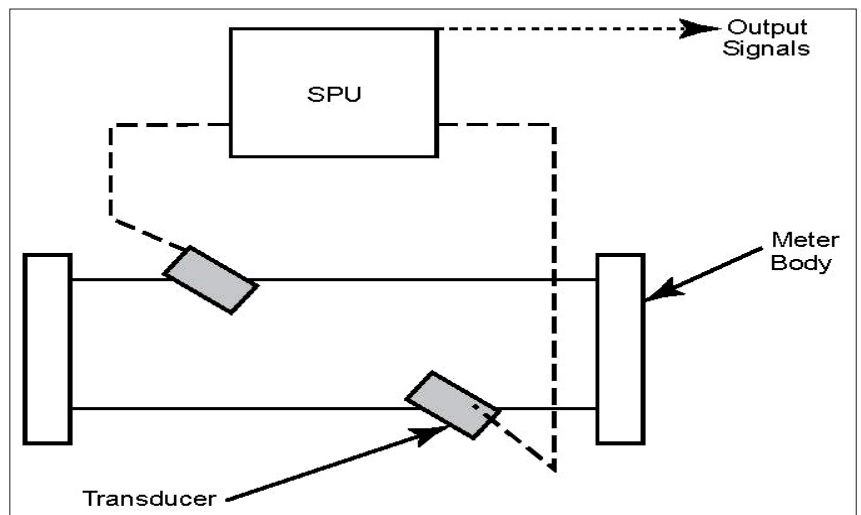
SPU انجام می‌شود تا اندازه‌گیری و استنباط دقیقی از سرعت متوسط جریان به دست آورد. شمای سیستم اندازه‌گیری در شکل ۴- نمایش داده شده است

۳- جریان سنج التراسونیک نوع مهاری

در این نوع جریان سنج، مبدل‌ها از بیرون خطلوله و توسط مهار یا چفت‌هایی به خط وصل می‌شوند. این گونه مبدل‌ها به راحتی نصب شده و می‌توانند به صورت موقت یا دائمی مورد بهره‌برداری قرار گیرند. با توجه به اینکه موج صوتی از دیواره خط و پوشش‌های آن نیز عبور می‌کند، باید ضخامت آنها به دقت اندازه‌گیری

(ب) دریافت؛ پالس صوتی از جریان عبور کرده و به مبدل روبرویی خود رسیده و باعث ایجاد ارتعاشی در کریستال می‌شود که از این طریق سیگنال الکتریکی تولید و خارج می‌شود. (ج) تبدیل؛ سیگنال الکتریکی نهایی وارد واحد SPU شده و پردازش نهایی روی آن انجام می‌شود.

(د) پردازش سیگنال؛ بسته به شرکت سازنده، الگوریتمی در SPU تعریف می‌شود که می‌تواند T_{12} و T_{21} را با پردازش سیگنال به دست آورده و از طریق آن سرعت متوسط جریان را محاسبه کند. (ه) تجدید خروجی؛ این عملیات مجدداً توسط



شکل ۴ | دریافت و ارسال سیگنال الکتریکی از مبدل به محل پردازش



شکل ۵ | جریان سنج التراسونیک از نوع مهاری



در سیستم‌های اندازه‌گیری التراسونیک، سیستمی الکترونیکی به نام واحد پردازش سیگنال SPU وجود دارد که شامل منبع تغذیه، میکرو کامپیوتر، پردازش‌گر و مدارهای تحریک مبدل‌های التراسونیک است. یکی از وظایف SPU، بستن تناظر و تناسب سیگنال خروجی و مقدار شدت جریان اندازه‌گیری شده است که این کار توسط فاکتور مقیاس‌گذاری پالس انجام می‌شود.

۲-۶- صفر کردن جریان سنج

به عملیات چک کردن خروجی جریان سنج، هنگامی که مسیر ورودی و خروجی جریان سنج بسته است، صفر کردن جریان سنج اطلاق می‌شود. در این حالت که هیچ جریانی از جریان سنج عبور نمی‌کند، باید جریان سنج عدد صفر را نشان دهد. (هنگامی که جریان سنج صفر شده، می‌بایست دوباره از نظر صحت اندازه‌گیری بررسی شود).

عملیات صفر کردن در حالت کارکرد عادی جریان سنج الزامی نیست و معمولاً وقتی انجام می‌شود که مبدل (ترانسدایوسر) یا کابل‌ها و یا تجهیزات الکترونیکی آن تعویض شده یا تغییر یابند.

۳-۶- فاکتور جریان سنج^{۱۴}

فاکتور جریان سنج عددی است که حاصل تقسیم حجم پایه معلوم بر مقدار خوانده شده توسط جریان سنج را نشان می‌دهد. به وسیله این عدد تصحیحات مدنظر روی خروجی جریان سنج اعمال می‌شود. کالیبراسیون لابر توری جریان سنج در کارخانه دو خاصیت مهم دارد: نخست اینکه به طرز مناسبی از عملکرد کلی جریان سنج به اطمینان حاصل می‌شود و دوم اینکه از روی اندازه‌گیری سرعت و وزن‌دهی سرعت پرتوها و اندازه‌گیری سرعت

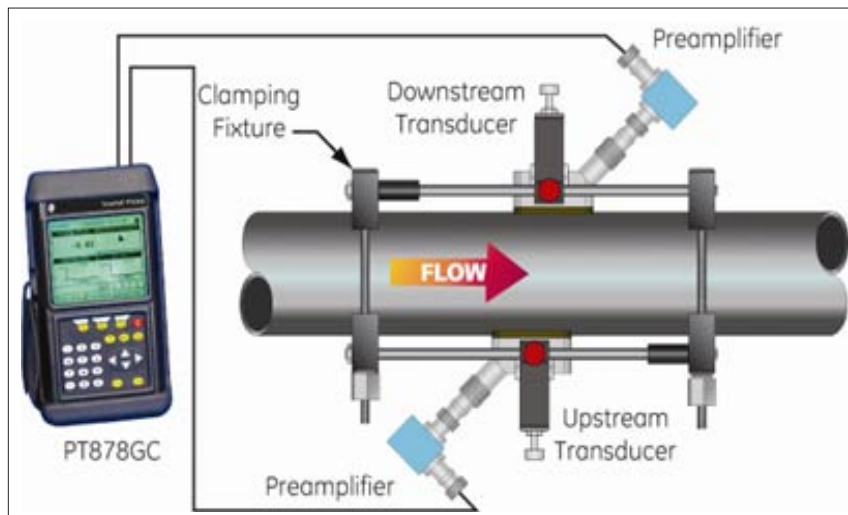
نبودند. تا اینکه از سال ۱۹۹۵ بعضی شرکت‌ها از اقدام به ساخت جریان‌سنج‌های التراسونیک با پنج پرتو کرده و مراجع بین‌المللی را بر صدور مجوز استفاده از آنها در مرزهای مبادلاتی و مالی متقاعد کردند. در حال حاضر بعضی شرکت‌های سازنده، اقدام به ساخت جریان‌سنج‌هایی با تعداد پرتوهای بالا کرده‌اند. حال سؤال این است که آیا این امر در بهبود دقت جریان‌سنج مؤثر است یا خیر؟ آنچه مسلم است افزایش دفعات نمونه‌گیری در این زمینه نقش به‌سزایی دارد. ولی نکته حائز اهمیت این است که مصرف‌کننده‌ای با تعداد پرتوهای زیاد، در ازای مقدار افزایش دقت حاصل، چه هزینه‌ای دربر خواهد داشت. بعضی از سازندگان با وجود افزایش تعداد پرتوها، به دلیل عدم آگاهی از تداخل آنها، به دقت بالایی دست نیافته‌اند؛ لذا در این خصوص باید در انتخاب سازنده جریان‌سنج با متخصصین این امر مشورت کرد.

سنسور، دقت بالا در اندازه‌گیری، مقاومت بالا در برابر جریان‌های گازدار، اپراتوری آسان، هزینه تعمیرات و نگهداری پایین و افت فشار کم در زمان اندازه‌گیری اشاره کرد. در کنار مزایای عنوان شده معایبی چون نویزپذیری آسان، تأخیر در پالس، نیاز به صحت‌سنج^{۱۳} با حجم زیاد و هزینه تأمین و نصب نسبتاً بالای این نوع جریان‌سنج‌ها از معایب آنها به شمار می‌رود.

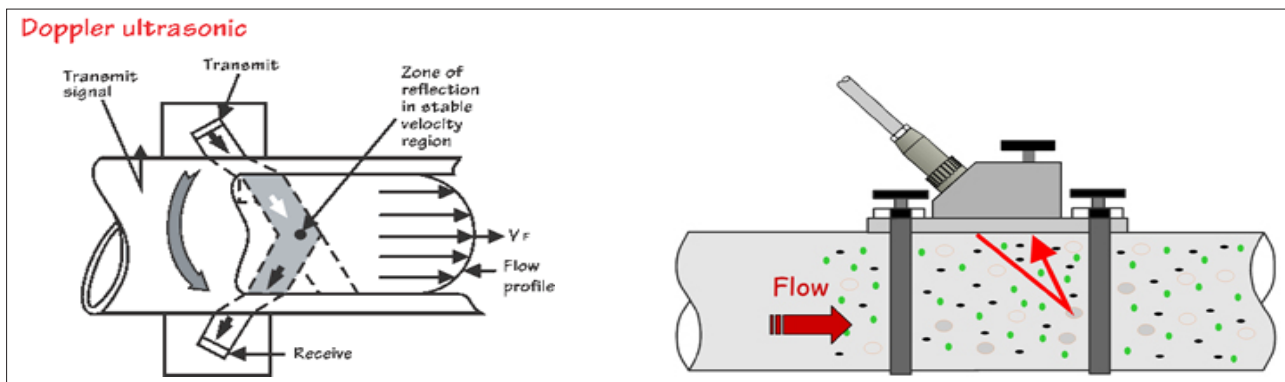
۶- نکات قابل ملاحظه در طراحی، نصب و استفاده از جریان‌سنج‌های التراسونیک

۱-۶- تعداد پرتوها

جریان‌سنج‌های التراسونیک که از دهه ۵۰ میلادی رایج شدند، از یک یا دو مسیر ارسال موج (one-path یا two-path) استفاده می‌کردند؛ ولی برای استفاده در نقاط مبادلاتی از دقت کافی برخوردار



شکل ۶ | تجهیزات استفاده شده در جریان سنج التراسونیک مهاری



شکل ۷ | شماتیک جریان سنج التراسونیک نوع داپلر

میانگین، شدت جریان به دست می آید.

۴-۶- تست ابعادی جریان سنج

طول پرتوها، زاویه های مسیر و سطح مقطع هر جریان سنج در کارخانه سازنده به دقت اندازه گیری و ثبت می شوند. از نتایج چنین برمی آید که در جریان سنج هایی که به صورت مجتمع هستند، عدم اطمینان تحمیل شده توسط این موارد بسیار کم بوده و خطای حاصل ناچیز خواهد بود. هرگونه خطای محتمل نیز در هنگام کالیبراسیون جبران می شود. دما یکی از متغیرهای تأثیرگذار بر ابعاد جریان سنج است که در فرآیند قابل کنترل نیست. لذا برای جبران اثر دمای عملیات و محیط بر انبساط و انقباض جریان سنج که سبب تغییرات ناخواسته ابعادی جریان سنج می شود، معمولاً شرکت های سازنده از یک اندازه گیر دمای مقاومتی پلاتینومی برای ردیابی و جبران تأثیرات دما استفاده می کنند. این در حالی است که تغییرات فشار معمولاً تأثیر زیادی بر روی ابعاد جریان سنج نخواهد گذاشت. نشست رسوبات، واکس و مواد سنگین بر روی سطح داخلی جریان سنج باعث تغییر سطح مقطع و تأثیر بر اندازه گیری خواهد شد.

۵-۶- صحت سنجی جریان سنج های التراسونیک

غیر از کالیبراسیون خشک که در کارخانه سازنده انجام می شود، برای حصول دقت بیشتر جریان سنج باید بعد از نصب در سایت، به صورت جریانی در محدوده عملکردی خود کالیبره شده، فاکتور

تشخیص نویز از پالس در مبدل ها بسیار مشکل خواهد بود. (تأثیر منفی این امر به ویژه زمانی که جنس نویز از نوع سیگنال التراسونیک باشد، بیشتر خواهد بود) یکی از راه های کاهش این تأثیر، بالا بردن انرژی مبدل است. هرچند به دلایل ایمنی نمی توان انرژی منبع تغذیه را بیشتر از حد مشخصی افزایش داد.

نتیجه گیری

استفاده بجا و عاری از افراط و تفریط از تکنولوژی جدید یک ضرورت است. با توجه به جمیع جهات و توضیحات ارائه شده، سیستم های نوین اندازه گیری التراسونیک همانند سایر سیستم ها دارای معایب و مزایایی بوده و بسته به شرایط عملکردی و نحوه استفاده از آن دارای دقت و کارآیی متفاوتی خواهد بود. اگر چه این سیستم تقریباً نوپا و جدید تلقی می شود ولی با اندکی دقت در انتخاب آن برای اندازه گیری و انجام ساینینگ و طراحی های پاپینگ، تجهیزات و صحت سنج مناسب، می توان به دقت دلخواه دست یافت. در هر حال با توجه به تجارب موجود در کشور و استفاده های موفق از جریان سنج های التراسونیک می توان گفت که با توجه به دقت زیاد، هزینه تعمیر و نگهداری پایین و مزایای عنوان شده برای این سیستم، اگر در طراحی های اولیه برای انتخاب و نصب این تکنولوژی دقت کافی انجام شود، جریان سنج های التراسونیک جایگزین مناسبی برای تکنولوژی های قدیمی خواهند بود.

جریان سنج به دست آمده و نمودار عملکردی آن رسم شود. بر خلاف دیگر جریان سنج ها که برای هر اندازه از جریان سنج، باید دستگاه صحت سنجی با حجم خاص و تکرارپذیری معینی تأمین شود، صحت سنج این نوع جریان سنج نسبت به جریان سنج های دیگر بزرگتر است. در این نوع، بسته به تعداد تکرار می توان تکرارپذیری را کم یا زیاد کرده و حجم صحت سنج را تغییر داد.

۶-۶- نصب

جریان سنج نباید به گونه ای نصب شود که دامنه و فرکانس ارتعاشات آن منطبق بر فرکانس های طبیعی، SPU و مبدل ها (ترانسدوسر) باشند. بدین منظور شرکت سازنده باید فرکانس طبیعی و ملاحظات نصب را ارائه کند. سازنده باید آرایش، طول و چیدمان بالادست و پایین دست جریان سنج را در دو حالت؛ یکی بدون مطبوع ساز^{۱۵} و دیگری با مطبوع ساز اعلام کند. در ضمن تجهیزات دمایی باید در سایه قرار گیرند تا تأثیر دمای محیط به حائل برسد.

۷-۶- شیرهای کنترلی و نویز^{۱۶}

یکی از معضلات جریان سنج های التراسونیک تداخل در سیگنال است. بعضی از شیرهای کنترلی نیز ایجاد نویز می کنند. لذا در چنین شرایطی باید آرایش خط را تغییر داد یا شیر را به فاصله مناسبی از جریان سنج منتقل کرد. هنگامی که سیگنال التراسونیک حاوی نویز باشد،

پانویس ها

- | | | |
|-------------------------|---------------------------|----------------------|
| 1. meter | 7. emission | 13. prover |
| 2. ultrasonic flowmeter | 8. signal processing unit | 14. meter factor |
| 3. transit time | 9. reception | 15. flow-conditioner |
| 4. clamp on | 10. conversion | 16. noise |
| 5. doppler | 11. signal treatment | |
| 6. transducer | 12. output refresh | |

منابع

- | | |
|--|--|
| [1]. Spicer D.W. and Boyes W. Consumer guide to ultrasonic and correlation flowmeter. Copperhill and Pointer Inc. USA P.9. 2004.) | 1402-1544. |
| [2]. C.Carlander. installation Effect and Self Diagnostics for Ultrasonic Flow Measurement, Doctoral Thesis 2001:11. Department of computer and electrical engineering, Lulea University of Technology, 2004. ISSN | [3]. James W. Bowen, Fundamentals of Ultrasonic Flow Meters, Instromet, Incorporated. |
| | [4]. AGA (American Gas Association) Standard No.9 |
| | [5]. Manual of petroleum Measurement Standard (Chapter 5.8) , Measurement of liquid hydrocarbons by ultrasonic flow meters using transit time technology |