

## مروری بر روش‌های اندازه‌گیری جریان‌های چندفازی در سرچاه

مهدی فدایی<sup>۱</sup>، فروغ عاملی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار مهندسی نفت، دانشگاه علم و صنعت ایران

پیام‌نگار: ameli@iust.ac.ir

### چکیده

جریان سنج چندفازی برای اندازه‌گیری جریان همزمان دو یا چندفاز، بدون نیاز به جداکردن فازها طراحی شد. جریان سنج باید به اندازه کافی برای کاربرد مورد نظر دقیق باشد. باید بتواند مشخصات را به‌طور دقیق در سرتاسر محدوده کسر جزئی هر فاز اندازه‌گیری کند و مستقل از رژیم جریان باشد. عامل‌های مختلفی در انتخاب یک جریان سنج چندفازی تأثیرگذار است، همچنین رویه‌های مختلفی برای اندازه‌گیری جریان‌های چندفازی وجود دارد. در این مطالعه، بررسی جامعی در ارتباط با فناوری‌های اندازه‌گیری جریان چندفازی در صنعت نفت ارائه شده و اساس روش‌های مختلف اندازه‌گیری مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به بررسی مزایا، ملزومات و محدودیت‌های هر یک از جریان‌سنج‌ها در صنعت نفت پرداخته شده و در نهایت، اطلاعاتی در مورد پیشرفت‌های اخیر در این زمینه در اختیار محققین قرار گرفته است.

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۲۱

شماره صفحات: ۴۵ تا ۵۷

**کلیدواژه‌ها:** جریان چندفازی،

اندازه‌گیری، جریان سنج، صنعت

نفت

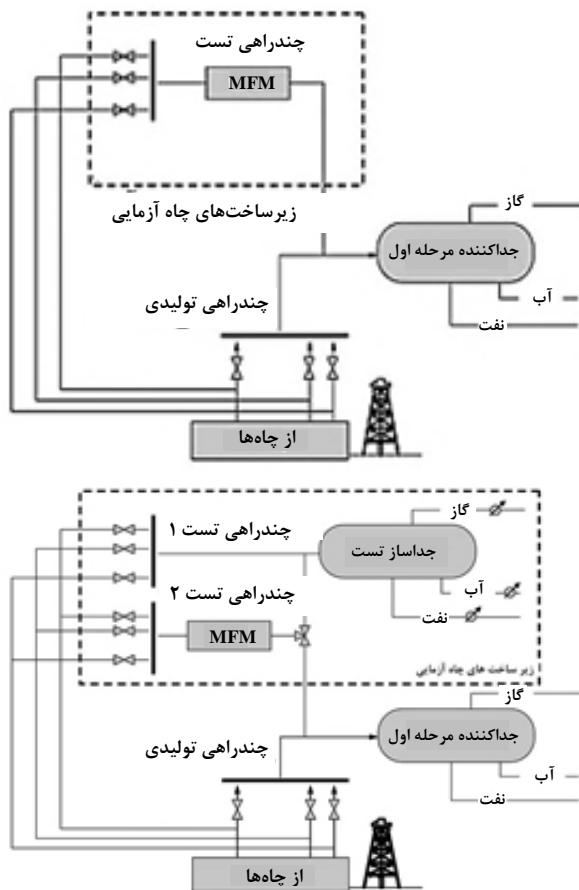
### ۱. مقدمه

محدوده تولیدی، ذاتاً شرایط ناپایداری جریان را در تجهیزات تولید به وجود می‌آورد و به راه‌حل‌های چندفازی که انعطاف بیشتری داشته باشند، احتیاج دارد. اولین بار شرکت‌های اِلف<sup>۱</sup>، شِل<sup>۲</sup>، تگزاکو<sup>۳</sup>، پتروبراس<sup>۴</sup> و آگپ<sup>۵</sup> برای گسترش جریان‌سنج چندفازی تلاش کردند. اولین نمونه آزمایشی جریان سنج چندفازی به‌وسیله تگزاکو و بی‌پی<sup>۶</sup> آزمایش شد. در کمتر از دو دهه گذشته، جریان‌سنج چندفازی در مقیاس میدانی نیز صحت‌سنجی شد و برای میدان‌های جدید به‌عنوان راه‌حل اولیه اندازه‌گیری جریان‌های چندفازی در نظر

سیالی که از چاه‌های نفتی تولید می‌شود، اغلب به شکل یک مخلوط چندفازی دیده می‌شود و در بسیاری از سیستم‌ها شامل آب و مواد جامد مختلفی مثل ماسه، هیدرات‌ها و آسفالتین‌ها می‌تواند باشد. اولین جریان‌سنج چندفازی تجاری در نتیجه چندین پروژه تحقیقاتی مربوط به دهه ۱۹۸۰ با تمرکز بر صنعت نفت و گاز ساخته شد. انگیزه اولیه برای گسترش فناوری جریان‌سنج چندفازی، پیش‌بینی افت تولید از میدان‌های اصلی دریای شمال بود. در آن میدان‌ها نیاز بود که تولید ناشی از کشف میدان‌های کوچک و جدید به تأسیسات فعلی متصل گردد. افزایش مقدار آب و گاز در یک

1. Elf
2. Shell
3. Texaco
4. Petrobras
5. Agip
6. B.P.

\* تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی نفت



شکل ۱. طرح شکل‌واره چاه‌آزمایی جریان‌سنج چندفازی [۱].

## ۲-۱ اطمینان نسبت به یک روش خاص

امکان ندارد یک جریان‌سنج چندفازی قادر به اندازه‌گیری همهٔ محدودهٔ مورد نظر ما باشد. بسته به کاربرد خاصی که مدنظر ماست، یک روش ممکن است از روش‌های دیگر برتر باشد، بنابراین متصدی باید از بین تکنیک‌های موجود، مناسب‌ترین جریان‌سنج چندفازی را انتخاب کند [۱].

## ۲-۲ ایمنی و سلامت

تا چندسال گذشته، جریان‌سنج‌های چندفازی که شامل منابع هسته‌ای بودند، از نظر سلامتی، امنیت و مشکلات محیط‌زیستی باعث نگرانی بودند. با این‌وجود، میزان تابش پایین اندازه‌گیرهای امروزی و انعطاف‌پذیری توافقی‌های دفع منبع هسته‌ای بین تولیدکننده و کارفرما به معنی پذیرش گسترده‌تر این‌گونه از اندازه‌گیری‌ها توسط نهادهای دولتی است [۱].

گرفته می‌شود. به‌طور سنتی، دبی جریان‌ها با جداسازی فازها از هم و اندازه‌گیری سیال خروجی از جداکننده به‌دست می‌آید؛ اما جنبه‌های اقتصادی بازیابی نفت در دکل‌های دریایی ما را به سمت آماده‌سازی چاه‌های تولید نفت در زیر دریا با لوله‌های حاوی جریان چندفازی، برای انتقال به ساحل موجود سوق داد. بدین ترتیب مشکلات جریان‌سنج‌های سنتی مشخص شد. ارزش بالای جریان‌سنج چندفازی آنجا مشخص می‌شود که می‌توان روی افت فشار اعمالی به سازند، فشار گذرا و دوره‌های کوتاه جریان، کنترل بهتری داشت [۱]. به‌دلیل تنوع گستردهٔ شرایط میدان‌های نفتی، جریان‌سنج‌های چندفازی باید تحت شرایط گسترده‌ای قادر به عملیات باشند. استفاده از جریان‌سنج چندفازی، سخت‌افزار مورد نیاز در تجهیزات داخل خشکی، تجهیزات دریایی روی آب و تجهیزات دریایی زیر آب را کاهش می‌دهد. یکی از مزایای اولیه و اصلی جریان‌سنج‌های چندفازی حذف تست جداساز<sup>۱</sup> اختصاصی برای کاربردهای چاه‌آزمایی است که برای جداکردن و اندازه‌گیری مقادیر کم نفت و گاز به کار می‌رود. استفاده از جریان‌سنج چندفازی باعث کمینه‌شدن فضای تختگاه (پلتفرم) و مقدار باری می‌شود که باید توسط تختگاه تحمل شود. جداسازهای تست بین ۱۰ تا ۱۵ درصد دقت دارند، اما نمی‌توانند چاه را به‌طور پیوسته نمایش دهند. عیب دیگر چاه‌آزمایی رایج این است که چاه در دوره‌هایی که عملکردش متوقف می‌شود دچار آسیب می‌گردد. چاه‌هایی که به‌طور منظم تحت آزمایش قرار می‌گیرند به عملیات تعمیر بیشتری برای نگهداری دبی تولید نیاز دارند. دوساختار از دبی‌سنج‌های چندفازی که برای کاربرد چاه‌آزمایی استفاده می‌شوند، در شکل (۱) نشان داده شده‌است. شکل بالا یکپارچه‌سازی دبی‌سنج چندفازی در ساختار یک سیستم چاه‌آزمایی است که در آن بدون هیچ کاهش در تولید می‌توان به‌طور دائم یک چاه را مورد پایش قرار داد و دیگر چاه‌ها را آزمایش کرد. در شکل پایین، جریان‌سنج چندفازی به‌تنهایی نقش یک وسیلهٔ چاه‌آزمایی دارد که طرحی بسیار ساده و بدون نیاز به جداسازی فازهاست.

## ۲. عامل‌های مهم در انتخاب جریان‌سنج‌های چندفازی

در انتخاب جریان‌سنج‌های چندفازی موارد زیر باید مد نظر قرار گیرند:

### 1. Test Separator

## ۲-۳ عوامل برهم زننده در اندازه‌گیری

تا زمانی که احتمال رسوب پارافین، آسفالتین و شن در سیستم تولید وجود داشته‌باشد، امکاناتی که درون خط لوله جریان قرار داده می‌شود، بهترین راه حل ممکن نیست. اگر مواد در داخل دستگاه رسوب کند، نه تنها باعث اختلال در کارکرد آن می‌شود، بلکه امکانات این دستگاه فقط منجر به کاهش قابل توجه سطح در دسترس جریان می‌شود.

## ۲-۴ ترکیب درصد گاز

طبق تحقیقات به عمل آمده در مواقعی که ترکیب درصد گاز بیش از ۹۰ درصد است، اطلاعات به دست آمده از جریان‌سنج‌های چندفازی خطای بیشتری دارد [۱].

## ۲-۵ محدوده عملیاتی

ابزاری وجود ندارد که بتواند در کل محدوده‌های ترکیب درصد گاز، شدت جریان، فشار، برش آب و انواع الگوهای جریان، اندازه‌گیری‌های لازم را به خوبی انجام دهد، بنابراین هنگام انتخاب جریان‌سنج چندفازی مناسب باید به دقت محدوده عملیاتی را که توسط یک اندازه‌گیر پوشش داده می‌شود، مشخص نمود.

## ۲-۶ واسنجی (کالیبراسیون) در طول عمر میدان

اگرچه بعضی از تولیدکنندگان ادعا می‌کنند که محصولات آن‌ها به تنظیم بیشتری بعد از واسنجی کارخانه نیاز ندارد، ولی این غیرمنطقی است که از وابستگی کارایی یک جریان‌سنج چندفازی به محدوده شرایط عملیاتی مختلف چشم‌پوشی کنیم [۱].

## ۲-۷ هزینه‌ها

در عملیات توسعه یک میدان جدید نفت و گاز، عوامل پروژه‌ها از هرکاری که باعث کاهش هزینه‌های ثابت اولیه و هزینه عملیات تأسیسات جدید شود، استقبال می‌کنند. جریان‌سنج‌های چندفازی یکی از اصلی‌ترین نقش‌ها را در رسیدن به این اهداف دارد [۲]. در این میان انتخاب جریان‌سنج‌های چندفازی که هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی پایین‌تری داشته‌باشد، بسیار حائز اهمیت است.

## ۳. طبقه‌بندی جریان‌سنج‌های چندفازی

فارغ از این که روش اندازه‌گیری انتخاب شده براساس جداسازی یا همگن‌سازی است، جریان‌سنج‌های چندفازی براساس شاخص قابل اندازه‌گیری طبقه‌بندی می‌شوند. پنج شاخص که توسط جریان‌سنج‌های چندفازی اندازه‌گیری می‌شود، عبارت است از:

## ۳-۱ چگالی

در این دستگاه‌ها چگالی متوسط سیال یا یک شاخص دیگر که به طور مستقیم به چگالی مرتبط است، در یک قسمت از لوله اندازه‌گیری می‌شود؛ مانند جذب اشعه گاما و مقاومت الکتریکی. این دستگاه‌ها در مورد جرم سیال در یک حجم مشخص از لوله یا اجزاء اتمی مشخص اطلاعاتی بدست می‌دهند، اما اطلاعاتی در مورد سرعت سیال حاصل نمی‌کند.

## ۳-۱-۱ جذب اشعه گاما

چگالی سنج گاما ابزاری است که برای اندازه‌گیری کسر فضای خالی به کار می‌رود، اما باید ملاحظات دقیقی در ضرایب جذب برای مخلوط‌های پیچیده‌ای که در کاربردهای جریان‌سنج چندفازی با آن روبرو هستیم، در نظر گرفته شود.

## ۳-۱-۲ بررسی نوترون

این تکنیک از واکنش  $n-\gamma$  استفاده می‌کند؛ اندازه‌گیری می‌تواند براساس اجزای اصلی یا ردیاب باشد. انرژی فوتون‌های گاما به عنصر بستگی دارد؛ برای مثال، اندازه‌گیری غلظت هیدروژن و اکسیژن امکان اندازه‌گیری شدت جریان آب و هیدروکربن‌ها را فراهم می‌کند. وقتی این فن با اندازه‌گیری نسبت گاز به مایع همراه شود، امکان اندازه‌گیری مجزای هر یک از کسرهای فازی را می‌دهد.

## ۳-۱-۳ وزن کردن لوله

این روش قابلیت به کارگیری در شرایط زیر دریا را داراست و این فن هم باید با اندازه‌گیری نسبت گاز به مایع همراه شود، تا کسرهای فازی به ترتیب مشخص شود.

۲-۲-۶ نداشت عرضی خازنی / هدایتی<sup>۶</sup>

این روش شامل استفاده از یک میدان الکتریکی جهت اندازه‌گیری پاسخ سیال از دو موقعیت مکانی مختلف با فواصل معین در طول کانال است. مشکل اصلی ترکیب مخلوط نفت-آب است. نفت خاصیت دی‌الکتریک از خود نشان می‌دهد، در حالی که آب هادی است؛ بنابراین وقتی در مخلوط، نفت فاز غالب (پیوسته) است، مخلوط به شکل خازن عمل می‌کند و در مواقعی که آب بیشتر است یعنی آب فاز پیوسته و نفت فاز پخش شده است، مخلوط به‌عنوان هادی عمل می‌کند. در مخلوط آب-نفت یک نقطه وارونگی وجود دارد که در این نقطه، پیوستگی از نفت به آب منتقل می‌شود، در این حالت خاصیت الکتریکی مخلوط تغییر می‌کند. اگر از کراس کورلیشن خازن/هدایت استفاده شود باید یک سیستم سوییچ کردن موجود باشد تا بتوان تضمین کرد که روش اندازه‌گیری در نقطه وارونگی تغییر می‌کند. ناحیه وارونگی معمولاً بین ۴۰ تا ۶۰ درصد برش آب قرار دارد. با این وجود، برای یک مخلوط آب و نفت نقطه وارونگی از قبل مشخص نیست، چراکه با خواص سیال و شرایط لحظه‌ای جریان تغییر می‌کند [۱].

## ۳-۳ شار جرمی

اگرچه شار جرمی تک تک اجزاء به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست، اما شار جرمی کلی می‌تواند توسط یک شار جرمی-سنج واقعی یا دستگاه کوریولیس اندازه‌گیری شود. شکل (۲) نمونه‌ای از این دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تصویری از دستگاه کوریولیس [۳].

## ۲-۲-۲ سرعت

در دسته دوم به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم (با اندازه‌گیری دبی حجمی) در یک جریان سنج توربینی سرعت سیال اندازه‌گیری می‌شود. در جریان همگن، سرعت عادی جریان اندازه‌گیری می‌شود و در جریان ناهمگن تفسیر سیگنال‌های ثبت‌شده پیچیده‌تر است.

۱-۲-۳ فعالسازی نوترون ضربانی<sup>۱</sup>

این فن مستلزم به‌کارگیری یک منبع نوترون ضربانی است تا بتواند یک جزء یا اجزا را در مخلوط فعال سازد و درنهایت بتواند انتقال گونه‌های فعال را در طول لوله اندازه‌گیری کند. این فن، با منابع مناسبی که در دسترس است، در صنایع مهمی کاربرد دارد.

## ۲-۲-۳ جریان سنج الکترومغناطیسی

وقتی در طول لوله‌ای که در آن سیالی هادی جاری است، یک میدان مغناطیسی ایجاد شود، جریانی که القا می‌شود با سرعت سیال متناسب است و با روابطی می‌توان سرعت را تخمین زد.

۳-۲-۳ کراس کورلیشن پرتو گاما<sup>۲</sup>

در این روش پاسخ‌های خروجی دو دستگاه جذب گامایی که در فواصل مشخصی در طول کانال قرار گرفته‌اند، ثبت می‌شوند. سیگنال‌ها به‌صورت عرضی نگاشته<sup>۳</sup> می‌شوند تا سرعت بدست آید.

۴-۲-۳ کراس کورلیشن نوترون<sup>۴</sup>

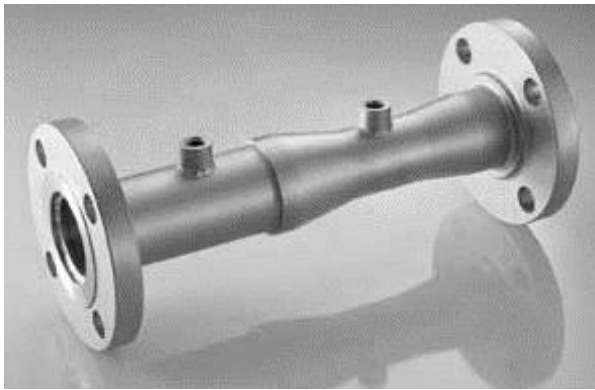
این امکان وجود دارد که واکنش  $n-\gamma$  انرژی با شدت کافی (از هیدروژن) تولید کند تا از لحاظ تئوری اجازه دهد که سیگنال‌ها به‌صورت عرضی نگاشته‌شوند، تا بتوان سرعت را به‌دست آورد. یک احتمال این است که اگر دستگاه‌ها در فاصله مشخصی از یکدیگر باشند، سیگنال‌های گاما و نوترون را به‌صورت عرضی نگاشته کرد. این امر تعداد ابزار را به دوکاهش می‌دهد.

۵-۲-۳ نداشت عرضی صوتی<sup>۵</sup>

این روش در حالتی که کسر حجمی زیاد باشد، مشکلات زیادی را به‌وجود می‌آورد.

1. Pulsed-Neutron Activation
2. Gamma-Ray Cross Correlation
3. Cross-Correlated
4. Neutron Cross Correlation
5. Acoustic Cross Correlation

6. Capacitance/conductivity Cross Correlation



شکل ۴. تصویری از جریان‌سنج چندفازی و نتوری متر [۳].

### ۳-۵ تجزیهٔ عنصری

دسته‌بندی نهایی شامل دستگاه‌هایی است که غلظت و سرعت هریک از اتم‌ها را - مانند اکسیژن، هیدروژن و کربن - اندازه‌گیری می‌کند. این دستگاه‌ها در زمانی که جریان نفت، آب و گاز به‌طور کامل باهم مخلوط یا همگن نشده‌اند، استفاده می‌شود.

### ۴. چهارمسیر ممکن جریان‌سنج چندفازی

شکل (۵) چهارمسیر ممکن برای ترکیب دستگاه‌ها به‌منظور اندازه‌گیری جریان نفت، گاز و آب را در خطوط لوله نشان می‌دهد. سیستم اول شامل همگن‌سازی و نمونه‌گیری است و به سه‌ابزار نیاز دارد که دو عدد از آن‌ها به صورت سری در پایین دست همگن‌سازی و دیگری در خط نمونه‌گیری قرار می‌گیرد. شکل (۶) مسیر ۱ را برای جریان‌سنج چندفازی نشان می‌دهد که در آن نسبت نفت به گازی که در کنتور ۳ در خط نمونه‌اندازه‌گیری شده، به‌صورت ترکیبی با نتایج کنتورهای ۱ و ۲ استفاده شده و مقادیر سرعت متوسط،  $\bar{v}$  و چگالی متوسط،  $\bar{\rho}$  بدست آمده‌است. کنتورهای ۱ و ۲ می‌توانند تمام ترکیب‌های ذکرشده در جعبهٔ شکل (۷) را اندازه‌گیری کنند؛ برای مثال، یک ونتوری متر می‌تواند تکانهٔ جهش یا  $\rho v^2$  را اندازه‌گیری کند و یک چگالی‌سنج گاما می‌تواند مقدار  $\bar{\rho}$  را مشخص کند، از ترکیب این دو مقدار  $\bar{v}$  را بدست می‌آید [۱].

### ۳-۳-۱ شار جرمی سنج واقعی

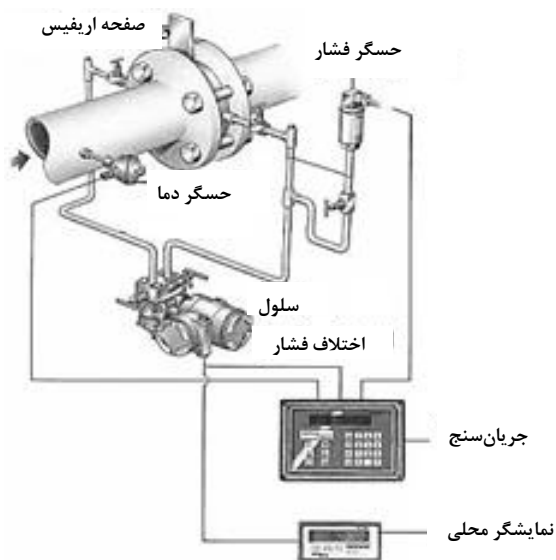
این ابزار در جریان ناهمگن کاربرد دارد؛ این دستگاه می‌تواند به‌عنوان یک همگن‌ساز عمل کند. بنابراین برای استفاده در ترکیب با یک اندازه‌گیر دوم جهت اندازه‌گیری برخی خواص مانند چگالی متوسط مناسب‌است.

### ۳-۳-۲ لولهٔ ارتعاشی

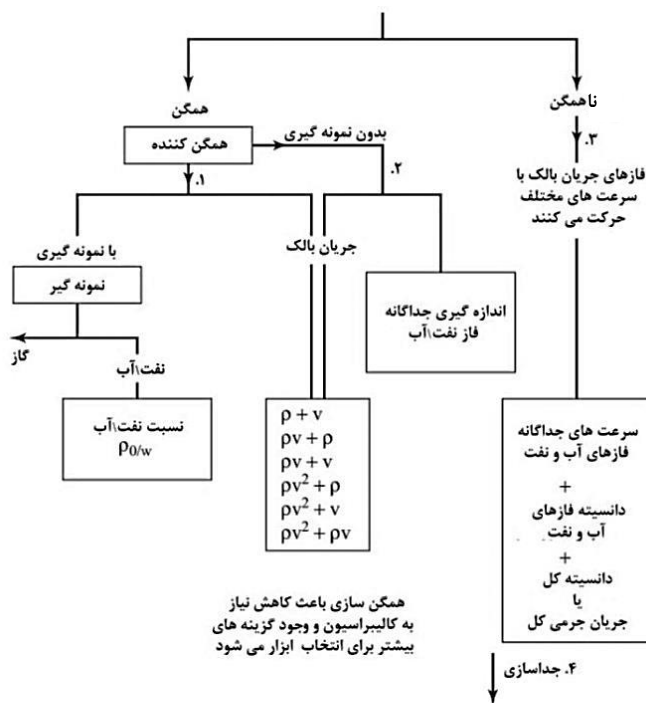
این دستگاه وابسته به اثر کوریولیس است و جهت اندازه‌گیری شار جرمی کلی استفاده می‌شود. ترکیب این دستگاه با کسر جزئی جریان‌سنج‌هایی که در بالا ذکر شد، اطلاعات مورد نیاز جریان را به ما می‌دهد. اگرچه این دستگاه به حضور فاز گاز بسیار حساس است.

### ۳-۴ تکانهٔ جهش (مومنتوم)

شاخص دیگری که قابل اندازه‌گیری است تکانهٔ جهش جریان سیال است، که حاصل ضرب شار جرمی در سرعت جریان است. این دسته شامل ابزارهای کلاسیک افت فشار مانند ونتوری و اوریفیس متر است. شکل‌های (۳) و (۴) نمونه‌هایی از این دستگاه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳. تصویری از جریان‌سنج چندفازی اوریفیس متر [۳].

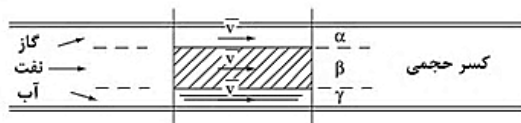
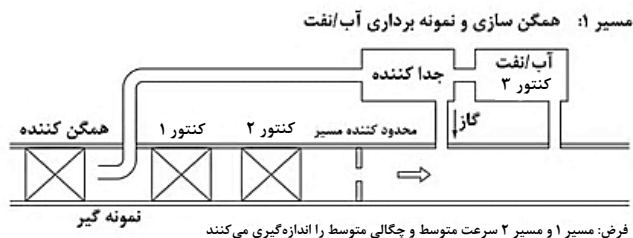


۴ مسیر وجود دارد:

۱. همگن سازی + نمونه برداری: ۲ اندازه گیری در جریان همگن + ۱ اندازه گیری نمونه
۲. همگن سازی بدون نمونه برداری: ۲ اندازه گیری در جریان همگن + ۱ اندازه گیری فاز
۳. جریان ناهمگن: ۴ اندازه گیری جداگانه هر فاز + ۱ اندازه گیری جریان بالک
۴. جداسازی: ۲ اندازه گیری جداگانه هر جریان

شکل ۵. چهار مسیر برای انجام جریان سنجی چندفازی [۱].

اگر از یک همگن کننده بدون نمونه گیری استفاده شود، به سه ابزار در جداگانه قادر به اندازه گیری یکی از فازهای مایع باشد. پایین دست همگن کننده نیاز است که یکی از آن ها باید به صورت



$$\bar{\rho} = \alpha\rho_g + \beta\rho_o + \gamma\rho_w \quad (i)$$

$$= (1 - \beta - \gamma)\rho_g + \beta\rho_o + \gamma\rho_w \quad (ii)$$

مسیر ۳ چگالی بخش آب/نفت مخلوط را تعیین می زند و مقدار نسبت  $\rho/\gamma$  را به دست می آورد که در معادله (ii) قرار می گیرد و با حل آن مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  و گاما بدست می آید. فرض می شود که چگالی فازها معلوم است یا جداگانه اندازه گیری شده.

شکل ۶. مسیر ۱ برای جریان سنج چندفازی [۱].

که در آن A سطح مقطع لوله است. همان‌طور که می‌دانیم  $\alpha + \beta + \chi = 1$  است. پس تنها نیاز است که دو کسر جزئی (معمولاً کسر جزئی گاز  $\alpha$  و کسر جزئی آب  $\beta$ ) اندازه‌گیری شوند. پس معادله (۱) به صورت زیر می‌شود:

$$Q = A(\alpha v_g + \beta v_w + [1 - (\alpha + \beta)]v_o) \quad (2)$$

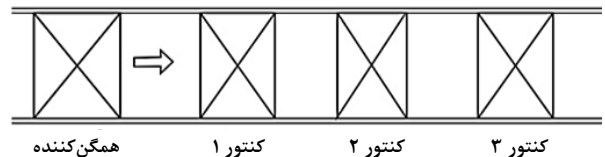
برای محاسبه شدت جریان حجمی مخلوط نیاز است پنج متغیر مستقل اندازه‌گیری شود، شدت جریان جرمی M یک مخلوط سه‌فازی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$M = A(\alpha v_g \rho_g + \beta v_w \rho_w + [1 - (\alpha + \beta)]v_o \rho_o) \quad (3)$$

که برای محاسبه شدت جریان جرمی کل مخلوط نیاز است هشت متغیر مستقل اندازه‌گیری شود [۴]. به‌طور کلی چگالی آب، نفت و گاز از دیگر بخش‌های فرآیند تولید بدست می‌آید، که این اتفاق موضوع را تبدیل به مسأله‌ای می‌کند که در آن فقط باید سرعت هریک از فازها و دو کسر جزئی (معمولاً کسر جزئی گاز<sup>۱</sup> و کسر جزئی آب<sup>۲</sup>) اندازه‌گیری شوند. همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، علاوه بر اندازه‌گیری‌های اساسی شدت جریان‌های حجمی و جرمی، شاخص‌های دیگری هم از این اطلاعات به دست می‌آید که معمولاً برای اهداف عملیاتی به آن‌ها نیاز داریم که شامل کسر حجمی گاز<sup>۳</sup>، برش آب<sup>۴</sup>، نسبت گاز به نفت<sup>۵</sup> و نسبت آب به مایع<sup>۶</sup> می‌شود. جدول (۱) رایج‌ترین شاخص‌های عملیاتی مورد نیاز و روابط آن‌ها با شاخص‌های بنیادی معادله را نشان می‌دهد.

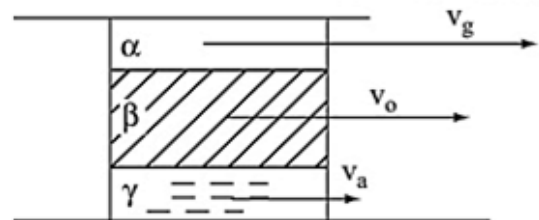
آبرو و همکاران [۵] روش دیگری برای کاهش تعداد اندازه‌گیری‌های مستقیم ارائه دادند، در این روش با استفاده از بازشناسی الگو و روش‌های شبکه عصبی، روابط بین خروجی‌های حداقل سه حسگر مستقل و شدت جریان حجمی هر فاز را محاسبه می‌کنیم. برای مثال این حسگرها می‌توانند فشار دیفرانسیلی در طول یک محدوده جریان، مقاومت الکتریکی جریان و میرایی پرتو گاما را که

شکل (۷) مسیر ۲ را برای جریان سنج چندفازی نشان می‌دهد که از روش همگن‌سازی بدون نمونه‌گیری استفاده می‌کند. هر دو مسیر ۱ و ۲ فقط به سه‌بازار نیاز دارند، زیرا فرض شده که هر سه جزء با سرعت مساوی حرکت می‌کنند.



شکل ۷. مسیر ۲ جریان سنج چندفازی [۱].

در سیال غیرهمگن، اگر به واسنجی وسیع نیاز نباشد، به پنج‌بازار نیاز است. در مسیر ۳ به اندازه‌گیری‌های بیشتری برای تعیین سرعت و کسر حجمی هریک از اجزاء نیاز دارد. شکل (۸) مسیر ۳ را در یک جریان ناهمگن نشان می‌دهد.



شکل ۸. مسیر ۳ برای جریان سنج چندفازی [۱].

مسیر ۴ عبارت است از جداسازی کامل اجزاء جریان از یکدیگر و اندازه‌گیری جداگانه هر فاز. البته در این صورت نیاز به وجود جریان سنج چندفازی از بین می‌رود.

### ۵. رویه اندازه‌گیری جریان در جریان سنج‌های چندفازی

مسأله اندازه‌گیری جریان سه‌فازی تبدیل به مسأله‌ای می‌شود که در آن سرعت لحظه‌ای ( $v_g$ ،  $v_o$  و  $v_w$ )، کسر جزئی در سطح مقطع ( $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\chi$ ) و چگالی هر فاز ( $\rho_g$ ،  $\rho_o$  و  $\rho_w$ ) محاسبه شود [۴]. شدت جریان حجمی یک مخلوط سه‌جزیی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = A(\alpha v_g + \beta v_w + \chi v_o) \quad (1)$$

1.  $\alpha$   
2.  $\beta$   
3. GVF  
4. WC  
5. GOR  
6. WLR

## Archive of SID

از مقطع لوله می‌گذرد، اندازه‌گیری کنند. رابطه بین خروجی هر حسگر و شدت جریان هرفاز به صورت تئوری نمی‌تواند تخمین زده شود، اما باید استفاده از واسنجی به دست آید. جداول (۲) و (۳) خلاصه‌ای از سیستم‌های جریان‌سنجی سه‌فازی را که به صورت تجاری در دسترس هستند، نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده، جریان‌سنج‌های سه‌فازی که جریان را پیش از اندازه‌گیری جدا می‌کنند، عموماً برای اندازه‌گیری شدت جریان فاز گاز از یک جریان‌سنج تک‌فازی مثل جریان‌سنج ورتکس یا کوریولیس استفاده می‌کنند و برای اندازه‌گیری سرعت از ترکیبی از روش‌های اندازه‌گیری سرعت مثل جریان‌سنج ونتوری، روش کراس کورلیشن یا کوریولیس و برای اندازه‌گیری کسر جزئی از روش‌هایی مثل مقاومت ظاهری یا امواج میکرو برای تخمین شدت جریان نفت-آب استفاده می‌شود. جریان‌سنج‌هایی که قبل از اندازه‌گیری، جداسازی در آن‌ها رخ نمی‌دهد، از روش‌هایی مثل جریان‌سنج لوله ونتوری و روش کراس کورلیشن برای تخمین سرعت فازهای حامل و پراکنده استفاده می‌کنند و از روش‌هایی مثل مقاومت الکتریکی و روش‌های میرایی پرتو گاما برای تخمین کسر جزئی فازها در مخلوط جاری استفاده می‌کنند. استراتژی‌های جایگزین دیگر، از تکنیک‌های مدل‌سازی مثل شبکه‌های عصبی برای تخمین شدت جریان از محدوده‌ای از حسگرهای اولیه استفاده می‌کنند [۶].

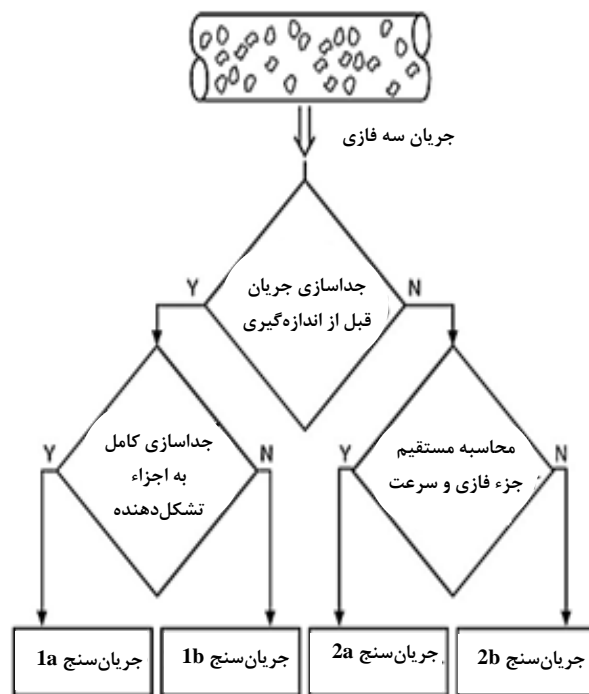
## ۵-۱ دبی‌سنج‌های نوع 1a: جداسازی کامل دوفازی

سیستم‌های اندازه‌گیری جریان چندفازی Weatherford Red Eye<sup>۱</sup> یک مثال تجاری از سیستم‌های نوع 1a است که در آن قبل از فرآیند اندازه‌گیری، جریان آب-نفت-گاز به دو جریان گاز و مایع تبدیل می‌شود. شکل (۱۰) عناصر پایه‌ای این جریان‌سنج را نشان می‌دهد.

ورود شیب‌دار جریان چندفازی به داخل جداکننده باعث ایجاد گردابه می‌شود، که موجب می‌شود ترکیبات گاز و مایع از هم جدا شوند. تفاوت چگالی بین نفت، گاز و آب باعث می‌شود که فاز مایع به سمت پایین و فاز گاز به سمت بالای جداکننده حرکت کند. از شیرهای کنترل مایع و گاز جهت حفظ جداسازی بهینه استفاده می‌کنیم. شدت جریان گاز عاری از مایع، توسط یک جریان‌سنج

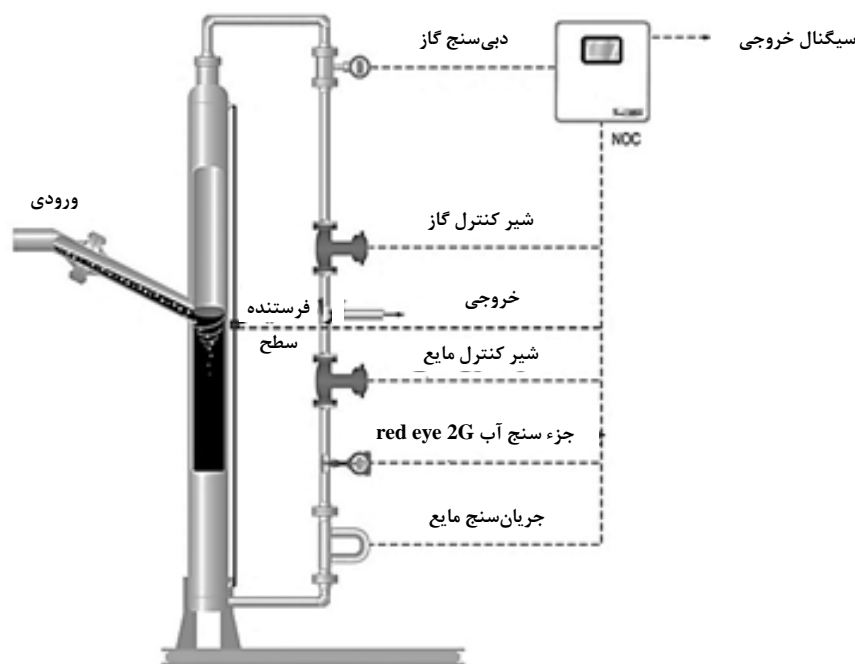
جدول ۱. شاخص‌هایی که معمولاً در فرآیند تولید نفت و گاز استفاده می‌شود [۴].

تعریف	شاخص عملیاتی
$\frac{\alpha v_g}{\beta v_w + \alpha v_o}$	نسبت گاز به مایع (GLR)
$\frac{\alpha v_g}{\alpha v_o}$	نسبت گاز به نفت (GOR)
$\frac{\alpha v_g A}{Q}$	کسر حجمی گاز (GVF)
$\frac{\beta v_w + \alpha v_o}{\alpha v_g}$	نسبت مایع به گاز (LGR)
$\frac{(\beta v_w + \alpha v_o)}{Q}$	کسر حجمی مایع (LVF)
$\frac{\beta v_w}{\beta v_w + \alpha v_o}$	برش آب (WC)
$\frac{\beta v_w}{\alpha v_o + \beta v_w}$	نسبت آب به مایع (WLR)



شکل ۹. یک سیستم دسته‌بندی برای جریان‌سنج‌های سه‌فازی [۶].





شکل ۱۰. مثالی از یک جریان‌سنج سه‌فازی که از جداسازی کامل دوفازی استفاده می‌کند [۴].

حال حاضر هیچ جریان‌سنج سه‌فازی که در دسته‌بندی نوع 1b قرار بگیرد در دسترس نیست.

### ۳-۵ سیستم‌های نوع 2a: اندازه‌گیری مستقیم خصوصیات

#### جریان سه‌فازی

رکسار<sup>۱</sup> MPFM 2600 یکی از نمونه‌های تجاری در دسترس جریان‌سنج نوع 2a است که به هیچ‌جداسازی و اختلاط جریانی نیاز ندارد و شدت جریان‌های فازها را با اندازه‌گیری مستقیم کسر جزئی و سرعت‌ها محاسبه می‌کند. شکل (۱۱) اجزای اصلی این جریان‌سنج چندفازی را رسم کرده است. این جریان‌سنج با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی، ظرفیت الکتریکی و چگالی مخلوط، کسر جزئی فازها را محاسبه می‌کند. در این حالت از جریان‌سنج لوله ونتوری و فن کراس کورلیشن برای محاسبه سرعت‌های سه‌فاز استفاده می‌شود. به دلیل تغییر شدت جریان‌هایی که در طول زمان حیات میدان اتفاق می‌افتد، می‌توان جریان‌سنج لوله ونتوری را عوض کرد. از یک سیستم چندالکتروده برای فراهم‌آوردن اطلاعات توزیع فاز محلی (مثل نزدیک دیواره) و مقطعی استفاده می‌شود [۴].

همچنین از جریان‌سنج برای اندازه‌گیری WLR و GVF در بازه صفر

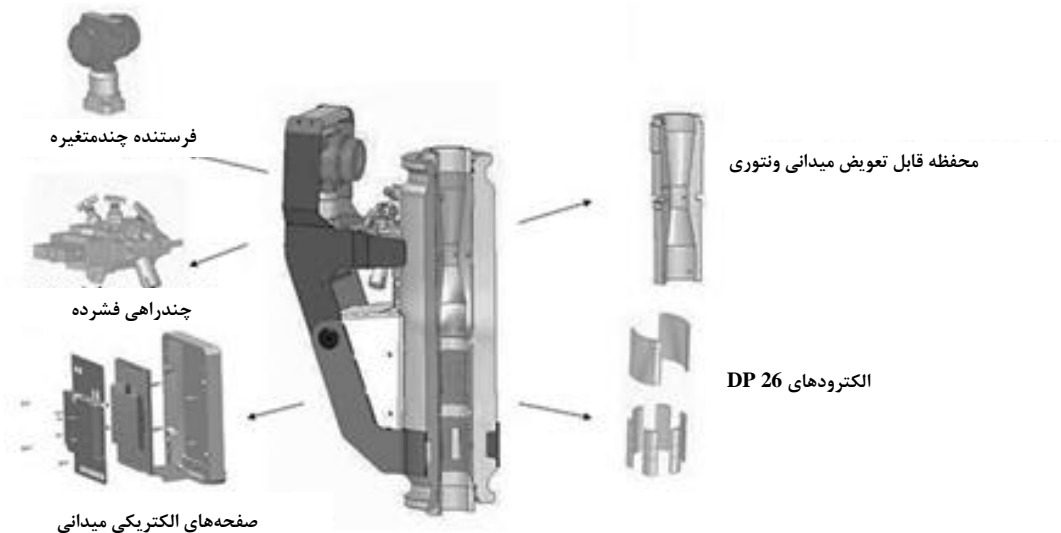
گردابه‌ای متداول اندازه‌گیری می‌شود. شدت جریان نفت/ آب توسط یک جریان‌سنج کوریولیس و برش آب جریان توسط یک برش آب‌سنج مادون قرمز اندازه‌گیری می‌شود. دو جریان قبل از خروج از جریان‌سنج با هم ترکیب می‌شوند.

با استفاده از این روش جداسازی، شدت جریان‌های حجمی گاز و مایع با عدم قطعیت نسبی  $\pm 2\%$  اندازه‌گیری می‌شوند. برش آب نیز با عدم قطعیت مطلق  $\pm 2\%$  قابل اندازه‌گیری است. اندازه‌گیری‌ها می‌توانند تا کسر جزئی گاز ۹۵٪ را اندازه‌گیری کنند. اگرچه این روش جریان‌سنجی می‌تواند در همه‌نوع از رژیم‌های جریانی شامل جریان لخته‌ای به کار برده شود ولی زمان ماند کوتاه جداکننده چرخشی آن را برای استفاده جهت سنجش نفت سنگین نامناسب می‌کند [۷]. جداکننده همچنین باعث افزایش افت فشار در خطوط لوله می‌شود که این امر باعث دشواری‌هایی در خطوط لوله‌ای می‌شود که نیاز به پیگ‌زنی دارد.

### ۲-۵ سیستم‌های نوع 1b: جداسازی جزئی دوفازی

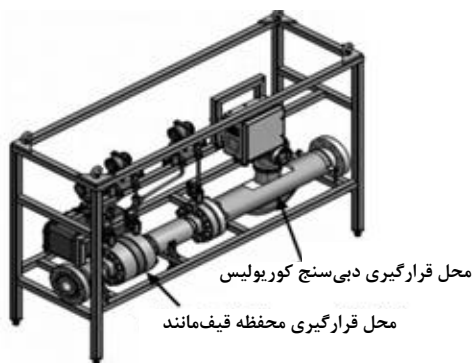
سیستم‌های نوع 1b مثل نوع 1a نیاز به جداسازی کامل گاز و مایع با دقت بالا ندارد، اما در مقابل پس از جداسازی نیاز به اندازه‌گیری جریان گاز تر و جریان مایعی که مقدار کمی گاز دارد، می‌باشد. در

1. Roxar



شکل ۱۱. جریان سنج سه‌فازی که از اندازه‌گیری مستقیم مشخصات جریان سه‌فازی استفاده می‌کند [۴].

مستقل به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشخص است، جریان سنج از دو زیرقرقره ماژولار تشکیل شده: قرقره مخروطی<sup>۲</sup> و قرقره کوریولیس<sup>۳</sup>. قرقره مخروطی شامل یک V-con است که مانند تولیدکننده دیفرانسیلی عمل می‌کند. شاخص‌های مستقلی که توسط این قرقره اندازه‌گیری می‌شود شامل دما، فشار مطلق، فشار جزئی و ظرفیت یا هدایت مخلوط است.



شکل ۱۲. جریان سنج سه‌فازی که از روش اندازه‌گیری

غیرمستقیم، خواص جریان سه‌فازی را اندازه‌گیری می‌کند [۴].

همه شاخص‌ها، هم به تغییرات سرعت و هم به تغییرات ترکیب فازهای جریان حساس هستند؛ از دوشبکه عصبی پس‌انتشار جهت تخمین رابطه بین خروجی‌های حسگر و شدت جریان هرفاز استفاده

تا ۱۰۰ درصد نیز استفاده می‌کنیم. در مواردی که ترکیب درصد گاز بیشتر از ۹۵ درصد است، نیاز است که یک سیستم چگالی اشعه گاما به جریان سنج اضافه شود. اگرچه جریان سنج به پیش مخلوط شدن نیاز ندارد ولی الزاماتی که سازنده روی تأسیسات قرار داده ضامن این است که جریان قبل از عبور از بخش اندازه‌گیری جریان سنج به خوبی مخلوط شده است. تست‌های مستقلی بر روی جریان سنج در محدوده GVF ۳۳٪-۹۱٪، و محدوده WC صفر درصد-۹۰٪ انجام گرفت و در این محدوده شدت جریان حجمی گاز و شدت جریان حجمی مایع اندازه‌گیری می‌شود که این مقادیر به ترتیب با عدم قطعیت نسبی  $\pm 0.35\%$  و  $\pm 0.878\%$  به دست آمد. مقدار برش آب نیز با عدم قطعیت  $\pm 0.275\%$  به دست می‌آید. اگرچه جریان سنج‌های نوع ۲a معمولاً به مخلوط‌کن‌های داخل جریان نیاز ندارد، ولی به دلیل نیاز به نصب دستگاه به صورت عمودی رو به بالا و پس از یک اتصال T شکل، به وضوح یک همگن‌سازی به دست می‌آید.

۴-۵ سیستم‌های نوع ۲b: اندازه‌گیری غیرمستقیم خصوصیات جریان سه‌فازی

اسمر<sup>۱</sup> نام یک جریان سنج تجاری است که به هیچ پیش‌جدايشی برای جریان نیاز ندارد. در این جریان سنج شدت جریان‌های هرفاز با به کارگیری تجزیه‌های پیشرفته سیگنال‌های خروجی سه‌حسگر

2. Cone Spool  
3. Coriolis Spool

1. Asmar

## ۶-۱ روش‌های پرتونگاری

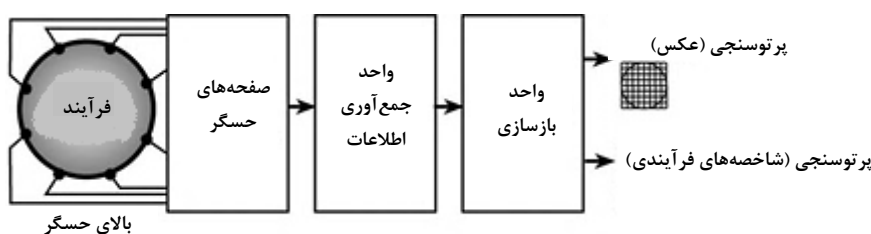
در اواخر دهه ۱۹۸۰ فرآیند صنعتی پرتونگاری به‌عنوان یک مفهوم جهت فراهم آوردن اطلاعات پردازش پویایی‌شناسی مقطعی<sup>۳</sup> برای فرآیندهای صنعتی ارائه شد. اطلاعات به‌دست آمده از یک فرآیند پرتونگاری می‌تواند به‌صورت تصویر باشد (توموگرافی) و یا شاخص‌های ساده پردازش، توزیع اجزای فرآیند را شرح دهند (شکل (۱۳)) [۹].

فرآیند پرتونگاری که بر اساس پرتوسنجی ظرفیت الکتریکی<sup>۴</sup> کار می‌کند در موارد متعددی از جریان‌های چند فازیهیدروکربنی کاربرد دارد و مزیت‌هایی مانند استوار بودن، غیر سرزده‌بودن و قیمت کم طراحی را داراست [۱۰]. چالش اصلی موجود در پرتوسنجی ظرفیت الکتریکی، غیرخطی بودن روابط بین اندازه‌گیری‌های الکتریکی و گذردهی ماده اندازه‌گیری شده است که بازسازی تصویر را پیچیده می‌کند. فرآیند پرتونگاری که بر پایه پرتو گاما عمل می‌کند هم برای تصویربرداری از جریان چندفازی هیدروکربن‌ها استفاده می‌شود. پرتونگاری با پرتو گاما در جریان چندفازی هیدروکربنی، بین فاز گاز و مایع به‌دلیل تفاوت چگالی آن‌ها، تبعیض قائل می‌شود، مثل ضرائب میرایی فتون متفاوت. تحقیقات بیشتر بر روی پرتونگاری پرتو گاما منجر به دستیابی به روش جدیدی شده که در آن روش‌های سنجش پرتونگاری<sup>۵</sup> با جریان‌سنج‌های چند فازیهی آنلاین ترکیب می‌شوند که فقط با استفاده از چند طرح می‌تواند به‌صورت پیوسته الگوی جریان را تشخیص دهد و به واسطه آن خطاهای اندازه‌گیری را کاهش دهد [۴]. اولین جریان‌سنج درون‌چاهی که از این روش استفاده می‌کند، راه‌اندازی شده است. یک سیستم فرآیند پرتونگاری نیز که بر اساس ریزموج کار می‌کند، برای تصویربرداری از جریان‌های چند فازیهی وجود دارد.

این روابط پیچیده و غیرخطی هستند و نمی‌توان آن‌ها را به‌صورت نظری به‌دست آورد. از قرقره کوریولیس برای تصحیح مقادیر اندازه‌گیری شده توسط قرقره مخلوطی در کسر جزئی‌های بالاتر گاز استفاده می‌شود. توسط این روش عدم قطعیت نسبی در اندازه‌گیری شدت جریان حجمی گاز و مایع به ترتیب  $\pm 0.1\%$  و  $\pm 0.5\%$  می‌شود. برش آب نیز با عدم قطعیت مطلق  $\pm 2\%$  به‌دست می‌آید. در همه دستگاه‌های مبتنی بر شبکه عصبی، قبل از استفاده در میداین نفتی و گازی، جریان‌سنج نیاز به واسنجی کارخانه‌ای و یا شبیه‌سازی آزمایشگاهی توسط یک حلقه جریان دارد. استفاده در میدان باعث بهبود بیشتر دقت این نوع از جریان‌سنج می‌شود؛ زیرا شبکه عصبی از شرایطی که قبلاً با آن مواجه شده (در جهت بهبود) استفاده می‌کند.

## ۶. سایر پیشرفت‌های تحقیقاتی

در بخش نفت و گاز عموماً زمان لازم برای این‌که یک فناوری جدید وارد بازار شود بسیار طولانی‌تر از دیگر صنایع مانند محصولات مصرفی، دارو و ارتباطات است. جریان‌سنج سه‌فازی یکی از بهترین مثال‌ها در این مورد است، حدود ۲۰ سال طول کشید تا این وسیله از یک تصور تحقیقاتی به مقبولیت تجاری برسد [۸]. تحقیقات برای بهبود این روش همچنان ادامه دارد. پژوهش در مورد روش‌های پرتونگاری<sup>۱</sup>، صوت‌شناسی و روش‌های بسامد بالای الکترومغناطیسی می‌تواند موجب پیشرفت‌های قابل توجهی در دقت و قابلیت جریان‌سنج‌های تجاری موجود شود. روش دیگر، استفاده از روش‌های جدیدی مانند بازآوایی مغناطیس هسته‌ای<sup>۲</sup> برای حل مشکل اندازه‌گیری سه‌فازی است که به‌طور کلی نوع جدیدی از جریان‌سنج‌ها را به‌وجود می‌آورد.



شکل ۱۳. نمایی از روند کلی سیستم اندازه‌گیری پرتونگاری [۹].

1. Tomographic  
4. Electrical Capacitance Tomography

2. Nuclear Magnetic Resonance  
5. Tomographic Sensing Methods

3. Dynamic Cross-Sectional Process

## ۶-۲ روش‌های فراصوتی

اگرچه هنوز این روش‌ها به‌طور کامل در جریان‌سنج‌های سه‌فازی تجاری کاربردی نشده‌است، اما به‌نظر می‌رسد فنون فراصوتی ظرفیت اندازه‌گیری هر دو مقدار سرعت فازی و ترکیب درصد فازی را دارد. امکان استفاده از حسگرهای الصاقی<sup>۱</sup> نیز فواید زیادتری از سایر فناوری‌های سنجش دارد. اگرچه محدودیت‌هایی نیز وجود دارد که استفاده گسترده‌تر آن‌ها را در اندازه‌گیری جریان‌سنج‌های چندفازی محدود کرده‌است. روش‌های فراصوتی داپلر به‌طور رایج برای اندازه‌گیری سرعت جریان‌های چندفازی در محیط‌های چالش برانگیز استفاده می‌شود. برای مثال تزوکاو همکاران [۱۱] از روش‌های داپلرپالسی<sup>۲</sup> برای اندازه‌گیری پروفایل سرعت جریان آب در لوله‌ای به قطر ۱۲۰ سانتی‌متر در یک نیروگاه هیدرولیکی استفاده کردند. به‌دلیل اینکه آب درون لوله دارای تعداد ذرات کمی است که به‌عنوان بازتاب‌کننده فراصوتی در اندازه‌گیری داپلر عمل کنند، مقادیر کمی از حباب‌های هوا باید درون جریان تزریق شود. دقت اندازه‌گیری سرعت به پایداری رابطه بین سرعت اندازه‌گیری شده ردياب و سرعت متوسط فاز حامل بستگی دارد؛ اغلب این رابطه توسط واسنجی آنلاین به‌دست می‌آید. مورااکاوا و همکاران [۱۲] از یک روش فراصوتی داپلر برای اندازه‌گیری سرعت هر دوفاز مایع و گاز در یک جریان حبابی استفاده کردند. از حباب‌ها به‌عنوان بازتاب‌دهنده‌های فراصوتی جهت تخمین سرعت گاز استفاده می‌شود، درحالی‌که ذراتی با قطر ۸۰ میکرومتر به‌مایع اضافه شدند تا سیگنال‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری سرعت فاز مایع فراهم‌آورند.

## ۶-۳ روش‌های میدان مغناطیسی با بسامد بالا

روش‌های میدان مغناطیسی با بسامد بالا می‌تواند برای اندازه‌گیری ترکیب درصد آب در تمام محدوده یک جریان نفت-گاز-آب مورد استفاده قرار گیرد. تلفات جریان گردابی ایجاد شده، توسط یک میدان مغناطیسی بسامد بالا در جزء آب تولید می‌شود. کل تلفات ایجاد شده در حجم اندازه‌گیری وابسته به مقدار آب موجود در مخلوط جریان خواهد بود و دوباره به‌وسیله مقاومت‌های موازی امپدانس سیم‌پیچ به‌وجود خواهد آمد. از دو سیم‌پیچ استفاده می‌شود

## Archive of SID

که یکی برای مخلوط پیوسته از آب و دیگری برای مخلوط‌های پیوسته از نفت یا گاز استفاده می‌شود. سیم‌پیچ‌ها توسط یک مدار بازخورد (فیدبک) وادار به تشدید می‌شوند و امپدانس هر سیم‌پیچ اندازه‌گیری می‌شود [۹]. آزمایش‌های انجام‌شده روی این مفهوم نشان داده که هنگامی که این فن در سرتاسر محدوده ترکیب درصد آب قابل استفاده باشد، نتایج وابسته به ترکیب درصد گاز<sup>۳</sup> خواهد بود.

۶-۴ روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای<sup>۴</sup>

این روش به‌صورت معمول برای محدوده‌ای از اهداف تشخیصی در زمینه پزشکی استفاده می‌شد و امروز برای کاربردهای اندازه‌گیری چندفازی در صنعت نفت و گاز توسعه داده شده‌است. به‌دلیل اینکه تشدید مغناطیسی هسته‌ای می‌تواند برای تخمین هر دو مقدار سرعت و ترکیب درصد فاز در جریان چندفازی استفاده شود، پس این روش به‌طور اساسی ظرفیت شکل‌دهی پایه و اساس یک جریان‌سنج چندفازی جهانی را دارد. در سال ۲۰۱۱ یک جریان‌سنج سه‌فازی تشدید مغناطیسی هسته که به‌صورت خاص برای اندازه‌گیری نفت-گاز-آب طراحی شد، به مرحله نمونه اولیه رسید. از این جریان‌سنج برای اندازه‌گیری محدوده‌ای از جریان‌های مختلف استفاده شد؛ مانند جریان تک‌فازی متان، جریان دوفازی نفت و آب‌نمک و جریان سه‌فازی نفت و متان و آب‌نمک. نتایج تجربی نشان داده که جریان‌سنج قادر به اندازه‌گیری دقیق شدت جریان فازها در تمام شرایط است. همچنین جریان‌سنج قادر به عملیات در نقاط اکسترمم محدوده عملیاتی تولید است. برای مثال، در جریان‌های نفت-آب، ترکیب درصد ۱٪ برای نفت با دقت بهتر از ۰٫۳٪ قابل اندازه‌گیری است. نمونه اولیه جریان‌سنج برای لوله‌ای به قطر ۴ اینچ (۱۰۱۶ سانتی‌متر) طراحی شده‌است که خودش دارای ۲ متر طول و ۸۰۰ کیلوگرم وزن است که بسیار بزرگتر از بسیاری از جریان‌سنج‌های سه‌فازی تجاری موجود است.

## ۷. نتیجه‌گیری کلی

در مقابل الزاماتی که برای اندازه‌گیری در بالا ذکر شد، یک جریان‌سنج باید دارای سه ویژگی مهم باشد. جریان‌سنج باید به‌اندازه

3. GVF  
4. Nuclear Magnetic Resonance Methods

1. Clamp-On Sensors  
2. Pulsed Doppler Techniques

## مراجع

- [1] Falcone, G., Hewitt, G., Alimonti, C., "Multiphase flow metering: principles and applications". Vol. 54: Elsevier, (2009).
- [2] Brandt, M., Tol, M., Ruden, L. A., "Improving measurement quality and meeting changing operator challenges with the multiphase meter". in Proc. 9th South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop (Kuala Lumpur, Malaysia, (2010).
- [3] Xie, Cheng-Gang, Germond, B., Jolivet, G., "Multiphase Flow Meters and related methods." U.S. Patent Application No. 15/570, 497, (2018).
- [4] Shi, X., Tan, C., Dong, F., Murai, Y., "Oil-gas-water three-phase flow characterization and velocity measurement based on time-frequency decomposition". International Journal of Multiphase Flow, 111, 219-231, (2019).
- [5] Åbro, E., Khoryakov, V. A., Johansen, G. A., Kocbach, L., "Determination of void fraction and flow regime using a neural network trained on simulated data based on gamma-ray densitometry". Measurement Science and Technology, 10(7), 619, (1999).
- [6] Makogon, Taras, Y., "Handbook of Multiphase Flow Metering". Gulf Professional Publishing, (2019).
- [7] Bastardo, R. A., Imam, A., Scoglio, J. V., "Field testing of an automated well tester in extra-heavy and diluted oil application". in SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, (2008).
- [8] Hoffmann, R. Johnson, G. W., "Measuring phase distribution in high pressure three-phase flow using gamma densitometry". Flow Measurement and Instrumentation, 22, 351-359, (2011)
- [9] Hjertaker, B. T., Tjugum, S. A., Hammer, E. A., Johansen, G. A., "Multimodality tomography for multiphase hydrocarbon flow measurements". IEEE sensors journal, 5(2), 153-160, (2005).
- [10] Ismail, I., Gamio, J. C., Bukhari, S. A., Yang, W. Q., "Tomography for multi-phase flow measurement in the oil industry". Flow measurement and instrumentation, 16(2-3), 145-155, (2005).
- [11] Tezuka, K., Mori, M., Suzuki, T., Kanamine, T., "Ultrasonic pulse-Doppler flow meter application for hydraulic power plants". Flow Measurement and Instrumentation, 19(3-4), 155-162, (2008).
- [12] Murakawa, H., Kikura, H. Aritomi, M., " Application of ultrasonic Doppler method for bubbly flow measurement using two ultrasonic frequencies". Experimental Thermal and Fluid Science, 29, 843-850, (2005).

کافی برای کاربرد مورد نظر دقیق باشد. باید بتواند مشخصات را به‌طور دقیق در سرتاسر محدوده کسر جزئی هرفاز اندازه‌گیری کند و مستقل از رژیم جریان باشد. دو روش که در جریان‌سنج‌های سه‌فازی تجاری رایج‌تر از بقیه است عبارت است از: میرایی پرتو گاما و مقاومت ظاهری الکتریکی. استفاده از اندازه‌گیری میرایی گاما در فرآیندهای صنعتی معمولاً مربوط به چگالی‌سنجی گاما است؛ زیرا ضریب میرایی اشعه گاما تقریباً با چگالی متوسط حجمی که توسط پرتو پوشانیده شده متناسب است. اگرچه در انرژی‌های پایین، میرایی وابستگی زیادی به عدد اتمی مؤثر ابزار فرآیند دارد؛ این بدان معنی است که حساسیت اندازه‌گیری در انرژی‌های پایین اغلب بالاتر است. در اصول و قواعد، روش‌های مقاومت ظاهری ساده هستند، وجود یک حسگر قوی ترکیب درصد هرفاز که با پاسخ دینامیکی سریع همراه است، بدون نیاز به توجه کردن به مسائل ایمنی که به‌واسطه حسگرهایی که بر اساس تابش کار می‌کنند به‌وجود می‌آید. در عمل نیز اگرچه سه‌محدودیت حساسیت به تغییرات رژیم جریان، حساسیت به تغییرات خواص دی‌الکتریکی سیال و تخمین نقطه تغییر فاز وجود دارد، ولی برای اینکه بتوان ترکیب درصد فازها را اندازه‌گیری کرد، باید بر آن‌ها غلبه کرد.

اگرچه هنوز این روش‌ها به‌طور کامل در جریان‌سنج‌های سه‌فازی تجاری کاربردی نشده است، اما به‌نظر می‌رسد فنون فراصوتی ظرفیت اندازه‌گیری هر دو مقدار سرعت فازی و ترکیب درصد فازی را دارد. امکان استفاده از حسگرهای الصافی نیز فواید زیادی از سایر فناوری‌های سنجش دارد. اگرچه محدودیت‌هایی نیز وجود دارد که استفاده گسترده‌تر آن‌ها را در اندازه‌گیری جریان‌سنج‌های چندفازی محدود کرده است. روش‌های فراصوتی داپلر به‌طور رایج برای اندازه‌گیری سرعت جریان‌های چندفازی در محیط‌های چالش برانگیز استفاده می‌شود.