

ارائه روش طراحی بهبودیافته جداساز دوفازی و طراحی جداساز صنعتی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و تحلیل ابعادی

علی سلمانی سیاح^۱، یوسف رفیعی^۱، محمد جواد عامری^{۲*}، مهدی فدایی^۱، کیوان قربان پور^۱ و صادق ادنان^۲

۱- دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه کربلا، عراق

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۲۹

چکیده

سیال تولیدی از چاه‌های نفت و گاز معمولاً به صورت دوفازی بوده که با توجه به لزوم حداکثرسازی بازدهی جداسازهای دوفازی، دستیابی به طراحی دقیق ابعاد این جداسازها ضروری است. اما یکی از مشکلات اساسی کشور نبود یک روش طراحی دقیق ابعاد جداسازهای دوفازی صنعتی است. بنابراین یکی از مسائل مهم حال حاضر در صنعت نفت، دستیابی به روشی مطمئن برای طراحی ابعاد جداسازهایی است که بهترین راندمان عملیاتی را در فرآیند جداسازی سیال تولیدی داشته باشند. در این پژوهش ابتدا مروری بر روش‌های طراحی کلاسیک جداسازهای دوفازی که بر مبنای روش‌های تئوری و نیمه‌تجربی استوار هستند، انجام شد. سپس به منظور بررسی آزمایشگاهی عملکرد جداسازهای دوفازی، پایلوت آزمایشگاهی جداساز طراحی شد. بنابراین یکی از مشکلات اصلی این حوزه یعنی نبود جداساز آزمایشگاهی مناسب جهت بررسی تجربی عملکرد جداساز دوفازی، برطرف شد و در حال حاضر امکان بررسی دقیق ابعاد جداساز دوفازی با استفاده از نتایج تجربی فراهم شد. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده در شرایط مختلف عملیاتی و مقایسه با طراحی کلاسیک، ضریب تصحیح (α) برای اصلاح روابط کلاسیک ارائه شد. در نهایت روش تحلیل ابعادی برای طراحی ابعاد جداساز دوفازی صنعتی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی معرفی شد. به منظور اعتبارسنجی روش تحلیل ابعادی، ابعاد استاندارد برای جداسازی قطرات مایع بزرگتر از $750 \mu\text{m}$ از فاز گاز در سیال تولیدی یکی از چاه‌های میدان پارس جنوبی ارائه شد و با ابعاد جداساز واقعی مقایسه شد. لازم به ذکر است میزان خطای ابعاد جداساز طراحی شده در مقایسه با ابعاد جداساز واقعی کمتر از ۴٪ بوده است.

کلمات کلیدی: طراحی کلاسیک، آنالیز ابعادی، جداساز، جریان دوفازی، ضریب تصحیح

*مسئول مکاتبات

amери@aut.ac.ir

آدرس الکترونیکی
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2021.4272.2932)

مقدمه

معمولاً منابع هیدروکربنی که در لایه‌های زمین کشف می‌شوند، از فشار و دمای بالایی برخوردار هستند. اما زمانی که حفاری لایه‌های مخزنی توسط مهندسين حفاری به پایان رسید، سیال مخزنی باید تولید و مورد بهره‌برداری قرار گیرد. معمولاً سیال تولید شده از سر چاه، مخلوط پیچیده‌ای از ترکیبات هیدروکربنی است که هر ترکیب خواص فیزیکی مخصوص به خود را دارد. در مسیر بالا آمدن سیال تولیدی، فشار و دمای سیال کاهش می‌یابد که این امر موجب تغییر ماهیت سیال و دو فاز شدن آن می‌شود. برای رسیدن به شرایط مطلوب محصول نهایی، سیال تولیدی باید به وسیله جداساز مورد جداسازی قرار گرفته و سپس هر کدام از فازهای گاز و مایع به حالت تک‌فاز در آمده و به سمت واحدهای بهره‌برداری منتقل می‌شوند. در واقع، جداسازی فیزیکی فازها یکی از اساسی‌ترین کارها در تولید، طراحی و عمل آوری نفت و گاز است. بنابراین، طراحی استاندارد جداسازهای دوفازی صنعتی که بیشترین راندمان عملیاتی جداسازی را داشته باشد، یکی از چالش‌های حوزه بهره‌برداری از میادین نفت و گاز است. اولین روابط تئوری طراحی جداساز دوفازی توسط سودرز و براون [۱] ارائه شده است. با استفاده از روابط ارائه شده توسط سودرز و براون سرعت ظاهری گاز محاسبه گردید. دیگر محققان نیز با تغییر در رابطه نیمه تجربی ارائه شده توسط سودرز و براون از آن بهره بردند. چیلینگریان و همکارانش [۲] روشی برای طراحی جداساز دوفازی ارائه کردند که بیشتر جنبه تجربی و عملیاتی داشت. روش آنها بر پایه این اصل بود که حجم جداساز چه مقدار باشد تا بتواند دبی گاز و مایع را در خود جای دهد، نه اینکه طراحی چگونه باشد تا بهترین جدایش صورت گیرد. مونی و سورکک [۳] روابطی نیمه تجربی برای طراحی انواع جداسازهای دوفازی افقی و قائم ارائه نمودند. اقای بویان‌گو و همکاران [۴] روشی برای انتخاب

(نه طراحی) جداساز دوفازی صنعتی ارائه کردند. در این روش، با استفاده از جدول جداسازهای استاندارد و چند فرمول ساده، جداساز مناسب انتخاب می‌شود که از مهم‌ترین کاستی این پژوهش عدم ارائه ابعاد استاندارد جداساز دوفازی می‌باشد. آرنولد و استوارت [۵] در کتاب خود، طراحی جداساز را به صورت تئوری و عملی ارائه کردند. طبق نتایج به دست آمده از طراحی جداساز دوفازی و مقایسه با ابعاد واقعی، بهترین روش برای طراحی ابعاد جداساز، روش آرنولد و استوارت می‌باشد. بنابراین این روش مبنای روش‌های طراحی جداساز دوفازی قرار گرفته است. اما یکی از اشکالات اساسی مدل‌های نیمه تجربی، استفاده از فرض‌های ساده شونده و در نظر نگرفتن عوامل واقعی است. در این مدل‌ها، فرض سقوط قطرات با سرعت ثابت، عدم بررسی حمل مجدد قطرات و ... باعث خطای محاسباتی در طراحی جداساز می‌شود. یکی دیگر از روش‌های طراحی جداساز، استفاده از مدل‌سازی جریان به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است. یایلا و همکارانش [۶] جریان سیال دوفازی درون دو هندسه متفاوت جداساز (ورودی سیال از کناره و از بالا) را با CFD شبیه‌سازی کرده و اثر مکان ورود سیال، فاصله بین ورودی و سرعت ورودی سیال را بر بازده جداسازی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که بیشینه بازده جداسازی در حالت ورودی در بالا و با کمترین سرعت ورودی و بیشترین فاصله صفحه منحرف‌کننده بررسی شده حاصل می‌شود. اما این شبیه‌سازی توانایی تشخیص مرز فازها و تخمین قطر قطرات فاز پراکنده را ندارد. در این پژوهش، اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی نیز انجام نشده است اما از نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده، سه بعدی بودن شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و تعیین قطر قطرات مایع در جریان گاز خروجی از جداساز می‌باشد. احمد و همکارانش [۷] دو جداساز پایلوت موجود با دو کیفیت پایین و بالای حجمی

کسر حجمی آب در دبی ورودی استفاده کرده و نتایج را با نتایج تجربی محققان پیشین که یک هندسه مشابه را به کار گرفته بودند مقایسه کردند. از نواقص این پژوهش می‌توان به دو بعدی بودن شبیه‌سازی و عدم بررسی توزیع اندازه ذرات اشاره کرد. تحقیقات انجام شده بر روی طراحی ابعاد جداساز در **جدول ۱** به‌طور مختصر ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است در پژوهش‌های انجام شده به‌صورت تئوری، نیمه تجربی و یا (CFD) برای طراحی جداساز دوفازی، یا به‌وسیله داده‌های تجربی اعتبارسنجی نشده‌اند و یا دارای فرض‌های ساده شونده و همچنین خطای زیادی نسبت به داده‌های تجربی بوده‌اند. نکته دیگر درخصوص روش دینامیک سیالات محاسباتی، نیاز به در اختیار داشتن سیستم‌های قوی رایانه‌ای است. لذا، یکی از راه‌کارهای مفید و سریع به منظور طراحی ابعاد جداسازهای دوفازی، استفاده از داده‌های تجربی و بهبود روش‌های نیمه تجربی موجود است.

گاز را با استفاده از CFD شبیه‌سازی کردند تا در جداساز اول، اثر دبی مایع (نفت و آب) و ارتفاع مانع سرریز و در جداساز دوم، اثر دبی ورودی را بر عملکرد جداساز بررسی کنند. در این پژوهش، یک مقدار متوسط برای قطر قطرات فاز پراکنده در نظر گرفته شد که تأثیر توزیع اندازه قطرات در شبیه‌سازی را کاملاً مورد چشم‌پوشی قرار می‌دهد. بازده جداسازی در این شبیه‌سازی‌ها با هر کدام از دو مدل مختلف در مقایسه با داده‌های تجربی تا ۳۰٪ خطا دارد. فرانک و همکارانش [۸] تلاش کردند تا با استفاده از شبیه‌سازی CFD جنبه‌های مهم برای بهینه‌سازی عملکرد جداساز دوفازی را شناسایی کنند. آن‌ها یک طراحی خاص را برای بررسی انتخاب کرده و بیشتر اصلاحات پیشنهادی را برای آن طراحی و به‌طور کیفی ارائه کردند. این پژوهش نیز فاقد اعتبارسنجی با داده‌های تجربی بود. آچاریا و کاسیمیرو [۹] از شبیه‌سازی‌های CFD به منظور تعیین دو پارامتر زمان ماند متوسط و توزیع زمان ماند به‌صورت توابعی از مقادیر مختلف

جدول ۱ تحقیقات انجام شده بر روی طراحی ابعاد جداساز

محقق	سال تحقیق	روش تحقیق	نقاط قوت	نقاط ضعف
سودرز و براون	۱۹۳۴	ارائه روابط تئوری	ارائه اولین روش تئوری طراحی جداساز	استفاده از فرض‌های ساده شونده در رابطه
چیلینگریان و همکاران	۱۹۸۷	محاسبه حجم جداساز بر مبنای دبی سیال	ارائه روش ساده تر برای محاسبه ابعاد جداساز	محاسبه ابعاد جداساز براساس حفظ دبی سیالات و عدم بررسی ابعاد بهینه در جداسازی
مونری و سورکک	۱۹۹۳	ارائه روابط نیمه‌تجربی	بهبود روابط تئوری و فرض‌های ساده شونده با استفاده از ضرایب مورد استفاده	عدم تطابق دقیق نتایج صنعتی با ضرایب ارائه شده
بویان‌گو و همکاران	۲۰۰۷	ارائه روش انتخاب جداساز	ارائه روش انتخاب جداساز با استفاده از تجارب صنعتی	عدم ارائه ابعاد استاندارد برای جداساز
آرنولد و استوارت	۲۰۱۴	ارائه روش نیمه‌تجربی بهبود یافته	بهبود ضرایب مورد استفاده و افزایش دقت طراحی	عدم تطابق ضرایب ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی موجود
یایلا و همکاران	۲۰۱۹	شبیه‌سازی CFD حرکت قطره مایع در جداساز	تعیین بیشینه بازدهی برای حالت‌های مختلف ورودی جداساز	عدم بررسی قطر قطره و عدم تشخیص مرز فازها
احمد و همکاران	۲۰۱۹	شبیه‌سازی CFD جریان دوفازی در جداساز	مقایسه بازدهی جداساز در نسبت‌های مختلف گاز به مایع	چشم‌پوشی از توزیع قطر قطرات - خطای بالا در مقایسه با داده‌های تجربی
فرانک و همکارانش	۲۰۱۹	شبیه‌سازی CFD جداساز	بررسی عوامل مؤثر بر بازدهی جداساز	عدم اعتبارسنجی با داده‌های تجربی
آچاریا و کاسیمیرو	۲۰۲۰	شبیه‌سازی CFD جداساز	بررسی تأثیر کسر حجمی آب در سیال ورودی بر زمان ماند متوسط و توزیع زمان ماند	دوبعدی بودن هندسی طراحی شده

بقای لازم را تأمین می‌کند تا گاز بتواند به آهستگی بالا رود و از بخش مایع خارج شود و به فاز گاز بپیوندد. همچنین، فضایی ایجاد می‌کند تا نوسانات جریان مایع را کنترل کند. پس از آن، مایع از نازل خروجی مایع، از پایین جداساز خارج می‌شود. کنترل‌گر ارتفاع، شیر خروجی مایع را تنظیم می‌کند. کنترل‌گر ارتفاع تغییرات سطح (ارتفاع) مایع را حس می‌کند و بنابر آن، شیر خروجی مایع را تنظیم می‌کند. گاز از بالای منحرف کننده ورودی، بالای مایع جریان می‌یابد. هم‌زمان که گاز در این بخش جریان می‌یابد، قطرات ریز مایع که درون گاز وارد شده بودند و منحرف کننده ورودی نتوانسته بود آنها را جدا کند، اکنون با نیروی گرانش از گاز جدا می‌شوند و به سطح گاز و مایع سقوط می‌کنند. مقداری از قطرات که قطر بسیار کوچکی دارند، نمی‌توانند به آسانی در بخش ته‌نشینی گرانشی جدا شوند. قبل از اینکه گاز از جداساز خارج شود، از میان مه‌گیر عبور می‌کند. در این بخش از اجزایی نظیر پره، توری‌های سیمی یا صفحات مورب استفاده می‌شود تا قطرات بسیار ریز مایع را به هم ملحق کرده و قبل از خروج به همراه گاز، آنها را جدا کند. کنترل‌گر فشار، فشار درون جداساز را ثابت نگه می‌دارد. کنترل‌گر فشار، تغییرات فشار درون جداساز را حس می‌کند و بنابراین سیگنالی می‌فرستد تا شیر کنترل‌گر فشار، باز یا بسته شود. با تنظیم دبی گاز به هنگام خروج از خروجی گاز جداساز، فشار درون جداساز ثابت نگه داشته می‌شود. جداسازهای افقی معمولاً در وضعیتی کار می‌کنند که تا نصفه پر از مایع هستند تا سطح تماس گاز و مایع حداکثر شود. اجزای مختلف جداساز افقی دوفازی در شکل ۱ نشان داده شده است.

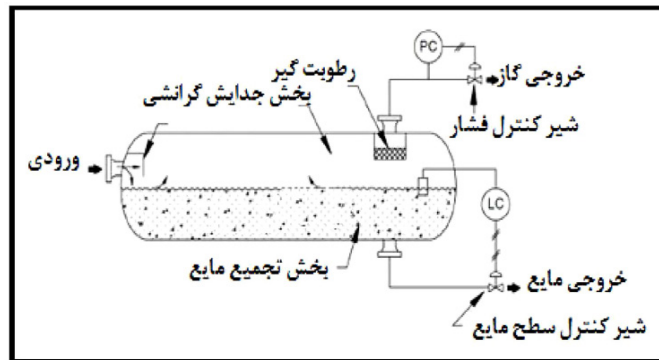
طراحی جداساز

طراحی جداسازها، به دو روش عمده صورت می‌گیرد. منظور از طراحی جداساز، تعیین قطر و طول آن و طراحی اجزای داخلی آن است.

در این مقاله سعی شده تا با استفاده از داده‌های تجربی دقیق و مقایسه با معتبرترین روش‌های نیمه تجربی موجود، ضرایب تصحیح بهینه برای دستیابی به پارامترهای مهم از جمله بیشینه قطر قطرات مایع و سرعت سقوط قطرات مایع که در نهایت به طراحی دقیق تر ابعاد بهینه جداساز می‌انجامد، ارائه شود. در نهایت با استفاده از روش تحلیل ابعادی که از روش‌های مهم و کاربردی به‌شمار می‌رود، نتایج آزمایشگاهی به نتایج صنعتی تبدیل شده و ابعاد بهینه جداساز صنعتی با توجه به خواص سیال تولیدی از چاه و با استفاده از ضرایب تصحیح ارائه شده، طراحی می‌شود.

انواع جداساز

جداسازها از یک منظر، به دو گروه کلی تقسیم می‌شوند؛ جداسازهای دوفازی و جداسازهای سه‌فازی. جداسازهای دوفازی، جریان دوفازی گاز-مایع (یا مایع-مایع) را به یک جریان گاز و یک جریان مایع (یا دو جریان مایع مجزا) تفکیک می‌کنند. جداسازهای سه‌فازی علاوه بر جدایش فاز مایع و گاز، جریان مایع را به دو فاز نفت و آب تفکیک می‌کنند. در این پژوهش، جداسازهای دوفازی مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین، جداسازها به لحاظ هندسه، به سه شکل افقی، قائم و کروی طراحی می‌شوند. فارغ از شکل آنها، همه جداسازهای دوفازی دارای چهار بخش اصلی هستند. این چهار بخش شامل بخش جدایش اولیه، بخش جدایش ثانویه یا جدایش گرانشی، بخش جمع مایع و بخش مه‌گیر یا بخش به هم آمیختن است [۹]. سیال زمانی که وارد جداساز می‌شود با منحرف کننده ورودی که به اصطلاح توزیع کننده ورودی نیز شناخته می‌شود، برخورد می‌کند و باعث تغییر ناگهانی در مومنتوم سیال می‌شود. اولین جدایش عمده مایع و گاز در منحرف کننده ورودی اتفاق می‌افتد. نیروی گرانش باعث می‌شود قطرات مایع درون جریان گاز، به پایین جداساز سقوط کنند؛ جایی که مایع آنجا انباشته می‌شود. این بخش جمع مایع، زمان



شکل ۱ توصیف اجزای جداساز دوفازی افقی

می‌شود. ابعاد جداساز، باید بتواند هر دو ظرفیت را تأمین کند.

قید ظرفیت گاز

اساس تعیین اندازه جداساز برای جدا شدن قطرات مایع از جریان گاز، به سرعت سقوط قطرات مایع بستگی دارد. هر قدر سرعت سقوط قطرات بیشتر باشد، جداساز با طول و قطر کوچکتری لازم است تا قطرات مایع از جریان گاز جدا شوند. از طرف دیگر، اندازه ذرات بر سرعت سقوط آنها تأثیر می‌گذارد. ذرات هر چه بزرگ‌تر باشند، سرعت سقوط بیشتری دارند. بنابراین تعیین اندازه قطرات و سرعت سقوط قطرات، در تعیین اندازه جداساز بسیار اهمیت دارد. این سرعت اولین بار توسط سودرز و براون [۸] با

$$V_t = \sqrt{\frac{2gd_p}{3C}} \times \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}} \quad (1)$$

رابطه نیمه تجربی زیر بیان شد:

سودرز و براون این رابطه را با برابر قرار دادن نیروهای بویانسی، وزن و نیروی مقاومت (نیروی درگ) به دست آوردند. اما از آنجا که درباره اندازه قطرات چیزی نمی‌دانستند، فقط اشاره کرده‌اند که: "متغیری نامعین است ولی احتمالاً با کشش سطحی مایع در ارتباط است. همین باعث شد که عبارت ظاهر شده در معادله سرعت حد را به صورت ضریب تجربی k در نظر بگیرند. در نهایت رابطه

$$K = \sqrt{\frac{2gd_p}{3c}} \quad (2)$$

سودرز و براون [۸] به صورت زیر ارائه شد:

طراحی به روش کلاسیک بر پایه تئوری سرعت حد (سرعت ثابت سقوط قطره) است. در این روش فرضیاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا بتوان بر پایه سرعت حد سقوط قطرات، طول و قطر جداساز محاسبه گردد. در روش کلاسیک طراحی اجزای داخلی مورد بحث قرار نمی‌گیرد. در نهایت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی با حل معادلات حاکم بر سیال برای یک جداساز با هندسه معلوم، عملکرد جداساز پیش‌بینی می‌شود. توجه شود که با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نمی‌توان جداساز را طراحی کرد بلکه می‌توان طراحی انجام شده را بهبود بخشید. همچنین برای طراحی اجزای داخلی، می‌توان از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده نمود. واضح است مزیت اصلی وجود پایلوت آزمایشگاهی، کنترل شرایط آزمایشگاهی و تغییر پارامترهای مؤثر عملیاتی بر عملکرد جداساز دوفازی صنعتی می‌باشد [۸۰].

روش‌های کلاسیک طراحی جداسازهای دوفازی

برای طراحی جداساز به روش کلاسیک، قید ظرفیت گاز و قید ظرفیت مایع باید برآورده شود. جداساز باید بتواند دبی مشخصی از گاز را در خود جای دهد به گونه‌ای که قطرات مایع فرصت سقوط داشته باشند. همچنین، جداساز باید حجمی برای مایع مهیا کند تا زمان ماند کافی را تأمین کند تا حباب‌های گاز از مایع خارج و فازهای گاز و مایع به تعادل برسند. بنابراین ابعاد جداساز، یک بار برای ظرفیت گاز و بار دیگر برای ظرفیت مایع طراحی

نظر گرفته می شود. برای محاسبه سرعت ظاهری گاز، کافی است دبی گاز در شرایط جداساز بر سطح مقطع گاز تقسیم شود.

در مدلی که آرنولد استوارت [۵] ارائه کردند: "یک قطره مایع از فاز گاز جدا خواهد شد، اگر پیش از رسیدن به خروجی گاز، خود را به سطح تماس مایع-گاز رسانده باشد، بنابراین، کافی است که مدت زمانی که طول می کشد قطره مسافت طول مؤثر جداساز را طی کند، کمتر یا مساوی مدت زمانی باشد که مسافت قائم را طی می کند. در این صورت است که می توان ادعا کرد قطره از فاز گاز جدا خواهد شد. بنابراین با برابر قرار دادن مدت زمان جابه جایی افقی با مدت زمان جابه جایی قائم، طول و قطر مناسب جداساز به دست می آید. منظور از طول مؤثر جداساز، فاصله ای است که قطرات مایع با سرعت حد سقوط می کنند.

$$t_L = \frac{L_{eff}}{120 \left(\frac{TZQ_g}{Pd^2} \right)} \quad (8)$$

$$t_{d/2} = \frac{\frac{d}{2}}{0.0119 * \left[\left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right) \frac{d_p}{C_D} \right]^{0.5}} \quad (9)$$

در نهایت با مساوی قرار دادن روابط ۸ و ۹، رابطه زیر حاصل می گردد.

$$d \times L_{eff} = 420 \frac{TZQ_g}{P} \sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_p}} \quad (10)$$

در این رابطه، متغیرهای سمت راست معادله معلوم هستند، در حالی که طول و قطر جداساز نامعلوم هستند. بنابراین از این رابطه یک پاسخ یکتا برای طول و قطر جداساز به دست نمی آید. به عبارت دیگر، مجموعه ای از طول و قطرها می توانند پاسخ مسأله باشند. ظاهر شدن عبارت فشار به علت تبدیل دبی حجمی گاز از شرایط جداساز به شرایط استاندارد است. حال آنکه ابتدا دبی حجمی گاز در شرایط جداساز اندازه گیری می شود و نیازی به تبدیل دبی حجمی گاز به شرایط استاندارد نیست.

که در آن k ضریب تجربی و تابعی از شرایط عملیاتی است و c ضریب درگ بی بعد است. آنها به این صورت توانستند متغیر اندازه قطره را از معادله حذف کنند. در نهایت رابطه سودرز و براون [۱] به صورت زیر ارائه شد:

$$V_t = K \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}} \quad (3)$$

آرنولد و استوارت [۵] نیز رابطه ای تئوری برای محاسبه مقدار k یافتند که با برابر قرار دادن برآیند نیروهای بویانسی، وزن و درگ به دست می آید.

$$K = \sqrt{\frac{4gd_p}{3C_D}} \quad (4)$$

که در آن C_D ضریب درگ (بی بعد) است و در واقع همان ضریب c در رابطه سودرز و براون [۱] است که مقدارش ۲ برابر شده است و ضریب رابطه K را تغییر داده است. به طور کلی، ضریب درگ C_D به صورت تابعی از عدد رینولدز چنین برآورد می شود:

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{Re} + 0.34 \quad (5)$$

که در آن، Re عدد رینولدز است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$Re = 0.0049 \frac{\rho_g d_p v_t}{\mu_g} \quad (6)$$

در نهایت آنها با قرار دادن مقدار شتاب گرانشی در رابطه ضریب k ، رابطه سرعت حد سقوط قطرات را به صورت زیر بیان کردند:

$$V_t = 0.0119 \left[\left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right) \frac{d_p}{C_D} \right]^{0.5} \quad (7)$$

برای محاسبه ضریب درگ باید از روش سعی و خطا استفاده شود.

طراحی ابعاد جداساز براساس قید ظرفیت گاز

آرنولد و استوارت [۵]، با ارائه یک مدل تئوری، جدایش فاز مایع از گاز را تحلیل کردند. در بخش جدایش گرانشی جداساز، قطرات مایع در فاز گاز پخش شده اند. سرعت این قطرات شامل دو مؤلفه افقی و قائم است، مؤلفه قائم همان سرعت حد است که نحوه محاسبه آن شرح داده شد و مؤلفه افقی سرعت قطرات، سرعت ظاهری فاز گاز در

داشت که طول به دست آمده از قید ظرفیت گاز و مایع، طول مؤثر جداسازی است. اما برای توزیع یکنواخت جریان، باید طول اصلی جداساز که با نام طول جوش تا جوش شناخته می‌شود، اندکی بزرگ‌تر از طول مؤثر آن باشد. رابطه زیر برای به دست آوردن طول جوش تا جوش استفاده می‌شود:

$$L_{ss} = \frac{4}{3} L_{eff} \quad (12)$$

مطالعات بسیاری درباره‌ی جداسازهای دوفازی و سه فازی قائم و افقی با نگاه ماکرو انجام شده است. در حالی که مطالعاتی که جزئیات را در ابعاد میکرو برای فرآیند جدایش واقعی بررسی کند، بسیار کم است. در واقع روش‌های سنتی متداول برای طراحی جداساز، غالباً به کمبود مدل ریاضی قابل استفاده برای تخمین سرعت‌های ته‌نشینی قطره منجر می‌شود. این امر سبب می‌شود طراحی محتاطانه‌تر و جداساز بسیار بزرگ‌تر از اندازه بهینه طراحی شود [۱۰]. در واقع در سال‌های اخیر به این نکته پی برده شده است که عملکرد واقعی جداساز ممکن است بسیار با آنچه که در روش‌های تئوری تصور می‌شود، تفاوت داشته باشد. علت آن الگوی واقعی جریان در داخل جداساز است که این امر به کمک دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین مدل‌سازی فیزیکی با استفاده از روش تحلیل ابعادی محقق شده است [۱۱].

تحلیل ابعادی و موارد استفاده از آن

روش تحلیل ابعادی، روشی ساده برای کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز در یک مسئله است. روش تحلیل ابعادی، بر مبنای اصل تشابه ابعادی، سعی می‌کند یک مسأله فیزیکی را تبدیل به مسأله‌ای متشکل از کمیت‌های بدون بعد کند. تحلیل ابعادی اگر درست انجام گیرد، از ارزش زیادی برخوردار است. اصل همگنی ابعادی می‌گوید دو طرف یک معادله، باید به لحاظ ابعاد (جرم، طول و زمان) یکسان باشند.

بنابراین برای طراحی فرآیند جداسازی کافی است دبی حجمی گاز در شرایط جداساز معلوم باشد و هیچ نیازی به دانستن فشار کاری جداساز نیست. البته باید توجه داشت که فشار بر ویژگی‌های گاز مانند چگالی و ویسکوزیته تأثیر می‌گذارد. دانستن این نکته که: "فشار کاری جداساز به خودی خود و به‌طور مستقل بر عملکرد جداساز تأثیرگذار نیست" بسیار با ارزش است. چون تأمین فشار کاری بالا در شرایط آزمایشگاهی، بسیار هزینه‌بر و پرخطر است. بنابراین می‌توان با هزینه کم و در شرایط ایمن، عملکرد جداساز را بررسی کرد.

قید ظرفیت مایع

اساس طراحی جداساز بر مبنای قید ظرفیت مایع، زمان ماند است. زمان ماند به معنای آن است که جریان مایع به‌طور متوسط چه مدت زمان در جداساز می‌ماند. هر چه مایع مدت زمان بیشتری در جداساز بماند، قطر و طول جداساز باید بزرگ‌تر شود. منابع مختلف دلایل متفاوتی را بر اهمیت زمان ماند ذکر کرده‌اند. برای جدایش حباب‌های گاز از مایع، به تعادل رسیدن دو فاز گاز و مایع و همچنین ملاحظات عملیاتی، لازم است مایع مدت زمانی در جداساز بماند. مقدار زمان ماند برحسب میزان سنگین یا سبک بودن نفت، دمای عملیاتی و نوع تجهیزاتی که پس از جداساز قرار گرفته است، تفاوت می‌کند. همچنین مشخص شد که تئوری واضحی برای جدایش حباب گاز از مایع ارائه نشده است اما برای جداسازهای دوفاز با اغلب کاربردها، زمان بقای بین ۳۰ s تا ۳ min کافی است. در صورت مشخص بودن زمان ماند مایع، ابعاد جداساز با توجه به قید ظرفیت مایع به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$d^2 \times L_{eff} = Q_r t_r \quad (11)$$

در نهایت با استفاده از قطر و طول به دست آمده از رابطه قید ظرفیت گاز و رابطه قید ظرفیت مایع، قطر و طول بزرگ‌تر با هدف اطمینان از درستی و قطعیت جداسازی انتخاب خواهند شد. باید توجه

$$\Pi_1 = \frac{g \Delta \rho d_p^5}{Q^2 \rho g} \quad (14)$$

$$\Pi_2 = \frac{\mu_g d_p}{Q \rho g} \quad (15)$$

$$\Pi_3 = \frac{d_p}{d} \quad (16)$$

$$\Pi_4 = \frac{g \Delta \rho d_p^4 L}{Q \mu_g d} \quad (17)$$

بنابراین کیفیت عملکرد جداساز دوفازی، در جدایش قطرات مایع از فاز گاز به صورت تابعی از چهار گروه بی بعد به دست آمده است:

$$\eta = f\left(\frac{g \Delta \rho d_p^5}{Q^2 \rho_g}, \frac{\mu_g d_p}{Q \rho_g}, \frac{d_p}{d}, \frac{g \Delta \rho d_p^4 L}{Q \mu_g d}\right) \quad (18)$$

مهم‌ترین مسأله در طراحی بر پایه داده‌های آزمایشگاهی، نحوه تعمیم نتایج از نمونه آزمایشگاهی به نمونه صنعتی است. به عبارت دیگر، چه تضمینی وجود دارد که برای جداساز با ابعاد بزرگ‌تر نتایج مشابه نتایج آزمایشگاهی به دست آید؟ پاسخ این است اگر بین جسم مدل و جسم اصلی تشابه وجود داشته باشد، نتایج به دست آمده برای مدل، قابل تعمیم به جسم اصلی است. تشابه باید در سه جهت هندسی، سینماتیکی و دینامیکی برقرار باشد. با توجه به اینکه تساوی اعداد بدون بعد بین مدل و جسم اصلی به معنای وجود تشابه دینامیکی است، می‌توان نتیجه گرفت که تساوی اعداد بدون بعد بین مدل و جسم اصلی در بطن خود انواع دیگر تشابه را نیز به همراه دارد.

روشن طراحی جداساز دوفازی صنعتی بر پایه ابعاد جداساز آزمایشگاهی

طول و قطر جداساز آزمایشگاهی با توجه به در اختیار داشتن شرایط آزمایش، توسط روابط نیمه تجربی آرنولد و استوارت [۵] و به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی تعیین گردید. ابعاد و تصویر جداساز آزمایشگاهی ساخته شده در دانشگاه صنعتی امیرکبیر به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

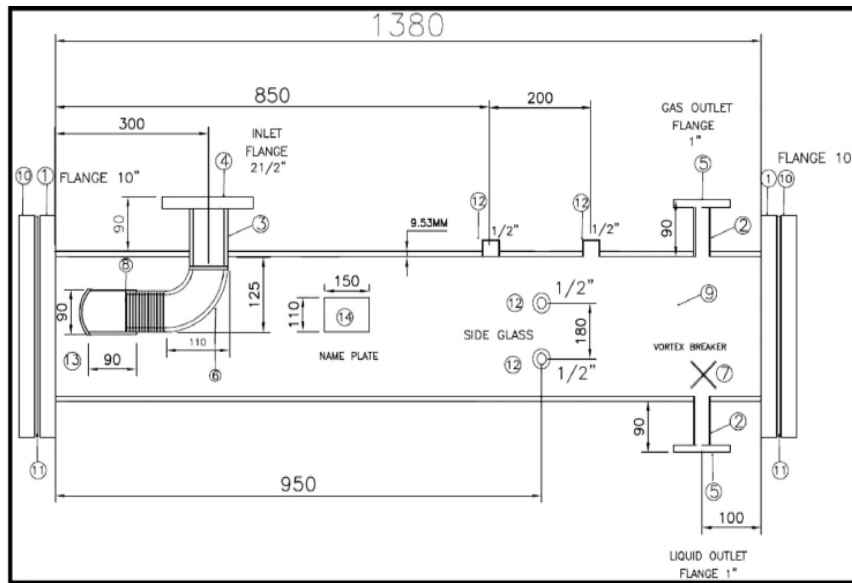
در روش تحلیل ابعادی هدف آن است که متغیرهای مؤثر بر مسأله را به صورت گروه‌های بی بعد بیان کرد. قضیه پی باکینگهام می‌گوید: "اگر تابعی با تعداد n متغیر به طور ابعادی همگن باشد، آن را می‌توان به صورت رابطه ساده‌ای بین " $n - m$ " گروه بی بعد مستقل در آورد که m کمترین تعداد بعدهای مرجع لازم برای بیان متغیرها است. با استفاده از روش تحلیل ابعادی، تعداد پارامترهای مؤثر بر مسأله کاهش داده می‌شود تا بتوان با متغیرهای کمتر و بی بعد، مسأله را تبیین نمود. سپس رابطه بین اعداد بی بعد با درجه تفکیک جداساز به دست می‌آید. در نهایت بر اساس اصل تشابه، ابعاد آزمایشگاهی به ابعاد جداسازهای صنعتی تعمیم داده می‌شود [۲۰].

پارامترهای مؤثر بر کیفیت جدایش مایع از گاز

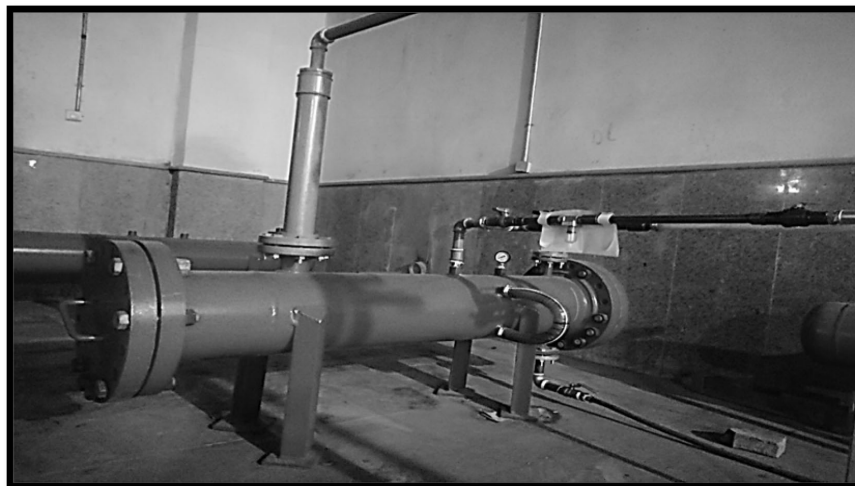
پارامترهای متعددی بر درجه تفکیک جداساز در خروجی گاز مؤثر هستند. پارامترهای مؤثر بر جداسازی عبارتند از:

$$\eta = f(Q, \rho_g, \mu_g, d, L, d_p, g \Delta \rho) \quad (13)$$

لازم به ذکر است که در پارامترهای فوق، فشار و دما به عنوان متغیرهای مؤثر بر مسأله آورده نشده‌اند. دلیل این امر آن است که فشار و دما به خودی خود بر پدیده جدایش فازها تأثیرگذار نیستند. بلکه فشار و دما بر خواص و دبی حجمی گاز در شرایط جداساز تأثیر می‌گذارند. بنابراین وقتی دبی حجمی گاز در شرایط جداساز و خواص گاز یعنی چگالی و ویسکوزیته جزء متغیرها ذکر شده باشند، لازم نیست فشار و دما را به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفت. از طرفی، به دلیل جدایش سریع حباب گاز از مایع نسبت به سقوط قطره مایع در گاز، قید ظرفیت گاز می‌تواند قید ظرفیت مایع را نیز پوشش دهد. به همین دلیل از دبی گاز به عنوان پارامتر مؤثر در جداسازی استفاده شده است. با این کار تعداد متغیرهای بی بعد کاهش می‌یابد و تحلیل نتایج آسان‌تر می‌گردد. در نهایت، گروه‌های بی بعد برای مسأله جداسازی فاز مایع از جریان گاز در جداساز دوفازی به صورت زیر به دست می‌آید:



شکل ۲ نقشه جداساز آزمایشگاهی ساخته شده (دانشگاه امیرکبیر)



شکل ۳ جداساز آزمایشگاهی ساخته شده در دانشگاه امیرکبیر

فرآیند جداسازی آزمایشگاهی

جریان دوفازی گاز-مایع، وارد جداساز آزمایشگاهی می‌شود تا فرآیند جداسازی دو فاز انجام شود. یعنی انتظار می‌رود جریان دوفازی در ورودی جداساز، هنگام خروج از جداساز، به دو جریان تفکیک شده گاز و مایع تبدیل شده باشد. در قسمت خروجی گاز، مایعی که به همراه گاز از نازل خروجی خارج شده‌اند، جمع‌آوری شده و گاز خالص بدون هیچ مایعی از فیلتر خارج می‌شود.

بنابراین، برای تعیین طول و قطر جداساز صنعتی، کافی است که گروه‌های بی‌بعد جداساز صنعتی را برابر گروه‌های بی‌بعد برای جداساز آزمایشگاهی قرار دهیم. در این صورت به سادگی مقادیر طول و قطر برای جداساز صنعتی محاسبه می‌شود. برای اینکه فرآیند جداسازی در نمونه کوچک در آزمایشگاه شبیه‌سازی شود، ابتدا باید جریان دوفازی گاز-مایع وارد جداساز آزمایشگاهی شود و پس از آنکه شرایط آزمایش پایدار شد، باید پارامترهای مورد نظر اندازه‌گیری شوند.

سیالات و دبی سیالات در جدول ۲ بیان شده است. با توجه به نتایج به دست آمده برای قطرات جذب شده در فیلتر، نمودار ضریب تصحیح (α) براساس قطر قطره در شکل ۵ ارائه شده است. در نهایت با در نظر گرفتن نمودار ارائه شده، رابطه ۱۹ برای ضریب تصحیح رابطه آرنولد-استوارت به منظور اصلاح نتایج طراحی حاصل از این روش، تعیین شد. ۸۰۰

$$\alpha = \left(\frac{d_p}{98} \right)^{1.67} \quad (19)$$

رابطه بهبود یافته آرنولد-استوارت به شکل زیر تغییر یافت:

$$d \times L_{eff} = 420(\alpha) \frac{TZQ_g}{P} \sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_p}} \quad (20)$$

همان طور که بیان شد در این مطالعه فرآیند جداسازی دو فاز مایع-گاز در شرایط مختلف عملیاتی مورد بررسی قرار گرفت و میزان خطای نتایج واقعی نسبت به روش طراحی کلاسیک تعیین شد. در مورد بررسی خطای روش‌های طراحی کلاسیک، پوراحمدی لاله [۱۰] از طریق مقایسه بازدهی جداساز طراحی شده و جداساز واقعی، به خطای حدود ۱۵٪ طراحی کلاسیک نسبت به نتایج واقعی پی برد. همچنین، غفارخواه [۱۴] نیز در مطالعات خود از طریق شبیه‌سازی فرآیند به روش، بازدهی جداساز طراحی شده را مورد بررسی قرار داد.

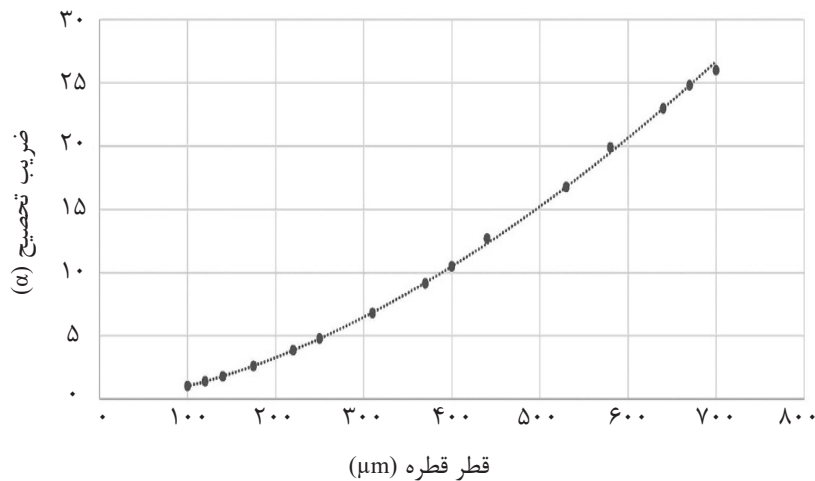
هر چقدر مایع کمتری در فیلتر جمع‌آوری شود، نشان‌دهنده عملکرد بهتر جداساز است. با استفاده از قطره‌گیر و فیلتر نصب شده در خروجی گاز جداساز دوفازی گاز-مایع، قطر قطرات مایع و کسر حجمی مایع در جریان گاز خروجی از جداساز دوفازی گاز-مایع تعیین می‌شوند. چرخه جریان سیال در واحد جداساز آزمایشگاهی در شکل ۴ نشان داده شده است [۲۱].

تفسیر نتایج تجربی

با استفاده از رابطه ۱۰ طول مؤثر جداساز مایع-گاز برای حالتی که سطح مایع برابر با ۵۰٪ ارتفاع کل جداساز باشد، محاسبه شد. لازم به ذکر است که برای اندازه‌گیری قطر قطره، ابتدا فیلتر شفاف برای به دام انداختن قطره استفاده شد و سپس با استفاده از دوربین عکس‌برداری از آن در کنار یک خط کش عکس گرفته شد. در نهایت با کمک نرم‌افزار رایانه عکس‌ها بزرگ‌نمایی شده و اندازه دقیق قطر قطره با کمک درجه‌بندی خط کش به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده از جداساز آزمایشگاهی، ابعاد حاصل از طراحی به روش آرنولد-استوارت با ابعاد واقعی مقایسه شده که نتیجه آن در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین شرایط انجام هر آزمایش شامل فشار، دما، چگالی

جدول ۲ نتایج آزمایشگاهی و نتایج طراحی رابطه آرنولد-استوارت

ضریب تصحیح (α)	طول جداساز تئوری (mm)	طول جداساز حقیقی (mm)	قطر قطره (μm)	دبی گاز (MMscfd)	ضریب تصحیح (Z)	چگالی مایع (lb/ft^3)	چگالی گاز (lb/ft^3)	فشار (pa)	دما ($^{\circ}\text{R}$)
۱/۰۵	۸۵۵	۹۰۰	۱۰۰	۰/۱۳۵	۰/۹۸	۶۲/۳	۰/۰۷	۱۰۳۴۲۱	۵۳۸
۱/۸	۵۰۰	۹۰۰	۱۴۰	۰/۱۸۶	۰/۹۹	۶۲/۳	۰/۰۷	۱۳۷۸۹۵	۵۳۸
۲/۶۲	۳۴۳	۹۰۰	۱۷۵	۰/۱۳۷۶	۰/۹۸	۶۲/۳	۰/۰۷	۱۰۳۴۲۱	۵۳۸
۳/۸۷	۱۱۶/۳	۴۵۰	۲۲۰	۰/۰۶۵	۰/۹۸	۶۲/۳	۰/۰۷	۱۰۳۴۲۱	۵۳۸
۱۲/۷	۳۵/۴۳	۴۵۰	۴۵۰	۰/۰۶۲۴	۰/۹۹	۶۲/۳	۰/۰۷	۱۳۷۸۹۵	۵۳۸
۲۶/۰۱	۱۷/۳	۴۵۰	۷۰۰	۰/۰۳۵	۰/۹۸	۶۲/۳	۰/۰۷	۱۰۳۴۲۱	۵۳۸



شکل ۵ نمودار تغییرات ضریب تصحیح (α) براساس قطر قطره

$$d = 1.90(m)$$

بنابراین با استفاده از تساوی بالا، قطر جداساز صنعتی برابر $1/90$ m خواهد بود. در مرحله بعد با استفاده از رابطه بین دبی گاز و نسبت لاغری، طول مناسب برای جداساز صنعتی انتخاب می‌شود.

$$\frac{9.8\left(\frac{m}{s^2}\right) \times 997.6\left(\frac{Kg}{m^3}\right) \times 0.0001^4(m) \times 0.88(m)}{0.02586\left(\frac{m^3}{s}\right) \times 0.0018\left(\frac{Kg}{m \cdot s}\right) \times 0.254(m)} =$$

$$\frac{9.8\left(\frac{m}{s^2}\right) \times 528.6\left(\frac{Kg}{m^3}\right) \times 0.00075^4(m) \times L(m)}{37.216\left(\frac{m^3}{s}\right) \times 0.0016\left(\frac{Kg}{m \cdot s}\right) \times d(m)}$$

$$\Pi_4 = \frac{g \Delta \rho d_p^4 L}{Q \mu_g d}$$

$$\frac{L}{d} = 2.64 \rightarrow L_{eff} = 5.016(m) \rightarrow L_{ss} = 5.17(m)$$

به دلیل حساسیت بیشتر طراحی جداساز به قید ظرفیت گاز نسبت به قید ظرفیت مایع، تعیین طول لازم برای قید ظرفیت گاز، طول لازم برای قید ظرفیت مایع هم پوشش داده می‌شود. با استفاده از تساوی بالا، طول مناسب برای جداساز صنعتی $5/016$ m می‌باشد. این عدد بیانگر طول مؤثر برای جداسازی است، اما طبق رابطه 12 طول جوش تا جوش این جداساز برابر $5/17$ m خواهد بود.

اما در هیچ‌یک از این مطالعات، ضریب تصحیح خاصی به منظور اصلاح رابطه کلاسیک و کاهش خطای طراحی ارائه نشده و تنها به بررسی میزان خطای طراحی اکتفا شده است. بنابراین می‌توان گفت که در پژوهش انجام شده، با استفاده از نتایج تجربی دقیق و ترسیم آن (شکل ۵)، برای اولین بار ضریب تصحیح مناسبی برای رابطه آرنولد-استوارت در طراحی جداساز دوفازی ارائه شده است.

طراحی جداساز صنعتی

برای طراحی جداساز صنعتی باید شرایط میدانی جریان دوفاز را در اختیار داشته باشیم. به همین دلیل با استفاده از اطلاعات جریان تولیدی یکی از چاه‌های میدان پارس جنوبی، جداساز مناسب برای این چاه طراحی شد. اطلاعات سیال تولیدی از چاه و همچنین ابعاد جداساز صنعتی مورد استفاده در سرچاه به ترتیب در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. با استفاده از اطلاعات سیال تولیدی از چاه، ابعاد بهینه جداساز با استفاده از روش مذکور، طراحی شده و در نهایت با ابعاد جداساز مورد استفاده در صنعت، مقایسه می‌شود. حال با استفاده از گروه‌های بی‌بعد مربوط به طول و قطر، طول و قطر جداساز صنعتی برای جداسازی قطره‌های بزرگتر از $750 \mu m$ به دست آمد.

$$\Pi_3 = \frac{d_p}{d} \rightarrow \frac{0.0001(m)}{0.254(m)} = \frac{0.00075(m)}{d(m)} \rightarrow$$

جدول ۳ مشخصات سیال تولیدی یکی از چاه‌های میدان پارس جنوبی

دبی گاز (m ³ /s)	چگالی گاز (kg/m ³)	چگالی مایع (kg/m ³)	ویسکوزیته گاز (Pa.s)	فشار (Pa)	دما (°C)
۳۷/۲۱۶	۹۹	۶۲۸	۰/۰۰۰۰۱۶	۱۲۵۰۰۱۹۴	۲۰۳

جدول ۴ مشخصات جداساز صنعتی مورد استفاده در یکی از چاه‌های میدان پارس جنوبی

طول جداساز (mm)	قطر داخلی جداساز (mm)
۵۰۰۰	۱۸۵۰

نتیجه‌گیری

با بررسی تاریخچه روش‌های طراحی جداساز دوفازی، مشاهده شد که روش‌های کلاسیک می‌تواند به‌عنوان روش اولیه طراحی ابعاد جداساز دوفازی به‌کار گرفته شود. اما به‌دلیل حساسیت عملیات در فاز صنعتی، دقت ابعاد طراحی شده باید بسیار بالا باشد. از طرفی با توجه به ریسک‌ها و هزینه‌های عملیاتی میدانی، شرایط مورد نظر باید در ابعاد آزمایشگاهی بررسی شود تا طراحی‌های لازم انجام شود و روش تحلیل ابعادی ابزار مناسبی برای تبدیل نتایج آزمایشگاهی به نتایج صنعتی و بالعکس خواهد بود. بنابراین در این تحقیق ابتدا جداساز آزمایشگاهی ساخته شد و با استفاده از نتایج حاصل شده از جداساز آزمایشگاهی، رابطه آرنولد-استوارت با تعیین ضریب تصحیح (α) اصلاح شد. همچنین در ادامه برای بررسی کارایی جداساز آزمایشگاهی و دقت روش تحلیل ابعادی، ابعاد دقیق جداساز دوفازی صنعتی برای شرایط واقعی یکی از چاه‌های میدان پارس جنوبی با استفاده از روش تحلیل ابعادی و به‌کمک نتایج آزمایشگاهی موجود محاسبه شد. با توجه به ابعاد به‌دست‌آمده، جداساز دوفازی صنعتی برای جداسازی قطرات مایع بزرگتر از $750 \mu\text{m}$ از فاز گاز در شرایط میدانی، باید دارای قطر داخلی $1/90 \text{ m}$ و طول $5/17 \text{ m}$ باشد. همچنین با توجه به اطلاعات موجود از ابعاد جداساز دوفازی مورد استفاده در همین چاه، خطای ابعاد جداساز

طبق اطلاعات موجود، طول جوش تا جوش جداساز مورد استفاده در صنعت با مشخصات بیان شده برای سیال خروجی از چاه، 5 m است. بنابراین، طول و قطر طراحی شده نسبت به‌حالت واقعی، دارای خطای کمتر از 4% است.

لازم به ذکر است اعتبارسنجی روش طراحی بهبودیافته که در مقاله ارائه شد، با استفاده از نتایج تجربی آزمایشگاهی در شرایط مختلف عملیاتی انجام شد. همچنین به‌دلیل مشخص بودن ابعاد و شرایط عملیاتی جداساز مورد استفاده در صنعت، ابعاد جداساز طراحی شده با استفاده از روش تحلیل ابعادی با ابعاد جداساز مورد استفاده در صنعت مقایسه شد و عملکرد روش ارائه‌شده مورد بررسی و اعتبارسنجی قرار گرفت. از آنجایی‌که جداساز مورد استفاده در صنعت بازدهی قابل قبولی داشته و از نظر طراحی مورد تأیید صنعت بوده است، لذا این جداساز به‌عنوان نمونه قابل قبول برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. البته در صورت مشخص نبودن اطلاعات جداساز مورد استفاده در صنعت، یکی از روش‌های اعتبارسنجی برای بررسی عملکرد جداساز طراحی شده، استفاده از شبیه‌سازی CFD به منظور بررسی دقیق رفتار سیالات در جداساز است. بنابراین با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی CFD که درستی عملکرد آن با استفاده از نتایج واقعی صحت‌سنجی شده باشد نیز می‌توان عملکرد جداسازهای مختلف طراحی شده را به‌طور مناسب پیش‌بینی کرد و مورد بررسی قرار داد.

Q_l : دبی حجمی مایع (m^3/h)	طراحی شده نسبت به نمونه واقعی کمتر از ۰.۴ است. همان طور که مشاهده می شود با استفاده از اصل تشابه و همچنین با کمک روش تحلیل ابعادی، امکان طراحی دقیق ابعاد جداسازهای دوفازی صنعتی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی با خطای بسیار کم وجود دارد. بنابراین با ساخت جداساز دوفازی آزمایشگاهی و به کمک روش های معرفی شده، هزینه های عملیاتی، زمان انجام آزمایش و ریسک های عملیاتی به صورت چشم گیری کاهش یافته و در نتیجه ابعاد جداسازهای دوفازی صنعتی از طریق در اختیار داشتن نتایج آزمایشگاهی، با خطای بسیار کم قابل طراحی است. همچنین در صورت نبود اطلاعات صنعتی به منظور اعتبارسنجی روش طراحی، با استفاده از یک مدل CFD تأیید شده می توان بازدهی جداسازهای صنعتی مورد طراحی را به طور قابل ملاحظه ای پیش بینی کرد.
d : قطر جداساز (M)	
L : طول (m)	
C : ضریب پسا -	
K : ضریب تجربی (m/s)	
ρ_l : چگالی مایع (kg/m^3)	
ρ_g : چگالی گاز (kg/m^3)	
P : فشار (Pa)	
T : دما (C)	
d_p : قطر قطره (M)	
Z : ضریب تراکم پذیری گاز -	
v_l : سرعت حد سقوط قطره (m/s)	
v_g : سرعت ظاهری گاز (m/s)	
μ : ویسکوزیته (pa.s)	
g : شتاب گرانش (m/s^2)	
R_e : عدد رینولدز -	
A : سطح مقطع (m^2)	
T : زمان (S)	
I_g : درجه تفکیک جداساز -	
	علائم و نشانه ها
	Q_g : دبی حجمی گاز (m^3/h)

مراجع

- [1]. Souders M, Brown G G (1934) Design of fractionating columns I. Entrainment and capacity. Industrial and Engineering Chemistry, 26, 1: 98-103.
- [2]. Chilingarian G V, Robertson J O, Kumar S (1987) Surface operations in petroleum production, I. Elsevier.
- [3]. Monnery W D, Svrcek W Y (1994) Successfully specify three-phase separators, Chemical Engineering Progress, 90: 29-29.
- [4]. Muther T, Khan M J, Chachar M H, Aziz H (2020) A Study on designing appropriate hydraulic fracturing treatment with proper material selection and optimized fracture half-length in tight multilayered formation sequence, SN Applied Sciences, 2, 5: 1-12.
- [5]. Stewart M (2014) Surface production operations, Design of Gas-Handling Systems and Facilities, Gulf Professional Publishing, 2.
- [6]. Yayla S E D A T, Kamal K, Bayraktar S (2019) Numerical analysis of a two-phase flow (oil and gas) in a horizontal separator used in petroleum projects, Journal of Applied Fluid Mechanics, 12, 4: 1037-1045.
- [7]. Ahmed T, Russell P A, Hamad F, Gooneratne S (2019) Experimental analysis and computational-fluid-dynamics modeling of pilot-scale three-phase separators, SPE Production and Operations, 34, 04: 805-819.
- [8]. Frank M, Kamenicky R, Drikakis D, Thomas L, Ledin H, Wood T (2019) Multiphase flow effects in a horizontal oil and gas separator, Energies 12, 11: 2116.
- [9]. Acharya T, Casimiro L (2020) Evaluation of flow characteristics in an onshore horizontal separator using computational fluid dynamics, Journal of Ocean Engineering and Science, 5, 3: 261-268.
- [10]. Laleh A P, Svrcek W Y, Monnery W D (2012) Design and CFD studies of multiphase separators—a review, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 90, 6: 1547-1561.
- [11]. Mokhatab S, Poe W A (2012) Handbook of natural gas transmission and processing, Gulf Professional publishing.
- [12]. Arnold K, Stewart M (2008) Surface production operations: Ken Arnold, Maurice Stewart, design of oil handling systems and facilities, Surface Production Operations: Design of Oil Handling Systems and Facilities, Elsevier.

- [13]. Specification A (2009) 12J. Specification for Oil and Gas Separators.
- [14]. Ghaffarkhah A, Shahrabi M A, Moraveji M K, Eslami H (2017) Application of CFD for designing conventional three phase oilfield separator, Egyptian Journal of Petroleum, 26, 2: 413-420.
- [15]. Ghaffarkhah A, Dijvejin Z A, Shahrabi M A, Moraveji M K, Mostofi M (2019) Coupling of CFD and semiempirical methods for designing three-phase condensate separator: case study and experimental validation, Journal Of Petroleum Exploration and Production Technology, 9, 1: 353-382.
- [16]. Oshinowo L, Vilagines R (2019) Verification of a CFD-population balance model for crude oil separation efficiency in a three-phase separator—effect of emulsion rheology and droplet size distribution, SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Society of Petroleum Engineers.
- [17]. Fadaei M E H D I, Ameli F, Hashemabadi S H (2019) Experimental study and CFD Simulation of Two-phase Flow Measurement Using Orifice Flow Meter, Petroleum Research, 29, (10800843): 85-96.
- [18]. Yeoh, G. H. and J. Tu (2019). Computational techniques for multiphase flows, Butterworth-Heinemann.

[۱۹] کاظمی م. ص.، (۱۳۹۱) طراحی جداساز سه فاز و مقایسه نتایج با نمونه موجود در صنعت نفت ایران، پایان نامه کارشناسی، دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

[۲۰] کاظمی م. ص.، (۱۳۹۳) طراحی مدل آزمایشگاهی جداساز مایع-گاز، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

[۲۱] سلمانی سیاح ع.، (۱۳۹۷) طراحی تجهیزات طرح پایلوت آزمایشگاهی جداساز، پایان نامه کارشناسی، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.



Introducing Modified Separator Design Model and Industrial Separator Design Using the Dimensional Analysis

Ali Salmani Sayah¹, Yousef Rafieci¹, Mohammad Javad Ameri^{1*}, Mehdi Fadaei¹, Keyvan Ghorbanpour¹ and Sadeq Adnan²

1. Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2. Department of Petroleum Engineering, University of Kerbala, Iraq

ameri@aut.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2021.4272.2932

Received: June/26/2020

Accepted: April/18/2021

Introduction

Usually, the fluid produced from the wellhead is a complex mixture of hydrocarbon compounds, each of which has its own physical properties. Therefore, the standard design of industrial multiphase separators that have the highest operational efficiency of separation is one of the challenges in the field of exploitation of oil and gas fields. The first relations of multiphase separator design theory were proposed by Soders and Brown [1]. The apparent velocity of the gas was calculated using the equations presented by Soders and Brown [1]. Other researchers have taken advantage of this by changing the quasi-experimental relationship proposed by Soders and Brown [1]. In 1987, Chilingarian et al [2] proposed a method for designing multiphase separators that was mostly experimental and operational. Their method was based on the principle of what is the volume of the separator to be able to accommodate the flow of gas and liquid, not the design to be the best separation. In 1993, Monnery and Svrca [3] introduced quasi-experimental relationships for the design of horizontal and vertical multiphase separators. In 2007, Mr. Boyango et al [4] proposed a way to select (rather than design) an industrial multiphase separator. In this method, using a table of standard separators and a few simple formulas, the appropriate separator is selected, which is one of the most important shortcomings of this study is the lack of standard dimensions of multiphase separators. In 2014, Arnold and Stewart [5] in their book, presented the separation design in theory

and practice. According to the results obtained from multiphase separator design and comparison with real dimensions, the best method for separator dimension design is Arnold and Stewart method [5].

Materials and Methods

Separator Design

Separator design means determining its diameter and length and designing its internal components. The following equation is presented to determine the dimensions of the separator based on the simplified assumption of droplet fall at a constant velocity.

$$d \times L_{eff} = 420 \frac{TZQ_g}{P} \sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_p}} \quad (1)$$

The following equation should be used to design a separator based on the liquid capacity constraint.

$$d^2 \times L_{eff} = Q_l t_r \quad (2)$$

Dimensional Analysis

The method of dimensional analysis, based on the principle of dimensional similarity, tries to turn a physical problem into a problem consisting of dimensionless committees. Using the dimensional analysis method, the number of parameters affecting the problem is reduced so that the problem can be explained with fewer and dimensionless variables. The parameters affecting the separation are:

$$\eta = f(Q, \rho_g, \mu_g, d, L, d_p, g \Delta \rho) \quad (3)$$

Finally, dimensionless groups for the problem of separating the liquid phase from the gas flow in a two-

phase separator are obtained and have been shown in Table 1:

Table 1 dimensionless numbers.

$\Pi_1 = \frac{g\Delta\rho d_p^5}{Q^2\rho g}$	$\Pi_2 = \frac{\mu_g d_p}{Q\rho g}$	$\Pi_3 = \frac{d_p}{d}$	$\Pi_4 = \frac{g\Delta\rho d_p^4 L}{Q\mu_g d}$
---	-------------------------------------	-------------------------	--

Interpretation of Experimental Results

According to the results obtained from the laboratory separator, the dimensions obtained by the Arnold-Stewart method are compared with the actual dimensions, the result of which is shown in Table 2.

Results and Discussions

Correction Coefficient of Design Method

According to the results obtained for the adsorbed droplets in the filter, the correction factor diagram (α) based on the droplet diameter is presented in Table 2. Also the trend of correction factor (α) is illustrated in Figure 1:

Table 2 Correction factor vs droplet diameter

d_p (micron)	L_{eff} (real) (mm)	L_{eff} (desined) (mm)	Correction factor(α)
129	900	552	1.63
138	900	511	1.76
175	900	344.8	2.61
260	900	176.1	5.11
320	900	124.6	7.22
450	900	70.4	12.78

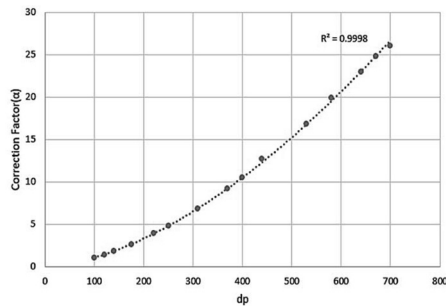


Fig. 1 Correction factor vs droplet diameter.

Finally, considering the presented diagram, the following equation was determined for the correction coefficient of the Arnold-Stewart relation in order to correct the design results obtained from this method.

$$\alpha = \left(\frac{d_p}{98}\right)^{1.67} \tag{4}$$

The improved Arnold-Stewart equation was changed as follows:

$$d \times L_{eff} = 420(\alpha) \frac{TZQ_g}{P} \sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g}\right) \frac{C_D}{d_p}} \tag{5}$$

It should be noted that the length obtained from the gas and liquid capacity constraint is the effective separation length. But for uniform flow distribution,

the main length of the separator, known as the weld-to-weld length, must be slightly larger than its effective length. The following equation is used to obtain the weld to weld length:

$$L_{ss} = \frac{4}{3} L_{eff} \tag{6}$$

Industrial Separator Design

To design an industrial separator, we must have the field conditions of two-phase current. For this reason, using the production flow information of one of the wells in South Pars field which is presented in Table 3, a suitable separator was designed for this well.

Table 3 operational conditions.

T(C)	P(Pa)	μ_g (Pa.s)	ρ_L	ρ_g	Q_g
203	12500194	0.000016	628	99	37.216

Using dimensional groups related to length and diameter, the length and diameter of the industrial separator for separating droplets larger than 750 μ m were obtained.

$$\Pi_4 = \frac{d_p}{d} \rightarrow \frac{0.0001(m)}{0.254(m)} = \frac{0.00075(m)}{d} \rightarrow d = 1.90(m) \tag{6}$$

Therefore, using the above equation, the diameter of the industrial separator will be 1.90(m). In the next step, using the relationship between gas-flow and slenderness ratio, the appropriate length for the industrial separator is selected.

$$\Pi_4 = \frac{g\Delta\rho d_p^4 L}{Q\mu_g d} \rightarrow \frac{L}{d} = 2.64 \rightarrow L_{eff} = 5.016(m) \rightarrow L_{ss} = 5.17(m) \tag{7}$$

According to the available information, the length of the weld to the separator used in the industry with the stated specifications for the fluid leaving the well is 5 meters. Therefore, the designed length and diameter have an error of less than 4 percent compared to the real case.

Conclusions

Examining the history of classical methods of industrial multiphase separator design, it was found that the classical method can be used as the initial design of the separator. Using the results of the laboratory separator test, the modified Arnold-Stewart relationship with the correction factor was presented. Also, using the properties of the fluid produced in the field, the necessary dimensions for the industrial separator were presented by the dimensional analysis method. According to the available information on the dimensions of the separator used in the industry, the design error is less than 4 percent. As can be seen, using the principle of similarity and also with the help of dimensional analysis method, it is possible to properly design the dimensions of industrial separators for oil and gas fields with very low error.

References

1. Souders M, Brown G G (1934) Design of fractionating columns I. Entrainment and capacity, *Industrial and Engineering Chemistry*, 26, 1: 98-103.
2. Chilingarian G V, Robertson J O, Kumar S (1987) *surface operations in petroleum production I.*, Elsevier.
3. Monnery W D, Svrcek W Y (1994) Successfully specify three-phase separators, *Chemical Engineering Progress*, 90, 29-29.
4. Guo Boyun Lyons, William C, Ghalambor A (2007) *petroleum production engineering.* s.l.Elsevier Science and Technology Books.
5. Stewart M (2014) *Surface Production Operations: Vol 2: Design of Gas-Handling Systems and Facilities*, Gulf Professional Publishing, 2.