

## ارائه روشی نوین برای طراحی جداساز دوفازی گاز و مایع، بر پایه‌ی شگرد تحلیل ابعادی

محمد صادق کاظمی<sup>۱</sup>، محمد جواد عامری شهرابی<sup>۲</sup>، حمید مرآتی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ [ms.kazemi@aut.ac.ir](mailto:ms.kazemi@aut.ac.ir)

<sup>۲</sup>استادیار دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ [ameri@aut.ac.ir](mailto:ameri@aut.ac.ir)

<sup>۳</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ [hamid-merati@aut.ac.ir](mailto:hamid-merati@aut.ac.ir)

### چکیده

در صنعت نفت یکی از مهمترین تجهیزات به کار گرفته شده، جداساز است که وظیفه جداسازی فازها از یکدیگر را به عهده دارد. برای طراحی فرآیندی جداساز، روابطی بر مبنای تئوری سرعت حد در منابع علمی ارائه شده است. این تئوری بر مبنای فرضیات ساده‌کننده‌ای استوار است. سقوط قطرات با سرعت ثابت، سقوط از بالاترین نقطه‌ی جداساز، یکنواخت بودن سرعت ظاهری گاز داخل جداساز، عدم برخورد قطرات با هم و دیگر فرضیات، اساس این روابط تئوری هستند. همچنین، برخی از متغیرهای موثر بر طراحی، بدون آزمایش‌های اولیه قابل تعیین نیستند. برای رفع این فرضیات و تعیین متغیرهای طراحی، روشی بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی در این مقاله ارائه می‌شود. در این روش، یک جداساز با ابعاد کوچک در آزمایشگاه ساخته می‌شود و جریان‌های مایع و گاز در دبی‌ها و فشارهای مختلف وارد آن می‌شود. سپس کیفیت عملکرد جداساز آزمایشگاهی، در شرایط مختلف بررسی می‌شود. برای تعمیم نتایج آزمایشگاهی به جداسازهای صنعتی، لازم است از شگرد تحلیل ابعادی استفاده شود. در این مقاله، یک مدل تحلیل ابعادی ارائه می‌شود تا با برقراری تشابه میان جداساز صنعتی و جداساز آزمایشگاهی، بتوان نتایج آزمایشگاهی را به نمونه‌ی صنعتی تعمیم داد.

### کلمات کلیدی

طراحی فرآیندی، جداساز گرانشی دوفازی، تحلیل ابعادی، نمونه‌ی آزمایشگاهی.

## A novel method development for design of gas-liquid separator based on dimension analysis

M. S. Kazemi, M. J. Ameri, H. Merati

### ABSTRACT

Separators are the important equipment used in petroleum industry that separate the different phases from each other. There are generally two methods to design a separator: classic method and CFD-based method. The classic method is based on terminal velocity theory of liquid droplets. The assumptions used in this method e.g. settling with terminal velocity, falling down from the top of shell, even surface velocity of gas, etc. lead to conservative design. In the other hand, classic method needs to some parameter that are not determined unless doing some experiments or using field data. To obtain the optimum design and gather this data, the new method is presented in this article that is based on dimension analysis and similarity. The separator model found in pilot-plant should be tested to confirm its performance. At first, the dimensionless group are developed and finally will discuss how to design a separator based on similarity.

### KEYWORDS

Process design, two-phase gravity separator, dimension analysis, pilot-plant model.

<sup>□</sup> محمد صادق کاظمی، تهران، خیابان حافظ، تقاطع سمیه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۰۹۳۶۸۴۷۹۸۰۸

## ۱- مقدمه

با ایجاد میدان الکتریکی قوی، ذرات قطبی آب را از جریان جدا می‌کنند. در این مقاله، فقط درباره جداساز گرانشی<sup>۱</sup> -اولین جداسازی که سیال چاه وارد آن می‌شود بحث خواهد شد.

قبل از ساخت یک جداساز، باید طراحی فرآیندی<sup>۱۱</sup> و مکانیکی<sup>۱۲</sup> جداساز انجام پذیرد. در طراحی مکانیکی -که البته موضوع این مقاله نیست- جنس و ضخامت ورق، نوع کنگی<sup>۱۳</sup>، و سایر خواص مکانیکی طوری تعیین می‌گردد تا جداساز در فشار و دمای عملیاتی، دچار شکست نشود. طراحی فرآیندی، شامل تعیین ابعاد جداساز -یعنی طول و قطر- انتخاب اجزای درونی جداساز است به طوری که فرآیند جدایش فازها به خوبی انجام شود.

طراحی فرآیندی جداساز، به دو روش عمده انجام گرفته است؛ طراحی کلاسیک، طراحی بر پایه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)<sup>۱۴</sup>. طراحی کلاسیک، سالیان است که در صنعت از آن استفاده می‌شود. اما طراحی بر پایه CFD، جدیدا استفاده از آن گسترش یافته است. پیش از تبیین روش‌های طراحی جداساز، نحوه عملکرد و اجزای داخلی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- معرفی جداسازهای دوفازی و اجزای داخلی آن

جداسازها از یک نگاه، به دو گروه کلی تقسیم می‌شوند؛ جداسازهای دوفازی، جداسازهای سه‌فازی. جداسازهای دوفازی، جریان دوفازی گاز و مایع را، به یک جریان گاز و یک جریان مایع تفکیک می‌کنند. جداسازهای سه‌فازی علاوه بر جدایش فاز مایع و گاز، جریان مایع را به دو فاز نفت خام و آب تقسیم می‌کنند. در این مقاله، جداسازهای دوفازی مد نظر هستند و جداسازهای سه‌فازی بررسی نمی‌شوند. شکل ۱ تصویری از یک جداساز تست سه‌فازی<sup>۱۵</sup> است که در اهواز استفاده شده است.

در صنعت نفت، سیال تولید شده از سر چاه<sup>۱</sup>، مخلوط پیچیده‌ای از ترکیبات هیدروکربنی است. هر ترکیب، چگالی، فشار بخار و ویژگی‌های فیزیکی متفاوتی دارد. هم‌زمان که سیال درون چاه، از مخزن با فشار و دمای بالا به سطح زمین حرکت می‌کند، فشار و دمای عملیاتی کاهش می‌یابد. گاز از مایع خارج می‌شود و جریان چاه در ماهیتش تغییر ایجاد می‌شود. گاز، قطرات مایع را و مایع، حباب گاز را به همراه خود حمل می‌کند. جداسازی فیزیکی فازها<sup>۲</sup> یکی از اساسی‌ترین کارها در تولید، طراحی و عمل‌آوری<sup>۳</sup> نفت و گاز است [۱].

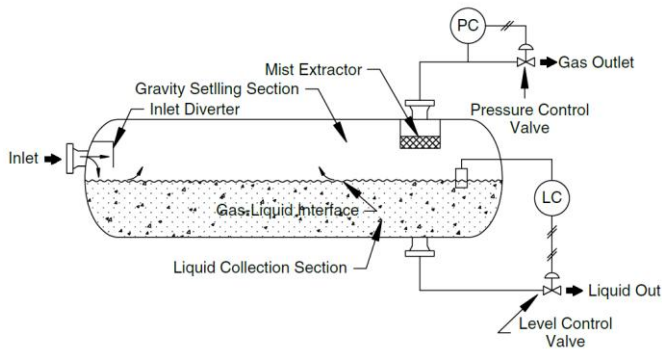
جداسازی این فازها از یکدیگر توسط دستگاهی به نام جداساز<sup>۴</sup> صورت می‌گیرد. جداسازها علاوه بر سر چاه‌ها، در کارخانه‌های بنزین طبیعی، ورودی و خروجی کمپرسور<sup>۵</sup>، تجمع مایع در لوله‌های انتقال گاز، کارخانه‌های آب‌زدایی، و کارخانه‌های شیرین‌سازی گاز نیز استفاده می‌شوند [۲].

جداسازها به لحاظ چگونگی عملکردشان به چندین گروه تقسیم می‌شوند. جداسازهای گرانشی<sup>۶</sup>، چرخه ای<sup>۷</sup>، گرمایی<sup>۸</sup> و الکتریکی<sup>۹</sup> رایج‌ترین جداسازهایی هستند که در صنعت نفت به کار می‌روند [۱]. جداسازهای گرانشی، بر مبنای اختلاف چگالی بین فازها، آن‌ها را از هم جدا می‌کند. جداسازهای چرخه‌ای به علت هندسه‌ی خاص شان، با استفاده از نیروی گریزازمرکز که از سرعت سیال در ورودی ناشی می‌شود، گردابه‌ای ایجاد می‌کنند که باعث جدایش فازها می‌شود. جداسازهای گرمایی، برای جداسازی امولسیون نفت و آب، استفاده می‌شود. مبنای عملکرد آن‌ها، با افزایش دما، عوامل امولسیون‌زا را می‌شکنند که منجر به جدایش فازها می‌گردد. جداسازهای الکتریکی،



شکل ۱ تصویری از جداساز تست سه‌فازی با ابزارهای کنترلی آن

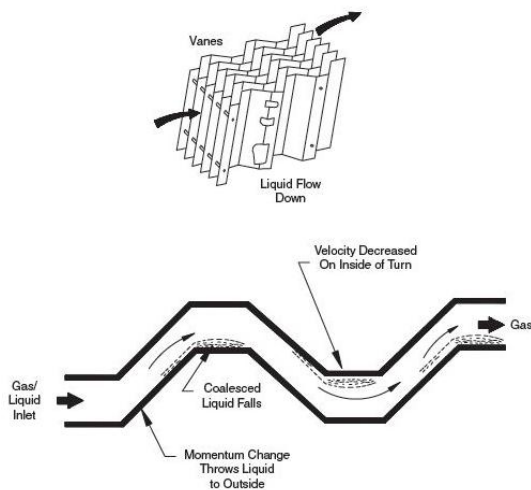
پس از آن، مایع از نازل خروجی مایع، از پایین جداساز خارج می‌شود [۱].



شکل ۴ چهار بخش اصلی یک جداساز افقی دوفازی و ابزارهای کنترل آن [۱]

گاز از بالای منحرف‌کننده ورودی و سپس به طور افقی از میان بخش جدایش گرانشی، بالای مایع جریان می‌یابد. همزمان که گاز در این بخش جریان می‌یابد، قطرات ریز مایع که درون گاز وارد شده بودند و منحرف‌کننده ورودی نتوانسته بود آنها را جدا کند، اکنون با نیروی گرانش از گاز جدا می‌شوند و به سطح گاز و مایع می‌افتند [۱].

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 بخش به هم آمیختن یا خارج‌کننده‌ی مه عبور می‌کند. این بخش از المان‌هایی نظیر پره<sup>۲۵</sup>، مشبک‌های سیمی<sup>۲۶</sup>، یا صفحات استفاده می‌کند تا قطرات بسیار ریز مایع را به هم بیامیزند پیش از آنکه به همراه گاز از جداساز خارج شوند، آنها را جدا کند [۱]. شکل ۵ نحوه‌ی عملکرد یک خارج‌کننده‌ی مه از نوع پره ای را نشان می‌دهد.

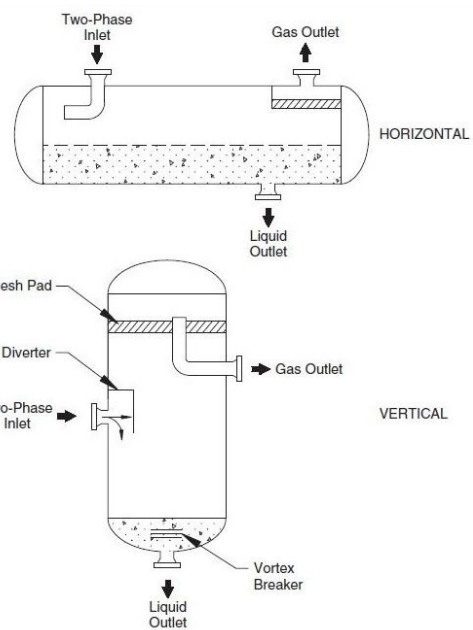


شکل ۵ نحوه‌ی جمع‌آوری قطرات ریز با خارج‌کننده‌ی مه پره‌ای [۱]

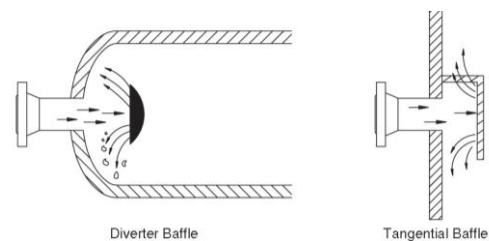
هنگام خروج مایع از جداساز، ممکن است گردابه ایجاد کند که می‌تواند گاز را به خروجی مایع پایین بکشد و جدایش فازها را مختل

همچنین جداسازها به لحاظ هندسه، به سه شکل افقی، قائم و کروی طراحی می‌شوند که در شکل ۲ جداسازهای افقی و قائم نمایش داده شده است. فارغ از شکل آنها، همه‌ی جداسازهای دوفازی دارای چهار بخش اصلی هستند. این چهار بخش شامل بخش جدایش اولیه<sup>۱۶</sup>، بخش جدایش ثانویه<sup>۱۷</sup> یا جدایش گرانشی<sup>۱۸</sup>، بخش تجمع مایع<sup>۱۹</sup> و بخش خارج‌کننده‌ی مه<sup>۲۰</sup> یا بخش به هم آمیختن<sup>۲۱</sup> است [۳]. شکل ۴ بخش‌های اصلی یک جداساز افقی دوفازی و ابزارهای کنترل آن را نشان می‌دهد.

سیال زمانی که وارد جداساز می‌شود با منحرف‌کننده‌ی ورودی<sup>۲۲</sup> برخورد می‌کند و باعث تغییر ناگهانی در مومنتوم<sup>۲۳</sup> سیال می‌شود. اولین جدایش عمده مایع و بخار در منحرف‌کننده‌ی ورودی اتفاق می‌افتد. شکل ۳ دو نوع منحرف‌کننده‌ی ورودی با هندسه‌ی ساده را نشان می‌دهد.



شکل ۲ جداساز دوفازی افقی، قائم [۴]



شکل ۳ دو نوع منحرف‌کننده‌ی ورودی با هندسه‌ی ساده [۱]

نیروی گرانش باعث می‌شود قطرات مایع درون جریان گاز، به پایین جداساز سقوط کنند؛ جایی که مایع آنجا انباشته می‌شود. این بخش تجمع مایع، زمان ماند<sup>۲۴</sup> لازم را تأمین می‌کند تا گاز بتواند به آهستگی بالا رود و از بخش مایع خارج شود و به بخش بخار بیبوند. همچنین فضایی ایجاد می‌کند تا نوسانات جریان مایع را کنترل کند.

است.

سودرز و براون این رابطه را با برابر قراردادن نیروهای بویانسی، وزن و نیروی مقاومت برابر جریان (نیروی پسا<sup>۳۰</sup>) به دست آوردند. اما از آنجا که درباره‌ی اندازه‌ی قطرات چیزی نمی‌دانستند فقط اشاره کرده‌اند که متغیری نامعین است ولی احتمالاً با کشش سطحی مایع در ارتباط است. همین باعث شد که ضریب ظاهر شده در معادله را به صورت تجربی در نظر بگیرند [۵]:

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

که در آن،  $k$  ثابت تجربی (m/s) و تابعی از شرایط عملیاتی است. به این صورت توانستند متغیر اندازه‌ی قطره را از معادله حذف کنند.

$$v_t = k \sqrt{\frac{\rho_g - \rho_l}{\rho_g}} \quad (3)$$

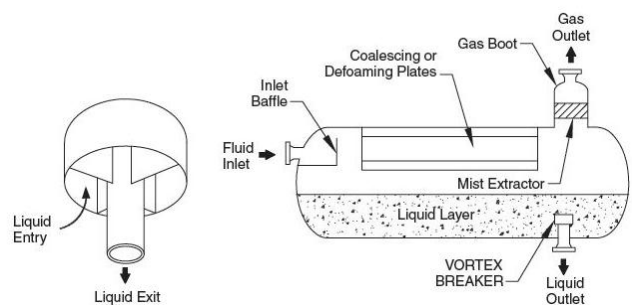
استاندارد API [۳]، بر مبنای داده‌های تجربی، پیشنهادهایی برای حداکثر سرعت ظاهری مجاز برای گاز ارائه دادند. در این روش ادعا می‌شود اگر سرعت ظاهری گاز در داخل جداساز کمتر از حداکثر سرعت مجاز باشد، جداسازی قطرات مایع اتفاق می‌افتد؛ فارغ از اینکه یک قطره‌ی مایع با چه مکانیزمی از جریان گاز جدا می‌شود. حداکثر سرعت ظاهری مجاز برای گاز از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود با این تفاوت که مفهوم آن سرعت حد قطرات نیست. همچنین مقادیر ضریب  $k$  تابعی از شکل جداساز یعنی افقی، قائم یا کروی بودن و طول جداساز معرفی شده است. مقادیر آورده شده در جدول ۱ برای جداسازهای مجهز به خارج‌کننده‌ی مه از نوع مشبک‌های سیمی با توانایی حذف قطرات بزرگ‌تر از ۱۰ میکرون، است.

جدول ۱ مقادیر پیشنهادی برای ضریب  $k$  برای سرعت حد [۳]

نوع جداساز	طول یا ارتفاع $L$ (ft)	مقادیر معمول برای ضریب $k$
قائم	5	0.12 - 0.24
	10	0.18 - 0.35
افقی	10	0.40 - 0.50
	دیگر اندازه‌ها	$0.40 - 0.50 \times (L/10)^{0.56}$
کروی	همگی	0.20 - 0.35

توجه شود، جهت سقوط قطرات مایع در جداسازهای افقی عمود بر جهت جریان گاز است، در حالی که جهت سقوط قطرات مایع در جداساز قائم خلاف جهت جریان گاز است. به همین دلیل، جدایش قطرات مایع در جداسازهای افقی ساده‌تر از جداسازهای قائم است. در واقع حداکثر سرعت جریان گاز برای جداساز افقی در مقایسه با جداساز قائم با سطح مقطع یکسان بیشتر است. بنابراین همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مقادیر ضریب  $k$  برای جداسازهای افقی در مقایسه با جداسازهای قائم بزرگ‌تر است. برای تعیین اندازه‌ی جداساز با روش استاندارد API، ابتدا حداکثر سرعت مجاز گاز با استفاده از معادله‌ی (۳) و جدول ۱

کند. برای جلوگیری از گسترش گردابه هنگامی که شیرهای کنترل مایع باز هستند، یک گرداب شکن ساده در خروجی مایع قرار داده می‌شود. شکل ۶ یک گرداب شکن و محل قرارگیری آن را نشان می‌دهد.



شکل ۶ گرداب شکن و محل قرارگیری آن [۱]

## ۲- طراحی جداساز دوفازی به روش کلاسیک

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

### ۳-۱- قید ظرفیت گاز

اساس تعیین اندازه‌ی جداساز برای جداساز قطرات مایع از جریان گاز، به سرعت سقوط قطرات مایع بستگی دارد. هر قدر سرعت سقوط قطرات بیشتر باشد، حجم کمتری لازم است تا قطرات مایع از جریان گاز جدا شوند. از طرف دیگر، اندازه‌ی ذرات بر سرعت سقوط آن‌ها تأثیر می‌گذارد. ذرات هرچه بزرگ‌تر باشند، سرعت سقوط بیشتری دارند. بنابراین تعیین سرعت سقوط قطرات و اندازه قطرات در تعیین اندازه‌ی جداساز بسیار اهمیت دارد.

### سرعت سقوط قطرات و حداکثر سرعت ظاهری مجاز برای گاز

فرض می‌شود که قطرات مایع در بخش جداسازی گرانشی با سرعت حد<sup>۳۱</sup>، سقوط می‌کند. این سرعت اولین بار توسط سودرز<sup>۳۲</sup> و براون<sup>۳۳</sup> [۵]، با روش نیمه‌تجربی با رابطه‌ی زیر بیان شد:

$$v_t = \sqrt{\frac{2gd_p}{3c}} \sqrt{\frac{\rho_g - \rho_l}{\rho_g}} \quad (1)$$

که در آن،  $v_t$  سرعت حد قطرات (m/s)،  $g$  شتاب گرانشی (9.8 m/s<sup>2</sup>)،  $d_p$  قطر قطرات (m)،  $c$  ضریب تجربی (بی‌بعد)،  $\rho_g$  چگالی فاز پیوسته‌ی گاز و  $\rho_l$  چگالی فاز گسسته یعنی قطرات مایع (kg/m<sup>3</sup>)

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{Re^{0.5}} + 0.34 \quad (5)$$

که در آن،  $Re$  عدد رینولدز است که چنین به دست می آید [۱]:

$$Re = 0.001 \frac{\rho_g d_p V_t}{\mu_g} \quad (6)$$

که در آن،  $Re$  عدد رینولدز (بی بعد)،  $\rho_g$  چگالی گاز ( $kg/m^3$ )،  $d_p$  قطر قطره‌ی مایع (micron)،  $V_t$  سرعت حد سقوط قطره‌ی مایع و  $\mu_g$  ویسکوزیته‌ی گاز (cp) است.

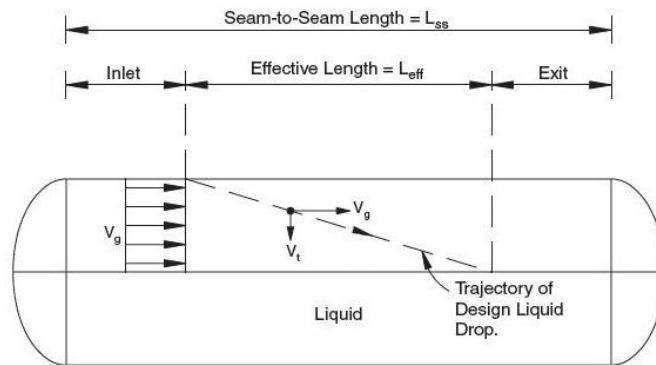
آن‌ها توانستند نحوه‌ی جدایش قطره‌ی مایع از جریان گاز را با تئوری سرعت حد به خوبی تبیین کنند. طبق نظر آن‌ها، در جداسازهای افقی، سرعت قطرات مایع دو مولفه دارد؛ مولفه‌ی افقی و مولفه‌ی قائم. مولفه‌ی قائم همان سرعت حد است. مولفه‌ی افقی قطره، برابر با سرعت جریان گاز داخل جداساز است که با تقسیم دبی گاز بر سطح عمود بر جریان گاز به دست می آید. شکل ۷ این دو مولفه‌ی سرعت قطره‌ی مایع را نشان می دهد.

محاسبه می شود. سپس با تقسیم دبی گاز در شرایط جداساز بر حداکثر سرعت، سطح مقطع لازم برای گاز محاسبه می شود. با تعیین سطح مقطع گاز، قطر جداساز معین می شود؛ مثلاً برای جداساز نیمه پر سطح مقطع جریان گاز، نصف مساحت جداساز است. در باره‌ی طول جداساز، استاندارد API مقدار ۱۰ فوت را پیشنهاد می کند. در صورتی که این مقدار طول کافی نباشد، به مقدار طول ۵ واحد باید افزود و محاسبات را تکرار نمود.

آرنولد و ستوارت [۱]، روشی برای تعیین ابعاد جداساز مبتنی بر تئوری سقوط قطرات با سرعت حد، ارائه کردند. در این روش سرعت سقوط قطره با استفاده از معادله‌ی (۳) محاسبه می شود. اما رابطه‌ی برای محاسبه‌ی مقدار  $k$  به صورت تئوری یافتند که با برابر قرار دادن برآیند نیروهای بویانسی، وزن و پسا به دست آمد:

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

که در آن  $C_D$  ضریب پسا (بی بعد) است. برای محاسبه‌ی ضریب پسا، از رابطه‌ی آن با عدد رینولدز استفاده می شود [۱]:



شکل ۷ مولفه‌های افقی و قائم سرعت قطره، طول موثر و جوش تاجوش جداساز افقی [۱]

قطره‌ی مایع پیش از آنکه همراه گاز از جداساز خارج شود اگر بتواند خود را به سطح تماس گاز و مایع برساند، در این صورت جدایش قطرات مایع از گاز انجام شده است. بر این مبنا، مدت زمانی که قطره فاصله‌ی قائم را از بالاترین نقطه‌ی جداساز تا سطح تماس گاز و مایع که برای جداسازهای نیمه پر نصف قطر جداساز است طی می کند باید کمتر یا مساوی با زمانی باشد که طول جداساز را می پیماید. با برابر قرار دادن این دو زمان، رابطه‌ی برای تعیین ابعاد جداساز ارائه نمودند [۱]:

$$k = 0.35 - 0.0001(P - 100) \quad (8)$$

که در آن،  $P$  فشار بر حسب (psig) است. این رابطه بسته به سرویس مورد استفاده باید تصحیحاتی در آن اعمال شود [۶]:

- برای اغلب بخارهای تحت خلأ  $k = 0.2$  است.
- برای محلول‌های گلايکول و آمین،  $k$  در  $0.6 - 0.8$  ضرب شود.
- اسکرابرها و ورودی کمپرسور و اکسپندرهای ورودی جداساز،  $k$  در  $0.7 - 0.8$  ضرب شود.
- اگر هیچ خارج کننده‌ی مه وجود نداشت،  $k$  در  $0.5$  ضرب شود.

مونری<sup>۳۳</sup> و سریک<sup>۳۴</sup> [۷]، روش طراحی برای جداسازهای سه فازی مبتنی بر تئوری سرعت حد و پیشنهادهای صنعتی ارائه کردند. آن‌ها برای محاسبه‌ی سرعت حد قطرات، به همان رابطه‌ی (۴) دست

پیش از آنکه همراه گاز از جداساز خارج شود اگر بتواند خود را به سطح تماس گاز و مایع برساند، در این صورت جدایش قطرات مایع از گاز انجام شده است. بر این مبنا، مدت زمانی که قطره فاصله‌ی قائم را از بالاترین نقطه‌ی جداساز تا سطح تماس گاز و مایع که برای جداسازهای نیمه پر نصف قطر جداساز است طی می کند باید کمتر یا مساوی با زمانی باشد که طول جداساز را می پیماید. با برابر قرار دادن این دو زمان، رابطه‌ی برای تعیین ابعاد جداساز ارائه نمودند [۱]:

$$d L_{eff} = 34.5 \left( \frac{TZQ_g}{P} \right) \sqrt{\left( \frac{\rho_g}{\rho_L - \rho_G} \right) \frac{C_D}{d_p}} \quad (7)$$

که در آن،  $d$  قطر جداساز (mm)،  $L_{eff}$  طول موثر جداساز (m)،  $T$  دما (K)،  $Z$  ضریب تراکم پذیری گاز (بی بعد)،  $Q_g$  دبی گاز در شرایط استاندارد (scmh<sup>۳۳</sup>)،  $P$  فشار (kPa) است.

مرجع داده‌های مهندسی<sup>۳۳</sup> GPSA [۶]، علاوه بر تأیید مقادیر



### ۳-۲- قید ظرفیت مایع

اساس طراحی جداساز بر مبنای قید ظرفیت مایع، زمان ماند است. زمان ماند به معنای آن است که سیال به طور متوسط چه مدت زمان در جداساز می ماند. هر چه مایع مدت زمان بیشتری در جداساز بماند، قطر و طول جداساز باید بیشتر باشد. منابع مختلف دلایل متفاوتی را بر اهمیت زمان ماند ذکر کرده اند.

#### زمان ماند

استاندارد API [۳] زمان ماند را به علت خارج شدن گاز حل شده در مایع و جدایش قطرات آب از فاز نفت در جداسازهای سفازی ضروری دانسته است. مقادیر پیشنهادی API برای زمان ماند، برای جداسازهای دوفازی و سفازی متفاوت و تابع، دما و درجهی API نفت ارائه شده است.

آرنولد و ستوارت [۱]، علاوه بر دو دلیل ذکر شده، تعادل فازهای مایع و گاز را نیز ذکر کرده اند. مقادیر پیشنهادی زمان ماند را از استاندارد API نقل کرده اند. آن‌ها اشاره کرده اند در صورت نداشتن داده‌های آزمایشگاهی یا داده‌های میدانی، مقدار ۳ دقیقه برای جداسازهای دوفازی و ۱۰ دقیقه برای جداسازهای سفازی در نظر گرفته شود.

مونری و سربک [۷]، به جای زمان ماند، از زمان پرشدن<sup>۳۵</sup> و زمان خالی شدن<sup>۳۶</sup> جداساز سخن به میان آورده اند. زمان خالی شدن به این معناست که در صورت قطع شدن جریان ورودی جداساز، چه مدت طول می کشد تا ارتفاع مایع در جداساز از ارتفاع نرمال به حداقل ارتفاع مجاز برسد. این مسأله از این جهت اهمیت دارد تا تجهیزاتی که خوراکشان از جداساز تأمین می شود در صورت ایجاد وقفه در ورودی جداساز، همچنان بتوانند کار کنند. از طرف دیگر، زمان پرشدن جداساز به این معناست که در صورت مسدود شدن خروجی جداساز، چه مدت زمان طول می کشد تا ارتفاع مایع از مقدار نرمال به حداکثر مجاز برسد. واضح است این گونه تعریف از زمان ماند بیشتر جنبه عملیاتی دارد. آن‌ها ادعا کرده اند اگر جداساز بر مبنای زمان پرشدن و خالی شدن طراحی شود، علاوه بر جدایش فازها، ملاحظات عملیاتی نیز لحاظ شده است. آن‌ها بسته به اینکه جداساز در چه موقعیتی واقع شده است، زمان‌های پرشدن و خالی شدن متفاوتی برای جداساز پیشنهاد کرده اند (برای مشاهدهی زمان‌های پیشنهادی به [۷] مراجعه کنید).

GPSA [۶] در جداسازهای سفازی برای جدایش مایع از مایع، ادعا کرده است چون اندازه قطرات مایع پخش شده در یکدیگر، معمولاً نامعلوم است ساده تر آن است که از زمان ماند به عنوان معیار طراحی قید ظرفیت مایع بهره جست.

با تعیین زمان ماند، طول و قطر جداساز تعیین می گردد. رابطه‌ی زیر برای جداساز افقی دوفازی نیمه پر است [۱]:

$$d^2 L_{eff} = 42,441 t_r Q_l \quad (12)$$

یافتند. اما برای محاسبه‌ی ضریب پسا (Cd)، رابطه‌ی زیر را پیشنهاد دادند [۷]:

$$C_D = \frac{5.0074}{\ln(x)} + \frac{40.927}{\sqrt{x}} + \frac{484.07}{x} \quad (9)$$

که در آن، x چنین تعریف می شود:

$$x = \frac{0.95 \times 10^8 d_p^3 \rho_g (\rho_l - \rho_g)}{\mu_g^2} \quad (10)$$

### طول جوش تاجوش برای قید گاز

از آنجا که در ورودی جداساز اغتشاش وجود دارد، نمی توان فرض کرد که قطرات از ابتدا با سرعت افقی یکنواخت حرکت می کنند. اما با فاصله گرفتن از ورودی جداساز، می توان فرض کرد که سرعت جریان گاز یکنواخت شده است. پس باید طول جداساز اندکی بیش از طول موثر ساخته شود تا تأثیر مرزها بر سرعت قطرات از بین برود.

همچنین، برای نصب ابزارهای داخلی جداساز نظیر منحرف کننده‌ی ورودی و خارج کننده‌ی مه، فضای اضافی مورد نیاز است. این فضا با افزایش طول جداساز مهیا می شود.

طول جوش تاجوش ( $L_{ss}$ )، که فاصله‌ی دو کنگی جداساز است این نیاز را برآورده می کند. طول موثر و طول جوش تاجوش در شکل ۷ به تصویر کشیده شده است. با توجه به این ملاحظات و تجربه‌های میدانی، آرنولد و ستوارت رابطه‌ی زیر را برای محاسبه‌ی طول جوش تاجوش قید گاز پیشنهاد کرده اند [۱]:

$$L_{ss} = L_{eff} + \frac{d}{1000} \quad (11)$$

که در آن،  $L_{ss}$  طول جوش تاجوش (m)،  $L_{eff}$  طول موثر (m) و d قطر (mm) جداساز است.

### اندازه‌ی قطرات

آرنولد و ستوارت [۱] درباری اندازه‌ی قطرات، مقدار ۱۴۰ میکرون را برای جدایش مایع از گاز پیشنهاد کرده اند. در واقع قطرات بزرگ تر از ۱۴۰ میکرون باید پیش از رسیدن به بخش خارج کننده‌ی مه، در بخش جدایش گرانشی جدا شده باشند. در غیر این صورت قطرات مایع در خارج کننده‌ی مه تجمع می یابند و مسیر خروجی گاز را مسدود می کنند. همچنین درباری اندازه‌ی قطرات پس از عبور از خارج کننده‌ی مه، ۱۰ میکرون لحاظ کرده اند.

API [۳] اندازه‌ی قطرات پس از عبور از خارج کننده‌ی مه را ۱۰ میکرون تعیین کرده است. در واقع خارج کننده‌ی مه باید طوری طراحی شود تا بتواند ذرات بزرگ تر از ۱۰ میکرون را جدا کند. اما روشی برای طراحی خارج کننده‌ی مه ارائه نکرده است.

که در آن،  $t_f$  زمان ماند (min) و  $Q_1$  دبی مایع ( $m^3/min$ ) است. آرنولد و ستوارت [۱] و مونری و سریک [۷] سعی کرده‌اند یک مدل تئوری برای جدایش فازهای مایع از یکدیگر ارائه دهند. بدین منظور با استفاده از قانون استوکس، سرعت حد قطرات آب در نفت و قطرات نفت در آب را محاسبه کرده‌اند. اگر در مدت زمان ماند لحاظ شده، قطرات بتوانند به سطح مشترک آب و نفت برسند جداسازی قطعاً اتفاق افتاده است. اما اگر قطرات نتوانند با سرعت محاسبه شده خود را به سطح آب و نفت برسانند، زمان ماند را آن قدر بیشتر می‌کنند که این امر حاصل شود. با یک محاسبه‌ی اولیه نشان داده شد، زمان ماند در نظر گرفته شده، به اندازه‌ی کافی زیاد هست تا این قطرات بتوانند به سطح مشترک نفت و آب برسند. در واقع تئوری سرعت حد برای جدایش فازهای مایع از مایع در جداسازهای سه‌فازی مدل دقیقی نیست.

#### ۴-۱- کاربرد روش CFD

در سال‌های اخیر به یک نکته پی برده شده است که عملکرد واقعی جداساز ممکن است بسیار با آنچه که در تئوری تصور می‌شود، تفاوت داشته باشد. علت آن، الگوهای واقعی جریان در داخل جداساز است. این امر به کمک دو تکنیک مرئی‌سازی<sup>۳۸</sup> زیر محقق شده است [۴]:

۱. مکانیک سیالات محاسباتی (CFD).

۲. مدل‌سازی فیزیکی.

با کمک این دو تکنیک، می‌توان پی برد که کجا ممکن است دچار مشکل شود و چگونه می‌توان آن را حل کرد. مهمترین نواحی برای اطمینان از عملکرد جداساز در زیر آمده است [۴]:

۱. تعیین اندازه‌ی نازل ورودی و هندسه‌ی منحرف‌کننده‌ی

ورودی؛ مخصوصاً منحرف‌کننده‌هایی با هندسه‌ی پره‌ای و چرخه‌ای.

۲. صفحات توزیع‌کننده جریان.

۳. اجزای نصب‌شده در خروجی جداساز نظیر گرداب‌شکن و خارج‌کننده‌ی مه.

CFD و مدل‌سازی فیزیکی، یک روش عالی برای بررسی تأثیر اجزای داخلی جداساز، قبل و بعد نصب‌کردن آن‌ها است. در این روش از تشابه اعداد بی‌بعد استفاده می‌شود تا در یک مقیاس کوچکتر رفتار سیال شبیه‌سازی شود. می‌توان آزمایش را با هوا-آب، هوا-نفت-آب یا گاز-نفت-آب انجام داد. در مراکز پیشرفته‌تر از سیالات واقعی (یعنی نفت و گاز) استفاده می‌شود و انجام آزمایش‌ها در فشارهای بالا انجام می‌گیرد. اشکال انجام آزمایش در فشار بالا، آن است که امکان ساخت محفظه‌ی شفاف وجود ندارد تا داخل جداساز قابل رویت شود [۴].

#### ۵- طراحی جداساز با تکنیک تحلیل ابعادی

در روش‌های کلاسیک و همچنین در روش‌های CFD، وجود فرضیات ساده‌کننده، ما را به روش آزمایشگاهی سوق می‌دهد. در واقع گر چه روش CFD جواب‌گوی مسائل است ولی نتایج CFD بدون اعتبار سنجی آزمایشگاهی بی‌ارزش است. به همین دلیل در اینجا روشی نو مبتنی بر تحلیل ابعادی و تشابه ارائه می‌شود.

که در آن،  $t_f$  زمان ماند (min) و  $Q_1$  دبی مایع ( $m^3/min$ ) است. آرنولد و ستوارت [۱] و مونری و سریک [۷] سعی کرده‌اند یک مدل تئوری برای جدایش فازهای مایع از یکدیگر ارائه دهند. بدین منظور با استفاده از قانون استوکس، سرعت حد قطرات آب در نفت و قطرات نفت در آب را محاسبه کرده‌اند. اگر در مدت زمان ماند لحاظ شده، قطرات بتوانند به سطح مشترک آب و نفت برسند جداسازی قطعاً اتفاق افتاده است. اما اگر قطرات نتوانند با سرعت محاسبه شده خود را به سطح آب و نفت برسانند، زمان ماند را آن قدر بیشتر می‌کنند که این امر حاصل شود. با یک محاسبه‌ی اولیه نشان داده شد، زمان ماند در نظر گرفته شده، به اندازه‌ی کافی زیاد هست تا این قطرات بتوانند به سطح مشترک نفت و آب برسند. در واقع تئوری سرعت حد برای جدایش فازهای مایع از مایع در جداسازهای سه‌فازی مدل دقیقی نیست.

#### طول جوش تاجوش قید مایع

برای نصب اجزای داخلی جداساز نظیر منحرف‌کننده‌ی ورودی و خروجی مایع، لازم است فضایی برای آن‌ها در نظر گرفته شود. این مقدار را می‌توان با رابطه‌ی زیر تخمین زد [۱]:

$$L_{ss} = \frac{4}{3} L_{eff} \quad (13)$$

#### نسبت لاغری

طبق روش آرنولد و ستوارت، طول و قطرهای مختلفی می‌توانند جواب مسأله‌ی طراحی جداساز باشند (به معادله‌ی (۷) نگاه کنید). بهینه آن است که هزینه ساخت کمتر شود. در واقع هر چه وزن ورق به کار گرفته شده در ساخت جداساز کمتر باشد، هزینه‌ی ساخت کمتر خواهد بود. می‌توان نشان داد، برای یک حجم معین از جداساز، آنکه طول بیشتری دارد هزینه‌ی کمتری در پی خواهد داشت. از طرف دیگر، اگر نسبت طول به قطر جداساز زیاد شود ممکن است جریان گاز، در سطح تماس گاز و نفت، بخشی از مایع را دوباره وارد جریان گاز کند. به این پدیده، بازحمل<sup>۳۷</sup> گفته می‌شود. برای جلوگیری از این پدیده، نسبت طول به قطر جداساز<sup>۳۶</sup> که به آن نسبت لاغری گفته می‌شود نباید بیشتر از ۵ باشد. از طرف دیگر اگر نسبت لاغری کم باشد، هزینه‌ی ساخت جداساز بیشتر می‌شود. آرنولد و ستوارت پیشنهاد می‌کنند که نسبت لاغری بیشتر از ۳ باشد. بنابراین نسبت لاغری باید بین ۳ و ۵ انتخاب شود.

البته باید یادآور شد که منابع مختلف مقدار نسبت لاغری مجاز را متفاوت اعلام کرده‌اند. مونری و سریک، نسبت لاغری بین ۱٫۵ و ۶ را مجاز اعلام کرده‌اند.

#### ۴- طراحی جداساز دوفازی بر پایه‌ی روش‌های CFD

با مروری بر روش‌های طراحی کلاسیک، آشکار شد که با این روش‌ها می‌توان ابعاد جداساز را تعیین نمود. اما هیچ تضمینی نیست

## 5-1- تحلیل ابعادی و کاربرد آن

یکی از روش‌های حل مسائل سیالاتی، روش آزمایشگاهی است. در روش آزمایشگاهی به جای محاسبه‌ی یک پارامتر، مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود. معمولاً این روش پرهزینه و وقت‌گیر است. از این رو از روش‌های آزمایشگاهی تنها هنگامی استفاده می‌شود که ضرورت پروژه آن را ایجاب کند [8].

تکنیک تحلیل ابعادی، تکنیکی ساده برای کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز در یک مساله است. تکنیک تحلیل ابعادی، بر مبنای اصل همگنی ابعادی، سعی می‌کند یک مساله فیزیکی را تبدیل به مساله‌ای متشکل از کمیت‌های بدون بعد کند. تحلیل ابعادی اگر درست انجام گیرد از ارزش زیادی برخوردار است [8]:

1. دسته بندی متغیرها و کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای تبیین یک مساله.
2. پیش بینی فرم تابع در برخی از مسائل مکانیک سیالات بدون نیاز به انجام آزمایش.
3. تعیین مهمترین (بحرانی ترین) متغیر مستقل یک مساله بدون نیاز به انجام آزمایش.

## 5-2- تکنیک تحلیل ابعادی

اساس تحلیل ابعادی، بر اصل همگنی ابعادی استوار است. اصل همگنی ابعادی، می‌گوید دو طرف یک معادله، باید به لحاظ ابعاد (جرم، طول و زمان) یکسان باشند. در تکنیک تحلیل ابعادی هدف آن است که متغیرهای موثر بر مساله را به صورت گروه‌های بی‌بعد (یا جمله‌های بی‌بعد) بیان نمود. قضیه پی‌باکینگهام می‌گوید: «اگر تابعی با تعداد  $n$  متغیر به طور ابعادی همگن باشد، آن را می‌توان به صورت رابطه‌ی ساده‌ای بین  $n-m$  حاصل‌ضرب بی‌بعد مستقل در آورد؛  $m$  کمترین تعداد بعدهای مرجع لازم برای بیان متغیرهاست» [9]. با روش‌های مختلفی می‌توان به جملات بی‌بعد دست یافت. برای تبیین بهتر، ابتدا روش متغیرهای تکراری، سپس روش ماتریس تبدیل که روشی ساده‌تر و قابل برنامه‌نویسی با کامپیوتر است، شرح داده می‌شود. تفاوتی ندارد از کدام روش استفاده شود زیرا هر دو روش به یک مجموعه از اعداد بی‌بعد منتهی می‌شود. تفاوت آن‌ها در نحوه‌ی رسیدن به اعداد بی‌بعد است.

## روش متغیرهای تکراری

گام (1) همه متغیرهای دخیل در مساله را فهرست کنید. «متغیر» هر کمیتی شامل ثابت‌های بعد دار و بی‌بعد که در پدیده‌ی تحت بررسی نقشی دارند. چون قرار است تعداد متغیرها برای کمینه کردن حجم کارهای آزمایشگاهی، حداقل شوند، مهم است که همه‌ی متغیرها مستقل باشند. مثلاً در مساله‌ای خاص که سطح لوله متغیر است؛ تنها سطح لوله یا قطر آن را بایستی به کار برد و نه هر دوی آن‌ها را.

گام (2) هر یک از متغیرها را بر حسب ابعاد اصلی ( $M, L, T^{\alpha}$ ) یا ( $F, L, T$ ) بیان کنید؛ مثلاً چگالی دارای ابعاد  $M/L^3$  است.

گام (3) تعداد جمله‌های بی‌بعد را تعیین کنید.

تعداد جمله‌های بی‌بعد طبق قضیه پی‌باکینگهام برابر با  $n-m$  است؛  $n$  تعداد متغیرهای موثر در مساله است (گام 1) و  $m$  تعداد ابعاد مرجع لازم برای بیان این متغیرها است. معمولاً تعداد ابعاد مرجع  $m$  با ابعاد اصلی هم‌خوانی دارند به جز در موارد خاص که در آن صورت لازم است ماتریس ابعاد را تشکیل دهیم؛ مرتبه ماتریس ابعاد، تعداد ابعاد اصلی مساله خواهد بود [9].

گام (4) متغیرهای تکراری را به تعداد ابعاد مرجع  $m$  انتخاب کنید.

از فهرست اصلی متغیرها، آن‌هایی انتخاب شوند که با ترکیب با هر یک از متغیرهای باقیمانده بتوانند یک جمله‌ی بی‌بعد را تشکیل دهند. همه‌ی ابعاد مرجع باید در گروه متغیرهای تکراری قرار گیرند و هر یک از متغیرهای تکراری باید از لحاظ ابعادی مستقل از دیگران باشد. یعنی ابعاد یک متغیر تکراری را نمی‌توان با ترکیب حاصل‌ضرب توان‌های بقیه‌ی متغیرهای تکراری ایجاد کرد [9].

برای هر مساله مفروض، معمولاً علاقه‌مندیم بدانیم که چگونه یک متغیر خاص تحت تأثیر متغیرهای دیگر قرار می‌گیرد. در این حالت، این متغیر را به عنوان متغیر وابسته در نظر می‌گیریم و انتظار داریم تنها در یک جمله‌ی بی‌بعد ظاهر شود. در نتیجه نمی‌توان متغیر وابسته را جزو متغیرهای تکراری، که معمولاً در بیش از یک جمله‌ی بی‌بعد ظاهر می‌شوند، در نظر گرفت. در حالت کلی سعی می‌شود که این متغیرهای تکراری را از میان متغیرهایی انتخاب کنیم که دارای ساده‌ترین ابعادند [9].

گام (5) با ضرب یکی از متغیرهای غیرتکراری در حاصل‌ضرب متغیرهای تکراری، که هر کدام دارای نماییم هستند که ترکیب را بی‌بعد می‌سازند، جمله‌ی بی‌بعد را به وجود آورید.

اساساً هر یک از جمله‌های بی‌بعد به شکل  $u_i u_1^{a_i} u_2^{b_i} u_3^{c_i}$  هستند که  $u_i$  یکی از متغیرهای غیرتکراری است.  $u_1, u_2, u_3$  متغیرهای تکراری هستند و نماهای  $a_i, b_i, c_i$  به گونه‌ای تعیین می‌شوند که این ترکیب، بی‌بعد شود. معمولاً کار با متغیر وابسته آغاز می‌شود.

گام (6) گام 5 را برای هر یک از متغیرهای غیرتکراری باقیمانده تکرار می‌کنیم؛ تعداد جمله‌های بی‌بعد حاصل، متناظر با تعداد جمله‌های بدست آمده از گام 3 خواهد بود در غیر این صورت باید کار خود را کنترل کنیم.

گام (7) همه‌ی جمله‌های بی‌بعد حاصل را امتحان کنید تا مطمئن شوید بی‌بعد هستند.

گام (8) شکل نهایی را به صورت رابطه‌ای بین جمله‌های بی‌بعد کنید و به مفهوم آن بیندیشید.



روبروی  $L$  عدد 3- قرار می‌دهیم.

به تعداد بعدها اصلی مسأله  $m$ ، از سمت چپ ماتریس را جدا می‌کنیم. در این مسأله ابعاد اصلی جرم، طول و زمان هستند بنابراین  $m=3$  است. سمت چپ را ماتریس هسته و سمت راست را ماتریس باقیمانده می‌نامیم. ماتریس تبدیل برای این مسأله به صورت زیر تولید می‌شود:

	$\Delta P$	Q	d	l	$\rho$	v
M جرم	1	0	0	0	1	0
L طول	-1	3	1	1	-3	2
T زمان	-2	-1	0	0	0	-1
	ماتریس هسته			ماتریس باقیمانده		

پارامترهای ماتریس باقیمانده، فقط در یکی از گروه‌های بی‌بعد ظاهر می‌شوند ولی پارامترهای ماتریس هسته، ممکن است در چند گروه بی‌بعد ظاهر شوند. در ماتریس باقیمانده بایستی متغیرهای ضروری نظیر کمیت هدف و مهمترین پارامترهای فرآیندی و خواص فیزیکی را قرار دهیم. همچنین متغیرهایی که احتمال می‌رود بر فرآیند تأثیر گذارند اما از تأثیر گذاری آن‌ها مطمئن نیستیم، بایستی در ماتریس باقیمانده قرار گیرند تا چنانچه بعداً معلوم شود تأثیری بر فرآیند ندارند به راحتی بتوانیم فقط گروهی را که شامل این متغیر است حذف کنیم بدون اینکه تأثیری بر گروه‌های دیگر بگذارند [10]. از طرفی چون قرار است ماتریس هسته به ماتریس یک‌به تبدیل شود، متغیرها را طوری می‌چینیم تا با کمترین عملیات سطری، به ماتریس یک‌به تبدیل شود. با توجه به نکات فوق، چینش ماتریس تبدیل را به صورت زیر تغییر می‌دهیم:

	$\rho$	d	v	$\Delta P$	q	l
M جرم	1	0	0	1	0	0
L طول	-3	1	2	-1	3	1
T زمان	0	0	-1	-2	-1	0

گام (2) بایستی ماتریس هسته را با اعمال سطری \_ که الگوریتم گاوسی<sup>41</sup> نامیده می‌شود \_ به ماتریس یک‌به<sup>42</sup> تبدیل کنیم.

	$\rho$	d	v	$\Delta P$	q	l
$Z_1 = M$	1	0	0	1	0	0
$Z_2 = 3M + L$	0	1	2	2	3	1
$Z_3 = -T$	0	0	1	2	1	0

همان طور که مشاهده می‌شود، اکنون ماتریس هسته، یک ماتریس بالامثلثی شده است. بنابراین تعداد سطرهایی که حداقل یک درایه ی غیر صفر دارند نشان دهنده ی مرتبه ی ماتریس است. به وضوح ماتریس هسته از مرتبه 3 است. بنابراین باز تأیید می‌شود که

$$\Pi_1 = \varphi(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-m}) \quad (14)$$

که در آن  $\Pi_1$  شامل متغیر وابسته در صورت کسر است. لازم به تأکید است که اگر تحلیل را با فهرست متغیرهای صحیح آغاز کنید (و دیگر گام‌ها را نیز صحیح دنبال کنید)، آنگاه با استفاده از رابطه مبتنی بر جمله‌های پی می‌توان مسأله را بیان کرد. تنها با جمله‌های پی کار کنید و نه متغیرهای منفرد [9].

اما این نهایت نتیجه‌ای است که از تحلیل ابعادی بدست خواهد آمد؛ یعنی رابطه‌ی واقعی بین جمله‌های پی را باید با آزمایش تعیین کرد.

هیچ مجموعه یکتایی از جمله‌های پی برای مسأله‌ی مفروض وجود ندارد اما تعداد جمله‌های لازم طبق قضیه پی ثابت است. مثلاً اگر برای یک مسأله‌ای جملات پی چنین باشند:

$$\Pi_1 = \varphi(\Pi_2, \Pi_3)$$

می‌توانیم به جای  $\Pi_2$ ، گروه پی زیر را جایگزین کنیم:

$$\Pi_2' = \Pi_2^a \Pi_3^b$$

که در آن نماهای  $a$  و  $b$  اعدادی دلخواه هستند. در این صورت رابطه‌ی بین گروه‌های پی چنین می‌شود:

$$\Pi_1 = \varphi(\Pi_2', \Pi_3)$$

سوال مهمی وجود دارد و آن اینکه «بهترین شکل جمله‌های پی کدام است؟» پاسخ ساده‌ای برای این پرسش وجود ندارد. معمولاً تنها راهنمایی آن است که تا حد امکان جمله‌های پی را ساده کنیم. همچنین در انجام آزمایش‌های واقعی، کار کردن با بعضی جمله‌های پی ممکن است ساده‌تر باشد. انتخاب نهایی کاملاً اختیاری است و معمولاً به زمینه و تجربه‌ی پژوهشگر بستگی دارد [9].

### روش ماتریس تبدیل

روش ماتریس ابعادی، روشی بسیار ساده و مرحله به مرحله است و چون با ماتریس بیان می‌شود به راحتی می‌تواند با کامپیوتر کد شود [10]. برای روشن شدن روش، با یک مثال توضیح داده می‌شود. مثال: مسأله افت فشار سیال همگن در لوله مستقیم و هموار. حل: متغیرهای مرتبط در این مسأله به صورت زیر است:

کمیت هدف:	افت فشار $\Delta P$
پارامترهای هندسی:	قطر $d$ و طول $l$ لوله
پارامترهای مواد:	چگالی $\rho$ و ویسکوزیته سینماتیکی $\nu$ سیال
پارامتر مرتبط فرآیند:	دبی سیال $q$

گام (1) ابتدا بایستی ماتریس تبدیل را تشکیل دهیم. سطرهای ماتریس تبدیل را ابعاد اصلی و ستون‌های آن را متغیرهای موثر بر مسأله، تشکیل می‌دهند. بنابراین هر درایه از این ماتریس به این معناست که توان ابعاد متغیر موثر بر مسأله چقدر است؛ مثلاً ابعاد چگالی  $M^1 L^{-3}$  است. بنابراین در ماتریس ابعاد روبروی  $M$  عدد 1 و

تعداد ابعاد اصلی موثر در مسأله،  $m=3$  است.

	$\rho$	$d$	$v$	$\Delta P$	$q$	$l$
$Z_1' = Z_1$	1	0	0	1	0	0
$Z_2' = Z_2 - 2Z_3$	0	1	0	-2	1	1
$Z_3' = Z_3$	0	0	1	2	1	0
	ماتریس یکه			ماتریس باقیمانده		

کمی گاز یافت شود. درصد نسبت حجمی مایع خارج شده همراه گاز به دبی خروجی گاز را درجه‌ی تفکیک جداساز تعریف می‌کنیم. درجه‌ی تفکیک جداساز شاخصی برای عملکرد جداساز خواهد بود. هر چه درجه‌ی تفکیک جداساز کمتر باشد، نشان می‌دهد مقدار مایع کمتری همراه گاز خارج می‌شود و جداساز وظیفه‌ی جداسازی را بهتر انجام داده است.

با استفاده از تکنیک تحلیل ابعادی، تعداد پارامترهای موثر بر مسأله را کاهش داده می‌شود تا بتوان با متغیرهای کمتر و بی‌بعد مسأله را تبیین نمود. سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاه، رابطه‌ی بین اعداد بی‌بعد با درجه تفکیک جداساز بدست می‌آید. در نهایت بر اساس تشابه، نتایج حاصل از آزمایشگاه به جداسازهای در ابعاد بزرگ ابعاد صنعتی - تعمیم داده می‌شود.

#### ۵-۴- پارامترهای موثر بر کیفیت جدایش مایع از گاز

پارامترهای متعددی بر درجه تفکیک جداساز در خروجی گاز موثر هستند. چنانچه بخواهیم بدانیم کدام پارامترها بر درجه تفکیک جداساز تأثیر گذارند بایستی در آزمایشگاه تجربه کنیم یا اینکه از تجربیات دیگران که در کتب و مقالات منتشر شده است استفاده نماییم. معمولاً برای مطالعات اولیه، پارامترهای موثر از منابع علمی استخراج می‌شود سپس با استفاده از آزمایشگاه، صحت و تأثیر این پارامترها بررسی می‌شود. بنابراین برای شروع مسأله، پارامترهای موثر بر جداسازی از منبع [۱] استخراج شده است:

کمیت هدف:	$\eta_g$ درجه تفکیک جداساز در خروجی گاز
پارامتر هندسی:	قطر $d$ و طول $L$ جداساز، $d_p$ قطر قطره مایع
پارامتر مواد:	چگالی گاز $\rho_g$ ، ویسکوزیته‌ی گاز $\mu_g$
پارامتر فرآیند:	دبی گاز $Q$ در فشار و دمای جداساز، $g\Delta\rho$ شتاب گرانشی ضرب در اختلاف چگالی قطره مایع با گاز

#### ۵-۵- تعیین گروه‌های بی‌بعد در جداساز دوفازی

برای تعیین گروه‌های بی‌بعد، از روش ماتریس تبدیل استفاده می‌شود. جزئیات مراحل در ماتریس زیر آورده شده است.

	$Q$	$\rho_g$	$d$	$g\Delta\rho$	$\mu_g$	$L$	$d_p$	$\eta_g$
M جرم	0	1	0	1	1	0	0	0
L طول	3	-3	1	-2	-1	1	1	0
T زمان	-1	0	0	-2	-1	0	0	0
$R_1 = -T$	1	0	0	2	1	0	0	0
$R_2 = L$	3	-3	1	-2	-1	1	1	0

گام ۳) در نهایت پارامترهای ماتریس باقیمانده، صورت کسر جملات پی و پارامترهای ماتریس یکه، با توان‌های متناظرشان، در مخرج کسر قرار می‌گیرند (نگاه کنید به رابطه‌ی (۱۵)).

$$\Pi_1 \equiv \frac{\Delta P}{\rho^1 d^{-2} v^2} = \frac{\Delta P d^2}{\rho v^2}$$

$$\Pi_2 \equiv \frac{q}{\rho^0 d^1 v^1} = \frac{q}{d v} \quad (15)$$

$$\Pi_3 \equiv \frac{l}{\rho^0 d^1 v^0} = \frac{l}{d}$$

نکته ۱: پارامترهای ماتریس هسته، همان پارامترهای تکراری‌اند که در روش قبل بیان شد.

نکته ۲: تحلیل ابعادی شکل گروه‌های پی را مشخص نمی‌کند. بلکه این طراح است که با پاسخ دادن به این پرسش که «کدام پارامترها را در ماتریس هسته قرار دهیم؟» شکل گروه‌های پی را تعیین می‌کند. این پرسش دقیقاً معادل این پرسش در روش قبل است؛ «کدام پارامترها را متغیرهای تکراری قرار دهیم؟». همان طور که قبلاً اشاره شد انتخاب پارامترهای تکراری به فیزیکی فرآیند و مناسب بودن آنها در ارزیابی داده‌های آزمایشگاهی بستگی دارد. اما ممکن است قبل از انجام تحلیل ابعادی پاسخ این سوال مشخص نباشد، هیچ نگرانی در این حالت نیست و می‌توان با توجه به نکته ۳ عمل کرد.

نکته ۳: حتی اگر در نهایت به اعداد بی‌بعدی برسیم که تشخیص دهیم برای تبیین مسأله مناسب نیستند می‌توانیم با ضرب و تقسیم اعداد بی‌بعد بدست آمده، به اعداد بی‌بعد جدید مناسب دست یابیم. این کار به منزله‌ی تغییر متغیرهای تکراری است؛ یعنی چنانچه از ابتدا متغیرهای دیگری را در ماتریس هسته می‌نشانیم به همین ابعاد بی‌بعد جدید دست می‌یافتیم [۱۰].

#### ۵-۳- ارائه روش حل مسأله بازده جداساز در خروجی گاز

وظیفه‌ی اصلی جداساز دوفازی، جدا کردن فاز مایع و گاز است طوری که در خروجی گاز، مایعی همراه گاز خارج نشود و در خروجی مایع، گازی همراه مایع خارج نشود. ایده آل آن است که در خروجی گاز هیچ مایعی یافت نشود اما در عمل، ممکن است که در خروجی گاز علاوه بر گاز، کمی مایع نیز خارج شود یا اینکه در خروجی مایع

اصلی به معنای وجود تشابه دینامیکی است، می توان نتیجه گرفت که تساوی اعداد بدون بعد بین مدل و جسم اصلی در بطن خود انواع دیگر تشابه را نیز نهفته دارد.

### روش طراحی جداساز بر پایه‌ی مدل ارائه شده

در گروه‌های بی‌بعد بدست آمده، تمام مقادیر پارامترهای ظاهر شده برای جسم مدل، در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شوند. در واقع طول و قطر جداساز مدل معلوم است، دبی و چگالی گاز و تمام پارامترهای دیگر برای جداساز مدل جزو معلومات مسأله هستند. در طرف دیگر، برای جداساز اصلی، فقط طول و قطر مجهول و باقی پارامترها معلوم هستند. همانطور که قبلاً ذکر شد، طراحی جداساز در یک معنا به مفهوم تعیین طول و قطر جداساز است. بنابراین، برای تعیین طول و قطر جداساز اصلی، کافی است که گروه‌های بی‌بعد جداساز اصلی را برابر گروه‌های بی‌بعد برای جداساز مدل قرار دهیم. در این صورت به سادگی مقادیر طول و قطر جداساز اصلی محاسبه می‌شود.

### ۶- نتیجه‌گیری

با بررسی تاریخچه‌ی روش‌های طراحی جداساز به روش کلاسیک، دریافت شد که روش کلاسیک می‌تواند به عنوان طراحی اولیه جداساز استفاده شود اما به هیچ وجه طراحی بهینه نخواهد بود. در برخی از روش‌های کلاسیک، برخی پارامترهای مهم طراحی نظیر ضریب  $k$  در رابطه‌ی سرعت حد، زمان ماند، طول جوش تاجوش و نسبت لاغری مبنای تئوری قوی ندارند و از داده‌های تجربی و میدانی بدست می‌آیند. به همین دلیل، برای اطمینان از عملکرد جداساز، فرضیات به طور محتاطانه لحاظ می‌شوند تا عملکرد جداساز با مشکل روبرو نشود. طراحی محتاطانه اندازه‌ی جداساز را بیش از اندازه بزرگ می‌کند. با این حال چنانچه به هر دلیلی فقط روش کلاسیک در اختیار طراح باشد، استاندارد API منبع خوبی برای مقادیر زمان ماند و ضریب  $k$  است. اما ضعف اصلی طراحی کلاسیک، عدم طراحی اجزای داخلی جداساز است که تأثیر شگرفی بر جدایش فازها دارد.

برای رفع کاستی‌های روش کلاسیک، روش‌های مبتنی بر CFD جایگزین خوبی است که سال‌های اخیر تحقیقاتی در این زمینه انجام شده است. مبنای اصلی روش‌های بر پایه‌ی CFD شبیه‌سازی با کامپیوتر و اعتبارسنجی با نتایج آزمایشگاهی است.

در این مقاله، روشی جدید برای طراحی جداساز دوفازی مطرح گردید. این روش مبتنی بر تحلیل ابعادی و تشابه بین جداساز مدل و جداساز واقعی ارائه گردید. ابتدا به کمک تحلیل ابعادی، گروه‌های بی‌بعد موثر بر کیفیت عملکرد جداساز دوفازی، تعیین شدند. سپس نحوه‌ی تعمیم نتایج جداساز مدل به جداساز واقعی با برقراری تساوی میان گروه‌های بی‌بعد برای جداساز مدل و جداساز اصلی، تشریح شد. از برقراری تساوی میان گروه‌های بی‌بعد، طول و قطر مناسب برای

$R_3 = M$	0	1	0	1	1	0	0	0
$Z_1 = R_1$	1	0	0	2	1	0	0	0
$Z_2 = 3R_1 - L$	0	3	-1	8	4	-1	-1	0
$Z_3 = -3R_3 + Z_2$	0	0	-1	5	1	-1	-1	0
$X_1 = Z_1$	1	0	0	2	1	0	0	0
$X_2 = Z_3 - Z_2$	0	-3	0	-3	-3	0	0	0
$X_3 = -Z_3$	0	0	1	-5	-1	1	1	0
$Y_1 = X_1$	1	0	0	2	1	0	0	0
$Y_2 = X_2 / (-3)$	0	1	0	1	1	0	0	0
$Y_3 = X_3$	0	0	1	-5	-1	1	1	0
	ماتریس یکه			ماتریس باقیمانده				

بنابراین، گروه‌های بی‌بعد برای مسأله‌ی جداسازی فاز مایع از جریان گاز در جداساز دوفازی به صورت زیر است:

$$\Pi_1 = \frac{g \Delta \rho}{Q^2 \rho_g^1 d^{-5}} = \frac{g \Delta \rho d^5}{Q^2 \rho_g}$$

$$\Pi_2 = \frac{\mu_g}{Q^1 \rho_g^1 d^{-1}} = \frac{\mu_g d}{Q \rho_g}$$

$$\Pi_3 = \frac{L}{Q^0 \rho_g^0 d^1} = \frac{L}{d} \quad (16)$$

$$\Pi_4 = \frac{d_p}{Q^0 \rho_g^0 d^1} = \frac{d_p}{d}$$

$$\Pi_5 = \frac{\eta_g}{Q^0 \rho_g^0 d^0} = \eta_g$$

بنابراین کیفیت عملکرد جداساز دوفازی، در جدایش فاز مایع از فاز گاز را می‌توان اینگونه بیان نمود:

$$\eta_g = f \left( \frac{g \Delta \rho d^5}{Q^2 \rho_g}, \frac{\mu_g d}{Q \rho_g}, \frac{L}{d}, \frac{d_p}{d} \right) \quad (17)$$

### ۵-۶- بحث درباره‌ی اعداد بی‌بعد در مسأله جداساز دوفازی

مهمترین مسأله در طراحی بر پایه‌ی داده‌های آزمایشگاهی نحوه‌ی تعمیم نتایج از نمونه‌ی کوچکتر (نمونه‌ی آزمایشگاه) به نمونه‌ی صنعتی است. به عبارت دیگر چه تضمینی وجود دارد که برای جداساز با ابعاد بزرگتر نتایج مشابه نتایج آزمایشگاهی بدست آید.

اگر بین جسم مدل و جسم اصلی تشابه وجود داشته باشد نتایج بدست آمده برای مدل، قابل تعمیم به جسم اصلی است. تشابه باید در سه جهت برقرار باشد؛ تشابه هندسی، تشابه سینماتیکی و تشابه جرمی. با توجه به اینکه تساوی اعداد بدون بعد بین مدل و جسم

جداساز واقعی محاسبه می شود.

## ۷- مراجع

- Thome, J.R., *Engineering data book III*. Wolverine Tube Inc, 2004. ۶
- Monnery, W.D. and W.Y. Svrcek, *Successfully specify three-phase separators*. Chemical engineering progress, 1994, 90(9): p. 29-40. ۷
- صادقی، کیوان؛ مکانیک سیالات، انتشارات پارسه، تهران، ویرایش سوم، ۱۳۹۱. ۸
- روی.مانسون، بروس؛ اف.بانگ، دونالد؛ اچ.اکی شی، تنودر؛ فیروزآبادی، بهار؛ مکانیک سیالات، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ویرایش چهارم، ۱۳۸۷. ۹
- Zlokarnik, M., *Scale-up in chemical engineering*. 2006: John Wiley & Sons. ۱۰
- Ken Arnold, M.S., *Surface Production Operation*. Vol. 1. 2008, New York: Gulf Professional Publishing. ۱
- Chilingarian, G.V., J.O. Robertson, and S. Kumar, *Surface Operations in Petroleum Production, I*. 1987: Elsevier. ۲
- SPEC, A., *12J, Specification for Oil and Gas Separators, eighth*, 2008, Washington, DC: API. ۳
- Mokhatab, S. and W.A. Poe, *Handbook of natural gas transmission and processing*. 2006: Gulf Professional Publishing. ۴
- Souders, M. and G.G. Brown, *Design of fractionating columns I. Entrainment and capacity*. Industrial & Engineering Chemistry, 1934. 26(1): p. 98-103. ۵

## زیر نویس ها

- <sup>۱</sup> wellhead  
<sup>۲</sup> physical separation  
<sup>۳</sup> treatment  
<sup>۴</sup> separator  
<sup>۵</sup> compressor suction and discharges  
<sup>۶</sup> gravity separator  
<sup>۷</sup> cyclone  
<sup>۸</sup> thermal treater  
<sup>۹</sup> electrostatic treater

<sup>۱۰</sup>- از این پس، هر جا که اصطلاح «جداساز» در این مقاله به کار رود، منظور جداساز گرانشی است.

- <sup>۱۱</sup> process design  
<sup>۱۲</sup> mechanical design  
<sup>۱۳</sup> head  
<sup>۱۴</sup> computational fluid mechanics  
<sup>۱۵</sup> three phase test separator  
<sup>۱۶</sup> primary separation section  
<sup>۱۷</sup> secondary separation section  
<sup>۱۸</sup> gravity separation section  
<sup>۱۹</sup> liquid collection section  
<sup>۲۰</sup> mist extractor section  
<sup>۲۱</sup> coalescing section  
<sup>۲۲</sup> inlet diverter  
<sup>۲۳</sup> momentum  
<sup>۲۴</sup> retention time  
<sup>۲۵</sup> vanes  
<sup>۲۶</sup> wire mesh  
<sup>۲۷</sup> terminal velocity  
<sup>۲۸</sup> Souders  
<sup>۲۹</sup> Brown  
<sup>۳۰</sup> drag force  
<sup>۳۱</sup> Standard cubic meter per hour  
<sup>۳۲</sup> Gas Processors Suppliers Association  
<sup>۳۳</sup> Monnery  
<sup>۳۴</sup> Svrcek  
<sup>۳۵</sup> surge time

<sup>۳۶</sup> holdup time

<sup>۳۷</sup> re-entrainment

<sup>۳۸</sup> visualization

<sup>۳۶</sup> - M بعد جرم، L بعد طول و T بعد زمان است. می توان به جای جرم از نیرو برای تبیین ابعاد یک متغیر استفاده نمود. در این صورت از سیستم FLT استفاده شده است.

<sup>۴۰</sup> - متغیر تکراری، متغیری است که ممکن است در چند گروه بی بعد ظاهر شود. اما متغیر غیر تکراری فقط در یک گروه بی بعد ظاهر خواهد شد.

<sup>۴۱</sup> - Gaussian algorithm: در این الگوریتم، با اعمال سطری ابتدا ماتریس را به ماتریس بالامثلثی \_\_ ماتریسی که درایه های زیر قطر اصلی آن همگی صفر هستند \_\_ تبدیل می کنیم (در این حالت، تعداد سطرهایی که حداقل یک درایه ی غیر صفر دارند مرتبه ماتریس را نشان می دهد. در تحلیل ابعادی مرتبه ی ماتریس تبدیل، تعداد ابعاد اصلی مسأله است). پس از آنکه با اعمال سطری، ماتریس هسته را به ماتریس بالامثلثی تبدیل کردیم، بایستی دوباره با اعمال سطری به ماتریس یکه تبدیل کنیم.

<sup>۴۲</sup> - ماتریس یکه ماتریسی است که قطر اصلی آن یک و درایه های دیگر آن صفر هستند.