

مروری بر مدل‌سازی جداکننده‌های چندفازی گرانشی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

زهرة خلیفات^۱، مرتضی زیودار^{۲*}، رهبر رحیمی^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

پیام‌نگار: mzivdar@eng.usb.ac.ir

چکیده

جداکننده‌های چندفازی گرانشی یکی از مهمترین تجهیزات برای جدایش فازهای با ارزش در صنایع مختلف به‌شمار می‌روند. به‌دلیل ضعف‌های مربوط به مدل‌های نیمه‌تجربی و هزینه‌های بالای انجام آزمایش برای یافتن طراحی بهینه برای این جداکننده‌ها، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) رو به گسترش است. در این تحقیق پس از مرور کلی جداکننده‌های گرانشی به بررسی مروری بر کارهای انجام‌شده با استفاده از CFD برای انتخاب مدل مناسب در طراحی و بهینه‌سازی جداکننده‌ها، پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه استفاده از CFD یک روش قدرتمند برای مدل‌سازی و بهبود طراحی جداکننده است ولی کاستی‌های آن همچون استفاده از مدل نادرست، فرضیات ساده‌کننده و روش بهینه‌سازی نامناسب، منجر به نبود دقت کافی در نتایج شبیه‌سازی و بهینه‌سازی شده است که باید در کارهای آینده بررسی شوند.

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۵/۲۱

شماره صفحات: ۶۵ تا ۵۴

کلیدواژه‌ها: جداکننده گرانشی،

شبیه‌سازی، دینامیک سیالات

محاسباتی، جریان چندفازی

۱. مقدمه

یک جداکننده با بازده بالا استفاده کرد تا از اتلاف این ذخائر مهم جلوگیری شود. لازم به ذکر است که علاوه بر اهمیت جدایش فازهای با ارزش، عملکرد این جداکننده‌ها تأثیر به‌سزایی بر واحدهای پایین‌دستی مانند پمپ‌ها یا کمپرسورها دارد. از این رو طراحی دقیق جداکننده‌ها برای دسترسی به بازده بالای جدایش و جلوگیری از خسارت واحدهای پایین‌دستی امری ضروری است [۱]. در گذشته از طراحی‌های مبنی بر API^۱ برای این جداکننده‌ها استفاده می‌شد که

جداکننده‌های چندفازی گرانشی یکی از نخستین و مهمترین تجهیزات برای جدایش فازهای امتزاج‌ناپذیر در صنایع مختلف به‌شمار می‌روند. برای نشان دادن اهمیت این جداکننده‌ها می‌توان به استخراج نفت از چاه نفت اشاره کرد. نفت استخراجی از چاه‌ها معمولاً به صورت دو فاز گاز-نفت، نفت-آب یا به صورت سه‌فاز گاز-نفت-آب است که برای دسترسی به نفت یا گاز خالص باید از

1. American Petroleum Institute

* زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، گروه مهندسی شیمی

برای بهبود طراحی و عملکرد این تجهیزات استفاده شده است [۳-۵].

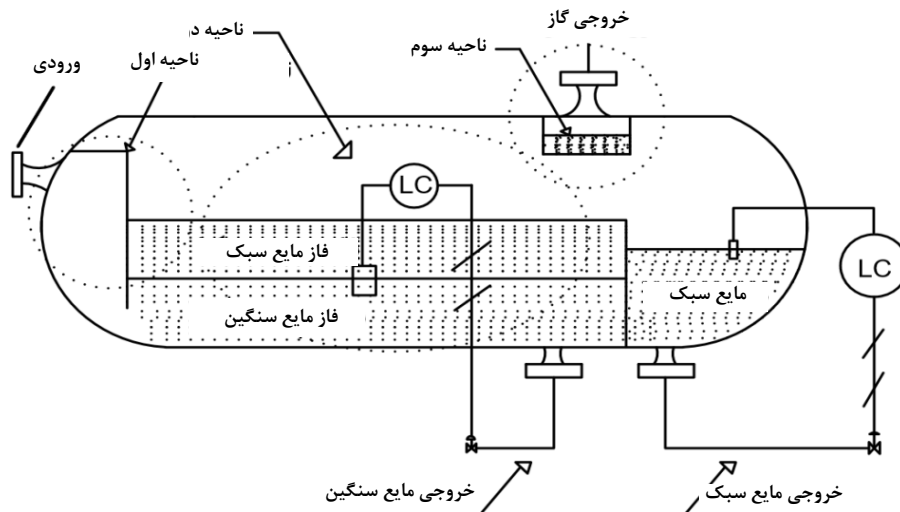
با توجه به اهمیت جداکننده‌های چندفازی گرانشی در صنعت و نیاز به ارائه یک روش مناسب عددی در طراحی و بهینه‌سازی جداکننده‌ها و همچنین با توجه به اینکه توسعه یک مدل مناسب با استفاده از CFD پیش‌نیاز طراحی و بهینه‌سازی جداکننده‌ها است، در این مطالعه به بررسی مروری بر مدل‌سازی‌های انجام‌شده با استفاده از CFD روی جداکننده‌های گرانشی پرداخته شده است تا با ارائه یک چارچوب جامع، به محققان این حوزه کمک شود. به منظور بررسی بهتر در این تحقیق، پیش از مرور مطالعات عددی انجام‌شده، ابتدا به مرور کلی جداکننده‌های گرانشی پرداخته و در پایان پیشنهادهایی برای بهبود تحقیقات انجام‌شده در زمینه شبیه‌سازی جداکننده‌ها ارائه شده است.

۲. جداکننده‌های گرانشی در صنعت نفت و گاز

در حالت کلی جداکننده‌های گرانشی به دودسته کلی جداکننده‌های دوفازی و سه‌فازی در دو حالت افقی و عمودی دسته‌بندی می‌شوند. این جداکننده‌ها اغلب به سه ناحیه اصلی برای جدایش فازها تقسیم می‌شوند که این نواحی در شکل (۱) نشان داده شده است: ناحیه نخست، ناحیه‌ای است که در آن جدایش دوفاز گاز و مایع در اثر برخورد جریان سیال با یک صفحه انحراف‌دهنده ورودی و تغییر ناگهانی در جهت و سرعت سیال، ایجاد می‌شود. درحقیقت این تغییر ناگهانی در جهت و سرعت باعث می‌شود که قطرات بزرگ مایع روی صفحه انحراف‌دهنده ورودی تجمع و در اثر نیروی جاذبه به سمت پایین حرکت کنند. ناحیه دوم به ناحیه جدایش گرانشی معروف است؛ در این ناحیه، فازهای بخار و مایع با سرعت و آشفتگی کمتر حرکت می‌کنند و قطره‌های مایع که در ناحیه نخست موفق به جدا شدن از فاز گاز نشده‌اند، در این ناحیه با نیروی جاذبه به سمت پایین جداکننده حرکت می‌کنند. لازم به ذکر است که نیروی جاذبه قادر به جداسازی همه قطره‌های ریز نیست و این قطرات بسیار ریز که نتوانسته‌اند در اثر نیروی جاذبه ته‌نشین شوند به ناحیه سوم یعنی ناحیه حذف نم‌نهایی یا نم‌گیرها می‌روند. در این ناحیه بسته به نیاز از نم‌گیرهای متفاوتی مانند صفحات موجدار، پدهای توری به هم بافته‌شده و غیره استفاده می‌شود. درحقیقت

این روش‌ها از قانون سرانگشتی^۱ برای طراحی ابعادی جداساز و تعیین زمان ماند برای جدایش فازها استفاده می‌کند ولی به دلیل در نظر نگرفتن شرایطی مانند آرمانی نبودن سیال و اثر تجهیزات داخلی جداکننده، منجر به طراحی‌هایی با ابعاد بالا و نامناسب می‌شوند. در روش‌های دقیق‌تر برای طراحی جداساز از قانون سقوط قطره برای جدایش قطرات مایع از گاز و مایع از مایع، استفاده می‌شود. زمان ماند مناسب در این روش‌ها از راه داده‌های آزمایشگاهی و صنعتی استخراج می‌شود [۲]. درحقیقت این مدل‌های نیمه‌تجربی از شرایط و فرض‌های ساده‌شونده‌ای همچون سقوط قطرات با سرعت ثابت، سقوط از بالاترین نقطه جداساز، تأثیر نداشتن جریان آشفته و تأثیر نداشتن تجهیزات داخلی بر پدیده جدایش استفاده می‌کنند. همچنین در این روش‌ها برای برخی از مؤلفه‌ها مانند نسبت طول به قطر، یک محدوده ارائه می‌شود. بنابراین شرکت‌های طراحی جداساز همواره از روش‌های آزمایشگاهی برای صحت‌سنجی طراحی و تعیین حدود مؤلفه‌های مجهول استفاده می‌کنند. افزون بر این با توجه به در نظر نگرفتن اثر تجهیزات داخلی در تمام روش‌های موجود طراحی، استفاده از طراحی‌های جدید یعنی در نظر گرفتن اثر تجهیزات درونی مانند صفحات هدایت‌کننده ورودی، گرداب‌شکن، نم‌گیرها، صفحات سوراخ‌دار و غیره، برای ترکیب‌شدن با روش‌های طراحی موجود ضروری است [۳]. بررسی اثر هر کدام از این مؤلفه‌ها برای یافتن بهترین بازده نیز به انجام آزمایش‌های متعدد نیاز دارد. طبق بررسی‌های انجام‌شده مشخص شده است که به دلیل متفاوت بودن خواص فیزیکی سیالات در یک میدان نفتی و شرایط آزمایشگاهی و همچنین متفاوت بودن اثر تجهیزات داخلی در شرایط آزمایشگاهی و صنعتی، رسیدن به یک طراحی بهینه برای جداساز بدون انجام آزمایش‌های وقت‌گیر و هزینه‌بر امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی ریاضی در این کار امری ضروری به‌شمار می‌رود تا با توسعه یک مدل مناسب برای شبیه‌سازی جداکننده‌ها بتوان با اطمینان، مناسب‌ترین طراحی را برای داشتن بهترین عملکرد یک جداکننده انتخاب کرد. به‌تازگی، به دلیل برتری‌های مناسب CFD نسبت به آزمایش، مانند صرف وقت و هزینه کمتر، امکان دسترسی به داده‌های مهندسی در نقاط مختلف سامانه و بررسی جامع‌تر مدل جریان از دینامیک سیالات محاسباتی

1. Thumb Rule



شکل ۱. تقسیم‌بندی جداکننده به نواحی مختلف [۵].

کمتر از ۱۵ تا ۲۰٪ جرمی کل جریان باشد) دسته‌بندی می‌شوند که در شکل (۲) نشان داده شده‌است [۸ و ۲]. از مهمترین تجهیزات درونی جداکننده‌ها می‌توان به هدایت کننده‌های ورودی، صفحات سوراخ‌دار یا بافل‌ها و نم‌گیرها اشاره کرد [۹ و ۵].

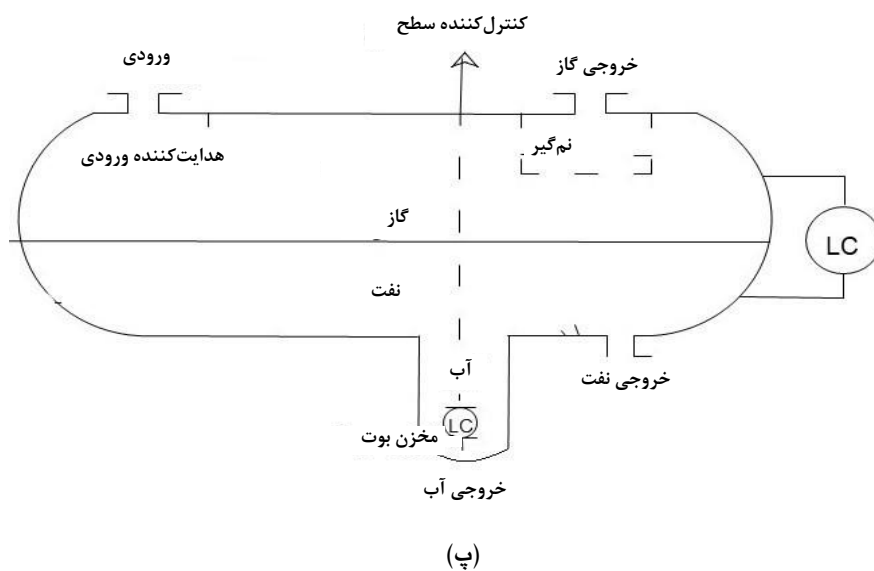
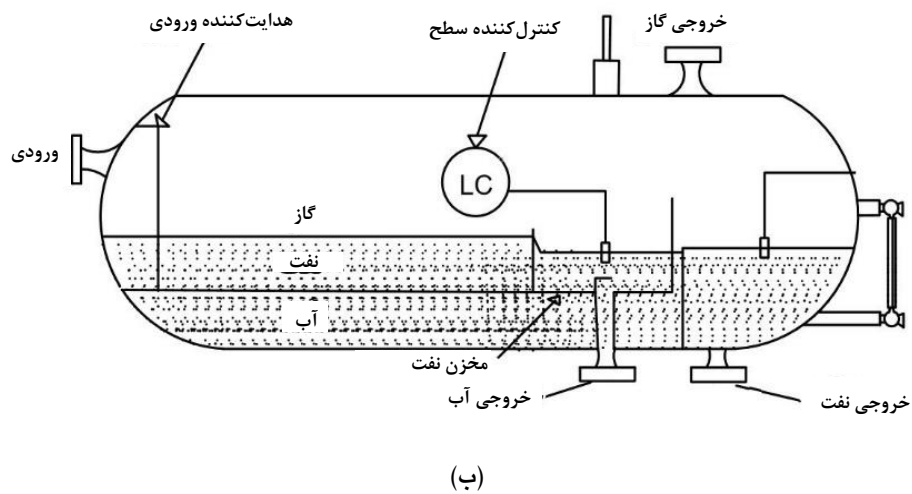
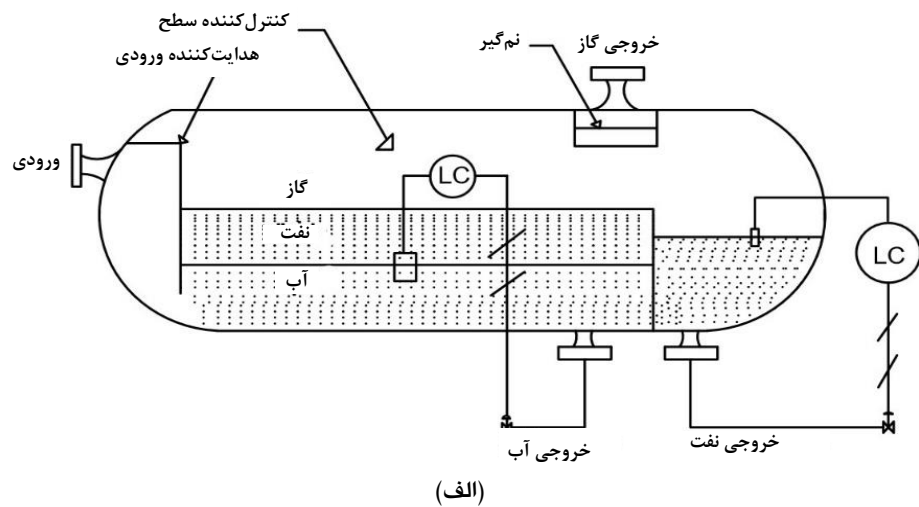
۳. مدل‌های مورد استفاده در جریان چندفازی

به‌طور کلی از دو دیدگاه برای مدل‌سازی جریان چندفازی استفاده می‌شود: دیدگاه اولر- لاگرانژ و دیدگاه اولر- اولر. در دیدگاه اولر- لاگرانژ یک‌فاز پیوسته و چندفاز پراکنده بررسی می‌شوند که فاز پیوسته به‌وسیله حل معادلات ناویراستوکس و فاز ناپیوسته از ردیابی تعداد زیادی ذرات در فاز پیوسته بر مبنای قانون دوم نیوتن مدل می‌شوند. مدل فاز پراکنده^۴ (DPM) مربوط به این دیدگاه است. در دیدگاه اولر- اولر، همه فازها به‌صورت فاز پیوسته در هم نفوذکننده در نظر گرفته می‌شوند که با یکدیگر بر همکنش دارند و به‌وسیله معادلات ناویراستوکس مدل می‌شوند. استفاده از این دیدگاه منجر به مدل‌های حجم سیال^۵ (VOF)، مدل مخلوط^۶ و مدل اولری^۷ می‌شود. مدل‌های $k-\epsilon$ ، $k-\omega$ و مدل تنش رینولدز^۸ (RSM) مدل‌های مختلف آشفتگی برای بررسی آشفتگی جریان هستند [۱۳-۱۰ و ۳].

پس از برخورد جریان گاز دارای قطرات بسیار ریز با نم‌گیرها، این قطرات روی نم‌گیرها تجمع می‌یابند و پس از تشکیل قطرات بزرگتر، در اثر نیروی جاذبه ته‌نشین می‌شوند [۵]. در جداکننده‌های دوفازی مایع- مایع یا هنگام جدایش دوفاز مایع در یک جداکننده سه‌فازی، دو سازوکار فیزیکی مهم انعقاد قطرات (که در این حالت، دو قطره به هم می‌چسبند) و ته‌نشینی قطرات اتفاق می‌افتد. در حالت کلی دوفاز به دلیل اختلاف چگالی از هم جدا شده، سپس قطراتی از فاز سبک (نفت) که در فاز سنگین (آب) و قطراتی از فاز سنگین که در فاز سبک هستند، در اثر تماس و ایجاد زمان اقامت کافی، هرکدام به فاز مربوط به خود می‌پیوندند [۶ و ۷]. لازم به ذکر است که جداکننده‌های سه‌فازی افقی به دلیل سطح تماس بیشتر بین فازها از کاربرد بیشتری در صنعت برخوردارند که این جداکننده‌ها معمولاً به چهار نوع جدا کننده سه‌فازی افقی همراه با سرریز^۱ (هنگامی که مایع سنگین زیاد باشد)، جداکننده سه‌فازی افقی سبک و سرریز^۲ (هنگامی که نسبت شدت جریان مایع سنگین به سبک، زیاد یا اختلاف چگالی دو فاز کم باشد و همچنین برای حالتی که کنترل سطح مشترک دو فاز مایع به دلیل مقدار زیاد امولسیون یا پارافین کار سختی باشد) و جداکننده سه‌فازی افقی همراه با بوت^۳ (زمانی که حجم مایع سنگین قابل توجه نباشد؛ یعنی مقدار آن

4. Dispersed Phase Model
5. Volume of Fluid
6. Mixture Model
7. Eulerian Model
8. Reynold's Stress Model

1. Weir Separator
2. Bucket and Weir
3. Boot Separator



شکل ۲. نمایی از جداکننده سه‌فازی افقی (الف) دارای سرریز (ب) دارای سبده و سرریز (ج) دارای بوت [۵].

۴. مطالعات CFD انجام شده روی جداکننده‌های

چندفازی گرانشی

ویلیکینسون^۱ و همکاران، یک جداکننده دوفازی را (نفت-آب) در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از مدل DPM و مدل آشفتگی k-ε شبیه‌سازی کردند. بررسی اثر میزان بازبودن صفحات سوراخ‌دار روی یکنواخت‌تر شدن جریان، هدف اصلی این کار بوده‌است. اگرچه نتایج CFD هنگام مقایسه توزیع سرعت در بعضی نقاط با شرایط آزمایشگاهی هم‌خوانی داشت؛ ولی نتایج مربوط به مقایسه میزان فضای بهینه باز بافل‌های سوراخ‌دار در مدل و آزمایشگاه متفاوت بودند [۱۴].

فرانکیس و لی^۲ به مطالعه مدل جریان در جداکننده دوفازی (نفت-آب) و سه‌فازی دارای سرریز (گاز-نفت-آب) در مقیاس آزمایشگاهی پرداختند. در این کار اثر شکل نازل ورودی، توزیع‌کننده جریان، هدایت‌کننده ورودی، صفحات سرریز، صفحات سوراخ‌دار و شکل نازل خروجی هرکدام به‌صورت جداگانه بدون بررسی اثر برهمکنش بین مؤلفه‌ها، روی بازده جداکننده بررسی شد. از مدل چندفازی VOF و مدل آشفتگی k-ε در این شبیه‌سازی استفاده شده‌است. نتایج نشان دادند که همه تجهیزات درونی استفاده شده در این کار روی خطوط جریان تأثیرگذار بوده‌اند. برای بعضی از جداکننده‌ها که دارای داده‌های آزمایشگاهی بودند مقایسه بین CFD و نتایج آزمایشگاهی برحسب توزیع سرعت، برای اعتبارسنجی استفاده شد و در بقیه موارد بدون اعتبارسنجی، تنها از بهبود خطوط جریان به‌دست‌آمده از نتایج شبیه‌سازی برای بررسی اثر تجهیزات داخلی جداکننده استفاده شد [۱۵].

لو^۳ و همکاران، اثر بافل‌های سوراخ‌دار را روی بهبود عملکرد جداکننده دوفازی در مقیاس صنعتی بررسی کردند. به‌دلیل ساختار و هندسه متقارن جداکننده تنها نیمی از مخزن مدل‌سازی شده‌است. این فرض ساده‌کننده به‌دلیل انحراف زیاد از رژیم جریان پلاگ درون جداکننده منطقی نبوده‌است. مدل چندفازی مخلوط و مدل آشفتگی k-ε بدون اعتبارسنجی مدل در این کار استفاده شده‌است. از بهبود خطوط و مدل جریان به‌عنوان معیاری برای بهبود عملکرد جداکننده هنگام استفاده از بافل استفاده شده‌است.

نتایج CFD نشان دادند که با نصب بافل‌های سوراخ‌دار، توزیع جریان با تبدیل چرخش‌های بزرگ جریان به چرخش‌های کوچک، بهتر شده‌است. در ادامه در این کار از مدل DPM استفاده شد تا با ردیابی ذره‌های سیال به بررسی زمان اقامت پرداخته شود. در این مرحله از افزایش زمان اقامت ذرات سیال به‌عنوان معیاری برای بهبود عملکرد جداکننده، استفاده شد. با توجه به نتایج CFD، زمان اقامت فاز نفت بعد از نصب بافل سوراخ‌دار از ۵۲۰ ثانیه به ۷۴۵ ثانیه و برای آب از ۶۳۰ ثانیه به ۹۸۰ ثانیه افزایش یافت [۱۶].

ویلاجین و آخراس^۴ به بررسی اثر هدایت‌کننده ورودی از نوع سیکلونی در یک جداکننده سه‌فازی افقی دارای سرریز، پرداختند. در این کار از مدل اولری برای شبیه‌سازی استفاده شد و بدون اعتبارسنجی مدل تنها با معیار بهبود توزیع سرعت در جداکننده و یکنواخت‌تر شدن مدل جریان بعد از قراردادن این‌نوع ورودی، نتیجه گرفتند که جداکننده دارای عملکرد بهتری شده‌است [۱۷].

محمدی قلعه‌نی و همکاران، به شبیه‌سازی یک جداکننده دوفازی افقی گاز-مایع در مقیاس صنعتی پرداختند. در این کار از مدل چندفازی VOF و مدل آشفتگی k-ε استفاده شده‌است. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی تطابق خوبی نداشتند، با این‌وجود هدف اصلی در این کار، بررسی اثر افزایش دبی جریان ورودی روی ماندگی قطرات مایع در جریان گاز خروجی بوده‌است. نتایج نشان داد که افزایش دبی به‌دلیل کاهش زمان اقامت مایع در ناحیه جداسازی گرانشی، منجر به افزایش حضور قطرات مایع در جریان گاز خروجی و در نتیجه کاهش بازده جداکننده شده‌است [۱۸].

هایتهام حسین^۵ و همکاران، اثر مکان‌های مختلف بافل را روی یکنواخت‌کردن جریان در یک جداکننده گرانشی دوفازی (نفت-آب) در مقیاس آزمایشگاهی بررسی کردند. در این کار از مدل VOF استفاده شد. توزیع سرعت به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با نتایج یک کار نظری ارائه‌شده در این تحقیق از تطابق خوبی برخوردار بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که بهترین مکان بافل برای حداقل شدن حجم ناحیه چرخشی در طول جداکننده بین ۷۵ تا ۸۰ درصد از طول کلی جداکننده بوده‌است [۱۹].

حاجی‌دولو و همکاران، یک جداکننده افقی دوفازی را (نفت-گاز) در مقیاس صنعتی شبیه‌سازی کردند. در این شبیه‌سازی از مدل

1. Wilkinson
2. Frankiewicz and Lee
3. Lu

4. Vilagine and Akhras
5. Haitham Hussein

انعقاددهنده‌ها^۴ و بافل‌ها به صورت محیط متخلخل به جای در نظر گرفتن این تجهیزات با جزئیات کامل، برای ساده‌سازی بوده است. برای این کار و برای به دست آوردن ضرائب مورد نیاز برای اعمال در مدل محیط متخلخل، از داده‌های واقعی برای محاسبه افت فشار بر حسب سرعت استفاده و بعد از به دست آمدن ضرائب مناسب از مدل محیط متخلخل استفاده شد. اگرچه اعتبارسنجی این مدل با نتایج آزمایشگاهی انجام نشده است؛ ولی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که رفتار کلی جداکننده هنگام ساده‌سازی مدل‌سازی با استفاده از مدل محیط متخلخل در تطابق خوبی با رفتار جداکننده هنگام استفاده از این تجهیزات داخلی با جزئیات کامل و بدون ساده‌سازی است [۲۳].

با توجه به آنچه تاکنون درباره مطالعات انجام شده گفته شد، می‌توان چنین بیان کرد که:

- بدون توجه به اعتبارسنجی مدل به بررسی اثر مؤلفه‌های مختلف روی بازده جداکننده پرداخته شده است.
- در برخی موارد که اعتبارسنجی انجام شده است از مؤلفه‌هایی مانند توزیع سرعت و زمان اقامت برای مقایسه استفاده شده است. در حقیقت صحت‌سنجی باید بر اساس بازده جداکننده بر حسب توزیع جرم هریک از فازها در خروجی‌های جداکننده (به عنوان مثال میزان حضور قطرات مایع در فاز گاز) حساب شود، زیرا اگرچه ممکن است معیارهایی مانند سرعت و زمان اقامت از نتایج آزمایشگاهی و مدل یکسان باشند اما لزوماً بازده کلی جداکننده از مدل و نتایج تجربی یکسان نمی‌شود و بدون انجام این کار دقت شبیه‌سازی انجام شده مشخص نمی‌شود [۵].
- در بهینه‌سازی جداکننده هنگام اضافه کردن تجهیزات داخلی از مؤلفه‌هایی مانند بهبود زمان اقامت، بهبود توزیع سرعت و کاهش آشفتگی یا یکنواختی جریان به عنوان معیاری برای بهبود بازده کلی جداکننده استفاده شده است. شایان ذکر است که اگرچه بهبود این مؤلفه‌ها به جدایش بهتر فازها کمک می‌کند، اما لزوماً باعث افزایش بازدهی مؤثر در جداکننده نمی‌شود [۵]. به عنوان مثال اضافه کردن یک بافل می‌تواند از طرفی با بهبود مدل جریان باعث جدایش بهتر فازها و افزایش بازده جداکننده شود و از طرفی

چندفازی VOF و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده شده است. هدف اصلی در این کار تأثیر ورودی سیکلونی بر آشفتگی جریان در طول جداکننده، هنگام افزایش دبی - که یک مشکل اساسی در صنعت است - بوده است. مدل مورد نظر در این کار صحت‌سنجی نشده است. معیار بهبود در این جداکننده نیز، بهبود توزیع سرعت در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی با ترسیم توزیع سرعت در مقاطع مختلف نشان داد که استفاده از ورودی سیکلونی به جای ورودی ساده باعث می‌شود که جریان در جداکننده با سرعت بیشتری آرام گیرد [۲۰].

رضایی و زارعی، یک جداکننده افقی (گاز- نفت- آب) در ابعاد پایلوت را با مدل چندفازی VOF و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ شبیه‌سازی و نتایج کارشان را با نتایج یک پژوهش موجود در این مقاله که مربوط به توزیع و انحراف استاندارد سرعت در طول جداکننده بود، مقایسه کردند که از تطابق خوبی برخوردار بود؛ سپس اثر شدت جریان ورودی را روی بازده جداساز سه‌فازی بررسی کردند؛ نتایج نشان داد که افزایش شدت جریان به دلیل کاهش زمان اقامت، بازده را کاهش داده است [۲۱].

آخاریا و کازیمیرو^۱ به بررسی جدایش مایع- مایع در یک جداکننده افقی در مقیاس پایلوت با استفاده از مدل چندفازی اولری و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ پرداختند. در این مطالعه به منظور اعتبارسنجی، زمان اقامت فازها با نتایج تجربی مقایسه و تطابق مناسبی بین آنها مشاهده شد. هدف از این کار بررسی اثر میزان آب (برش‌های مختلف^۲) و همچنین بررسی اثر ارتفاع سرریز روی عملکرد جداکننده بوده است. نتایج نشان داد که با افزایش میزان برش آب، زمان اقامت فاز آلی (کروزن) افزایش یافته است و در هر میزان برش از آب، با افزایش ارتفاع سرریز نیز افزایش زمان اقامت مایع مشاهده شده است. بنابراین، این محققان از بهبود این مؤلفه یعنی افزایش زمان اقامت فاز آلی به عنوان معیاری برای بهبود عملکرد جداکننده استفاده کردند [۲۲].

کرزمیانوسکی^۳ و همکاران به بررسی رفتار جریان و عملکرد جداکننده در یک جداکننده سه‌فازی صنعتی با استفاده از مدل چندفازی اولری و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ پرداختند. هدف از این کار بررسی امکان در نظر گرفتن تجهیزات داخلی جداکننده مانند

1. Acharya and Casimiro
2. Water Cut
3. Krzemianowski

4. Coalescer

برخی فرضیات مربوط به مدل، مانند استفاده از اندازه قطرات ثابت برای فازهای ناپیوسته و در نظر نگرفتن شکست و به هم پیوستن قطرات، خطای نتایج شبیه‌سازی در حدود ۵۰٪ مشاهده شد [۲۶].

در مطالعه دیگری خاروا و همکاران برای غلبه بر محدودیت‌های مدل استفاده شده در کار پیشینشان [۲۵] در استفاده از توزیع اندازه قطرات برای فازهای ثانویه و در نظر گرفتن پدیده شکست و به هم پیوستن قطرات، از ترکیب مدل موازنه جمعیت (PBM) با مدل اولری استفاده کردند تا به شبیه‌سازی جداکننده سه‌فازی دارای سرریز پردازند. اگرچه نتایج این مطالعه نسبت به کار قبلی بهبود یافت اما احتمالاً به دلیل اینکه این مدل تنها قادر به در نظر گرفتن توزیع اندازه قطرات برای یکی از فازهای ثانویه است و همچنین مدل اولری قادر به شبیه‌سازی مناسب برای جدایش فازها با مرز مشترک مشخص نیست دوباره تطابق خوبی بین نتایج مربوط به شبیه‌سازی و داده‌های صنعتی (خطایی بین ۵۰ تا ۸۵٪) برحسب جرم قطرات در خروجی‌ها مشاهده نشد. در این مطالعه همچنین به مقایسه زمان اقامت بین نتایج مربوط به مدل و داده صنعتی که در کارهای گذشته به عنوان معیار بازده جداکننده استفاده می‌شد، پرداخته شده است؛ نتایج نشان داد که زمان اقامت متوسط به دست آمده در شبیه‌سازی از تطابق نسبتاً خوبی با داده‌های صنعتی برخوردار بود. لازم به ذکر است که اگرچه مقایسه زمان اقامت تطابق خوبی داشت؛ اما بازده واقعی - که نشان‌دهنده کارکرد واقعی جداکننده است - تطابق ضعیفی بین نتایج مدل و صنعت داشت، که خود تأییدکننده این نکته است که تحقیقات گذشته که از این معیار به عنوان ارزیابی عملکرد استفاده می‌کردند، دقیق نبوده‌اند. در این تحقیق اثر نم‌گیر و هدایت‌کننده ورودی به طور همزمان تنها با یک ساختار از نظر طراحی، روی بازده واقعی جداکننده در نظر گرفته شدند. اگرچه نتایج این تحقیق نشان داد که اضافه کردن این تجهیزات داخلی باعث بهبود عملکرد جداکننده شده است؛ ولی با در نظر گرفتن تنها یک حالت از تجهیزات داخلی (حضور هردو به صورت همزمان در یک حالت) امکان بررسی اینکه آیا هر کدام از تجهیزات به طور جداگانه اثر قابل توجهی روی عملکرد فرایند جدایش در یک جداکننده را دارد یا خیر، فراهم نمی‌کند؛ همچنین برهم‌کنش بین این مؤلفه‌ها برای در نظر گرفتن اثر آن روی عملکرد جداکننده مشخص نمی‌شود [۲۷].

می‌تواند باعث پدیده شکست قطرات و در نتیجه کاهش بازده به دلیل جدایش سخت قطرات ریز شود. بنابراین و بر این اساس که کدام یک بر دیگری غلبه می‌کند بازده کلی جداکننده مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که این دو اثر می‌تواند به گونه‌ای باشند که اثر یکدیگر را خنثی کنند؛ به طوری که تغییر خاصی در بازده جداکننده مشاهده نشود [۲۴ و ۱۴ و ۵]. بنابراین این بازده واقعی یک جداکننده باید بعد از اضافه کردن تجهیزات داخلی حساب شود تا اثر واقعی روی عملکرد کلی جداکننده مشخص شود.

در ادامه به عنوان بخش بعدی مقاله، تحقیقاتی که در آن‌ها معیار صحیح بازده برای اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شده است، بررسی خواهند شد تا با یک مطالعه دقیق به میزان دقت مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی جداکننده‌ها دست‌یافته شود. در این تحقیقات همچنین اثر تجهیزات داخلی با در نظر گرفتن معیار صحیح روی افزایش بازده کلی جداکننده انجام شده است تا اثر واقعی هر تجهیز داخلی مشخص شود. شایان ذکر است که شبیه‌سازی جداکننده‌ها، که نتایج واقعی بازده با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند، بسیار محدود بوده است و بیشتر آن‌ها از دیدگاه اولر - اولر به بررسی فرایند جدایش پرداخته‌اند که به شرح زیر هستند:

خاروا و همکاران به منظور بررسی رفتار جریان سه‌فازی در یک جداکننده صنعتی دارای سرریز به شبیه‌سازی این جداکننده پرداختند و از مدل اولری و از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده کردند. در این تحقیق به دلیل محدودیت مدل، فازهای ثانویه آب و نفت هر کدام با یک اندازه قطره ثابت شبیه‌سازی شده‌اند؛ البته از شکست و به هم پیوستن قطرات در این مطالعه صرف نظر شده است. به دلیل این فرضیات ساده‌کننده که محدودیت موجود در این مدل هستند، تطابق بسیار ضعیفی بین نتایج تجربی و نتایج مربوط به شبیه‌سازی برحسب میزان جرم قطرات مایع در خروجی مشاهده شد [۲۵].

احمد و همکاران شبیه‌سازی یک جداکننده سه‌فازی دارای سرریز را در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از مدل اولری و معادله آشفتگی $k-\epsilon$ انجام دادند؛ نتایج شبیه‌سازی برحسب میزان جرم قطرات مایع در فاز خروجی با هم مقایسه شد. در این روش نیز به دلیل استفاده از

DPM برای غلبه بر مشکل مربوط به مدل کردن قطرات می‌تواند مناسب باشد؛ در این مدل قطرات به صورت ترم‌های چشمه‌ای از تکانه عمل می‌کنند که در فضا در حرکتند. ولی مشکل اصلی استفاده از این مدل به تنهایی در جداکننده اینگونه است که از فازهای پیوسته نفت و آب که در پایین جداکننده تجمع یافته‌اند، صرف نظر شده، بنابراین برهم‌کنش قطرات با این فازها در نظر گرفته نمی‌شود [۳۱ و ۳۰]. و این امر به نتایج نامناسبی در شبیه‌سازی جداکننده می‌انجامد [۳۲]. بنابراین با توجه به امکان خوب مدل DPM در ردیابی قطرات، برای غلبه بر مشکل مربوط به نادیده گرفتن فازهای پیوسته نیاز به در نظر گرفتن سه فاز پیوسته (در جدا کننده سه‌فازی) در پس‌زمینه وجود دارد تا بتواند با قطرات بر هم‌کنش انجام دهد و همچنین رفتار کلی جداکننده را از نظر جدایش کلی فازها نشان دهد [۳۳ و ۵]. با توجه به امکان خوب مدل VOF در شبیه‌سازی فازهای پیوسته با سطح مشترک دقیق بین آن‌ها، این مدل یک نامزد مناسب برای ترکیب شدن با مدل DPM است [۳۳-۳۲ و ۳۰]. با وجود قابل قبول بودن مدل ترکیبی VOF-DPM هنگام بررسی همزمان قطرات و رفتار فازهای پیوسته در جریان‌های چندفازی [۳۴ و ۳۰]، در زمینه جداکننده‌های چندفازی که از این مدل ترکیبی برای نشان دادن رفتار واقعی جدایش استفاده شده باشد، تحقیقات بسیار محدودی وجود دارد:

پورا احمدی لاله و همکاران در یک مطالعه به عیب‌یابی فرایند جدایش در یک جداکننده سه‌فازی دارای سرریز در مقیاس صنعتی و به بررسی اثر بافل و سرریز روی عملکرد جداکننده پرداختند. از مدل ترکیبی چندفازی VOF-DPM و مدل آشفتگی $k-\epsilon$ در این تحقیق استفاده و توزیع اندازه قطرات، شکست و به هم پیوستن آنها در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که هندسه جداکننده مش‌بندی شده و کیفیت آن بررسی شد که نمایی از این مش ترکیبی ساختار نیافته در شکل (۳) نشان داده شده است. در این تحقیق به دلیل نبود دسترسی به داده‌های صنعتی، این مدل اعتبارسنجی نشده است. نتایج این تحقیق روی جداکننده سه‌فازی نشان داد که با وجود بهبود توزیع سرعت پس از اضافه کردن بافل و افزایش ارتفاع سرریز، تغییر خاصی در میزان بازده واقعی از نظر مقدار مایع خارج شده از فاز گاز و همچنین خلوص دیگر فازها مشاهده نشد، بنابراین روشن است که تنها بهبود توزیع سرعت، تضمین بهبود عملکرد کلی جداکننده نیست. با توجه به جدید بودن

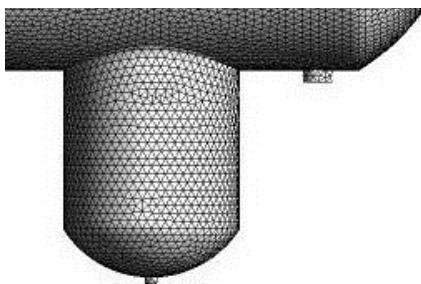
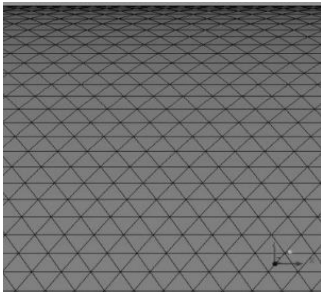
اوشینو^۱ و همکاران، از مدل چندفازی اولری به همراه مدل PBM برای بررسی جدایش گاز-نفت-آب استفاده کردند. در این کار با در نظر گرفتن امولسیون تشکیل شده بین آب و نفت، برهم‌کنش بین آنها در سطح مشترک و تشکیل یک لایه به هم فشرده (DPL^2)، شبیه‌سازی CFD انجام شد. جداکننده مورد نظر یک جداکننده دارای سرریز در مقیاس پایلوت بوده است. نتایج این کار بر حسب بازده جداکننده، توزیع اندازه قطرات و ضخامت لایه DPL در جداکننده ارائه و با نتایج پایلوت مقایسه شد. نتایج CFD نشان داد که اگرچه استفاده از این مدل نسبت به استفاده از مدل اولری به تنهایی یک گام به سمت پیشگویی بهتر بازده اصلی جداکننده، ضخامت لایه DPL بالای سطح آب و ارزیابی توزیع اندازه ذرات درون جداکننده بوده است، ولی برای رسیدن به نتایج بهتر با دقت بالاتر، به استفاده از مدل‌های دقیق‌تر نیاز است [۲۸]. اوشینو و ویلاجین^۲ در ادامه این کار، از یک رابطه ریاضی دقیق‌تر برای محاسبه خواص امولسیون تشکیل شده هنگام جدایش مایع-مایع استفاده کردند و با مقایسه با کار قبلی‌شان به نتایج مدل‌سازی بهتری برای تخمین DPL و میزان جدایش آب از نفت دست یافتند. با این وجود بیشترین خطای مشاهده شده برای جدایش آب از نفت نسبت به نتایج آزمایشگاهی در حدود ۴۳/۵٪ مشاهده شده است [۲۹].

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از مدل‌های مربوط به دیدگاه اولر-اولر (مدل اولری و مخلوط)، اگرچه این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی توزیع سرعت، فشار و زمان اقامت با دقت خوبی بوده‌اند اما در تخمین دقیق رفتار جدایش برای محاسبه میزان جرم واقعی خارج شده از جداکننده‌ها ضعیف عمل می‌کنند. در حقیقت علاوه بر محدودیت این مدل‌ها در مدل‌سازی قطرات، این مدل‌ها در مدل‌سازی فصل مشترک بین فازها که لازمه فرایند جدایش است، ضعیف عمل می‌کنند. اگرچه مدل VOF در مدل‌سازی سطح مشترک بین فازها و همچنین مدل کردن قطرات که هر کدام دارای یک سطح مشترک با فاز پیوسته هستند، مناسب عمل می‌کند اما به دلیل اینکه مدل‌سازی در اطراف هر قطره باید انجام شود، به تعدادی شبکه بسیار ریز در جداکننده نیاز است؛ بنابراین استفاده از این مدل در ابعاد صنعتی مقرون به صرفه نیست. استفاده از مدل

1. Oshinow
2. Dense Packed Layer
3. Vilagines

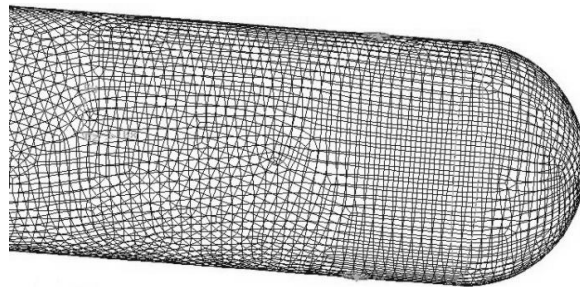
شده بود، در این کار جداکننده مورد نظر از نوع بوت انتخاب شده و نتایج محاسبات عددی برحسب توزیع‌های جریان سه‌فازی، رفتار فازهای ثانویه، بازده جداکننده و توزیع اندازه قطرات بررسی شده است. نتایج نشان داد که مدل CFD مورد نظر قادر به تخمین زدن خوبی از رفتار کلی جدایش و همچنین رفتار قطرات در یک جداکننده سه‌فاز دارای بوت است. عیب‌یابی فرایند جدایش در جداکننده مورد نظر نشان‌دهنده کاربرد نامناسب نوع هدایت‌کننده ورودی، نیاز به وجود نم‌گیر مناسب در خروجی گاز و همچنین نیاز به یک گرداب‌شکن در خروجی مایع بوده است [۳۶].

خلیفات و همکاران در کار دیگری، به منظور توسعه این مدل ترکیبی به بررسی جزئیات مدل برای یافتن یک مدل مناسب با دقت کافی باهدف ایجاد یک شبیه‌سازی واقع‌بینانه، پرداختند. نمایی از شبکه ترکیبی چهاروجهی ساختارنا یافته به کار گرفته شده در این کار (مربوط به مخزن بوت) در شکل (۴) نشان داده شده است. اثر زیر مدل‌های مختلف شامل نیروی جرم مجازی، شکست قطرات و مدل گام تصادفی^۱ (DRW) بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل ترکیبی مورد نظر با در نظر گرفتن هر سه زیر مدل و تأثیر بالای زیرمدل DRW یک مدل موفق (خطای شبیه‌سازی ۱۲/۹٪ نسبت به داده صنعتی) در تخمین بازده جداکننده بوده است [۳۷].



شکل ۴. نمایی از مش‌های مربوط به جداکننده [۳۳].

مدل ترکیبی در تحقیق نامبرده، جزئیات مدل مورد استفاده مانند بررسی اثر زیر مدل‌های مختلف در این مدل ترکیبی بررسی نشده است. گفتنی است که در این مطالعه اثر برهم‌کنش بین تجهیزات داخلی (اثر سریز و بافل) روی بازده جداکننده نیز در نظر گرفته نشده است [۵].



شکل ۳. نمایی از مش مربوط به هندسه جداکننده [۵].

غفارخواه و همکاران از مدل ترکیبی VOF-DPM به همراه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ برای مقایسه دو مدل نیمه تجربی در طراحی ابعاد (طول و قطر) جداکننده سه‌فازی دارای سرریز استفاده کردند [۳]. پس از انتخاب مدل تجربی مناسب در کار دیگری [۳۵] به طراحی ابعاد یک جداکننده سه‌فازی دارای سرریز با شرایط موجود در یک جداکننده سه‌فازی صنعتی پرداختند. نتایج این شبیه‌سازی برای انتخاب بهترین ابعاد دارای اختلاف بسیار کمی با نتایج جداکننده موجود در صنعت بوده است. به منظور بررسی اثر تجهیزات داخلی در این کار، بررسی همزمان اثر نم‌گیر، هدایت‌کننده ورودی و بافل روی کیفیت جداکننده سه‌فازی دارای سرریز انجام شده است. همانند کار خاوا و همکاران [۲۷] تنها یک ساختار از تجهیزات درون جداکننده در نظر گرفته شد. نتایج این کار نشان داد که با تعویض نوع هدایت‌کننده ورودی، اضافه کردن نم‌گیر در خروجی گاز و اضافه کردن بافل در قسمت مایع به طور همزمان، خلوص فازهای جدا شده از خروجی جداکننده افزایش یافته است. ولی در این کار نیز اثر هر کدام از مؤلفه‌ها و همچنین برهم‌کنش بین آن‌ها روی عملکرد جداکننده در نظر گرفته نشده است.

خلیفات و همکاران با استفاده از یک مدل ترکیبی VOF-DPM به عیب‌یابی و تحلیل رفتار فرایند جدایش در یک جداکننده سه‌فازی صنعتی دارای بوت، پرداختند. بر خلاف کارهای همه محققان که تنها به شبیه‌سازی جداکننده دارای سرریز پرداخته

۵. نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله پس از مرور انواع جداکننده‌های گرانشی؛ تحقیقات انجام شده به وسیله CFD روی این جدا کننده‌ها مرور شده است. نتایج این مطالعه به طور کلی نشان داد که اگرچه CFD یک روش مؤثر برای اصلاح رفتار جریان برای بهبود عملکرد جداکننده است ولی کاستی‌های متعددی در تحقیقات انجام شده دیده می‌شود. با بررسی کلی تحقیقات انجام شده مشخص شد که:

- در بعضی از کارها بدون توجه به اعتبارسنجی مدل، به بررسی اثر مؤلفه‌های مختلف روی بازده جداکننده پرداخته شده است.
- در بیشتر کارها از مؤلفه‌هایی مانند بهبود زمان اقامت و بهبود توزیع سرعت به عنوان معیاری برای بهبود بازده کلی جداکننده هنگام اضافه کردن تجهیزات داخلی استفاده شده است. در حقیقت بازده جداکننده بر حسب توزیع جرم قطرات در خروجی جدا کننده (هم برای اعتبارسنجی و هم برای بررسی بهبود عملکرد) باید حساب شود که محققان کمی به آن پرداخته‌اند.
- راهکار مؤثری برای مشکل کاهش بازده در اثر افزایش دبی ورودی- که یک مشکل اساسی در صنعت است- ارائه نشده است.
- در بیشتر تحقیقات از مدل‌های دیدگاه اولری- اولری برای مدل‌سازی استفاده شده است؛ اگرچه این مدل‌ها قادرند رفتار کلی فازها مانند توزیع سرعت و فشار را به خوبی تخمین بزنند؛ اما در تخمین بازده واقعی جدایش با دقت مناسب موفق نبوده‌اند. در مواردی که نیاز به دقت بالا وجود دارد، بررسی همزمان رفتار کلی فازها و قطرات پیشنهاد می‌شود. در زمینه مدل‌های ترکیبی مانند مدل VOF-DPM، برای دقیق‌تر شدن جزئیات شبیه‌سازی و بررسی زیر مدل‌های مناسب آن، برای یافتن بهترین نتایج در جداکننده‌ها، کارهای بسیار محدودی انجام شده است.
- در بیشتر این تحقیقات در جدا کننده‌ها برای سادگی از مدل آشفتگی k-ε استفاده شده و به بررسی مدل‌های پیچیده‌تر پرداخته نشده است.

- با توجه به کارهای انجام شده روی جداکننده‌های سه‌فازی گرانشی، تمام کارها، به استثنای کار خلیفات و همکاران [۳۶ و ۳۷]، مربوط به بررسی عملکرد جدایش در جداکننده گرانشی سه‌فازی دارای سرریز بوده است.
- با وجود کاربرد گسترده جداکننده سه‌فازی دارای بوت در صنایع پتروشیمی، نفت و گاز تاکنون هیچ تحقیقی بر روی این نوع از جداکننده‌ها با استفاده از CFD برای بررسی اثر تجهیزات داخلی به منظور بهینه‌سازی آنها انجام نشده است. با توجه به بررسی گاواس^۱ [۳۸] مشخص شد که در یک جریان سه‌فازی (آب، نفت و گاز) حتی با تغییر مقدار اندک در آب، رفتار جریان سه‌فاز به دلیل برهم‌کنش‌های متفاوت بین فازهای مایع، متفاوت می‌شود و اثر تجهیزات داخلی درون هر جداکننده متفاوت است. بنابراین بررسی هر نوع جداکننده، به ویژه در مقیاس صنعتی، نیاز به بررسی جداگانه برای در نظر گرفتن فرایند جدایش و بهبود عملکرد آن دارد.
- به منظور بررسی اثر تجهیزات داخلی در برخی تحقیقات تنها یک ترکیب از همه حالات، استفاده شده است و تنها از روش بهینه‌سازی معمول^۲ - که در این روش‌ها برهم‌کنش بین مؤلفه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود- استفاده شده است. بنابراین استفاده از روش‌های آماری بهینه‌سازی^۳ که قابلیت مشخص شدن میزان اهمیت هر مؤلفه و همچنین برهم‌کنش بین آنها را دارد [۳۹]، ضروری است. تاکنون هیچ بهینه‌سازی آماری روی جدا کننده‌های گرانشی برای بررسی اثر چندین مؤلفه به صورت همزمان انجام نشده است. به دلیل هزینه بالای انجام آزمایش در بهینه‌سازی آماری جداکننده‌ها، ترکیب CFD با روش‌های بهینه‌سازی آماری به تأکید توصیه شده است که این عمل نیز در جداکننده‌ها انجام نشده است. با توجه به مطالب بیان شده، شبیه‌سازی‌ها باید با در نظر گرفتن مواردی که در این قسمت به عنوان کاستی‌ها ذکر شده، انجام شود تا با غلبه بر این کاستی‌ها نتایج دقیق‌تری به دست آید.

1. Gawas
2. Usual Optimization
3. Statistical Optimization

- [1] Behin, J., Aghajari, M., "Influence of water level on oil-water separation by residence time distribution curves investigations", Separation and Purification Technology, 64: pp. 48-55, (2008).
- [2] Arnold, K., Stewart, M., "Surface Production Operations", 3rd edition, Elsevier, New York, (2008).
- [3] Ghaffarkhah, A., Ameri shahrabi, M., Keshavarz Moraveji, M., Eslami, H., "Application of CFD for designing conventional three phase oilfield separator", Egyptian journal of petroleum, 26 (2): pp. 413-420, (2017).
- [4] Skelton, G. F., "Our Industry Petroleum", British Petroleum Company, London, Chapter 7, (1977).
- [5] Pourahmadi Laleh, A., "CFD Simulation of Multiphase Separators", PhD Dissertation, University of Calgary, Calgary, Canada, (2010).
- [6] Das, S. K., Biswas, M. N., "Separation of oil-water mixture in tank", Chem. Eng. Comm., 190: pp. 116-127, (2003).
- [7] Frising, T., Christine, N., Christine, D., "The liquid/liquid sedimentation process: From Droplet coalescence to technologically enhanced water/oil emulsion gravity separators: A Review", Journal of Dispersion Science and Technology, 27 (7): pp. 1035-1057, (2006).
- [8] Monnery, W. D., Svrcek, W. Y., "Successfully Specify Three-Phase Separators", Chem. Eng Prog., 90: pp. 29-40, (1994).
- [9] Ahmed, T., Makwashi, N., Hameed, M., "A review of gravity three-phase separators", Journal of Emerging trends in engineering and applied science, 8 (3): pp. 143-153, (2017).
- [10] شجاعی فرد، م. ح.، هشترودی، ع.، "مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی". انتشارات دانشگاه علم و صنعت، (۱۳۹۲).
- [11] هاشم‌آبادی، س. ح.، دهنوی، م. ع.، "شبیه‌سازی CFD جریان‌های چندفازی با نرم‌افزار Fluent". انتشارات اندیشه‌سرا، (۱۳۹۰).
- [12] ANSYS Fluent version: 16.2, Fluent Theory Guide, (2016).
- [13] Pourahmadi Laleh, A., Svrcek, W. Y., Monnery, W. D., "Design and CFD studies of multiphase separators- A Review", The Canadian Journal of Chemical Engineering, 90: pp. 1547-1560, (2011).
- [14] Wilkinson, D., Waldie, B., Nor, M. I. M., Lee, H. Y., "Baffle Plate Configuration to Enhance Separation in Horizontal Primary Separators", Chem. Eng. J., 77 (2): pp. 189-196, (2000).
- [15] Frankiewicz, T., Lee, C. M., "Using Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation to Model Fluid Motion in Process Vessels on Fixed and Floating Platforms", SPE annual technical conference and exhibition, San Antonio, Texas, (2002).
- [16] Lu, Y., Lee, J. M., Phelps, D., Chase, R., "Effect of Internal Baffles on Volumetric Utilization of a FWKO- A CFD Evaluation", SPE annual technical conference and Exhibition, Anaheim, California, U.S.A, (2007).
- [17] Vilagines, R. D., Akhras, A. R., "Three-phase flows simulation for improving design of gravity separation vessels", SPE annual technical conference and exhibition, Society of Petroleum Engineers, Florence, Italy, (2010).
- [18] Mohammadi Ghaleni, M., Zivdar, M., Nemat, M. R., "Hydrodynamic Analysis of two-phase separator by computational fluid dynamic (CFD)", 6th International Conference on Advanced computational Engineering and Experimenting, Istanbul, Turkey, (2012).
- [19] Hussein, H. A., Abdullah, R., Harun, S., Abdulkhaleq, M., "Numerical model of baffle location effect on flow pattern in oil and water gravity separator tanks", World Appl. Sci. J., 26 (10): pp. 1351-1356, (2013).
- [۲۰] حاجی‌دولو، ا.، نقره‌آبادی، ا. ر.، دلخواه، ن.، "شبیه‌سازی جریان سیال در جداکننده افقی دو فاز نفت و گاز". اولین همایش ملی تکنولوژی‌های نوین در شیمی و پتروشیمی، هم‌اندیشان چرخه علم و صنعت، اهواز، (۱۳۹۲).
- [۲۱] رضایی، ه.، زارعی، ط.، "شبیه‌سازی جداکننده افقی گرانشی سفازی نفت/آب/گاز". اولین کنفرانس ملی نفت، گاز و پتروشیمی، شرکت علمی پژوهشی پنداران‌دیش رهپو، شیراز، (۱۳۹۳).
- [22] Acharya, T., Casimiro, L., "Evaluation of flow characteristics in an onshore horizontal separator using computational fluid dynamics", Journal of ocean and engineering science, Article in press, (2019).
- [23] Krezmianowski, Z., Lackowski, T., Ochrymiuk, T., Flszynski, P., "Substitute model and CFD investigation of a coalescer in a three-phase crude oil gravity separator", Journal of applied fluid mechanics, 13 (3): pp. 805-813, (2020).
- [24] Hansen, E. W. M., Heitmann, H., Laksa, B., Ellingsen, A., Ostby, O., Morrow, T. B., Dodge, F. T., "Fluid flow modelling of gravity separators", 5th international conference on multiphase production, Texas, U.S.A, (1991).
- [25] Kharoua, N., Khezzar, L., Saadawi, H., "CFD simulation of three-phase separator: effects of size distribution", ASME Fluids Engineering Summer Meeting, Nevada, USA, (2013).

- [26] Ahmed, T., Hamed, F., Russell, P. A., "The use of CFD simulation to compare and evaluate different sizing algorithm for three – phase separator", OTC offshore technology conference, Janeiro, Brazil, (2017).
- [27] Kharoua, N., Khezzar, L., Saadawi, H., "CFD Modelling of a horizontal three-phase separator: A population balance Approach", American Journal of Fluid Dynamic, 3 (4): pp. 101-118, (2013).
- [28] Oshinowo, L., Elsaadawy, E., Vilagines, R., "CFD modeling of oil-water separation efficiency in three-phase separators", 10th International Conference on CFD in oil & Gas, Metallurgical and process Industries SINTEF, Trondheim, Norway, (2014).
- [29] Oshinowo, L., Vilagines, R., "Modeling of oil-water separation efficiency in three-phase separators: Effect of emulsion rheology and droplet size distribution", Chemical engineering research and design, 59: pp. 278-290, (2020).
- [30] Cloete, S., Olsen, J. E., Skjetne, P., "CFD modeling of plume and free surface behavior resulting from a sub-sea gas release", Applied Ocean Research, 31 (3): pp. 220-225, (2009).
- [31] Kirveski, L., "Design of Horizontal three-phase separator using computational fluid dynamics", MSC Dissertation, Aalto university school of chemical technology, Espoo, Finland, (2016).
- [32] Pourahmadi Laleh, A., Svrcek, W. Y., Monnery, W. D., "Computational fluid dynamics simulation of pilot-plant-scale two-phase separators", Chem. Eng. Technol., 34 (2): pp. 296-306, (2011).
- [33] Qarot, Y. F., Kharoua, N., Khezzar, L., "Discrete phase modeling of oil droplets in the gas compartment of a production separator", ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, Montreal, Canada, (2014).
- [34] Cloete, S., Eksteen, J. J., Bradshaw, S. M., "A mathematical modelling study of fluid flow and mixing in full scale gas stirred ladles", Computational Fluid Dynamics, 9 (6): pp. 345-356, (2009).
- [35] Ghafarkhah, A., Shahrabi, M. A., Moraveji, M. K., Eslami, H., "3D Computational-Fluid-Dynamics Modeling of Horizontal Three-Phase Separators: An Approach for Estimating the Optimal Dimensions", Oil and Gas. Fac., 33 (4): pp. 1-17, (2018).
- [36] Khalifat, Z., Zivdar, M., Rahimi, R., "Application of CFD for troubleshooting and hydrodynamic analysis in an industrial three-phase gravity separator", Journal of gas technology, 5: pp. 57-69, (2019).
- [37] Khalifat, Z., Zivdar, M., Rahimi, R., "Simulation of an industrial three-phase boot separator using computational fluid dynamics", Journal of gas technology, 6: pp. 30-42, (2020).
- [38] Gawas, K., "Studies in low-liquid loading in gas/oil/water three phase flow in horizontal and near-horizontal pipes", Ph.D. dissertation, The University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma, (2013).
- [39] Montgomery, D. C., "Design and analysis of experiments", second edition, John Wiley & Sons, (2008).