

## بهینه کردن طراحی جداکننده گرانشی سه فازی صنعتی به منظور رفع مشکلات مربوط به فرایند جدایش

زهره خلیفات، مرتضی زیودار\*، رهبر رحیمی

گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

### چکیده

جداکننده‌های گرانشی چند فازی یکی از پرکاربردترین تجهیزات برای جدایش فازهای غیرقابل امتزاج در صنایع مختلف به شمار می‌روند. در این کار به بهبود عملکرد یک جداکننده گرانشی سه فازی صنعتی دارای بوت، با هدف رفع مشکلاتی که از عیب‌یابی فرایند جدایش در این جداکننده بدست آمده، پرداخته شده است. بدین منظور، اثر تعویض هدایت‌کننده در ورودی (نوع پرده‌دار به جای ورودی زاویه‌دار)، نصب بافل در میانه و نم‌گیر در انتهای جداکننده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که با استفاده از طراحی جدید، عملکرد جداکننده بهبود یافته، به طوری که میزان مایع در گاز خروجی  $83/8\%$  نسبت به طراحی کنونی در صنعت کاهش یافته است. این طراحی در بهبود رفتار جریان در ناحیه ورودی، بهبود توزیع اندازه قطرات در خروجی و همچنین در جلوگیری از کاهش چشمگیر عملکرد جداکننده هنگام افزایش دبی، که از مشکلات مربوط به عیب‌یابی فرایند جدایش بوده‌اند، نیز موفق عمل کرده است.

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:  
دریافت: ۱۳ آذر ۱۳۹۹  
دریافت پس از اصلاح: ۷ اسفند ۱۳۹۹  
پذیرش نهایی: ۴ اردیبهشت ۱۴۰۰

### کلمات کلیدی:

جداکننده صنعتی دارای بوت  
تجهیزات درونی  
هدایت‌کننده ورودی  
بافل  
نم‌گیر

\* عهده دار مکاتبات

mzivdar@eng.usb.ac.ir

حقوق ناشر محفوظ است.

## ۱- مقدمه

جدایش فازهای غیرقابل امتزاج (نفت، گاز و آب) از مخلوط‌های چند فاز، یکی از فرایندهای مهم عملیاتی در صنایع مختلف به شمار می‌رود [۱]. یکی از تجهیزات مهم برای جدایش این فازها، جداکننده‌های گرانشی سه فاز بوده که به صورت افقی و عمودی در صنایع موجود هستند. از میان این جداکننده‌ها، جداکننده‌های افقی در ایران بیشتر رایج بوده و مناسب برای جدایش مخلوط‌هایی با نسبت بالای گاز به مایع هستند. این جداکننده‌ها به سه دسته اصلی جداکننده‌های دارای سرریز<sup>۱</sup> (برای جدایش مخلوط‌هایی که دبی آب نسبت به فاز مایع سبک، قابل توجه است)، جداکننده‌های دارای سبد و سرریز<sup>۲</sup> (برای جدایش مخلوط‌هایی که در آن نسبت مایع سنگین به سبک زیاد و اختلاف دانسیته دو فاز کم است و همچنین در مواقعی که به دلیل مقدار زیاد امولسیون یا پارافین، کنترل سطح مشترک دو فاز سخت است) و جداکننده‌های دارای بوت<sup>۳</sup> (برای جدایش مخلوط‌هایی که در آن فاز مایع سنگین قابل توجه نیست) تقسیم‌بندی می‌شوند. لازم به ذکر است که از میان این جداکننده‌ها، جداکننده‌های دارای سرریز و جداکننده‌های دارای بوت قسمت عمده واحدهای صنعتی را تشکیل می‌دهند. طراحی مناسب این تجهیزات علاوه بر کمک به راندمان بالای جدایش، نقش مهمی در بهبود عملکرد تجهیزاتی نظیر پمپ‌ها و کمپرسورها که بلافاصله بعد از این تجهیزات قرار می‌گیرند، دارند و راندمان کل واحد عملیاتی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در صورت مناسب نبودن طراحی جداکننده‌ها، کاهش چشمگیر عملکرد در جداکننده‌ها هنگام افزایش دبی ورودی مشاهده می‌گردد که یکی از مشکلات اصلی صنعت محسوب می‌شود [۲،۳]. با توجه به متفاوت شدن الگوی جریان با تغییر در هر یک از فازها (به عنوان مثال خوراک در جداکننده دارای بوت و خوراک در جداکننده دارای سرریز) و همچنین متفاوت شدن اثر تجهیزات درونی در هر جداکننده [۴،۵،۶]، هر یک از این جداکننده‌ها باید به طور جداگانه مورد بررسی قرار گیرند، تا بهترین طراحی جهت دسترسی به بهترین راندمان حاصل گردد. به دلیل رفتار پیچیده جریان‌های چند فاز، طراحی جداکننده‌های سه فاز یک مسئله چالش برانگیز در صنایع محسوب می‌شود. روش‌های

نیمه تجربی یکی از روش‌های رایج برای طراحی این تجهیزات به شمار می‌روند. اما در این روش‌ها یک سری محدودیت‌ها و فرضیات ساده کننده اعمال می‌گردد. به عنوان مثال، اگرچه تجهیزات درونی نظیر هدایت کننده‌های ورودی، بافل و نم‌گیرها تأثیر قابل توجهی روی بهبود عملکرد جداکننده‌ها دارند، ولی یکی از مهمترین محدودیت‌های روش‌های نیمه تجربی، عدم بررسی درست اثر تجهیزات درونی، روی راندمان جدایش این جداکننده‌ها است [۷،۸]. لازم به ذکر است که جهت غلبه بر مشکلات مربوط به این روش‌ها و در نظر گرفتن اثر تجهیزات درونی، انجام آزمایش یک روش قابل اطمینان برای یافتن طراحی بهینه است، اما به دلیل هزینه‌های بالای انجام این آزمایش‌ها به ویژه در مقیاس صنعتی، نیاز به یک روش جامع و اقتصادی تر دیده می‌شود. اخیراً از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD<sup>۴</sup>)، به دلیل مزایای آن نسبت به روش‌های آزمایشگاهی، جهت بررسی فرایند جدایش، عیب‌یابی، بهبود عملکرد و بهینه کردن طراحی جداکننده‌ها استفاده شده است [۹،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳]. به دلیل اثر متفاوت تجهیزات درونی در مقیاس‌های مختلف آزمایشگاهی، پایلوت و صنعتی، این تجهیزات باید در ابعاد واقعی روی عملکرد جداکننده‌های صنعتی مورد بررسی قرار بگیرند، تا یک بهینه‌سازی واقع‌بینانه از طراحی جداکننده حاصل گردد [۱۴]. کارهای مختلفی برای بررسی اثر تجهیزات درونی در جداکننده‌های گرانشی صنعتی با استفاده از CFD انجام شده است. فرانکیس و لی [۱۵] اثر تجهیزات درونی نظیر هدایت کننده ورودی، بافل و ارتفاع سرریز را روی بهبود عملکرد یک جداکننده گرانشی سه فاز دارای سرریز، مورد بررسی قرار دادند. در این کار معیار بهبود عملکرد جداکننده، تنها بهبود پروفایل سرعت و خطوط جریان بعد از نصب تجهیزات درونی بوده است. شایان ذکر است که اگرچه بهبود موارد ذکر شده جهت بهبود عملکرد جداکننده خوب است، اما بازده واقعی جداکننده (بر حسب حضور هر یک از فازها در فاز دیگر در خروجی جداکننده [۱۰،۹،۲،۱]) لزوماً افزایش نمی‌یابد [۲]. به عنوان مثال اضافه کردن بافل در یک جداکننده می‌تواند به طور همزمان هم باعث بهبود پروفایل سرعت و هم باعث شکست قطرات گردد و بر اساس اینکه کدام عامل بر دیگری غلبه کند،

<sup>3</sup> Boot<sup>4</sup> Computational fluid dynamics<sup>1</sup> Weir<sup>2</sup> Bucket and weir

همکاران، اثر همزمان هدایت‌کننده ورودی، بافل و نم‌گیر را روی بهبود بازده واقعی جداکننده مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که با به‌کارگیری این تجهیزات، خلوص هر یک از فازها در خروجی جداکننده بیشتر شده و عملکرد کلی جداکننده افزایش یافته است [۱۸].

با توجه به بررسی‌های انجام شده در مراجع، تا کنون هیچ تحقیقی برای بررسی اثر تجهیزات درونی در جداکننده‌های دارای بوت انجام نشده است و تمامی کارها مربوط به جداکننده‌های دارای سرریز بوده است. علاوه بر این در کارهای گذشته، بدون انجام عیب‌یابی فرایند جدایش و شناخت مشکلات مربوط به جداکننده به بهبود طراحی جداکننده پرداخته‌اند. همچنین همانطور که در مقدمه ذکر گردید، کاهش عملکرد جداکننده‌ها هنگام افزایش دبی ورودی یکی از مشکلات اساسی صنعت به شمار می‌رود که در این زمینه نیز تحقیقی انجام نشده است. در این مطالعه به منظور بهبود طراحی، به بررسی اثر تجهیزات درونی در یک جداکننده سه فازی صنعتی دارای بوت با استفاده از CFD پرداخته شده است. بدین منظور از نرم‌افزار فلونت استفاده شده است. این کار ادامه تحقیق قبلی [۱۲] است که در آن عیب‌یابی فرایند جدایش، به منظور شناخت مشکلات در این جداکننده صنعتی، به طور کامل بررسی شده است. با توجه به نتایج مربوط به عیب‌یابی فرایند، هدف کار حاضر بررسی اثر نصب هدایت‌کننده ورودی پره‌دار به جای ورودی زاویه‌دار، نصب بافل و همچنین نم‌گیر، جهت دسترسی به یک طراحی مناسب است تا با استفاده از طراحی جدید عملکرد جداکننده در رفع مشکلات مربوط به فرایند جدایش در شرایط کنونی صنعت و هنگام نیاز به افزایش دبی مورد بررسی قرار بگیرد.

## ۲- جداکننده صنعتی سه فازی دارای بوت

جداکننده سه فازی صنعتی دارای بوت مورد مطالعه در این تحقیق مجهز به هدایت‌کننده ورودی زاویه‌دار، ناحیه جدایش گرانشی و یک محفظه بوت استوانه‌ای شکل در پایین جداکننده است. جداکننده مورد نظر دارای طول و قطر  $m$  ۱۱/۹ و  $m$  ۳/۲۵۰ بوده است. قطر لوله ورودی، خروجی گاز، خروجی نفت و خروجی آب نیز به ترتیب  $m$  ۰/۵۱،  $m$  ۰/۲۵ و  $m$  ۰/۱ گزارش شده است [۱۲].

راندمان کلی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. وقتی عامل اول یعنی بهبود پروفایل سرعت بر شکست قطرات غلبه کند، راندمان کلی افزایش می‌یابد و در صورتی که پدیده شکست قطرات غالب گردد، به دلیل اینکه با ریز شدن اندازه قطرات، جدایش در اثر جاذبه سخت‌تر شده، راندمان کلی نیز کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که در بعضی موارد، اثر این دو عامل به گونه‌ای است که خنثی‌کننده یکدیگر بوده و در راندمان کلی جدایش، تغییر چشمگیری حاصل نمی‌گردد [۲، ۵، ۶]. بنابراین، بررسی بازده واقعی جهت دسترسی به خلوص هر فاز در خروجی جداکننده که در کار فرانکیس و لی مورد بررسی قرار نگرفته بود، باید در هر فرایند مورد ارزیابی قرار بگیرد تا اثر واقعی تجهیزات درونی روی عملکرد جداکننده مشخص گردد. لو و همکاران [۱۶] به بررسی اثر بافل روی بهبود عملکرد یک جداکننده سه فازی صنعتی دارای سرریز پرداختند. نتایج محاسبات بر حسب کانتور سرعت نشان داد که بعد از نصب بافل، چرخش‌های بزرگ جریان به چرخش‌های کوچکتر شکسته شده‌اند و پروفایل سرعت بهبود یافته است. دوباره در این کار بازده واقعی براساس خلوص فازها برای بررسی اینکه بافل چگونه روی عملکرد کلی جداکننده اثر گذاشته، مورد بررسی قرار نگرفته است. ویلاچین و آخراس [۱۷] اثر ورودی سیکلونی به جای ورودی ساده را در یک جداکننده صنعتی دارای سرریز بررسی کردند. در این مطالعه محققان بر مبنای یکنواخت‌تر شدن پروفایل سرعت بعد از تعویض نوع ورودی، به بهبود عملکرد جداکننده بدون بررسی اثر بازده واقعی اشاره کردند. خاروا و همکاران [۱۰] در یک مطالعه اثر اعمال همزمان هدایت‌کننده ورودی و نم‌گیر در یک جداکننده سه فازی صنعتی دارای سرریز را با ارزیابی بازده واقعی، به منظور بررسی اثر این تجهیزات روی عملکرد کلی جداکننده، بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که با نصب همزمان این تجهیزات، میزان حضور فاز مایع در گاز خروجی کاهش یافته و عملکرد جداکننده از نظر خلوص افزایش یافته است. در یک مطالعه دیگر [۲]، یک جداکننده سه فاز صنعتی دارای سرریز مورد بررسی قرار گرفت تا اثر بافل روی بهبود عملکرد کلی جدایش با در نظر گرفتن بازده واقعی ارزیابی گردد. نتایج این تحقیق نشان داد که با وجود بهبود الگوی جریان داخلی و پروفایل سرعت، بافل روی بازده کلی جداکننده از نظر خلوص فازها اثر چشم‌گیری نداشته و بازده بدون تغییر باقی مانده است. غفارخواه و

جداکننده استفاده می‌شود، بنابراین به کارگیری مدل مناسب پیش نیاز این کار است. در حالت کلی از دو دیدگاه مختلف اولر-اولر<sup>۵</sup> و اولر-لاگرانژ<sup>۶</sup> برای مدل‌سازی جریان‌های چند فاز استفاده می‌شود. در دیدگاه اول، همه فازها به صورت فازهای پیوسته‌ای در نظر گرفته می‌شوند که با هم برهم‌کنش دارند و توسط معادلات ناویر-استوکس<sup>۷</sup> مورد بررسی و حل قرار می‌گیرند. مدل حجم مخلوط (VOF<sup>۸</sup>)، مدل اولری و مدل مخلوط از مدل‌های موجود در این دیدگاه هستند. در دیدگاه دوم، یک فاز به صورت فاز پیوسته در نظر گرفته شده و با حل معادلات ناویر-استوکس مورد بررسی قرار می‌گیرد و دو یا چند فاز دیگر به صورت فازهای ناپیوسته‌ای در نظر گرفته می‌شوند، که ردیابی ذرات مربوط به این فازها با اعمال قانون دوم نیوتن مورد تحلیل قرار می‌گیرد. مدل فاز ناپیوسته (DPM<sup>۹</sup>) یک مدل موجود در این دیدگاه است [۲۰].

بر اساس کارهای انجام شده توسط محققان روی شبیه‌سازی جداکننده‌ها، مشخص گردید که بهترین نتایج شبیه‌سازی هنگامی به دست آمده است که از ترکیب این دو دیدگاه (به طور ویژه مدل VOF-DPM)، به منظور بررسی همزمان رفتار کلی فازها و رفتار و حرکت قطرات، استفاده شده است [۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶]. در حقیقت با توجه به تحقیقات مشخص شده است که مدل‌های اولری و مخلوط در ردیابی سطح مشترک بین فازها و بررسی رفتار قطرات در جداکننده‌ها ضعیف عمل کرده‌اند. اگرچه مدل VOF قادر به شبیه‌سازی فازهای غیرقابل امتزاج و ردیابی سطح مشترک بین آنها است، اما به دلیل این که در یک جداکننده، تعداد قطرات بسیاری وجود دارد و ردیابی سطح آزاد اطراف هر کدام از این قطرات نیاز به تعداد مش بالا در محیط محاسباتی دارد، استفاده از این مدل به تنهایی در مقیاس صنعتی مقرون به صرفه نیست و هزینه محاسباتی بالایی جهت ردیابی قطرات دارد [۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶]. استفاده از مدل DPM برای غلبه بر مشکل ردیابی قطرات، به صورتی که در آن قطرات به صورت چشمه‌هایی از مومنت در نظر گرفته می‌شوند، یک راه حل مناسب است، اما در صورتی که از این مدل به تنهایی در شبیه‌سازی جداکننده‌ها استفاده گردد، باعث می‌شود که از فازهای

لازم به ذکر است که این جداکننده‌ها هنگامی که مقدار فاز مایع سنگین، ناچیز یعنی کمتر از ۲۰٪ کل فاز مایع است، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. هدایت‌کننده ورودی که در ابتدای جداکننده قرار داده می‌شود، باعث تغییر ناگهانی جهت و کاهش سرعت سیال ورودی شده تا به طور مؤثری به جدایش توده فاز مایع از فاز گاز کمک کند. قطرات مایعی که نتوانسته‌اند در این ناحیه از فاز گاز جدا شوند، به ناحیه بعد یعنی ناحیه جدایش گرانشی (ناحیه بعد از هدایت‌کننده ورودی تا قبل از خروجی گاز) رفته و در این ناحیه در اثر نیروی جاذبه از فاز گازی که دارای سرعت و آشفتگی کمتر است، جدا می‌گردند. در پایین مخزن جایی که فازهای مایع تجمع پیدا می‌کنند، زمان اقامت لازم برای جدایش حباب‌های گاز از فاز مایع و همچنین برای جدایش فازهای مایع (هیدروکربن مایع و آب) از یکدیگر فراهم می‌گردد. بر خلاف جداکننده‌های دارای سرریز، در این جداکننده‌ها مایع سنگین در یک محفظه جدا از جداکننده (بوت) جمع‌آوری می‌گردد و زمان اقامت لازم برای جدایش فاز مایع سبک از سنگین را فراهم می‌کند. بنابراین، قطر محفظه اصلی جداکننده دارای بوت نسبت به جداکننده دارای سرریز کوچکتر بوده و از نظر اقتصادی هزینه کمتری دارد. به دلیل کسر حجمی پایین فاز آب نسبت به سایر فازها در جداکننده‌های دارای بوت، مشکلی برای جدایش فاز مایع-مایع دیده نمی‌شود و مسئله اصلی در این جداکننده‌ها، جدایش قطرات مایع (به ویژه مایع سبک) از فاز گاز و دسترسی به یک فاز گاز با خلوص بالا است [۲].

خصوصیات فیزیکی و دبی حجمی هر یک از فازها از جداکننده صنعتی مورد نظر واقع در جنوب ایران گرفته شده [۱۹] است. چگالی فازهای گاز، هیدروکربن مایع و آب به ترتیب  $3 \text{ kg/m}^3$ ،  $6/283$  و  $991/1$  و ویسکوزیته این فازها به ترتیب  $6-9/332e$ ،  $4-3/685e$  و  $4-5/780e$  گزارش شده‌اند. دبی حجمی این فازها نیز به ترتیب  $340/1$ ،  $1793 \text{ m}^3/\text{hr}$  و  $11/93$  بوده‌اند.

### ۳- مدل CFD

در این مطالعه از دینامیک سیالات محاسباتی به منظور بررسی اثر تجهیزات داخلی روی بهبود طراحی

<sup>۸</sup> Volume of fluid  
<sup>۹</sup> Dispersed phase model

<sup>۵</sup> Eulerian-Eulerian  
<sup>۶</sup> Eulerian-Lagrangian  
<sup>۷</sup> Navier-Stokes's equation

از مدل نیروی کشش سطحی پیوسته (CSF<sup>10</sup>) که توسط براک بیل<sup>11</sup> و همکارانش ارائه شده است، در این کار استفاده شده است [۲۶]. برای ردیابی قطرات، اعمال موازنه نیرو روی هر قطره در مدل DPM طبق معادله زیر انجام می‌گردد [۲۳، ۲۷]:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{f} \quad (3)$$

زیر نویس p در معادله فوق نمایانگر ذرات است. شتاب ذرات در این معادله در اثر نیروهای درگ، جاذبه و نیروهای اضافی دیگر ( $\vec{f}$ ) به وجود می‌آید. لازم به ذکر است که از همه نیروهای اضافی به جز نیروی جرم مجازی، در جداکننده صرف نظر شده است [۲۱]. نیروی جرم مجازی هنگامی که فاز پیوسته در اثر حرکت فاز ناپیوسته شتاب می‌گیرد، اعمال می‌گردد و به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$F_{\theta m} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (4)$$

نیرو و ضریب درگ مورد استفاده در این کار نیز به صورت زیر نمایش داده می‌شوند [۱، ۲۳]:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{24\rho_p d_p^2} \quad (5)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (6)$$

در این روابط  $\mu$  ویسکوزیته مولکولی و  $d_p$  قطر ذرات هستند. از روش مورسی و الکساندر<sup>۱۲</sup> برای محاسبه ضرایب  $a_1$ ،  $a_2$  و  $a_3$  در محدوده های مختلف رینولدز استفاده شده است [۲۳، ۲۸]. به دلیل کاربرد گسترده و قابل قبول معادله آشفتگی k-ε استاندارد در جریان‌های شامل جدایش در مقیاس صنعتی [۱۱، ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۲۹، ۳۰]، در این تحقیق از این معادله آشفتگی استفاده شده است.

لازم به ذکر است که در یک جریان آشفته، پراکندگی و حرکت ذرات تحت تأثیر سرعت میانگین ( $\vec{u}$ ) و سرعت نوسانی ( $u'$ ) فاز پیوسته است. اثر سرعت میانگین روی حرکت ذرات، توسط ترم درگ موجود در معادله (۳) بررسی می‌گردد و به منظور بررسی اثر سرعت نوسانی روی حرکت

پیوسته مایع که در پایین جداکننده تجمع پیدا کرده‌اند، صرف نظر گردد و برهم کنش این فازها با قطرات نیز نادیده گرفته شود. این عوامل منجر به نتایج نامناسب در شبیه‌سازی جداکننده‌ها می‌گردد [۱، ۲۰]. بنابراین مدل DPM نیاز به وجود سه فاز پیوسته در پس زمینه دارد تا بتواند با قطرات برهم کنش انجام دهد [۱۱، ۱۲، ۲۳، ۲۴]. به دلیل اینکه مدل VOF در شبیه‌سازی سه فاز پیوسته و ردیابی سطح مشترک بین آنها به خوبی عمل می‌کند، این مدل یک گزینه مناسب برای ترکیب شدن با مدل DPM است و هزینه محاسباتی را قابل قبول می‌کند [۲، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۸، ۲۱، ۲۴]. بنابراین، به دلیل نتایج قابل قبول این مدل ترکیبی در شبیه‌سازی جداکننده‌ها و جریان‌های چند فازی [۲، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۸، ۲۰، ۲۱، ۲۳، ۲۵]، که در آنها حضور همزمان فازهای پیوسته و ناپیوسته اتفاق می‌افتد، از این مدل ترکیبی در کار حاضر استفاده شده است.

### ۳-۱- معادلات حاکم

در مدل ترکیبی مورد استفاده در این تحقیق از مدل VOF برای شبیه‌سازی سه فاز پیوسته (هیدروکربن مایع، آب و گاز) در پس‌زمینه و از مدل DPM برای ردیابی فازهای ثانویه و برهم‌کنش با فازهای پیوسته استفاده شده است. خواص فیزیکی ثابت، شبیه‌سازی سه بعدی، در نظر گرفتن جریان آشفته، دمای ثابت و در نظر گرفتن قطرات به صورت ذرات کروی شکل، از فرض‌های مورد استفاده در این مدل هستند. معادلات پیوستگی و مومنتم برای استفاده در مدل VOF به ترتیب به صورت‌های زیر نشان داده می‌شوند [۲۳]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_m \rho_m) + \nabla \cdot (\alpha_m \rho_m \vec{u}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \cdot \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \tau + \rho g + \vec{F} \quad (2)$$

در این روابط ( $\alpha$ ) کسر حجمی، ( $\rho$ ) دانسیته، ( $\vec{u}$ ) سرعت فاز پیوسته، ( $P$ ) فشار، ( $g$ ) نیروی جاذبه و ( $\tau$ ) تنش برشی هستند. در همه نمادها زیر نویس m مربوط به فاز پیوسته m ام است. نیروی کشش سطحی بین فازها به صورت یک ترم چشمه ( $\vec{F}$ ) به معادله (۲) اضافه شده، که

<sup>12</sup> Morsi and Alexander

<sup>10</sup> Continuum Surface Force

<sup>11</sup> Brakbill

همانطور که در قسمت مقدمه ذکر شد، در این مطالعه به منظور بهبود طراحی جداکننده جهت غلبه بر مشکلات مربوط به فرایند جدایش، که در قسمت‌های بعد به طور کامل توضیح داده می‌شود، یک سری تجهیزات داخلی (هدایت‌کننده ورودی پره‌دار، بافل و نم‌گیر) به جداکننده صنعتی مورد نظر اضافه می‌گردد. لازم به ذکر است که با توجه به قابلیت در نظر گرفتن تجهیزاتی نظیر بافل‌ها و نم‌گیرها به صورت محیط متخلخل [۳۵]، از مدل محیط متخلخل<sup>۱۵</sup> به منظور مدل کردن این تجهیزات در این تحقیق استفاده شده است. به منظور مدل کردن جریان عبوری از محیط‌های متخلخل، یک ترم چشمه به صورت زیر باید به معادله مومنتم اضافه گردد، تا اثر محیط متخلخل را به صورت افت فشار وارد محاسبات مربوط به جریان سیال کند [۳۴].

$$S_p = -\left(\frac{\mu}{\alpha} \bar{u} + \frac{1}{2} C_f \rho \bar{u} |\bar{u}|\right) \quad (12)$$

در معادله فوق،  $C_f$  ضریب مقاومت اینرسی،  $\frac{1}{\alpha}$  ضریب مقاومت ویسکوز و  $|\bar{u}|$  مقدار سرعت هستند. شایان ذکر است که هنگام مدل کردن صفحات بافل، ترم اول یعنی ترم دارسی قابل نظر است و افت فشار تنها در اثر ترم ناشی از اینرسی در نظر گرفته می‌شود، در حالی که برای استفاده در نم‌گیر هر دو ترم در این معادله باید لحاظ گردد [۲، ۱۸، ۳۱].

### ۲-۳- شرایط مرزی، گسسته سازی و روش حل عددی

در این تحقیق برای مدل VOF از شرط مرزی سرعت در ورودی و از شرط مرزی فشار در خروجی گاز استفاده شده است. برای هر دو خروجی مایع نیز، جهت کنترل سطح مشترک بین فازها، از شرط مرزی سرعت استفاده شده است [۲، ۱۱، ۱۸، ۲۱]. در مدل DPM، در ورودی و خروجی‌ها از شرط مرزی فرار<sup>۱۶</sup> استفاده شده است، بدین صورت که تمامی قطراتی که به این نواحی رسیده‌اند، از آن مرزها خارج می‌گردند. قطراتی که به دیواره‌های ناحیه گازی (نیمه بالایی جداکننده) برخورد می‌کنند، دارای شرط

قطرات در این تحقیق، از مدل گام تصادفی (DRW) استفاده شده است. در این مدل به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۱]:

$$u' = G \sqrt{\frac{2k}{3}} \quad (7)$$

در این رابطه  $G$  یک عدد تصادفی است که مقدار آن در زمان عبور ذرات از یک گردابه آشفته ثابت می‌ماند. طول عمر یک گردابه آشفته به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$\tau_e = 2c_L \frac{k}{\varepsilon} \quad (8)$$

انرژی جنبشی آشفته ( $k$ )، نرخ استهلاک انرژی جنبشی ( $\varepsilon$ ) و  $c_L$  که یک عدد ثابت است، پارامترهای موجود در معادله فوق هستند. لازم به ذکر است که هنگام استفاده از معادله  $k$ - $\varepsilon$  عدد  $c_L$  معادل ۰/۱۵ پیشنهاد شده است [۲۳، ۳۱].

برای بررسی شکست و به هم پیوستن قطرات به ترتیب از مدل آنالوژی شکست تیلور (TAB<sup>۱۳</sup>) و مدل اروک<sup>۱۴</sup> استفاده شده است. در مدل اروک یک تخمین آماری از برخورد بین قطرات در نظر گرفته می‌شود و فرض بر این است که ذرات در صورتی به هم می‌پیوندند که [۱، ۳۲]:

$$\frac{2X}{d_1 + d_2} < \frac{24(\alpha^3 - 2.4\alpha^2 + 2.7\alpha)}{We}, \quad \alpha = \frac{d_1}{d_2} \quad (9)$$

$X$  فاصله بین مرکز دو قطره پس از برخورد،  $d_1$  و  $d_2$  به ترتیب قطر قطرات کوچک و بزرگ و  $We$  عدد وبر برخورد بین قطرات هستند [۳۲]. مدل TAB نیز که بر مبنای تشابه بین حرکت قطرات با سیستم جرم و فنر است، به صورت زیر نشان داده می‌شود [۳۳]:

$$C_F \frac{\rho_c u_p^2}{\rho_d r} - C_k \frac{\sigma}{\rho_d r^2} x - C_d \frac{\mu_d}{\rho_d r^2} = \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (10)$$

زیر نویس‌های  $c$  و  $d$  به ترتیب نشانگر فاز پیوسته و ناپیوسته هستند.  $\sigma$  کشش سطحی و  $x$  انحراف از حالت کروی است.  $C_F$ ،  $C_k$  و  $C_d$  ثوابت موجود در این معادله هستند. پدیده شکست هنگامی اتفاق می‌افتد که [۳۱، ۳۳]:

$$x > C_b r, \quad C_b = 0.5 \quad (11)$$

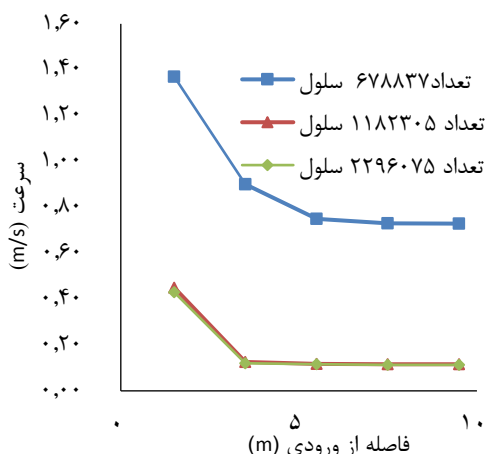
<sup>15</sup> Porous media model

<sup>16</sup> Escape

<sup>13</sup> Taylor analogy breakup model

<sup>14</sup> O'Rourke

## بهینه کردن طراحی جداکننده گرانشی سه فاز صنعتی به منظور رفع مشکلات مربوط به فرایند جدایش



شکل (۱) استقلال از تعداد شبکه در جداکننده صنعتی

جدول ۱ مقایسه داده صنعتی و مدل را نشان می‌دهد و تعیین‌کننده تطابق قابل قبول (۱۲/۹٪) بین نتیجه صنعتی و مدل در تخمین این پارامتر است. اختلاف بین نتیجه صنعتی و مدل به دلیل ساده سازی‌های استفاده شده در مدل ترکیبی مورد نظر بوده است.

جدول (۱) مقایسه بین مدل و داده صنعتی

داده صنعتی		نتیجه شبیه سازی با مدل CFD
مقدار هیدروکربن مایع در گاز خروجی (kg/hr)	۴۸/۹۳	۴۲/۶

لازم به ذکر است که داده دیگر مربوط به این جداکننده صنعتی در دسترس نبوده که با مدل مقایسه گردد. اگرچه که مدل مورد نظر در تخمین پارامتر اصلی (مقدار هیدروکربن مایع در گاز خروجی)، که هدف این تحقیق کاهش آن به منظور بهبود عملکرد جداکننده است، موفق عمل کرده است ولی در کار حاضر به منظور صحت‌سنجی بیشتر به شبیه‌سازی یک جداکننده سه فاز صنعتی دیگر که اطلاعات آزمایشگاهی بیشتری از آن جهت مقایسه در دسترس بوده، پرداخته شده است. جداکننده مورد نظر شامل یک هدایت‌کننده ورودی است که از طریق اتصال به یک زانویی با قطری به اندازه ۰/۲۵ m به ورودی متصل شده است. نم‌گیر مورد استفاده در این جداکننده در مکان ۳/۷۵ m از ورودی قرار گرفته که دارای ضخامت ۱ cm

مرزی انعکاس<sup>۱۷</sup> بوده و اندازه حرکت خود را از دست می‌دهند، در حالی که قطراتی که به دیواره ناحیه مایع برخورد می‌کنند به دام<sup>۱۸</sup> افتاده و از ناحیه محاسباتی خارج می‌گردند [۲۰، ۲۱، ۱۸، ۲۱].

از روش حجم محدود برای گسسته سازی معادلات دیفرانسیل پاره‌ای و از الگوریتم سیمپل<sup>۱۹</sup> برای ارتباط بین فشار و سرعت استفاده شده است [۲۰، ۲۴، ۳۶]. پارامترهای آشفتگی و معادلات، با استفاده از طرح بالادستی مرتبه دوم<sup>۲۰</sup> گسسته سازی شدند و روش پرستو<sup>۲۱</sup> به دلیل تطابق با مدل VOF، برای درون‌یابی فشار انتخاب گردید [۱۸، ۲۱].

## ۴- نتایج و بحث

### ۴-۱- اعتبارسنجی مدل

به دلیل استفاده از مدل ترکیبی VOF-DPM جهت بررسی اثر تجهیزات درونی در جداکننده صنعتی حاضر، این مدل باید اعتبارسنجی گردد. لازم به ذکر است که در کار قبلی همین محققان، مدل ذکر شده با داده صنعتی مربوط به همین جداکننده، اعتبارسنجی شده [۱۳] است. اطلاعات کامل در کار قبلی موجود می‌باشد و در اینجا تنها به ارائه مختصری از نتایج پرداخته می‌شود. همان طور که قبلاً ذکر گردید مسئله اصلی در جداکننده‌های دارای بوت، جدایش فاز مایع سبک از گاز خروجی است و به دلیل اینکه در این تحقیق هدف بهبود طراحی به منظور کاهش این پارامتر است، در این قسمت ابتدا به مقایسه این پارامتر از داده صنعتی (که با استفاده از روش ASTM D1945 در جداکننده موجود در پتروشیمی برزویه اندازه گیری شده) و مدل پرداخته می‌شود. به منظور انجام شبیه‌سازی از شبکه ترکیبی چهار وجهی ساختار نایافته در این جدا کننده استفاده شده و با انجام فرایند استقلال از مش که در شکل ۱ نشان داده شده است، تعداد ۱،۱۸۲،۳۰۵ سلول به عنوان تعداد سلول بهینه انتخاب شده است.

<sup>20</sup> Second order upwind method

<sup>21</sup> Presto

<sup>17</sup> Reflect

<sup>18</sup> Trap

<sup>19</sup> Simple

مقدار هیدروکربن مایع خارج شده از آب خروجی، مقدار آب در خروجی هیدروکربن مایع و همچنین مقدار آب در خروجی گاز با این مقادیر از نتایج شبیه سازی مقایسه شده است و در جدول ۲ نشان داده شده است. در این کار مقدار هیدروکربن مایع خارج شده در آب خروجی با استفاده از روش کروماتوگرافی گاز (GC-FID<sup>۲۲</sup>) و مقدار آب در خروجی‌های هیدروکربن مایع و گاز براساس روش کارل فیشر طبق استاندارد ASTM D6304 اندازه‌گیری شده‌اند [۱۸].

جدول (۲) مقایسه نتایج صنعتی و مدل برای اعتبارسنجی

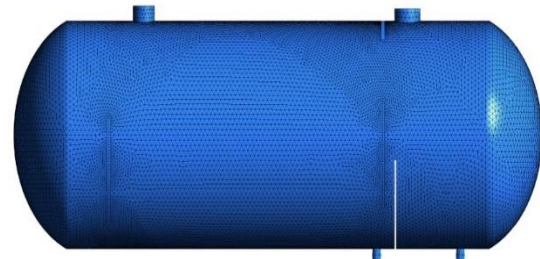
مقدار آزمایشگاهی	مدل CFD	
مقدار میعانات گازی در خروجی آب (مقدار حجمی ppm)	۲۳۰۰	۲۰۰۰
مقدار آب در خروجی میعانات گازی (مقدار حجمی ppm)	۱۷۴۳	۲۰۰۰
مقدار آب در خروجی گاز (مقدار حجمی ppm)	۴۴/۷	۵۱

از مقایسه نتایج CFD و مقادیر آزمایشگاهی مشخص می‌شود که یک تطابق قابل قبول (میانگین خطای ۱۳/۴٪) بین نتایج شبیه‌سازی و مقادیر آزمایشگاهی وجود دارد. بنابر این با توجه به نتایج جدول ۱ و جدول ۲ استفاده از مدل مورد نظر در شبیه‌سازی جداکننده‌های سه فازی منطقی است.

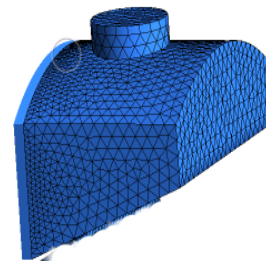
#### ۲-۴- بهبود طراحی

در این قسمت به بهبود طراحی جداکننده صنعتی دارای بوت به منظور حل مشکلات مربوط به عیب‌یابی فرایند جدایش در این جداکننده پرداخته می‌شود. در کار قبل [۱۲] تمامی اطلاعات مربوط به عیب‌یابی فرایند جهت شناخت مشکلات مربوط به این جداکننده ذکر شده است. با استفاده از نتایج عیب‌یابی مشخص شد که جداکننده مورد نظر در ناحیه ورودی از نظر عملکرد هدایت‌کننده (عدم شکست مناسب مومنتم خوراک)، در ناحیه جدایش گرانشی و در ناحیه خروجی از نظر توزیع اندازه قطرات دچار

۱۵ و تخلخل ۹۷/۷٪ بوده است. صفحات بافل مورد استفاده در این جداکننده نیز دارای تخلخل ۳۸٪ بوده است. قطر لوله ورودی، خروجی گاز، خروجی هیدروکربن مایع و آب به ترتیب ۰/۲۵۴ m، ۰/۳۰۴۸، ۰/۱۰۱۶ و ۰/۱۰۱۶ بوده‌اند [۱۸]. هندسه مش‌بندی شده جداکننده مورد نظر نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مرحله، محیط حل جداکننده به دلیل قرار گرفتن تجهیزات پیچیده مختلف درون جداکننده، جهت کیفیت و یکنواختی بهتر از نظر شبکه‌بندی، به چندین قسمت تقسیم شده و سپس شبکه‌بندی روی هر یک از قسمت‌ها به صورت جداگانه انجام شده است. برای شبکه‌بندی از شبکه‌های ترکیبی چهار وجهی ساختار نایافته استفاده شده است.



(۲-الف)



(۲-ب)

شکل (۲) شبکه استفاده شده در الف) کل جداکننده ب) بخشی از جداکننده

خوراک ورودی به جداکننده به صورت ترکیبی از گاز، هیدروکربن مایع (میعانات گازی) و آب بوده است. چگالی فازهای گاز، میعانات گازی و آب به ترتیب  $99 \text{ kg/m}^3$ ،  $626/7$  و  $1168/7$  و ویسکوزیته این فازها به ترتیب  $4 \times 10^{-5}$  و  $13 \times 10^{-4}$  و  $8 \times 10^{-4}$  گزارش شده‌اند [۱۸]. به منظور مقایسه عملکرد جداکننده از نظر عددی، مقادیر آزمایشگاهی در دسترس در این جداکننده یعنی

<sup>22</sup> gas chromatography with flame ionization detection



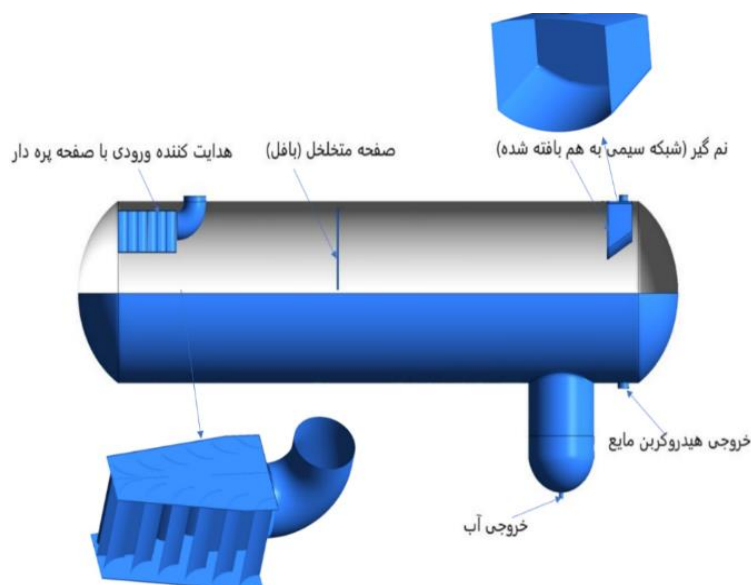
[۱۸] گرفته شده و در کار حاضر استفاده شده است. لازم به ذکر است که در این کار از نم‌گیر با شبکه سیمی، به دلایلی نظیر ساختار ساده، قیمت پایین، نصب آسان و پایین‌تر بودن افت فشار آن نسبت به سایر نم‌گیرها، استفاده شده است. بر اساس مطالعه جامع هلسر و اسوندسون روی نم‌گیرها با شبکه سیمی، بهترین نوع آن که مناسب برای کار صنعتی بوده، برای استفاده در کار حاضر انتخاب شده است. در حقیقت با نصب نم‌گیر، قطرات با اینرسی بالا به صفحات مشبک برخورد کرده و مومنتم خود را از دست می‌دهند. سپس قطراتی که دارای اندازه کافی برای جدایش در اثر جاذبه نیستند، روی این صفحات تجمع می‌کنند. این تجمع تا زمانی ادامه می‌یابد که در مرحله بعد، قطرات در اثر برخورد با قطرات دیگر به اندازه کافی رشد کنند، تا قادر به ته‌نشین شدن در اثر جاذبه باشند. در نتیجه عملکرد جداکننده، با کاهش میزان حضور قطرات ریز در خروجی گاز، بهبود می‌یابد. ضریب مقاومت ویسکوز  $(\frac{1}{\alpha})$ ، ضریب مقاومت اینرسی  $(C_f)$  و تخلخل نم‌گیر انتخاب شده به ترتیب  $3.84e6 \text{ m}^{-2}$ ،  $126 \text{ m}^{-1}$  و  $97.7\%$  گزارش شده‌اند [۴۰] و جهت استفاده در مدل محیط متخلخل در کار حاضر استفاده شده است. همان‌طور که ذکر شد اضافه کردن بافل نیز، جهت بهبود عملکرد جداکننده، در این کار مد نظر بوده است. بافل‌ها از یک صفحه سوراخ‌دار تشکیل شده‌اند و در طول جداکننده افقی نصب می‌شوند تا با توزیع بهتر جریان، به جدایش بهتر قطرات کمک کنند. بر اساس مطالعات انجام شده در مراجع مشخص شده است که یک بافل هنگامی بهترین عملکرد را برای بهبود الگوی جریان دارد که سطح آزاد صفحه سوراخ‌دار بین  $20\%$  تا  $40\%$  است [۶]. بنابراین، بر اساس معیار ذکر شده، از اطلاعات یک بافل موجود در یکی از جداکننده‌های صنعتی مربوط به یکی از شرکت‌های نفتی ایران، به منظور استفاده در کار حاضر استفاده شده است. بافل مورد نظر در میانه جداکننده قرار داده شده است و میزان سطح آزاد و ضریب مقاومت اینرسی مربوط به بافل استفاده شده، به ترتیب  $38\%$  و  $\text{m}^{-1}$   $1763/42$  گزارش شده است [۱۸]. نمایی از طراحی جدید جداکننده صنعتی با نصب تجهیزات درونی در شکل ۳ نشان داده شده است.

مشکل بوده است که در نتیجه منجر به حضور مقدار زیاد مایع در گاز خروجی شده است. علاوه بر این جداکننده مورد نظر هنگام افزایش دبی با کاهش چشمگیر عملکرد مواجه شده است [۱۳]. با توجه به این موارد نیاز به بهبود طراحی جداکننده جهت رفع این مشکلات دیده می‌شود. همان‌طور که در قسمت مقدمه ذکر گردید، علی‌رغم تأثیر تجهیزات داخلی روی بهبود طراحی جداکننده‌ها، تا کنون هیچ تحقیقی برای بررسی اثر این تجهیزات در جداکننده صنعتی دارای بوت، انجام نشده است. بنابراین در کار حاضر به بررسی اثر تجهیزات درونی در این جداکننده صنعتی به منظور بهبود طراحی آن پرداخته می‌شود.

### ۱-۲-۴- طراحی جدید با اضافه کردن تجهیزات درونی

در این تحقیق با توجه عیب‌یابی انجام شده، به بررسی تعویض هدایت‌کننده ورودی (به دلیل مشکل مربوط به ناحیه ورودی و نیاز به تغییر در شرایط هدایت‌کننده)، نصب بافل (به دلیل نیاز به بهبود عملکرد جداکننده در ناحیه جدایش گرانشی برای جدایش بهتر قطرات درشت) و نصب نم‌گیر (به دلیل نیاز به جدایش قطرات ریز خارج شده از خروجی گاز)، جهت دستیابی به طراحی مناسب پرداخته شده است. طبق بررسی‌های انجام شده، در یک جداکننده با طراحی بهینه، فاز گاز در خروجی باید حداقل گرم مایع به ازای هر متر مکعب از گاز را داشته باشد [۱۸، ۳۸، ۱۰، ۱۱]. بنابراین در این کار تلاش شده تا با بهبود طراحی جداکننده موردنظر، به کاهش مقدار مایع در خروجی گاز کمک کرد. در این کار به دلیل نیاز به تعویض نوع هدایت‌کننده ورودی جهت بهتر شکسته شدن مومنتم، از هدایت‌کننده ورودی با صفحات پره‌دار<sup>۲۳</sup> استفاده شده است. در این ورودی‌ها خوراک پس از برخورد با یک پره به پره دیگر برخورد کرده و موجب بیشتر شکسته شدن مومنتم و یکنواخت‌تر شدن بیشتر جریان می‌گردد. لازم به ذکر است که هنگام افزایش دبی، استفاده از یک ورودی که در بهتر شکسته شدن مومنتم موفق‌تر است، نیز توصیه می‌شود. بنابراین، این نوع ورودی به منظور رفع مشکل افزایش دبی نیز باید مد نظر قرار بگیرد [۲]. مشخصات هدایت‌کننده ورودی مورد نظر از یکی از جداکننده‌های صنعتی موجود در جنوب ایران

<sup>23</sup> Vane type inlet diverter

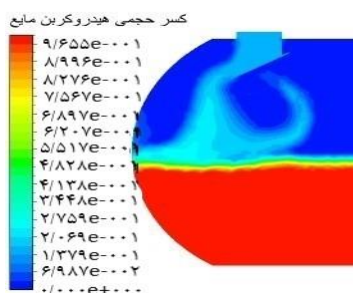


شکل (۳) نمایی از جداکننده با طراحی جدید

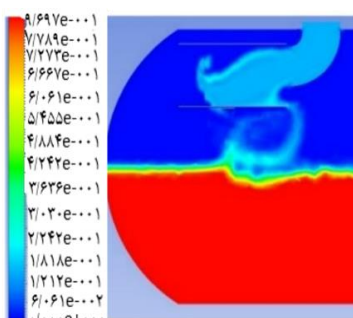
می‌شود اما در طراحی جدید، این انحراف با تقسیم شدن در صفحات پره‌دار یکنواخت‌تر می‌گردد، و سیال با توزیع بهتر از هدایت کننده خارج می‌گردد. بنابراین این امر باعث بهتر شکسته شدن مومنتم، که لازمه یک فرایند جدایش خوب است، می‌شود و مشکل مربوط به این ناحیه را کاهش می‌دهد.

#### ۱-۲-۴- اثر طراحی جدید روی رفع مشکل مربوط به عیب‌یابی جدایش و بهبود عملکرد جداکننده

در این بخش به منظور بررسی اثر طراحی جدید روی رفع مشکل مربوط به عملکرد جدایش در ورودی، کانتور کسر حجمی هیدروکربن مایع در شکل ۴ رسم شده است. به منظور مقایسه بهتر با جزئیات بیشتر، در شکل ۵ پروفایل سرعت مربوط به ورودی در جداکننده با طراحی کنونی و طراحی جدید نیز نشان داده شده است. در حقیقت در هر جداکننده، هدایت کننده ورودی باید به گونه‌ای انتخاب گردد که میزان آشفتگی، چرخش‌ها، برگشت جریان و غیر یکنواختی سرعت در ورودی را به حداقل برساند تا بهترین جدایش در ورودی حاصل گردد [۲]. با توجه به شکل ۴ مشخص است که با طراحی جدید مشکل جداکننده کنونی، که در آن جریان خوراک ورودی با برخورد به سطح مشترک یک حرکت برگشتی به سمت بالای جداکننده داشته و مومنتم به اندازه کافی توسط هدایت کننده ورودی شکسته نشده، کاهش یافته است. در حقیقت با تعویض نوع هدایت کننده ورودی با توجه به شکل های ۴ و ۵ مشخص می‌شود که کاهش برگشت جریان، تبدیل چرخش‌های بزرگ جریان به چرخش‌های کوچکتر و همچنین کاهش مؤثر بردارهای سرعت نسبت به طراحی کنونی صنعت اتفاق افتاده است. دلیل این امر این است که در هدایت کننده ورودی زاویه‌دار، جریان یک دفعه در ورودی منحرف



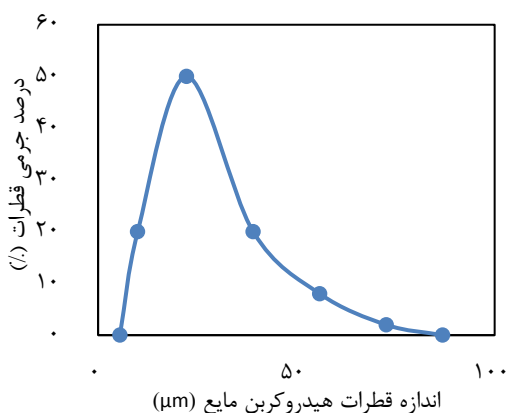
(الف-۴)



(ب-۴)

شکل (۴) کانتور کسر حجمی هیدروکربن در (الف) طراحی کنونی (ب) طراحی جدید

جداکننده با طراحی جدید، در رفع مشکل مورد نظر بوده است.



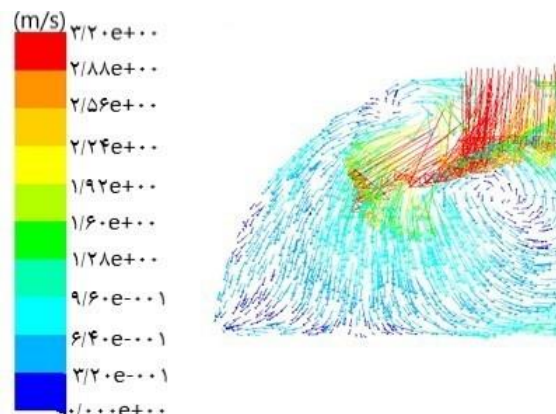
شکل (۶) توزیع اندازه قطرات در خروجی گاز با طراحی جدید

با توجه به این که طراحی جدید در رفع مشکلات مربوط به فرایند جدایش در شرایط کنونی صنعت موفق بوده است، در این قسمت به محاسبه میزان جرم مایع خارج شده از گاز در خروجی پرداخته می‌شود، تا مشخص شود که طراحی جدید در کاهش مؤثر جرم مایع در خروجی به چه اندازه مؤثر بوده است. در جدول ۳ مقایسه میزان مایع در خروجی گاز با استفاده از طراحی جدید و طراحی کنونی صنعت نشان داده شده است. نتایج جدول نشان دهنده بهبود عملکرد جداکننده با کاهش مؤثر میزان جرم مایع در خروجی گاز بوده، به طوری که با طراحی جدید میزان جرم مایع به اندازه ۸۳/۸٪ نسبت به طراحی کنونی کاهش یافته است.

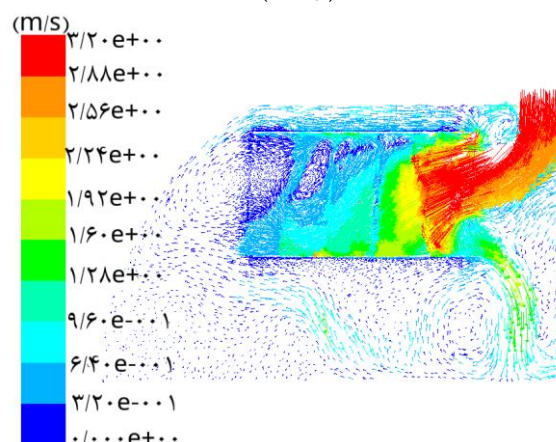
جدول (۳) مقایسه میزان مایع در خروجی گاز برای طراحی جدید و طراحی کنونی صنعت

مقدار مایع در خروجی گاز (kg/hr)	
طراحی کنونی صنعت	۴۲/۶
طراحی جدید	۶/۹

در این قسمت اثر افزایش دبی روی جداکننده با طراحی جدید باید مورد بررسی قرار گیرد تا مشخص شود که این طراحی در رفع مشکل کاهش کیفیت جدایش هنگام افزایش دبی چگونه عمل می‌کند. درحقیقت



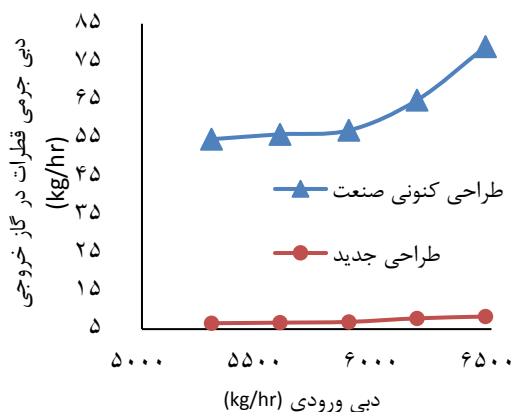
(الف-۵)



(ب-۵)

شکل (۵) بردارهای سرعت در ورودی برای (الف) طراحی کنونی (ب) طراحی جدید

شکل ۶ اثر طراحی جدید روی توزیع جرم قطرات خارج شده از گاز خروجی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در طراحی کنونی صنعت بخش عمده قطرات خارج شده در محدوده زیر  $100\mu\text{m}$  بوده‌اند ولی حضور قطرات درشت (بزرگتر از  $100\mu\text{m}$ ) در خروجی نیز دیده شده است [۱۲]. در حقیقت در یک جداکننده که به خوبی طراحی شده باشد، قطرات درشت باید در طول مسیر جداکننده از فاز گاز جدا شده باشند. در صورت حضور زیاد قطرات ریز در خروجی نیز، باید از نم‌گیر برای افزایش عملکرد جداکننده استفاده کرد [۲،۳۷]. بنابراین جهت بهبود عملکرد از طراحی جدید استفاده شده است. با توجه به شکل ۶ مشخص است که پراکندگی توزیع اندازه قطرات نسبت به حالت اصلی جداکننده در شرایط کنونی صنعت کاهش یافته و عمده قطرات باقی مانده (حدود ۹۰٪ آنها) قطری کمتر از  $39\mu\text{m}$  دارند. این امر نیز نشان دهنده عملکرد بهتر



شکل (۷) مقایسه اثر افزایش دبی برای طراحی کنونی صنعت و طراحی جدید

### ۵- نتیجه گیری

در این کار از یک مدل ترکیبی (VOF-DPM) برای شبیه‌سازی جداکننده سه فازی صنعتی استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های صنعتی مربوط به دو جداکننده مختلف مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد که دو جداکننده با خطای  $12/9\%$  و  $13/4\%$  در تطابق قابل قبولی با داده‌های صنعتی بوده‌اند. از این مدل ترکیبی برای بررسی اثر تجهیزات درونی در یک جداکننده سه فازی صنعتی دارای بوت به منظور بهبود طراحی آن استفاده شده است. هدف از بهبود طراحی جداکننده، کاهش مقدار مایع در خروجی گاز، رفع مشکلات مربوط به فرایند جدایش در شرایط کنونی صنعت و جلوگیری از کاهش چشمگیر عملکرد جداکننده هنگام افزایش دبی بوده است. با توجه به نتایج عیب‌یابی فرایند جدایش در این جداکننده، از هدایت‌کننده ورودی پره‌دار در ابتدا، بافل در میانه و نم‌گیر در انتهای جداکننده استفاده شد. پروفایل سرعت و کانتور کسر حجمی مایع در ورودی جداکننده با طراحی جدید، نشان دهنده کاهش برگشت جریان، تبدیل چرخش‌های بزرگ جریان به چرخش‌های کوچکتر و همچنین کاهش مؤثر بردارهای سرعت نسبت به جداکننده با طراحی کنونی صنعت بوده است. این امر کاهش مشکل مربوط به عملکرد ناحیه ورودی را تأیید می‌کند. بررسی توزیع اندازه قطرات مایع در خروجی گاز نشان داد که پراکندگی توزیع اندازه قطرات در طراحی جدید نسبت به طراحی کنونی صنعت کاهش یافته است به

جداکننده‌های طراحی شده باید قابلیت تغییر دبی در یک محدوده مورد نیاز عملیاتی را بدون کاهش چشمگیر در عملکرد جداکننده داشته باشند. شکل ۷ اثر تغییر دبی گاز ورودی روی میزان مایع در گاز خروجی را نشان می‌دهد. دبی ورودی در محدوده  $5298-6475$  kg/hr تغییر داده شده است. همان طور که از شکل مشخص است با افزایش دبی در ورودی، به دلیل کاهش زمان اقامت فاز مایع، میزان قطرات مایع در خروجی گاز افزایش پیدا کرده است. به دلیل مشکل جداکننده حاضر با طراحی کنونی صنعت، که هنگام افزایش دبی با افزایش چشمگیر مقدار مایع در خروجی مواجه شده، از طراحی جدید استفاده شده است. در حقیقت در شرایط کنونی در بیشترین حالت دبی، مقدار زیاد مایع به اندازه  $79$  kg/hr در خروجی گاز خارج شده است. استفاده از طراحی جدید در رفع این مشکل نشان می‌دهد که میزان افزایش مایع در گاز خروجی برای جداکننده با طراحی جدید بسیار کمتر از میزان افزایش مشاهده شده در طراحی کنونی صنعت است به طوری که در این حالت در بیشترین دبی تنها مقدار  $8/3$  kg/hr از مایع در خروجی مشاهده می‌گردد. لازم به ذکر است که با توجه به شکل هنگامی که از طراحی جدید استفاده می‌شود، میزان حذف مایع در بیشترین حالت دبی، بسیار بیشتر از میزان حذف مایع در کمترین حالت دبی اتفاق می‌افتد بنابراین عملکرد این طراحی جدید در میزان حذف مقدار مایع برای دبی‌های بالاتر موفق‌تر بوده است. دلیل این امر استفاده از هدایت‌کننده ورودی پره‌دار در طراحی جدید است. در حقیقت طراحی این هدایت‌کننده‌ها به گونه‌ای است که افزایش دبی و سرعت در ورودی منجر به برخورد سریع‌تر جریان با صفحات پی در پی، تغییر سریع‌تر جهت و در نتیجه شکست بهتر مومنتم می‌شود، در نتیجه جدایش بیشتر مقدار مایع حاصل می‌گردد. با توجه به نتایج گزارش شده، جداکننده مورد نظر با طراحی جدید قابلیت افزایش دبی در کل محدوده عملیاتی را بدون کاهش چشمگیر عملکرد داشته و در رفع این مشکل نیز موفق عمل کرده است.

مشکل فرایند جدایش در شرایط کنونی صنعت و هنگام افزایش دبی، این طراحی به عنوان طراحی مناسب برای این جداکننده صنعتی معرفی می‌گردد.

### تشکر و قدردانی

با تشکر ویژه از شرکت پتروشیمی برزویه جهت در اختیار گذاشتن همه داده‌های مورد نیاز در این تحقیق.

طوری که عمده قطرات باقی مانده یعنی حدود ۹۰٪ از قطرات خارج شده قطری کمتر از  $39 \mu\text{m}$  دارند. این امر نیز نشان دهنده عملکرد مناسب این طراحی جهت رفع مشکل مربوط به توزیع اندازه قطرات بوده است. با استفاده از طراحی جدید بهبود عملکرد جداکننده حاصل شده به طوری که میزان جرم مایع در خروجی گاز به اندازه ۸۳/۸٪ نسبت به طراحی کنونی صنعت کاهش یافته است و در خروجی تنها مقدار  $6/9 \text{ kg/hr}$  از مایع مشاهده شده است. نتایج هنگام بررسی اثر افزایش دبی ورودی در محدوده  $5298-6475 \text{ kg/hr}$  نشان داد که اگر چه جداکننده با طراحی کنونی صنعت با کاهش چشمگیر عملکرد مواجه شده و منجر به خروج مقدار زیاد مایع به اندازه  $79 \text{ kg/hr}$  شده است، ولی با استفاده از طراحی جدید، مقدار افزایش مایع بسیار کمتر بوده و حداکثر مقدار مایع در خروجی تنها به اندازه  $8/3 \text{ kg/hr}$  مشاهده شده است. بنابراین جداکننده مورد نظر با طراحی جدید، قابلیت تحمل افزایش دبی در کل محدوده عملیاتی را بدون کاهش چشم‌گیر عملکرد داشته است. با توجه به موفقیت طراحی جدید در رفع

علائم یونانی	علائم لاتین
کسر حجمی فاز $m$ [-]	$C_D$ ضریب درگ [-]
نرخ استهلاک انرژی جنبشی $[m^2/s^2]$	$D$ قطر لوله [m]
ویسکوزیته فاز پیوسته و ناپیوسته [Pa. s]	$d_p$ قطر ذره [m]
تنش برشی $[N/m^2]$	$d_1, d_2$ قطر قطرات بزرگ و کوچک [m]
دانسیته فازهای پیوسته، ناپیوسته، ذره و فاز $m$ $[Kg/m^3]$	$F_D$ نیروی درگ [N]
	$F_{\theta m}$ نیروی جرم مجازی [N]
	$\vec{f}$ نیروهای اضافی به ازای واحد جرم $[m/s^2]$
	$g$ نیروی جاذبه $[m/s^2]$
	$k$ انرژی جنبشی آشفته $[m^2/s^2]$
	$P$ فشار $[N/m^2]$
	$\vec{u}$ سرعت میانگین $[m/s]$
	$u_p$ سرعت ذره $[m/s]$
	$u_c$ سرعت فاز پیوسته $[m/s]$
	$u'$ سرعت نوسانی $[m/s]$
	$X$ انحراف ذره از حالت کروی [m]
	$C_f$ ضریب مقاومت اینرسی $[m^{-1}]$

## مراجع

- [1]. Y.F. Qarot, N. Kharoua and L. Khezzar (2014) "Discrete phase modeling of oil droplets in the gas compartment of a production separator", *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, Canada.
- [2]. A. Laleh, (2010) "CFD Simulation of Multiphase Separators", PhD Dissertation, University of Calgary, Calgary, Canada.
- [3]. M. Mostafaiyan, M.R. Saeb, A.E. Alorizi and M. Farahani (2014) "Application of evolutionary computational approach in design of horizontal three-phase gravity separator", *Journal of petroleum science and engineering*, 119, 28-35.
- [4]. K. Gawas, (2013) "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
- [5]. E.W.M. Hansen, H. Heitmann, B. Lakså, A. Ellingsen, O. Østby, T.B. Morrow and F.T. Dodge (1991) "Fluid Flow Modeling of Gravity Separators", *5th International Conference on Multiphase Production*.
- [6]. D. Wilkinson, B. Waldie, M.I.M. Nor and H.Y. Lee (2000) "Baffle Plate Configuration to Enhance Separation in Horizontal Primary Separators", *Chemical Engineering Journal*, 7, 221-226.
- [7]. T. Ahmed, P.A. Russell and S. Gooneratne (2019) "Experimental analysis and Computational fluid dynamics modeling of pilot scale three-phase separators", *SPE production and operation*, Society of Petroleum Engineers.
- [8]. M. Bothamley, (2013) "Gas/liquid separators: quantifying separation performance-part 1", *Oil and Gas Facilities*, 2(4), 21-29.
- [9]. N. Kharoua, L. Khezzar and H. Saadawi (2013) "CFD Modelling of a horizontal three-phase separator: A population balance Approach", *American Journal of Fluid Dynamic*, 3(4), 101-118.
- [10]. N. Kharoua, L. Khezzar and H. Saadawi (2013) "CFD simulation of three-phase separator: effects of size distribution", *ASME FEDSM*. Nevada, USA.
- [11]. A.P. Laleh, W.Y. Svrcek and W.D. Monnery (2012) "Computational Fluid Dynamics-Based Study of an Oilfield Separator--Part I: A Realistic Simulation", *Oil and Gas Facilities*, 1(6), 1-12.
- [12]. Z. Khalifat, M. Zivdar and R. Rahimi (2019) "Application of CFD for troubleshooting and hydrodynamic analysis in an industrial three-phase gravity separator", *Journal of gas technology*, 5, 57-75.
- [13]. Z. Khalifat, M. Zivdar and R. Rahimi (2020) "Simulation of an industrial three-phase boot separator using computational fluid dynamics", *Journal of gas technology* 6:30-42.
- [14]. T. Austrheim (2006) "Experimental Characterization of High-Pressure Natural Gas Scrubbers", Ph.D. Thesis, University of Bergen, Bergen, Norway.
- [15]. T. Frankiewicz and C.M. Lee (2002) "Using Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation to Model Fluid Motion in Process Vessels on Fixed and Floating Platforms", *Society of Petroleum Engineering*, 77494, 1-9.
- [16]. Y. Lu, J.M. Lee, D. Phelps and R. Chase (2007) "Effect of Internal Baffles on Volumetric Utilization of a FWKO-A CFD Evaluation", *Society of Petroleum Engineering*, 109944, 1-6.
- [17]. R.D. Vilagines and A.R. Akhras (2010) "Three-phase flows simulation for improving design of gravity separation vessels", *SPE annual technical conference and exhibition*, Florence, Italy.
- [18]. A. Ghafarkhah, M.A. Shahrabi, M.K. Moraveji and H. Eslami (2018) "3D Computational-Fluid-Dynamics Modeling of Horizontal Three-Phase Separators: An Approach for Estimating the Optimal Dimensions", *Oil and Gas Facilities*, 33(4), 1-17.
- [19]. Nouri Petrochemical Company, Hydro-Treating Unit, D-2502, Document NO. 0250-T4031-007-A1.
- [20]. A.P. Laleh, W.Y. Svrcek and W.D. Monnery (2011) "Design and CFD studies of multiphase separators- A review", *The Canadian journal of chemical engineering*, 90(6), 1547-1561.
- [21]. A. Ghafarkhah, M.A. Shahrabi, M.K. Moraveji and H. Eslami "Application of CFD for designing conventional three phase oilfield separator", *Egyptian journal of petroleum*, 26(2), 413-420.
- [۲۲]. زهرة خلیفات، مرتضی زیددار، رهبر رحیمی (۱۳۹۹) "مروری بر مدل سازی جداکننده های چند فازي گرانشی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی"، *مجله مهندسی شیمی ایران*, ۱۹، ۱۱۰، ۱۱۱-۵۴.
- [23]. S. Cloete, J.E. Olsen and P. Skjetne (2009) "CFD modeling of plume and free surface behavior resulting from a sub-sea gas release", *Applied Ocean Research*, 31(3), 220-225.
- [24]. A.P. Laleh, W.Y. Svrcek and W.D. Monnery (2011) "Computational Fluid Dynamics Simulation of Pilot Plant- Scale Two- Phase Separators", *Chemical Engineering Technology*, 34(2), 296-306.
- [25]. S. Cloete, J.J. Eksteen and S.M. Bradshaw (2009) "A mathematical modeling study of fluid flow and mixing in full-scale gas stirred ladles", *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 9 (6), 345-356.
- [26]. J.u. Bracbill, D.B. Kothe and C. Zemach (1992) "A continuum method for modeling surface tension", *Journal of Computational Physics*, 100, 335-356.

- [27]. S.K. Shukla, P. Shukla and P. Ghosh (2011) "Evaluation of numerical schemes for dispersed phase modeling of cyclone separators", *Engineering Applications of Computational Fluid mechanics*, 5(2), 235-246.
- [28]. A.N. Huang, K. Ito, T. Fukasawa, K. Fukui and H.P. Kuo (2018) "Effects of particle mass loading on the hydrodynamics and separation efficiency of a cyclone separator", *Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers*. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.12.016>.
- [29]. R.C. Hsu, C.K. Chiu and S.C. Lin (2018) "A CFD study of the drawdown speed of floating solids in a stirred vessel". *Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers*. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.12.014>.
- [30]. B. Zhang, L. Kong, H. Jin, G. He, S. Yang and X. Guo (2018) "CFD simulation of gas-liquid flow in a high-pressure bubble column with a modified population balance model", *Chinese journal of chemical engineering*, 26(6), 1350-1358.
- [31]. ANSYS Fluent version 16.2: Fluent Theory Guide, ANSYS help viewer, 2016.
- [32]. E. Kufas (2008) "Mathematical modeling of coalescence of oil droplets in water flow", M.Sc. Dissertation, University of science and technology, Norway.
- [33]. U.V. Kongre and V.K. Sunnap war (2010) "CFD modeling and experimental validation of combustion in direct ignition fueled with diesel", *International Journal Applied Engineering Research*, 1(3), 508-517.
- [34]. F. Wang, J. Tan and Z. Wang (2014) "Heat transfer analysis of porous media receiver with different transport and thermophysical models using mixture as feeding gas", *Energy Conversion and Management*, 83, 159-166.
- [35]. Z. Krezmianowski, T. Lackowski, T. Ochrymiuk and P. Flszynski (2020) "Substitute model and CFD investigation of a coalescer in a three-phase crude oil gravity separator", *Journal of applied fluid mechanics*, 13(3), 805-813.
- [36]. S.V. Patankar and D.B. Spalding (1972) "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, 1787-1806.
- [37]. K. Arnold and M. Stewart (2008) *Surface Production Operations*, 3<sup>rd</sup> ed., Elsevier, New York.
- [38]. L. Oshinowo, E. Elsaadawy and R. Vilagines (2014) "CFD modeling of oil-water separation efficiency in three-phase separators", *10<sup>th</sup> international conference on CFD in oil & Gas*, Metallurgical and process Industries SINTEF, Trondheim, Norway.
- [39]. V.R. Andreeva, A.Y. Ivashov, K.A. Kotin and A.A. Voltsov (2016) "High gas oil ratio separator units", *SPE Russian Petroleum Technology conference*, Russia.
- [40]. Hølsør, T. and H. Svendsen (2007) "Experimental characterization of pressure drop in dry demisters at low and elevated pressures", *Chemical Engineering Research and Design*, 85 (3), 377-385.

## Optimizing the design of an industrial three-phase gravity separator to debottleneck the separation process

Zohreh Khalifat, Mortaza Zivdar \*, Rahbar Rahim

Chemical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

---

### ABSTRACT

Multi-phase gravity separators are one of the most useful equipment used to separate immiscible phases in different industries. Debottlenecking of the separation process was investigated in this study, to improve the performance of an industrial three-phase boot separator. So, the effect of altering the inlet diverter (replacing the slopped inlet diverter with a vane inlet diverter), placing a baffle in the middle, and placing a mist extractor at the end of the separator, were considered. Results of this research showed that by using the new design, the performance of the separator improved so that the liquid amount at the gas outlet decreased by 83.8% compared to the current design of the industrial separator. This new design was successful in improving the flow behavior at the inlet zone, improving the droplet size distribution at the outlet zone, and preventing the impressive decrease of the separator performance while increasing the inlet flow rate.

---

### ARTICLE INFO

---

#### Article history:

Received: December 3, 2020

Received in revised form: February 25, 2021

Accepted: April 24, 2021

---

#### Key words:

Industrial boot separator

Internals

Inlet diverter

Baffle

Mist extractor

---

All right reserved.

\* Corresponding author

mzivdar@eng.usb.ac.ir

---