

مطالعه تجربی و مدل سازی CFD جداساز دوفازی

مهدی فدائی، محمدجواد عامری* و علی سلمانی
دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۶

چکیده

تمرکز اصلی این پژوهش بر روی بررسی عملکرد جداساز دوفازی (مایع-گاز) آزمایشگاهی به صورت تجربی و همچنین، ارائه مدل شبیه سازی دقیق به منظور استفاده در طراحی جداسازهای صنعتی بوده است. به همین منظور، جداساز صنعتی دوفازی در ابعاد آزمایشگاهی با استفاده از روابط تجربی موجود طراحی گردید. در مدل های نیمه تجربی علاوه بر فرض های ساده شونده، تأثیر منحرف کننده ورودی جداساز بر فرآیند جداسازی نادیده گرفته شده و قطر قطرات فاز ثانویه یک مقدار ثابت تعیین شده می باشد که تمامی قطرات مایع در بالاترین نقطه جداساز قرار دارند و از آن نقطه به طرف سطح مایع سقوط می کنند. همچنین، مفاهیم مربوط به جریان آشسته در این روش ها مدنظر گرفته نشده است. در این پژوهش، چرخه جریان دوفازی در ابعاد آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. در چرخه جریانی ساخته شده، آب به عنوان سیال مایع و هوا به عنوان سیال گاز مورد استفاده قرار گرفتند. سیال آب و هوا در نقطه اختلاط که یک مخلوط کننده استاتیک می باشد، تشکیل جریان دوفازی داده و پس از طی مسافتی معادل با ۱۶۰ برابر قطر خط لوله، جریان توسعه یافته تشکیل شده و وارد جداساز می شود. دبی آب در بازه $2-0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ و دبی گاز در بازه $10-0 \text{ m}^3/\text{h}$ در نظر گرفته شد. به منظور بررسی عملکرد جداساز دوفازی، از فیلتر 20μ در خروجی گاز جداساز استفاده شد و کسر حجمی قطرات آب باقی مانده در جریان گاز خروجی اندازه گیری شد. همچنین با استفاده از سیستم عکس برداری، قطر قطره های آب به دام افتاده در فیلتر اندازه گیری شد. نتایج شبیه سازی CFD جداساز دوفازی با نتایج تجربی به دست آمده اعتبارسنجی شدند و بهترین مدل شبیه سازی چندقفازی، مدل اغتشاش و ضرایب تخفیف برای فرآیند شبیه سازی CFD جداساز دوفازی تعیین شدند. از مهم ترین دستاوردهای این پژوهش فراهم نمودن بستر لازم جهت طراحی جداساز دوفازی گاز-مایع در ابعاد صنعتی با توجه به شرایط تولید و تأثیر هریک از اجزای داخلی جداساز می باشد.

کلمات کلیدی: مطالعه تجربی، شبیه سازی، CFD، جداساز، دوفازی

مقدمه

جداسازهای چندقفازی از فرض های ساده شونده ای استفاده می کنند که نتایج حاصل از آنها را تا حدودی غیرقابل اعتماد می کند. بدین منظور، شرکت های معتبر طراحی جداساز همواره از روش های

مدل های نیمه تجربی ارائه شده برای طراحی

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2020.4191.2900)
ameri@aut.ac.ir

باشد. البته ضعف بزرگ در این پژوهش، این بود که درصد باز بودن صفحات مشبک در مدل های آزمایشگاهی و مدل های دینامیک سیالات محاسباتی تفاوت داشتند و این امر از دقت مقایسه کاسته بود. کلیه مدل های استفاده شده در این مطالعه توسط نرم افزار فونیکس تحلیل گردید. از جمله نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط ویلکینسون و همکاران، مدل سازی دقیق جداساز آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار فلوئنت می باشد زیرا نرم افزار فونیکس اثرات مربوط به اغتشاش جریان چندفازی را در نظر نمی گیرد و از مدل های بسیار ساده چندفازی مثل مدل ترکیب استفاده می کند در حالی که مدل های چندفازی جدیدتر از جمله حجم سیال توانایی مدل کردن تمامی پارامترهای جریان چندفازی از جمله اغتشاش، گردابه ها، قطرات مایع و اثرات اغتشاش در نزدیک دیواره و جداشوندگی و به هم پیوستن قطرات را دارا می باشد. همچنین، یکی دیگر از نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط ویلکینسون و همکاران، نشان دادن پدیده حمل مجدد قطرات مایع توسط جریان آب به صورت تجربی و شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی می باشد. لی و همکاران [۲]، برای حل مشکلات عملیاتی موجود در جداسازها چندین پیشنهاد عملیاتی را ارائه دادند و مؤثر بودن این پیشنهادها را از طریق روش دینامیک سیالات محاسباتی ارزیابی کردند. شبکه بندی این مدل در محیط نرم افزار گمیت انجام شد و تحلیل آن به کمک نرم افزار فلوئنت انجام شد. یکی از نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط لی و همکاران، اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی با نتایج تجربی می باشد که از این طریق بهترین مدل شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه سازی جداساز چندفازی تعیین می شود.

آزمایشگاهی برای صحت سنجی طراحی های حاصل از این روش و تعیین حدود پارامترهای مجهول این روش ها استفاده می کنند. لازم به ذکر است که این نوع از کارهای آزمایشگاهی بسیار هزینه بر و زمان بر است و از طرف دیگر، هیچ شرکتی نتایج حاصل از این کارها را منتشر نمی کند. بنابراین، لزوم وجود یک واحد پیشتاز آزمایشگاهی برای دریافت اطلاعات آزمایشگاهی صحیح بیش از پیش احساس شده و هدف این پژوهش هم پیشبرد همین مورد است. هر یک از روش های طراحی جداساز مجموعه ای از ابعاد متفاوت را ارائه می دهند که در نهایت ابعاد بهینه باتوجه به ضریب لاغری^۱ تعیین می شود. در روش های نیمه تجربی، تأثیر منحرف کننده های داخلی جداساز بر فرآیند جدایش نادیده گرفته شده و قطر قطرات فاز ثانویه یک مقدار ثابت و پیش تعیین شده در نظر گرفته شده است. همچنین در روش های نیمه تجربی این گونه فرض شده است که تمامی قطرات مایع در بالاترین نقطه جداساز قرار دارند و سپس از آن نقطه سقوط می کنند. در حالی که وجود منحرف کننده ورودی باعث می شود که تکانه ذرات مایع به سرعت کم شده و فقط تعداد کمی از این قطرات جدایش گرانشی خود را از بالاترین نقطه جداساز شروع کنند. همچنین، مفاهیم مربوط به جریان آشفته در این روش هادر نظر گرفته نشده اند. به همین منظور، ویلکینسون و همکارانش [۱]، یکی از کامل ترین فرآیندهای طراحی جداساز را به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی و روش های آزمایشگاهی انجام دادند. روند کاری آنها، از ساخت مدل آزمایشگاهی یک جداساز کوچک مقیاس آغاز شد و به بررسی کارایی و شیوه طراحی جداسازهای چندفازی بزرگ مقیاس به روش دینامیک سیالات محاسباتی ختم شد. نتایج کار این گروه به خوبی نشان داد که بهترین جدایش بین فازها زمانی اتفاق می افتد که پدیده حمل مجدد مایع توسط فاز گاز صورت نگیرد و در کنار آن جریان در قسمت جدایش گرانشی، به صورت کاملاً یکنواخت و دور از تلاطم

1. Slenderness Ratio

از مدل حجم‌سیال برای شبیه‌سازی جریان دو فازی در ابعاد ماکروسکوپی بهره گرفته شده است. در مرحله بعد، فاز گسسته نفتی از ورودی جداساز تزریق شده است و مسیر حرکت فاز گسسته تا خروجی گاز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مدل، به جز در موارد بسیار محدود، چه در زمینه تعیین کارایی جداساز و چه در زمینه تعیین دبی مناسب کاری جداساز، بسیار به نتایج آزمایشگاهی نزدیک است. در این روش نیز برای شبیه‌سازی اثر توربولانسی از مدل کا-اِپسیلون استاندارد بهره گرفته شده است. از جمله نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط پورا احمدی لاله و همکاران عدم فرض دیواره بدون اصطکاک در سطح تماس فاز مایع و گاز می‌باشد که پدیده حمل مجدد قطرات مایع توسط فاز گاز در فرآیند شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مدل می‌شود و نتایج حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی به نتایج تجربی بسیار نزدیک خواهند شد. غفارخواه و همکاران [۵]، با استفاده از دو روش تعیین ابعاد تجربی آرنولد استوارت^۲ و مونری و سروک^۳ ابعاد جداساز چندفازی را تعیین نمودند. سپس با ترکیب دو مدل حجم‌سیال و مدل فاز گسسته به همراه مدل اغتشاش کا-اِپسیلون برای بررسی رفتار سیالات چندفازی و میزان جداسازی در جداساز چندفازی استفاده نمودند و برای مدل کردن سرعت سیال در فاز دیگر از مدل گام تصادفی مجزا^۴ استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی نشان داد که اندازه سرعت و مقدار انرژی جنبشی در روش تجربی مونری و سروک از آرنولد استوارت بالاتر بود و مقدار حمل مایع در جداساز مونری و سروک افزایش یافت. همچنین، نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده بازده بالاتر جداساز آرنولد استوارت در قسمت پخش آب و نفت دارد.

هانسن [۳]، جریان دوفازی داخل جداساز افقی را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی کرد. در فرآیند شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، توزیع یک قطره گوسی در نظر گرفته شده بود و شبیه‌سازی با در نظر گرفتن انعقاد^۱ و بدون آن انجام شد. هانسن نتیجه گرفت که دینامیک سیالات محاسباتی بهتر از بقیه روش‌ها می‌تواند پیش‌بینی‌ها را انجام دهد. از جمله نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط هانسن، در نظر گرفتن جدایش قطرات علاوه بر انعقاد بود زیرا در جداسازهای چندفازی به دلیل حرکت قطرات مایع جدایش قطرات نیز رخ می‌دهد که حتماً باید در نظر گرفته شود. پورا احمدی لاله و همکاران [۴]، از روش دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان درون چهار جداساز در ابعاد آزمایشگاهی بهره گرفتند. مدل اغتشاش مورد استفاده در شبیه‌سازی، مدل شناخته شده کا-اِپسیلون بود. در این مطالعه از دو روش متفاوت برای شبیه‌سازی جریان درون جداساز دوفازی بهره گرفته شده است. در روش اول از مدل چندفازی فاز گسسته برای مسیریابی قطرات نفت درون فاز پیوسته گاز استفاده شد. در این روند حل، از یک دیواره بدون اصطکاک برای شبیه‌سازی سطح تماس نفت و گاز بهره گرفته شد. هنگامی که قطرات نفت به این دیواره می‌رسند، به دام افتاده و انرژی آنها به فاز پیوسته گاز انتقال پیدا می‌کند و هیچ پدیده حمل مجدد گاز به چشم نمی‌خورد. نتایج این روند حل برای تعیین دبی کاری مناسب جداساز با نتایج آزمایشگاهی تطابق مناسبی دارد. اما این روش در تعیین کارایی جداساز، دارای خطای بسیار بزرگی نسبت به نتایج آزمایشگاهی بود. با این وجود، نتایج ارائه شده توسط پورا احمدی لاله خطای بسیار زیادی را بین نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی نشان می‌دهند که علت این ضعف را می‌توان در شیوه مدل‌سازی جست و جو کرد به این صورت که

1. Coalescence

2. Arnold and Stewart

3. Monroe and Svrcek

4. Discrete Random Walk (DRW)

حالت ورودی در بالا و با کمترین سرعت ورودی و بیشترین فاصله صفحه منحرف کننده بررسی شده حاصل می شود. این شبیه سازی با روش اولرین-اولرین انجام شد که بر خلاف روش حجم سیال^۴ توانایی تشخیص مرز فازها و تخمین قطر قطرات فاز پراکنده را ندارد. در این پژوهش، اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی با داده های تجربی نیز انجام نشده است. از جمله نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط یایلا و همکاران استفاده از مدل چندفازی حجم سیال و اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی CFD با نتایج آزمایشگاهی می باشد. احمد و همکارانش [۸] پایلوت جداساز دوفازی با دو کیفیت پایین و بالای حجمی گاز را با استفاده از CFD شبیه سازی کردند تا در جداساز اول، اثر دبی مایع (نفت و آب) و ارتفاع مانع سرریز و در جداساز دوم، اثر دبی ورودی را بر عملکرد جداساز بررسی کنند. دو مدل جریان چندفازی اولرین و حجم سیال منظور شبیه سازی الگوی جریان و رفتار فازی سیال درون هر جداساز مورد استفاده قرار گرفتند. در این پژوهش، یک مقدار متوسط برای قطر قطرات فاز پراکنده در نظر گرفته شد که تأثیر توزیع اندازه قطرات در شبیه سازی را کاملاً مورد چشم پوشی قرار می دهد. بازده جداسازی در این شبیه سازی ها با هر کدام از دو مدل مختلف در مقایسه با داده های تجربی تا ۳۰٪ خطا دارد. از جمله نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط احمد و همکارانش استفاده از مدل شبیه سازی حجم سیال با مدل اغتشاش کا-پسیلون می باشد که باعث کاهش خطا بین نتایج شبیه سازی CFD با داده های تجربی به کمتر از ۸٪ می شود و همچنین در نظر گرفتن قطر قطرات فاز پراکنده در شبیه سازی CFD جداساز دوفازی آزمایشگاهی و نشان دادن پدیده حمل مجدد قطرات مایع با فاز گاز می باشد.

علاوه بر این، انرژی جنبشی ذرات در فاز گاز با استفاده از روش مدل فاز گسسته تحلیل شد و در انتها پیشنهاد شد که بهترین روش تعیین ابعاد جداساز مقایسه روش نیمه تجربی و دینامیک سیالات محاسباتی است. از نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط غفارخواه و همکاران، مقایسه نتایج شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی با نتایج تجربی می باشد که بهترین مدل شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه سازی جداساز چندفازی تعیین شد. آچاریا و کاسیمیرو [۶] از شبیه سازی های CFD به منظور تعیین دو پارامتر زمان ماند متوسط^۱ و توزیع زمان ماند^۲ به صورت توابعی از مقادیر مختلف کسر حجمی آب در دبی ورودی استفاده کرده و نتایج را با نتایج تجربی محققان پیشین که یک هندسه مشابه را به کار گرفته بودند، مقایسه کردند. آن ها زمان ماند متوسط نفت را براساس توزیع زمان ماند ارزیابی کرده و نشان دادند که زمان ماند متوسط با مقدار کسر حجمی آب در دبی ورودی رابطه مستقیم داشته و لذا عملکرد جداساز با افزایش مقدار کسر حجمی آب در دبی ورودی بهبود می یابد. به علاوه، مقادیر بالاتر زمان ماند متوسط برای هر مقدار کسر حجمی آب در دبی ورودی در سرریز با ارتفاع بیشتر^۳ به دست می آید. از نواقص این پژوهش می توان به دو بعدی بودن شبیه سازی و عدم بررسی توزیع اندازه ذرات اشاره کرد. از نقاط قوت این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط آچاریا و کاسیمیرو سه بعدی بودن شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی و تعیین قطر قطرات مایع در جریان گاز خروجی از جداساز می باشد. یایلا و همکارانش [۷] جریان سیال دوفازی درون دو هندسه متفاوت جداساز (ورودی سیال از کناره و از بالا) را با CFD شبیه سازی کرده و اثر مکان ورود سیال، فاصله بین ورودی و صفحه منحرف کننده و سرعت ورودی سیال را بر بازده جداسازی مورد بررسی قرار دادند. آن ها نشان دادند که بیشینه بازده جداسازی در

1. Mean Residence Time
2. Residence Time Distribution
3. Higher Weir
4. VOF

ایران و خاور میانه با قابلیت ارتقاء به سه‌فازی (نفت، گاز و آب)

• بررسی صحت و اعتبارسنجی روابط نیمه‌تجربی ارائه شده برای طراحی جداساز چندفازی با نتایج تجربی

• تعیین بهترین مدل شبیه‌سازی CFD برای شبیه‌سازی جداسازهای چندفازی در صنایع نفت و گاز

• تعیین ضریب لاغری^۳ بهینه برای جداسازهای چندفازی که از جمله معیارهای اصلی طراحی جداسازهای چندفازی می‌باشد

• بررسی پدیده فیزیکی حمل مجدد قطرات مایع توسط جریان گاز^۴ به دو صورت تجربی و شبیه‌سازی CFD

روش انجام آزمایش

در شکل ۱ ابعاد واقعی جداساز دوفازی مایع-گاز به همراه نمونه واقعی تست شده نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است ورودی جداساز به صورت زانویی ۹۰° می‌باشد و در قسمت انتهایی، جداساز دارای خروجی‌های گاز و مایع می‌باشد. برای کنترل سطح مایع از ارتفاع‌سنج استفاده گردید. همچنین از فشارسنج و دماسنج برای تنظیم فشار و دمای جداساز حین عملیات استفاده شد.

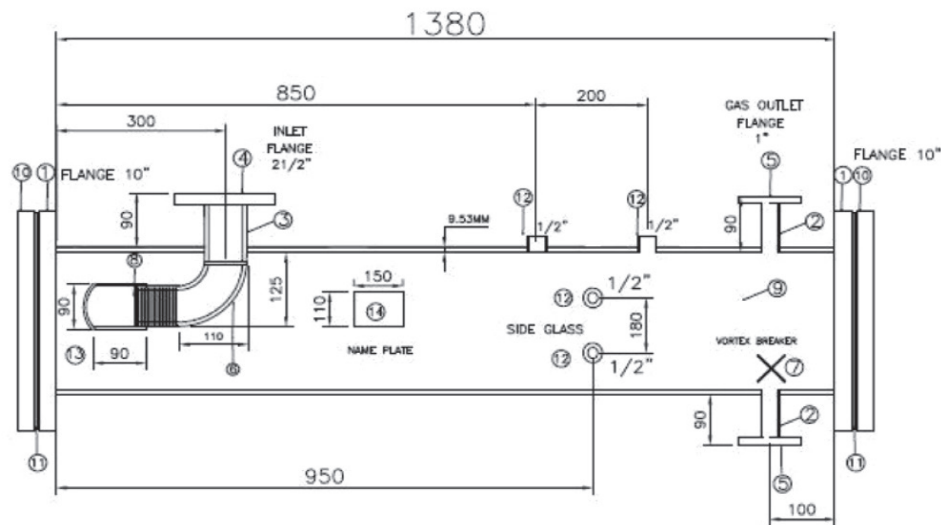
مدار جریان دوفازی (مایع-گاز)

جهت بررسی عملکرد جداساز دوفازی مایع-گاز مدار جریانی دوفازی (مایع-گاز) طراحی و ساخته شد. مدار جریانی دوفازی طراحی و ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است. جریان تک‌فاز آب به وسیله پمپ از مخزن آب به مدار جریانی پمپ می‌شود.

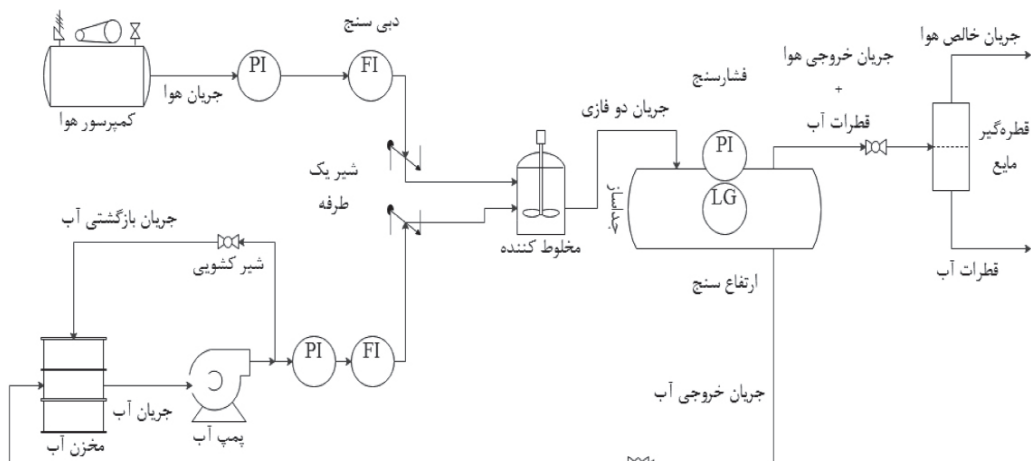
فرانک و همکارانش [۹] تلاش کردند تا با استفاده از شبیه‌سازی CFD جنبه‌های مهم برای بهینه‌سازی عملکرد جداساز دوفازی را شناسایی کنند. آن‌ها یک طراحی خاص را برای بررسی انتخاب کرده و بیشتر اصلاحات پیشنهادی را برای آن طراحی و به‌طور کیفی ارائه کردند. این پژوهش نیز فاقد اعتبارسنجی با داده‌های تجربی بود و نتایج شبیه‌سازی CFD با نتایج حاصله از نرم‌افزار اولگا^۱ مقایسه شدند. غفارخواه و همکارانش [۱۰] به منظور تعیین ابعاد بهینه جداسازهای سه‌فازی، یک جداساز نصب شده در یکی از میادین میعانات گازی ایران را با شبیه‌سازی CFD و براساس خواص سیال آن میدان شبیه‌سازی کردند. آن‌ها با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی نشان دادند که عملکرد جداساز با ضریب لاغری رابطه عکس دارد. از نقاط ضعف پژوهش انجام شده توسط غفارخواه و همکارانش نبود داده‌های تجربی به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی CFD با آن‌ها بود. به‌علاوه، اوشینو و ویلاجینز [۱۱] از یک مدل ترکیبی CFD-تعادل جمعیت^۲ به منظور پیش‌بینی رفتار جدایش گاز، نفت و آب و ضخامت لایه امولسیون بالای سطح آب در یک جداساز پایلوت افقی سه‌فازی دارای دما و فشار بالا استفاده کردند. آن‌ها از مدل جریان چندفازی اولرین استفاده کرده و برای تخمین توزیع اندازه قطرات مدل تعادل جمعیت را به کار گرفتند. نتایج این مدل ترکیبی با داده‌های تجربی حاصل از جداساز موجود مقایسه شدند. شبیه‌سازی این مدل با استفاده از CFD به صورت دوبعدی انجام شده و اندازه قطرات با داده‌های تجربی مقایسه نشدند. در حالی که در پژوهش حاضر اندازه قطر قطرات به صورت تجربی تعیین شده‌اند و شبیه‌سازی CFD جداساز چندفازی به صورت سه‌بعدی انجام شده است. از جمله نوآوری‌های پژوهش حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

• طراحی و ساخت مجموعه آزمایش جداساز آزمایشگاهی دوفازی مایع-گاز برای اولین بار در

1. Olga
2. Population Balance
3. Slenderness Ratio
4. Re-entrainment



شکل ۱ جداساز دوفازی مایع-گاز طراحی شده



شکل ۲ مدار دوفازی (مایع-گاز) طراحی و ساخته شده

جدا می‌شود. جداسازی اولیه توسط منحرف‌کننده ورودی انجام شده و جداسازی ثانویه توسط نیروی گرانش انجام می‌شود. جداساز دوفازی گاز-مایع در حالت‌های مختلف که ارتفاع آب چند درصد ارتفاع کل جداساز باشد (۱۰، ۵۰ و ۹۰٪ ارتفاع کل جداساز) در دبی‌های مختلف مایع و گاز بررسی شد. در خروجی گاز جداساز با استفاده از یک فیلتر که با توجه به کاتالوگ دستگاه، قطرات مایع با حداقل قطر برابر با 20μ را جذب می‌نماید قطرات حمل شده در جریان گاز خروجی به دام انداخته شدند.

پس از اندازه‌گیری دبی آن توسط روماتر آب و تعیین دما و فشار جریان تک‌فاز آب، با جریان گاز ورودی از کمپرسور هوا در نقطه اختلاط توسط میکراستاتیک^۱ تشکیل جریان دوفازی می‌دهد. جریان دوفازی تشکیل شده پس از طی مسافتی معادل با ۱۶۰ برابر قطر خط لوله، توسعه یافته می‌شود. جریان هوا نیز توسط کمپرسور هوا تأمین می‌شود و قبل از ورود به نقطه اختلاط، دبی، دما و فشار آن توسط روماتر هوا، گیج دما و فشار اندازه‌گیری می‌شود. جریان دوفازی گاز و مایع پس از ورود به جداساز دوفازی و برخورد به منحرف‌کننده ورودی به فازهای تشکیل‌دهنده

1. Static Mixer

محاسبه طول مؤثر جداساز دوفازی مایع-گاز

برای محاسبه ضریب درگ و سرعت حد از روابط زیر استفاده می‌شود. در روش زیر با استفاده از تکرار و حدس اولیه برای ضریب درگ، مقادیر همگرا شده برای ضریب درگ و سرعت حد به دست می‌آیند [۵].

مرحله اول: حدس اولیه برای ضریب درگ و قرار دادن در رابطه زیر

$$V_t = 0.0199 \left[\left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right) \frac{d_m}{C_D} \right]^{0.5} \quad (1)$$

محاسبه عدد رینولدز قطرات مایع حمل شده توسط جریان گاز با استفاده از رابطه ۲ به صورت زیر:

$$Re = 0.0049 \frac{\rho_g d_m v}{\mu} \quad (2)$$

سپس محاسبه دوباره ضریب درگ با استفاده از رابطه ۳ به صورت زیر:

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

و سپس محاسبه دوباره سرعت حد با استفاده از رابطه ۱ و این مراحل تا رسیدن به هم‌گرایی سرعت حد ادامه پیدا می‌کند و در نهایت، ضریب درگ به دست می‌آید. ضریب درگ به دست آمده در این مرحله برای محاسبه طول مؤثر و قطر جداساز در رابطه ۴ استفاده می‌شود [۵].

$$D \times L_{eff} = 420 \left(\frac{TZQ_g}{P} \right) \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{0.5} \quad (4)$$

رابطه ۴ رابطه قید ظرفیت گاز می‌باشد. رابطه قید ظرفیت مایع به صورت رابطه ۵ می‌باشد.

$$D^2 L_{eff} = \frac{t_r Q_L}{0.7} \quad (5)$$

با استفاده از رابطه ۴ طول مؤثر برای جداساز برحسب ظرفیت گاز تعیین شد. سپس در سطح مایع برابر با ۱۰٪، ۵۰٪ و ۹۰٪ کل ارتفاع جداساز کسر حجمی آب در جریان گاز خروجی و حداکثر قطر قطرات آب تعیین شد.

جهت بررسی عملکرد فیلتر، فیلتر بر روی خط جریان گاز نصب شد و با استفاده از سرنگ به داخل جریان گاز قطرات آب تزریق شد. پس از سه بار انجام آزمایش و اندازه‌گیری وزن فیلتر راندمان عملیاتی فیلتر برابر با ۹۰٪ تعیین شد و مشاهده شد که حداقل ۹۰٪ قطرات آب موجود در جریان گاز در فیلتر به دام می‌افتند. اندازه‌گیری قطر قطرات آب با استفاده از سیستم تصویربرداری به این صورت بود که از سه جهت از فیلتر عکس گرفته شد که اثرات شکست نور در اندازه‌گیری قطر قطرات مایع به حداقل برسد. سپس با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر^۱ قطر قطره‌هایی از مایع که در حین حرکت به هم نچسبیده‌اند با توجه به درجه‌بندی‌های روی خط‌کش مدرج تعیین شد و حداقل، حداکثر و متوسط قطر قطرات مایع در جریان هوا اندازه‌گیری گردید. همچنین، کسر حجمی قطرات آب موجود در جریان هوا به روش وزنی با استفاده از ترازو تعیین شد. عکس‌برداری با سیستم تصویربرداری با قابلیت بزرگ‌نمایی ۱۰ برابر و دوربین ۲۵ مگاپیکسل به صورت ۳۰ تصویر در ثانیه انجام شد و برای اندازه‌گیری وزن قطرات به دام افتاده از ترازو با دقت ۰/۰۱ g استفاده شد. در شکل ۲ شماتیک جریانی دوفازی گاز-مایع نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، جریان دوفازی گاز-مایع پس از وارد شدن به جداساز دوفازی به جریان مایع و گاز جدا می‌شود. جریان آب برگشتی به مخزن آب برگشته و جریان گاز خروجی جهت اندازه‌گیری کسر حجمی آب و قطر قطرات مایع موجود در آن به سمت سیستم تصویربرداری و گیراندازی قطرات مایع هدایت می‌شود. هر کدام از آزمایش‌ها سه بار در شرایط کاملاً مشابه از نظر دبی آب، دبی هوا، سطح مایع، دما و فشار عملیاتی تکرار شد و نتایج با هم مقایسه شدند. معادلات تئوری مربوط به محاسبه طول مؤثر جداسازی در ادامه آورده شده‌اند.

جداساز دوفازی آزمایشگاهی ابتدا هندسه جداساز با استفاده از نرم افزار گمبیت^۱ ساخته شد. برای ساخت هندسه جداساز دقیقاً از ابعاد جداساز آزمایشگاهی از جمله طول و قطر جداساز، محل قرارگیری ورودی و خروجی فازها و قطر مجراهای ورودی و خروجی فازها استفاده شد. سپس شبیه سازی جریان دوفازی با استفاده از نرم افزار فلونت^۲ و با توجه به شرایط آزمایش، خصوصیات سیال دوفازی، شرایط مرزی، انواع مدل های موجود و روش های حل انجام گردید. هندسه شبکه بندی به منظور کاهش دادن زمان اجرای شبیه سازی و تحلیل بهتر نتایج به صورت سه بعدی ایجاد شد. نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج تجربی به دست آمده مقایسه و اعتبارسنجی گردید. در شکل ۳ جداساز دوفازی آزمایشگاهی نشان داده شده است. برای حجم کنترل در نظر گرفته شده پوسته جداساز و منحرف کننده ورودیها شرط مرزی دیواره^۳ در نظر گرفته شدند. صفحه ورودی جریان دوفازی به عنوان ورودی جریان^۴ و صفحه خروجی گاز حجم کنترل با شرط مرزی فشار خروجی^۵ و صفحه خروجی مایع حجم کنترل با شرط مرزی سرعت خروجی^۶ نظر گرفته شدند. شتاب جاذبه برابر با ۹/۲۸ m/s و در جهت عمودی به سمت پایین در نظر گرفته شد. در فرآیند شبیه سازی جداساز دوفازی آزمایشگاهی روند حل معادلات بر طبق فشار^۷ بوده و شرایط ناپایدار^۸ در نظر گرفته می شود. در فرآیند شبیه سازی CFD جداساز دوفازی، شرط به اتمام رسیدن فرآیند شبیه سازی CFD، همگرا شدن مقدار متوسط وزنی-سطحی^۹ کسر حجمی آب در جریان گاز خروجی از جداساز دوفازی می باشد.

1. Gambit
2. Fluent
3. Wall
4. Mass Flow Inlet Boundary
5. Pressure Outlet Boundary
6. Velocity outlet Boundary
7. Pressure Based
8. Unsteady
9. Area-weighted Average

از رابطه ۶ برای تعیین کسر حجمی هوا در جریان دوفازی (آب و هوا) استفاده شد [۱۲].

$$\alpha = \left[1 + \frac{(1+x)}{x} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \right]^{-1} \quad (6)$$

پارامتر x در رابطه ۶ نشان دهنده کیفیت فاز گاز در جریان دوفازی گاز-مایع می باشد. با بسط رابطه ۴ مشخص گردید که هرچه ارتفاع مایع در جداساز دوفازی مایع-گاز پایین تر بیاید، رابطه ۴ به رابطه ۷ تبدیل می شود. به این معنا که با کاهش سطح مایع در جداساز دوفازی، قطرات مایع باید مسیر طولانی تری را برای رسیدن به سطح مایع طی کنند. پس به همین دلیل قطرات بیشتری با جریان گاز حمل شده و از خروجی گاز جداساز خارج می شوند و کسر حجمی مایع در خروجی گاز افزایش می یابد. اختلاف رابطه ۴ و ۷ فقط در ضریب رابطه می باشد. به طوری که رابطه ۴ برای جداساز دوفازی گاز-مایع در حالتی که سطح مایع در ۵۰٪ ارتفاع کل جداساز می باشد و روابط ۷ و ۸ به ترتیب برای جداساز دوفازی گاز-مایع با سطح مایع برابر با ۱۰٪ و ۹۰٪ ارتفاع کل جداساز دوفازی گاز-مایع می باشند.

$$D \times L_{eff} = 760 \left(\frac{TZQ_g}{P} \right) \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{0.5} \quad (7)$$

از سویی دیگر، با افزایش سطح مایع در جداساز دوفازی قطرات مایع مسیر کوتاه تری را برای رسیدن به سطح مایع طی می کنند. به همین دلیل قطرات کمتری با جریان گاز حمل شده و از خروجی گاز جداساز خارج می شوند و کسر حجمی مایع در خروجی گاز کاهش می یابد. بر این اساس، رابطه ۴ به رابطه ۸ تبدیل می گردد.

$$D \times L_{eff} = 84 \left(\frac{TZQ_g}{P} \right) \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right) \frac{C_D}{d_m} \right]^{0.5} \quad (8)$$

شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی جداساز دوفازی مایع-گاز

به منظور شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی

قرار می‌گیرند، پیوستگی سرعت و تنش در فازها وجود دارد. به این معنی که در فصل مشترک، سرعت و تنش دو فاز با هم برابر است ولی با توجه به وجود کشش سطحی، ترم فشار یک پرش دارد که به صورت ساده برای حساب به این صورت است [۱۴ و ۱۵].

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R} \quad (9)$$

در رابطه بالا $P\Delta$ اختلاف فشار بین داخل و خارج حباب می‌باشد. اگر قرار باشد به صورت پیوسته حباب در حال حرکت بررسی شود، گفته می‌شود فشار محیط با یک جهش روی سطح حباب به فشار داخل حباب تبدیل می‌شود. باید دقت شود که در همه جریان‌های چند فازی این بحث تعادلی صادق است. در روش حجم سیال علاوه بر معادله پیوستگی، یک سری از معادلات مومنتوم برای دامنه محاسباتی به صورت زیر حل می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_j v_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial(P)}{\partial x_i} + \frac{\partial\left(\mu\left(\frac{\partial(v_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\rho_j)}{\partial x_i}\right)\right)}{\partial x_i} + \rho g_i + F_i \quad (10)$$

در رابطه ۱۰ ترم آخر مربوط به نیروهای کشش سطحی به صورت یک نیروی خارجی وارد بر حجم شبیه سازی می‌گردد.

$$F_i = \frac{\sigma K \delta}{v} \quad (11)$$

که خواص مخلوط در معادله مومنتوم استفاده می‌شود. پارامتر k که انحنای محلی فصل مشترک می‌باشد به صورت مقدار واگرایی بردار واحد عمود بر سطح می‌باشد [۱۵ و ۱۶].

ردیابی فصل مشترک با دیدگاه حجم سیال

در دیدگاه حجم سیال که یکی از پرکاربردترین روش‌های ردیابی فصل مشترک بین فازی است، الگوریتم‌های خاص ریاضی برای تعیین فصل مشترک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

فشار عملیاتی حداکثر برابر با ۲۰۲۴۵۰ پاسکال و دمای عملیاتی برابر با دمای محیط در نظر گرفته شد. الگوریتم PISO به عنوان روش حل^۱ انتخاب و جهت هم‌گرایی بهتر با استفاده از سعی و خطا بهترین ضرایب تخفیف^۲ برای فشار، چگالی، نیروهای حجمی، مومنتوم، کسر حجمی و ترم‌های انرژی جنبشی به ترتیب برابر با ۰/۱۲، ۰/۹، ۰/۹، ۰/۰۰۵، ۰/۰۵۲ و ۰/۷ به دست آمدند. در ابتدای حل، جداساز به صورت نیمه‌پر در نظر گرفته شد و برای ثابت ماندن سطح مایع جداساز سرعت خروجی برای فاز مایع در خروجی مایع برابر با سرعت ورودی مایع در ورودی جداساز قرار داده شد (دبی ورودی و خروجی مایع برابر در نظر گرفته شدند). برای شبیه‌سازی جریان دوفازی از مدل حجم سیال^۳ و برای شبیه‌سازی اغتشاش از مدل آشفتگی کا-اِپسیلون استاندارد استفاده شد. به منظور بررسی اثرات آشفتگی و خصوصیات جریان دوفازی در نزدیک دیواره استاندارد دیواره^۴ استفاده شد.

روش حجم سیال برای مدل سازی جریان چندفازی

برای مطالعه برهم‌کنش‌های بین فازی، مثل تأثیر هر کدام از فازها روی هیدرودینامیک، انرژی و ترکیب درصد اجزاء در فاز دیگر نیاز به مطالعه سطح مشترک بین فازها ضروری می‌باشد. روش حجم سیال برای سیستم‌های چندفازی شامل دو یا تعداد بیشتری سیال غیرقابل امتزاج است که در آن بررسی موقعیت فصل مشترک سیالات مورد نظر می‌باشد [۱۱]. روش حل در دیدگاه حجم سیال به این صورت است که معادلات پیوستگی و مومنتوم برای کل دامنه محاسباتی که شامل فازهای مختلف است، حل می‌شوند. در حل این معادلات خواص سیال شامل چگالی و ویسکوزیته با توجه به ترکیب درصد فازهای مختلف با قوانین اختلاط محاسبه و جایگزین می‌شوند. آنچه در این دیدگاه به معادله مومنتوم اضافه می‌شود، ترم مربوط به کشش سطحی می‌باشد. می‌دانیم وقتی دوفاز در کنار هم

1. Solution Methods
2. Under Relaxation Factors
3. Volume Of Fluid (VOF)
4. Standard Wall Function Model

$$n_y(i, j) = \frac{1}{\Delta y} (\alpha_{i+1, j+1} + 2\alpha_{i, j+1} + \alpha_{i-1, j+1} - \alpha_{i+1, j-1} - 2\alpha_{i, j-1} - \alpha_{i-1, j-1}) \quad (13)$$

در محاسبه مؤلفه‌های بردار نرمال مقدار کسر حجمی تمام همسایه‌های سلول محاسباتی وارد می‌شود. میزان تأثیر سلول‌هایی که در بالا، پایین، چپ و راست سلول محاسباتی نسبت به سلول‌هایی که در گوشه‌ها قرار گرفته‌اند، با ضریب دو لحاظ شده‌اند. اگر $n_x > n_y$ باشد، فصل مشترک موازی محور y ها و در غیر اینصورت، موازی محور x ها در نظر گرفته می‌شود [۱۳]. در روش‌بازسازی هندسی با توجه به مؤلفه‌های بردار نرمال محاسبه شده از گرادیان کسر حجمی سلول‌های همسایه زاویه β به دست می‌آید که برابر است با: اگر باشد، فصل مشترک موازی محور y ها و در غیر این صورت، موازی محور x ها در نظر گرفته می‌شود [۱۳]. در روش‌بازسازی هندسی با توجه به مؤلفه‌های بردار نرمال محاسبه شده از گرادیان کسر حجمی سلول‌های همسایه زاویه β به دست می‌آید که برابر است با:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{-n_x}{n_y} \right) \quad (14)$$

در شکل ۳ مقایسه‌ای بین فصل مشترک تعیین شده به روش‌های دسته‌بندی سطح و بازسازی هندسی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است روش بازسازی هندسی دقت بالاتری در تعیین سطح مشترک بین فازهای گاز و مایع دارد.

بررسی اثر دانسیته شبکه‌بندی

با توجه به موارد ذکر شده در فرآیند شبیه‌سازی جداساز دوفازی آزمایشگاهی ابتدا باید از صحت شبکه‌بندی و دانسیته آن اطمینان حاصل کرد. به عبارت دیگر اثر اندازه حجم‌های کنترلی بر نتایج شبیه‌سازی مبتنی بر پیش‌بینی مشخصات هیدرودینامیکی سیال باید بررسی گردد، که البته واضح است این متغیر باید اثر قابل توجهی در پیش‌بینی نتایج حاصل از شبیه‌سازی داشته باشد.

1. Level Set

2. Piecewise Liner Interface Calculation (PLIC)

که روش‌های مختلفی برای تعیین فصل مشترک در دیدگاه حجم سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌توان به دسته‌بندی سطح^۱ و روش ارتفاع مایع اشاره کرد. معادلات حاکم در دیدگاه حجم سیال عبارتند از معادلات پیوستگی و مومنتوم برای مخلوط و معادلات کسر حجمی سلول‌ها که پس از حل آنها نمودار فشار و از همه مهم‌تر مقدار کسر حجمی هر کدام از فازها در سلول‌های محاسباتی به دست می‌آید [۱۳].

نحوه مشخص کردن فصل مشترک با دیدگاه حجم سیال

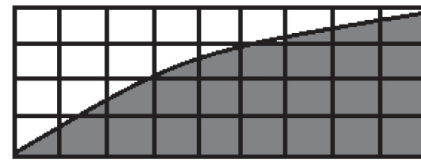
صرفاً پس از محاسبه کسر حجمی هر کدام از فازها در حجم‌های کنترل موجود در دامنه محاسباتی نمی‌توان فصل مشترک صحیح بین دو فاز را تعیین کرد. پس از حل معادلات کسر حجمی فازها در سلول‌هایی که مقدار کسر حجمی فاز صفر یا یک است فصل مشترک وجود ندارد و الگوریتم محاسباتی، این سلول‌ها را از محاسبات خود خارج می‌کند. ولی در سلول‌هایی که مقدار کسر حجمی فاز عددی بین صفر و یک است معمولاً با استفاده از روش‌های متفاوتی فصل مشترک صحیح بین فازها تعیین می‌شود. در روش بازسازی هندسی^۲، فصل مشترک فاز در هر حجم کنترل با پاره خط‌هایی تقریب زده می‌شود که شیب آنها با استفاده از بردار نرمال فصل مشترک محاسبه می‌شود. این بردار نرمال از گرادیان کسر حجمی به دست می‌آید. این روش ساده‌ترین روش ردیابی فصل مشترک می‌باشد که زمان محاسباتی زیادی لازم ندارد ولی دقت پیش‌بینی فصل مشترک به وسیله آن کم است که بردار نرمال با استفاده از گرادیان کسر حجمی فازها به دست می‌آید [۱۳]. نحوه محاسبه مؤلفه x بردار نرمال سلول محاسباتی با مختصات (i, j) و همین‌طور مؤلفه y بردار نرمال برای شبیه‌سازی دو بعدی جریان دوفازی به صورت زیر است:

$$n_x(i, j) = \frac{1}{\Delta x} (\alpha_{i+1, j+1} + 2\alpha_{i+1, j-1} - \alpha_{i-1, j+1} - 2\alpha_{i-1, j-1} - \alpha_{i-1, j-1}) \quad (12)$$

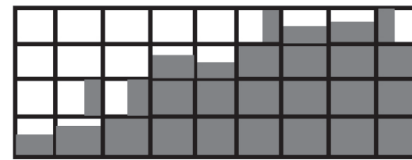
شکل ۳ جداساز دوفازی آزمایشگاهی نشان داده شده است. به همین منظور در شکل ۴ اثرات تغییرات تعداد سلول‌های حجم کنترل بر مقدار متوسط وزنی-سطحی کسر حجمی فاز مایع در خروجی گاز نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ تعداد بهینه سلول‌های شبیه‌سازی جهت شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی برابر با ۴۵۴۱۵۸ با حداکثر نسبت ابعادی^۱ برابر با ۳۰/۴۱ تعیین شد. در شکل ۵، هندسه شبکه‌بندی جداساز دوفازی آزمایشگاهی نشان داده شده است.

تفسیر نتایج تجربی

با استفاده از رابطه ۴ طول موثر جداساز مایع-گاز برای حالت‌هایی که سطح مایع برابر با ۱۰٪، ۵۰٪ و ۹۰٪ ارتفاع کل جداساز باشد محاسبه شد که در جدول ۱ این نتایج نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است هرچه قدر سطح مایع در جداساز دوفازی مایع-گاز پایین‌تر باشد طول موثر جداسازی برای قطره‌های با قطر ۱۰۰ μ بیشتر می‌گردد به این صورت که مسافت طی شده برای قطره‌ای که در بالاترین ارتفاع جداساز قرار دارد تا به سطح مایع برسد افزایش یافته و مسلماً به طول بیشتری جهت جداسازی نیاز دارد.



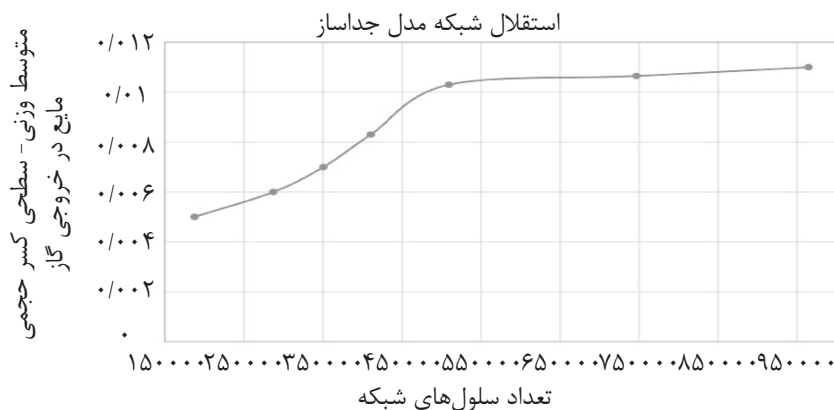
تعیین فصل مشترک با روش دسته بندی سطوح



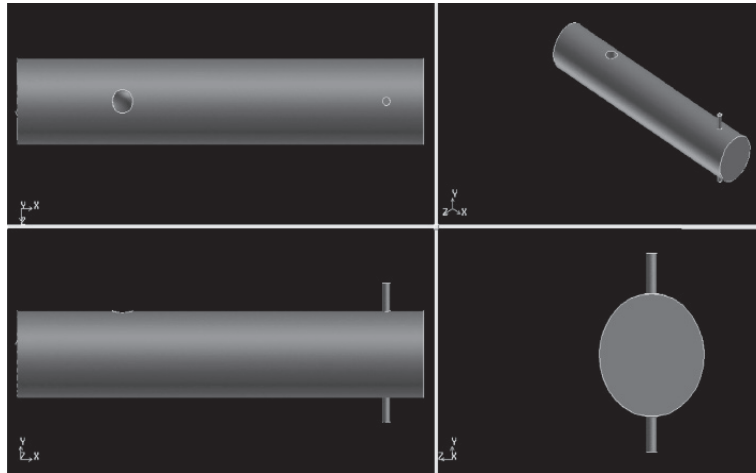
تعیین فصل مشترک با روش بازسازی هندسی

شکل ۳ مقایسه فصل مشترک تعیین شده بین فازهای گاز و مایع در جریان دوفازی گاز-مایع

در فرآیند شبیه‌سازی هرچه تعداد حجم‌های کنترلی افزایش یابد، زمان و منابع سخت‌افزاری مورد نیاز نیز افزایش می‌یابد. لذا، همیشه سعی بر این است که با کمترین تعداد مش، بهترین و دقیق‌ترین جواب‌ها حاصل شوند که این مهم به دقت مطلوب مسأله نیز بستگی دارد. از این رو، تعیین دانسیته مش بهینه در هر عملیات شبیه‌سازی ضروری به نظر می‌رسد. برای بررسی تعیین دانسیته بهینه مش از یک پارامتر به‌عنوان معیار استفاده می‌شود. پارامتر معیار برای بررسی دانسیته بهینه در این پژوهش، متوسط وزنی-سطحی کسر حجمی فاز مایع در خروجی گاز می‌باشد. در



شکل ۴ بررسی اثر تعداد سلول شبیه‌سازی بر روی مقدار متوسط وزنی-سطحی کسر حجمی مایع در خروجی گاز جداساز آزمایشگاهی



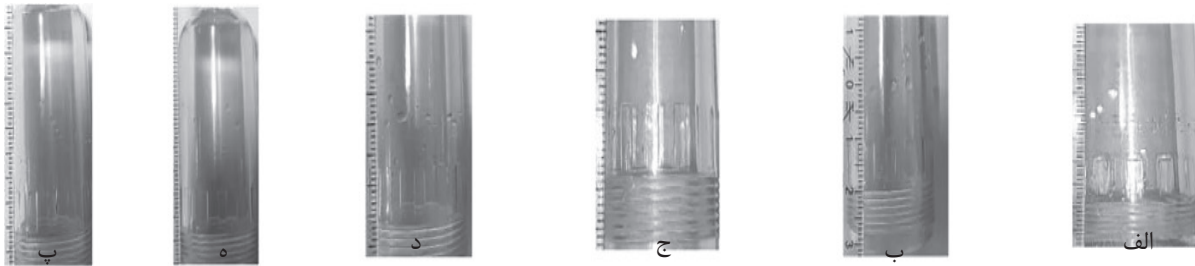
شکل ۵ مش بندی جداساز افقی دوفازی آزمایشگاهی

جدول ۱ نتایج تجربی برای جداساز شکل ۱

FILL(%)	P	T	d_m	Qg	S	x	ρg	ρL	Z	CD	L_{eff}	L_{act}	LONG $d_{m,max}$	$d_{m,max}$ HALF
		۲۶												
۱۰	۲۴۸۲۱۱	۲۶	۱۰۰	۰/۰۲۰	۱/۵۳	۰/۰۲۸	۲/۹۶	۹۹۸	۰/۹۹	۷/۷۲	۰/۹۶	۰/۸	۴۲۸	۶۳۸
۵۰	۱۹۹۹۴۸	۲۶	۱۰۰	۰/۰۱۶	۱/۴۳	۰/۰۲۲	۲/۳۵	۹۹۸	۰/۹۹	۷/۷۲	۰/۵۳	۰/۸	۱۲۹	۲۲۲
۵۰	۲۴۸۲۱۱	۲۶	۱۰۰	۰/۰۲۰	۱/۵۳	۰/۰۲۸	۲/۹۶	۹۹۸	۰/۹۹	۷/۷۲	۰/۹۴	۰/۸	۱۳۸	۴۳۹
۵۰	۱۹۹۴۸	۲۶	۱۰۰	۰/۰۳۰	۱/۷۷	۰/۰۴۱	۲/۳۵	۹۹۸	۰/۹۹	۷/۷۲	۰/۹۸	۰/۸	۴۵۰	۷۸۰
۹۰	۱۹۹۹۴۸	۲۶	۱۰۰	۰/۰۱۶	۱/۴۳	۰/۰۲۲	۲/۳۵	۹۹۸	۰/۹۹	۷/۷۲	۰/۱	۰/۸	<۶۲	۶۲

به همین ترتیب وقتی خروجی گاز در فاصله ۴۰ cm از ورودی نصب شود قطرات با قطر بزرگتر از 315μ (برابر با 470μ) در خروجی گاز مشاهده می‌شوند که در شکل ۶ قسمت ب نشان داده شده است. در حالتی که سطح مایع ۵۰٪ ارتفاع کل جداساز مایع-گاز و فشار عملیاتی برابر با 202450 پاسکال و دبی آب و مایع به ترتیب برابر با ۱ و $20 \text{ m}^3/\text{h}$ باشند طول موثر جداسازی برای قطرات با قطر 100μ برابر با ۵۳ cm تعیین شد که در خروجی گاز با فاصله ۸۰ cm از ورودی جریان دوفازی قطرات با قطر 129μ مشاهده شدند که وجود قطرات با قطر بزرگتر از 100μ به دلیل پدیده حمل مجدد قطرات مایع توسط جریان گاز^۱ می‌باشد که در شکل ۶ قسمت ج نشان داده شد.

با توجه به جدول ۱ کاهش سطح مایع در جداساز و افزایش دبی گاز باعث افزایش طول موثر جهت جداسازی قطره‌های مایع با قطر 100μ می‌شوند. مبنای محاسبات تئوری در جدول ۱ برای قطره‌های مایع با قطر 100μ می‌باشد. همان‌طور که در جدول ۱ دیده می‌شود برای حالتی که سطح مایع ۱۰٪ ارتفاع کل جداساز باشد در فشار برابر با 202450 پاسکال و دبی آب و گاز به ترتیب برابر با ۱ و $20 \text{ m}^3/\text{h}$ باشند، طول موثر محاسبه شده برای جداسازی قطرات آب با قطر 100μ برابر با ۹۴ cm به دست می‌آید و با توجه به اینکه خروجی گاز در فاصله ۸۰ cm از ورودی جریان دوفازی قرار گرفته است به همین دلیل قطرات آب با قطر بیشتر از 100μ (برابر با 315μ) در خروجی گاز مشاهده می‌شوند که در شکل ۶ قسمت الف نشان داده شده است و



شکل ۶ تصویر قطرات آب در جریان هوا در خروجی گاز جداساز دوفازی

و در شرایطی که فاصله نمونه‌گیر تا ورودی جداساز کمتر از ۹۸ cm (۴۰ cm) باشد قطرات آب با قطر μ ۷۸۰ در خروجی گاز مشاهده شدند که در شکل ۶ قسمت پ نشان داده شده است و در حالت اول کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز برابر با ۱/۸٪ و در حالت دوم برابر با ۲/۵٪ بود. برای حالتی که سطح مایع جداساز برابر با ۱۰٪ کل ارتفاع جداساز باشد و فشار عملیاتی برابر با ۲۰۲۴۵۰ پاسکال و دبی آب و مایع به ترتیب برابر با ۱ و $40 \text{ m}^3/\text{h}$ باشد مقدار کسر حجمی مایع در خروجی گاز جداساز برابر با ۲/۱٪ به دست آمد و در حالتی که خروجی گاز جداساز در فاصله ۴۰ cm از ورودی نصب شود مقدار کسر حجمی مایع در خروجی گاز جداساز دوفازی برابر با ۲/۸٪ به دست آمد و برای حالتی که سطح مایع جداساز برابر با ۹۰٪ کل ارتفاع جداساز باشد و فشار عملیاتی برابر با ۲۰۲۴۵۰ پاسکال و دبی آب و مایع به ترتیب برابر با ۱ و $40 \text{ m}^3/\text{h}$ باشد مقدار کسر حجمی مایع در خروجی گاز جداساز برابر با ۰/۵٪ به دست آمد و در حالتی که خروجی گاز جداساز در فاصله ۴۰ cm از ورودی نصب شود مقدار کسر حجمی مایع در خروجی گاز جداساز دوفازی برابر با ۰/۶۹٪ به دست آمد.

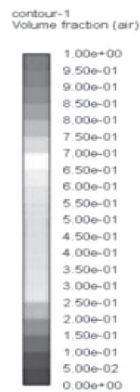
تفسیر نتایج دینامیک سیالات محاسباتی

شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی جداساز دوفازی مایع-گاز با توجه به مراحل گفته شده انجام شد و نتایج شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی جداساز دوفازی مایع-گاز در ادامه بیان شده است

و در حالتی که خروجی گاز در فاصله ۴۰ cm از ورودی جریان دوفازی نصب شود قطرات با قطر μ ۲۲۲ در خروجی گاز مشاهده شدند که در شکل ۶ قسمت د نشان داده شد. در حالتی که سطح مایع ۹۰٪ ارتفاع کل جداساز دوفازی مایع-گاز و فشار عملیاتی برابر با 202450 Pa و دبی آب و مایع به ترتیب برابر با ۱ و $20 \text{ m}^3/\text{h}$ باشد طول موثر برای جداسازی قطرات با قطر μ ۱۰۰ برابر با ۱۰ cm تعیین شد که در خروجی گاز با فاصله ۸۰ cm از ورودی جریان دوفازی قطرات با قطر کمتر از μ ۶۲ مشاهده شدند و در خروجی گاز با فاصله ۴۰ cm از ورودی جریان دوفازی قطرات آب با قطر حداکثری برابر با μ ۶۲ مشاهده شدند. با افزایش سطح آب از ۵۰٪ کل ارتفاع جداساز دوفازی مایع-گاز به ۹۰٪، قطر حداکثری قطرات آب به طور متوسط ۷۲٪ کاهش می‌یابد و با کاهش سطح مایع از ۵۰٪ کل ارتفاع جداساز دوفازی مایع-گاز به ۱۰٪، قطر حداکثری قطرات آب به طور متوسط ۲۱۱٪ افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که با افزایش دبی گاز در جریان ورودی به جداساز دوفازی مایع-گاز کسر حجمی آب در جریان گاز خروجی افزایش می‌یابد. به طوری که با افزایش دبی فاز گاز از $20 \text{ m}^3/\text{h}$ تا $40 \text{ m}^3/\text{h}$ در حالتی که جداساز تا نصفه از آب پر باشد و فشار عملیاتی نیز برابر با ۲۰۲۴۵۰ پاسکال و دبی آب برابر با $1 \text{ m}^3/\text{h}$ باشد کسر حجمی آب در گاز خروجی برابر با ۱/۸٪ می‌باشد. در این حالت طول موثر برابر با ۹۸ cm است به طوری که وقتی فاصله نمونه‌گیر تا ورودی جداساز کمتر از ۹۸ cm (۸۰ cm) باشد قطرات آب با قطر μ ۴۵۰ در خروجی گاز مشاهده شدند که در شکل ۶ قسمت ه نشان داده شده است

با $1 \text{ m}^3/\text{h}$ و دبی هوا برابر با $40 \text{ m}^3/\text{h}$ و فشار عملیاتی عملیاتی برابر با 20.2450 پاسکال می باشد، تصاویر کسر حجمی هوا و چگالی ترکیب در جداساز دوفازی نشان داده شده است.

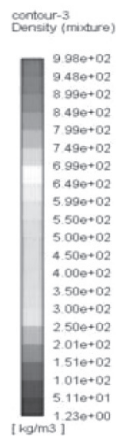
تفسیر نتایج دینامیک سیالات محاسباتی جداساز دوفازی مایع-گاز با سطح مایع برابر با 50% کل ارتفاع جداساز در شکل های ۷ قسمت الف و ب که دبی آب برابر



الف



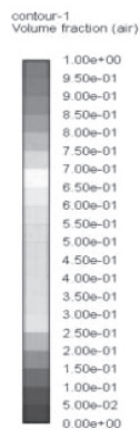
شکل ۷ الف کانتور کسر حجمی هوا در جداساز در حالت نیمه پر و فاصله 90 cm بین خروجی و ورودی



ب



شکل ۷ ب کانتور چگالی مخلوط در جداساز در حالت نیمه پر و فاصله 90 cm بین خروجی و ورودی



ج



شکل ۷ تصویر کسر حجمی هوا (الف)، چگالی ترکیب (ب)، کسر حجمی هوا با خروجی گاز در 40 cm ورودی (ج) در جداساز افقی دوفازی گاز-مایع با دبی آب و گاز به ترتیب برابر با 1 و $40 \text{ m}^3/\text{h}$

کسر حجمی هوا و چگالی ترکیب در جداساز دوفازی نشان داده شده است. در این حالت کسر حجمی آب در جریان گاز خروجی به صورت تجربی برابر با ۰/۵٪ تعیین شد و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی نشان می‌دهد که در خروجی گاز جداساز ۰/۴۶٪ آب وجود دارد که در شکل ۸-ه نشان داده شده است. برای حالتی که نمونه‌گیر در فاصله ۴۰ cm از ورودی نصب شود کسر حجمی آب در خروجی گاز به صورت تجربی برابر با ۰/۲۵٪ تعیین شد و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز را برابر با ۰/۲۴٪ نشان دادند که در شکل ۷ قسمت ج نشان داده شده است.

تفسیر نتایج دینامیک سیالات محاسباتی جداساز دوفازی مایع-گاز با سطح مایع برابر با ۱۰٪ کل ارتفاع جداساز

در شکل‌های ۸-الف و ۸-ب که دبی آب برابر با $1 \text{ m}^3/\text{h}$ و دبی هوا برابر با $40 \text{ m}^3/\text{h}$ و فشار عملیاتی برابر با ۲۰۲۴۵۰ پاسکال است، تصویر کسر حجمی هوا و چگالی ترکیب در جداساز دوفازی نشان داده شده است. در این حالت کسر حجمی آب در جریان گاز خروجی به صورت تجربی برابر با ۰/۲۱٪ تعیین شد و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی نشان می‌دهد که در خروجی گاز جداساز ۰/۱۹٪ آب وجود دارد که در شکل ۸-الف نشان داده شده است. برای حالتی که نمونه‌گیر در فاصله ۴۰ cm از ورودی نصب شود کسر حجمی آب در خروجی گاز به صورت تجربی برابر با ۰/۲۸٪ تعیین شد و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز را برابر با ۰/۲۶٪ نشان دادند که در شکل ۸-ج که نشان‌دهنده چگالی ترکیب در جداساز دوفازی آزمایشگاهی است نشان داده شده است.

تفسیر نتایج دینامیک سیالات محاسباتی جداساز دوفازی مایع-گاز با سطح مایع برابر با ۹۰٪ کل ارتفاع جداساز

در شکل‌های ۸-د و ۸-ه که مربوط به دبی آب و هوا به ترتیب برابر با $1 \text{ m}^3/\text{h}$ و $40 \text{ m}^3/\text{h}$ و فشار عملیاتی برابر با ۲۰۲۴۵۰ پاسکال می‌باشد، تصویر

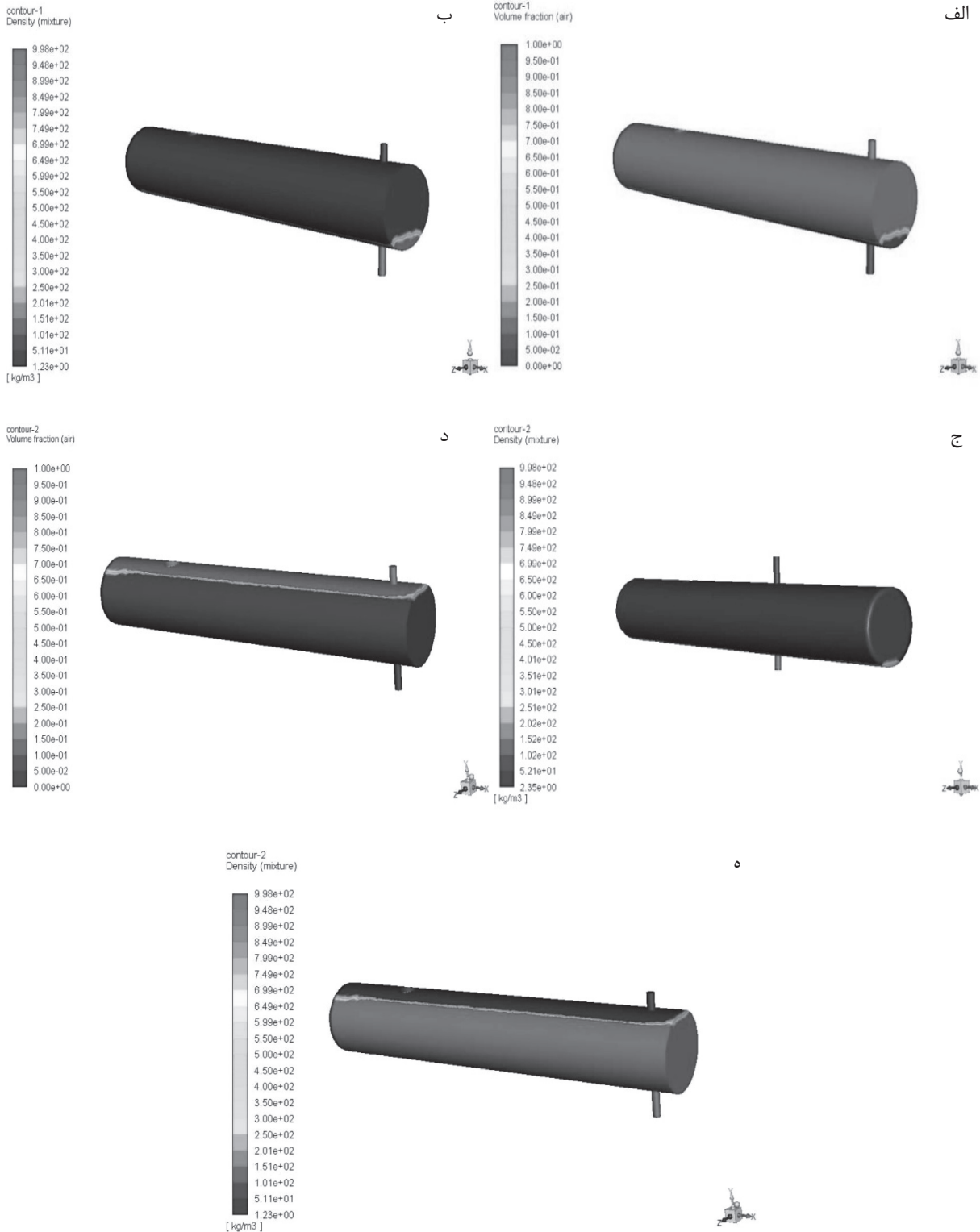
کسر حجمی هوا و چگالی ترکیب در جداساز دوفازی نشان داده شده است. در این حالت کسر حجمی آب در جریان گاز خروجی به صورت تجربی برابر با ۰/۵٪ تعیین شد و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی نشان می‌دهد که در خروجی گاز جداساز ۰/۴۶٪ آب وجود دارد که در شکل ۸-ه نشان داده شده است. برای حالتی که نمونه‌گیر در فاصله ۴۰ cm از ورودی نصب شود کسر حجمی آب در خروجی گاز به صورت تجربی برابر با ۰/۲۵٪ تعیین شد و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز را برابر با ۰/۲۴٪ نشان دادند که در شکل ۷ قسمت ج نشان داده شده است.

تفسیر نتایج دینامیک سیالات محاسباتی جداساز دوفازی مایع-گاز با سطح مایع برابر با ۱۰٪ کل ارتفاع جداساز

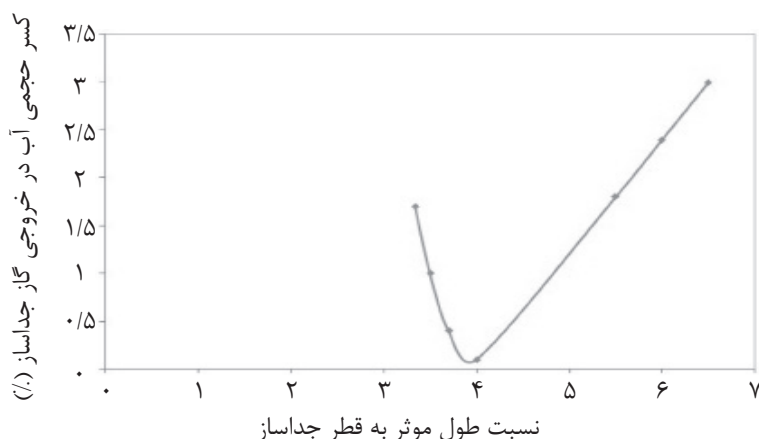
در شکل‌های ۸-الف و ۸-ب که دبی آب برابر با $1 \text{ m}^3/\text{h}$ و دبی هوا برابر با $40 \text{ m}^3/\text{h}$ و فشار عملیاتی برابر با ۲۰۲۴۵۰ پاسکال است، تصویر کسر حجمی هوا و چگالی ترکیب در جداساز دوفازی نشان داده شده است. در این حالت کسر حجمی آب در جریان گاز خروجی به صورت تجربی برابر با ۰/۲۱٪ تعیین شد و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی نشان می‌دهد که در خروجی گاز جداساز ۰/۱۹٪ آب وجود دارد که در شکل ۸-الف نشان داده شده است. برای حالتی که نمونه‌گیر در فاصله ۴۰ cm از ورودی نصب شود کسر حجمی آب در خروجی گاز به صورت تجربی برابر با ۰/۲۸٪ تعیین شد و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز را برابر با ۰/۲۶٪ نشان دادند که در شکل ۸-ج که نشان‌دهنده چگالی ترکیب در جداساز دوفازی آزمایشگاهی است نشان داده شده است.

تفسیر نتایج دینامیک سیالات محاسباتی جداساز دوفازی مایع-گاز با سطح مایع برابر با ۹۰٪ کل ارتفاع جداساز

در شکل‌های ۸-د و ۸-ه که مربوط به دبی آب و هوا به ترتیب برابر با $1 \text{ m}^3/\text{h}$ و $40 \text{ m}^3/\text{h}$ و فشار عملیاتی برابر با ۲۰۲۴۵۰ پاسکال می‌باشد، تصویر



شکل ۸ الف) کانتور کسر حجمی هوا در جداساز افقی دو فازی گاز-مایع با دبی آب و گاز به ترتیب برابر با ۱ و ۴۰ m³/h (ب) تصویر چگالی ترکیب در جداساز افقی دو فازی گاز-مایع با دبی آب و گاز به ترتیب برابر با ۱ و ۴۰ m³/h (ج) تصویر چگالی ترکیب در جداساز افقی دو فازی گاز-مایع با دبی آب و گاز به ترتیب برابر با ۱ و ۴۰ m³/h (د) تصویر کسر حجمی فاز هوا در جداساز افقی دو فازی گاز-مایع با دبی آب و گاز به ترتیب برابر با ۱ و ۴۰ m³/h (ه) تصویر چگالی ترکیب در جداساز افقی دو فازی گاز-مایع با دبی آب و گاز به ترتیب برابر با ۱ و ۴۰ m³/h



شکل ۹ نمودار عملکرد جداساز افقی دو فازی در حالت ۵۰٪ پر به ازای دبی آب و گاز به ترتیب برابر با ۱ و $40 \text{ m}^3/\text{h}$

نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد جداساز دوفازی (مایع-گاز) آزمایشگاهی به صورت تجربی بررسی شد. به همین منظور، جداساز دوفازی با استفاده از روابط تجربی موجود برای طراحی جداسازهای دوفازی مایع-گاز طراحی گردید. برای بررسی عملکرد جداساز دوفازی گاز-مایع و میزان جدایش قطرات مایع از جریان دوفازی مایع-گاز، در خروجی گاز جداساز، جریان گاز خروجی از نظر کسر حجمی آب و حداکثر قطر قطره‌های آب بررسی شد. سپس، نتایج شبیه‌سازی CFD جداساز دوفازی مایع-گاز با نتایج تجربی به دست آمده اعتبارسنجی شدند و بهترین مدل چندفازی، مدل اغتشاش و ضرایب تخفیف برای فرآیند شبیه‌سازی CFD جداساز دوفازی آزمایشگاهی معرفی شدند. همان‌طور که نشان داده شد هرچه قدر سطح مایع در جداساز دوفازی مایع-گاز پایین‌تر باشد طول موثر جداسازی برای قطره مایع با قطر مشخص بیشتر می‌گردد به این صورت که مسافت طی شده برای قطره‌ای که در بالاترین ارتفاع جداساز قرار دارد تا به سطح مایع برسد افزایش یافته و به طول بیشتری جهت جداسازی نیاز خواهد داشت. علاوه بر این با توجه به نتایج تجربی به دست آمده، کاهش سطح مایع در جداساز و افزایش دبی گاز باعث افزایش طول موثر جهت جداسازی قطره‌های مایع با قطر مشخص می‌شوند. با مقایسه نتایج به دست آمده

از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با نتایج تجربی مشاهده گردید که مقدار خطای متوسط بین کسرهای حجمی اندازه‌گیری شده به صورت تجربی و دینامیک سیالات محاسباتی کمتر از ۸٪ بوده که نشان‌دهنده بهترین مدل جهت شبیه‌سازی CFD جداساز چندفازی می‌باشد. همچنین با انجام بررسی‌های حساسیت‌سنجی برای طول جداساز دیده شد که با افزایش ضریب لاغری جداساز از ۳ تا ۳/۸ میزان کسر حجمی فاز مایع در خروجی گاز جداساز کاهش یافت و به ازای ضریب لاغری جداساز بیشتر از ۳/۸ کسر حجمی فاز مایع در خروجی گاز جداساز آزمایشگاهی به دلیل پدیده حمل مجدد قطرات مایع توسط فاز گاز افزایش می‌یابد. از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش، می‌توان به طراحی و ساخت مجموعه تست جداسازهای چندفازی آزمایشگاهی و تعیین مدل مناسب جهت شبیه‌سازی CFD جداساز چندفازی آزمایشگاهی و تعیین ضریب لاغری بهینه اشاره کرد. ثوابتی مانند ضریب لاغری بهینه در طراحی جداسازهای سرچاهی به دلیل مسایل اقتصادی بسیار اهمیت دارد. این پژوهش به نوبه خود می‌تواند باعث فراهم نمودن بستر لازم جهت طراحی جداسازهای دوفازی گاز-مایع سرچاهی با استفاده از انجام آنالیز ابعادی پس از مطالعات تجربی و شبیه‌سازی CFD با توجه به شرایط تولید می‌شود.

علائم و نشانه‌ها	
D : قطر جداساز (m)	x : کیفیت فاز گاز ----
ρ_g : چگالی گاز (kg/m^3)	σ : کشش سطحی دوفاز (dyne/cm)
L_{eff} : طول مؤثر جداساز (m)	k : انحنای محلی فصل مشترک ^۱ ----
ρ_l : چگالی مایع (kg/m^3)	δ : تابع دلتای دیراک ----
T : دمای جداساز ($^{\circ}\text{C}$)	n : بردار نرمال سطح ----
C_D : ضریب درگ ----	R : شعاع حباب گاز m
Z : ضریب تراکم‌پذیری گاز ----	α : کسرحجمی فاز گاز ----
d_m : قطر قطره مایع (Micron)	d_m : قطر قطره (μ)
P : فشار جداساز (Pa)	R_e : عدد رینولدز ----
Q_g : دبی گاز (MMSCFD)	v : سرعت (m/s)
V_l : سرعت حد (m/s)	t_r : زمان ماند (s)
Q_L : دبی مایع (m^3/h)	g : شتاب گرانشی (m/s^2)
S : نسبت لغزش ----	β : زاویه خط مماس بر فصل مشترک گاز و مایع
	(درجه) $^{\circ}$

مراجع

- [1]. Wilkinson D, Waldie B, Nor M M, Lee H Y (2000) Baffle plate configurations to enhance separation in horizontal primary separators, *Chemical Engineering Journal*, 77, 3: 221-226.
- [2]. Lee J M, Khan R I, Phelps D W (2010) Debottlenecking and computational-fluid-dynamics studies of high- and low-pressure production separators, *SPE Projects, Facilities and Construction*, 4, 04: 124-131.
- [3]. Hansen E W (2001) Phenomenological modelling and simulation of fluid flow and separation behavior in offshore gravity separators, *Asme-Publications-Pvp* 431: 23-30.
- [4]. Pourahmadi Laleh A, Pourahmadi Laleh A, Svrcek W Y, Monnery W D (2011) Computational fluid dynamics simulation of pilot-plant-scale two-phase separators, *Chemical Engineering and Technology*, 34, 2: 296-306.
- [5]. Ghaffarkhah A, Ghaffarkhah A, Shahrabi M A, Moraveji M K, Eslami H (2017) Application of CFD for designing conventional three phase oilfield separator, *Egyptian Journal of Petroleum*, 26, 2: 413-420.
- [6]. Acharya T, Casimiro L (2020) Evaluation of flow characteristics in an onshore horizontal separator using computational fluid dynamics, *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5, 3: 261-268.
- [7]. Yayla S, Yayla S E D A T, Kamal K, Bayraktar S (2019) Numerical analysis of a two-phase flow (oil and gas) in a horizontal separator used in petroleum projects, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12, 4: 1037-1045.
- [8]. Ahmed T, Ahmed T, Russell P A, Hamad F, Gooneratne S (2019) Experimental analysis and computational-fluid-dynamics modeling of pilot-scale three-phase separators, *SPE Production and Operations*, 34, 04: 805-819.
- [9]. Frank M, Frank M, Kamenicky R, Drikakis D, Thomas L, Ledin H, Wood T (2019) Multiphase flow effects in a horizontal oil and gas separator, *Energies*, 12, 11: 2116.
- [10]. Ghaffarkhah A, Dijvejin Z A, Shahrabi M A, Moraveji M K, Mostofi M (2019) Coupling of CFD and semiempirical methods for designing three-phase condensate separator: case study and experimental validation, *Journal of Petroleum Exploration And Production Technology*, 9, 1: 353-382.
- [11]. Oshinowo L, Vilagines R (2019) Verification of a CFD-population balance model for crude oil separation efficiency in a three-phase separator—effect of emulsion rheology and droplet size distribution, *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*, Society of Petroleum Engineers.
- [12]. Fadaei M, Ameli F, Hashemabadi S H (2019) Experimental study and CFD simulation of two-phase flow measurement using orifice flow meter, 29: 85-96.
- [13]. Ferziger J H, Perić M, Street R L (2002) *Computational methods for fluid dynamics*, 3, Berlin Springer.
- [14]. Yeoh G H, Tu J (2019) *Computational techniques for multiphase flows*, Butterworth-Heinemann.
- [15]. Manual F (2005) *Manual and user guide of fluent software*, Fluent Inc 597.
- [16]. Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C (1992) A continuum method for modeling surface tension, *Journal of Computational Physics*, 100, 2: 335-354.



Experimental Study and CFD Modeling of Two-phase Well-Head Separator

Mehdi Fadaei, Mohammad Javad Ameri* and Ali Salmani

Petroleum Engineering at Amir Kabir University of Technology, School of Petroleum Engineering, Tehran, Iran

ameri@aut.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2020.4191.2900

Received: June/08/2020

Accepted: October/27/2020

Introduction

Wilkinson et al. [1] performed one of the most comprehensive designing processes of separator using CFD modeling and experimental methods. They manufactured a small scale laboratory separator, and then they investigated the functionality and designing methods of large scale multi-phase separators using CFD modeling. Their study showed that if re-entrainment phenomena does not occur the best separation between phases will be occurred and also the turbulent effects should not be observed in gravity settlement section. But in this research, the opening percent of porous plates were not the same in the laboratory and CFD simulation. Lee et al. [2] proposed some instructions to solve operational problems of separators and investigated their effectiveness using CFD modeling. Hansen et al. [3] simulated two-phase flow in horizontal separators and they observed that the CFD simulation can predict the results for multi-phase separators better than other methods. Pourahmadi laleh et al. [4] modeled four laboratory separators using CFD. Ghaffarkhah et al. [9] determined the dimensions of multi-phase separator using arnold-stwart and monery-srveck methods. They investigated the treatment of fluids effects and separator performance in separation process. They used VOF multiphase flow model with DPM in CFD modeling process. They showed that velocity and kinetic energy magnitude which was determined by monery-srveck method is more than arnold-stwart method and re-entrainment phenomena was increased in monery-srveck separator. Kinetic energy of particles in gas phase was investigated using DPM and finally Ghaffarkhah et al. concluded that the best method for determining the separator dimensions is comparing the CFD and empirical results.

Experimental

The empirical study of performance of two-phase (gas-liquid) separator was the most important goal of this study. The two-phase separator was designed using empirical correlations. The simplifying assumptions were considered in these empirical correlations that lead to make the obtained results of these correlations less trustable. The companies do not publish the results of their empirical investigations and determine the range of unknown parameters. The effects of the inlet diverter and fundamentals of turbulent flow were neglected in the empirical correlations. The two-phase (gas-liquid) flow loop was designed and manufactured. Air and water flows were mixed at the mixing section that was a 45° Tee. The maximum operational pressure was equal to 202650 Pa and operational temperature was equal to ambient temperature. The liquid fraction of gas flow in the gad outlet section and the diameter of liquid droplets in gas flow were measured using liquid droplets trapper with a filter which was mounted at gas outlet section. It was observed that if liquid height in the separator decreases the effective length for liquid droplets separation increases, in other words, the volume fraction of liquid in gas flow increases. Increasing the gas flow rate had the same effect on the effective length for liquid droplets separation. The CFD modeling results were compared with the experimental results and it was seen that the average error was lower than 4%. It was observed that if the air and water flow rates be equal to 20 and 1 m³/h, respectively, the measured effective length for liquid droplets separation was equal to 94cm and when the liquid droplets trapper with filter was mounted at 80cm long from inlet diverter, the liquid droplets with bigger diameter (315 μm) were observed.

Results and Discussion

It was observed that if the air and water flow rates be equal to 20 and 1 m³/h, respectively, the measured effective length for liquid droplets separation was equal to 94cm and when the liquid droplets trapper with filter was mounted at 80cm long from inlet diverter the liquid droplets with bigger diameter (315 μm) were observed. The CFD modeling results were compared with the experimental results and it was seen that the average error was lower than 4%.

Conclusion

In order to perform the computational fluid dynamics simulation process, the solver method was pressure based. The acceleration of gravity was assumed to be 9.8 m/s² in the vertical direction downward. Multi-phase fluid volume model and standard K-Epsilon turbulence model were considered. Standard wall functions were used to investigate perturbations near the wall. The inlet velocity boundary condition for the two-phase liquid-gas inlet flow, the outlet pressure for the outlet gas pressure and the outlet velocity boundary condition for the liquid outlet were considered. The maximum operating pressure was considered to be 202450 Pa and the operating temperature equals to the ambient temperature. The PISO algorithm was chosen as the solution method and to better converge, the under relaxation coefficients for pressure, density, momentum, momentum, volume fraction and kinetic energy terms were 0.1, 0.9, 0.9, 0.0005, 0.05 and 0.7, respectively. At the beginning of the solution, the separator was considered as half-filled and to maintain the liquid level of the separator the outlet velocity for the liquid phase was equal to the liquid inlet velocity at the separator inlet (the inlet and outlet liquids were considered equal). It was observed that the average error rate between the empirically measured fraction and the computational fluid dynamics results is less than 3%.

References

1. Wilkinson D, Waldie B, Nor M M, Lee H Y (2000) Baffle plate configurations to enhance separation in horizontal primary separators, *Chemical Engineering Journal*, 77, 3: 221-226.
2. Lee J M, Khan R I, Phelps D W (2010) Debottlenecking and computational-fluid-dynamics studies of high-and low-pressure production separators, *SPE Projects, Facilities and Construction*, 4, 04: 124-131.
3. [3]. Hansen E W (2001) Phenomenological modelling and simulation of fluid flow and separation behavior in offshore gravity separators, *Asme-Publications-Pvp* 431: 23-30.
4. Pourahmadi Laleh A, Pourahmadi Laleh A, Svrcek WY, Monnery WD (2011) Computational fluid dynamics simulation of pilot-plant-scale two-phase separators, *Chemical engineering and technology*, 34, 2: 296-306.
5. Pourahmadilaleh A, Svrcek W Y, Monery W (2011) Computational fluid dynamics-based study an oilfield separator--part 1: a realistic simulation", 1, 57-68, *Oil gas facil.*
6. Pourahmadilaleh A, Svrcek W Y, Monery W (2012) Computational fluid dynamics-based study an oilfield separator—part 1: an optimum design', 1, 57-68, *Oil Gas Facil*, 2012.
7. Pourahmadilaleh A (2010) CFD Simulation of Multi-phase separators.
8. Monnery W. D, Svrcek W Y (2000) Analytical study of liquid/vapour separation efficiency, Study developed for petroleum technology alliance Canada.
9. Ghaffarkhah A, Ghaffarkhah A, Shahrabi M A, Moraveji M K, Eslami H (2017) Application of CFD for designing conventional three phase oilfield separator, *Egyptian journal of petroleum*, 26, 2: 413-420.