

بررسی روش‌های شبیه‌سازی CFD مخازن همزن‌دار دوفازی گاز-مایع

امیر حیدری

استادیار، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان

amirheidari@semnan.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

مخازن همزن‌دار
شبیه‌سازی CFD
جریان دوفازی گاز-مایع

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۰۸

تعداد زیادی از واکنش‌های موجود در صنایع شیمیایی مانند فرآیندهای اکسیداسیون، هیدروژناسیون و بیولوژیکی در محیط‌های دو فازی گاز-مایع و توسط مخازن همزن‌دار انجام می‌شوند. در این محیط‌ها به کمک فرآیند اختلاط، فاز گاز به صورت حباب‌هایی در فاز مایع پراکنده می‌شود تا سطح انتقال جرم مواد بین فاز گاز و مایع برای انجام واکنش‌های شیمیایی افزایش یافته و در نتیجه بازدهی راکتور افزایش پیدا کند. با توجه به اهمیت رفتار هیدرودینامیکی راکتورهای همزن‌دار دوفازی گاز-مایع بر میزان پراکندگی فاز گاز در فاز مایع و تأثیر آن بر بازدهی فرآیند، شبیه‌سازی CFD به عنوان راهکاری مؤثر برای بررسی عملکرد مخازن همزن‌دار به طور گسترده توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش، با بررسی مدل‌های ارائه شده در زمینه شبیه‌سازی CFD مخزن همزن‌دار، پرکاربردترین مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی رفتار جریان مغشوش، نحوه مدل‌سازی پره در مخزن و همچنین مدل‌های پیش‌بینی رفتار چند فازی در شبیه‌سازی‌های CFD مخازن همزن‌دار معرفی گردیده و ویژگی‌های آن‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۱ مقدمه

مخازن همزن‌دار دوفازی گاز-مایع از جمله تجهیزات پرکاربرد در صنایع مختلف شیمیایی، نفت، پتروشیمی، بیولوژیک و غذایی می‌باشند. عملکرد این دسته از راکتورها به پارامترهای زیادی مانند شکل، اندازه، تعداد و مکان قرارگیری پره‌ها، تعداد، شکل و زاویه بافل‌ها، مکان، شکل و نحوه توزیع گاز توسط اسپارجر و همچنین اندازه و شکل راکتور وابسته است. با توجه به گستردگی کاربرد مخازن همزن‌دار دوفازی گاز-مایع و اهمیت شناخت نحوه توزیع جریان درون این دسته از مخازن مطالعات زیادی در مورد مدل‌سازی و شبیه‌سازی مخازن همزن‌دار (تک‌فازی و چندفازی) انجام شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که روش‌ها و مدل‌های استفاده شده در بررسی رفتار هیدرودینامیک مخازن همزن‌دار را می‌توان بر اساس دسته‌بندی زیر مورد مطالعه و بررسی قرار داد:

● روش‌ها و مدل‌های مورد استفاده شبیه‌سازی رفتار جریان مغشوش

درون مخزن

● روش مدل‌سازی اثر پره در مخزن

● مدل‌های مختلف بررسی رفتار جریان چند فازی

در این مقاله سعی شده است راهکارهای مؤثر در شبیه‌سازی CFD مخازن همزن‌دار بر اساس دسته‌بندی فوق ارائه شود و دستاوردهای محققین در قالب مدل‌های مورد استفاده و نتایج حاصل مورد بررسی قرار گیرد.

۲ بررسی روش‌های شبیه‌سازی جریان مغشوش در

مخازن همزن‌دار

بخش مهمی از مسئله شبیه‌سازی CFD مخازن همزن‌دار، مدل‌سازی اثر رفتار جریان مغشوش است. با توجه به ماهیت جریان در اینگونه از مخازن، مقیاس‌های مختلف از گردابه در سیال داخل مخزن ایجاد می‌گردد که متناسب با دقت مورد نظر برای ارزیابی رفتار گردابه‌ها در سیال از تکنیک‌های مختلف مدل‌سازی رفتار جریان مغشوش استفاده می‌شود. در شبیه‌سازی CFD جریان‌های مغشوش سه دیدگاه کلی را می‌توان در نظر گرفت: (۱) روش شبیه‌سازی عددی مستقیم^۱ DNS (۲) روش LES^۲ و (۳) رهیافت معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده^۳ (RANS). در ادامه به معرفی روش‌های فوق و کاربرد آن‌ها در شبیه‌سازی مخازن همزن‌دار گاز-مایع خواهیم پرداخت.

۱.۲ روش DNS

هدف اصلی در استفاده از روش DNS حل میدان سرعت جریان مغشوش بدون استفاده از مدل‌سازی و تخمین اثرات جریان مغشوش است. در این روش حل دقیق معادلات حرکت برای سیال مورد نظر می‌باشد. روش DNS راهکاری است که تمام مقیاس‌های مختلف گردابه‌ها را می‌توان در مدل CFD برشمرد. در این روش می‌توان رفتار جریان مغشوش را در مقیاس‌های

¹Direct Numerical Simulation (DNS)

²Large Eddy Simulation (LES)

³Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

مورد بحث قرار گرفته‌اند.

از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی CFD مخزن همزن‌دار به کمک دیدگاه LES می‌توان به مقاله ژانگ و همکاران [۱۰] اشاره کرد. آن‌ها زمان اختلاط را در یک مخزن همزن‌دار دوفازی گاز-مایع با پره راشتون توسط شبیه‌سازی LES و مدل زیرشبکه اسماگورینسکی مورد مطالعه قرار دادند. همچنین با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و روش اندازه‌گیری هدایت الکتریکی نتایج عددی را اعتبارسنجی قرار گرفت. نتایج آن‌ها شامل بررسی اثر پارامترهای عملیاتی مانند محل ورود خوراک، سرعت پره و نرخ دبی گاز ورودی بر روی زمان اختلاط بود. نتایج نشان داد که مدل‌های استفاده شده به خوبی می‌توانند توزیع غلظت و زمان اختلاط را در مخزن را پیش‌بینی کنند.

۳.۲ مدل‌های RANS

شبیه‌سازی CFD استفاده به کمک روش‌هایی مانند روش DNS و LES نیازمند هزینه محاسباتی و زمان زیاد برای رسیدن به جواب نهایی به خصوص در جریان‌هایی با عدد رینولدز بالا و مقیاس صنعتی می‌باشند. در چنین مواردی می‌توان به کمک مدل‌های ساده‌شده مبتنی بر رهیافت معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده (RANS)، رفتار جریانی سیال در فرآیند را مورد بررسی قرار داد. در این بخش به معرفی مدل‌هایی خواهیم پرداخت که بر مبنای رهیافت RANS به بررسی اثر جریان مغشوش سیال در مخازن همزن‌دار می‌پردازند. در این مدل‌ها پارامتری به عنوان ویسکوزیته جریان مغشوش در معادلات RANS ایجاد می‌شود که توسط مدل‌های صفر، یک و دو معادله‌ای محاسبه می‌گردند. در اینجا به بررسی برخی از مهم‌ترین مدل‌های تخمین ویسکوزیته جریان مغشوش با رویکردی بر بیان ویژگی آن مدل‌ها در پیش‌بینی عملکرد مخازن همزن‌دار و جریان‌های چرخشی پرداخته خواهد شد.

۱.۳.۲ مدل $k - \epsilon$ استاندارد

یکی از مدل‌های معروف در رهیافت RANS مدل $k - \epsilon$ استاندارد است. این مدل در اصل برای جریان‌هایی با رینولدز بسیار بالا و با فرض جریان مغشوش ایزوتروپیک و در محدوده طیف تعادلی جریان مغشوش است [۴]. در این مدل یک معادله برای تخمین انرژی سینماتیک جریان مغشوش k و یک معادله برای تخمین اتلاف انرژی جنبشی ϵ جریان مغشوش مورد استفاده قرار گرفته و ویسکوزیته جریان مغشوش بر اساس رابطه‌ای به k و ϵ مرتبط می‌گردد (رابطه مورد نظر: $\mu_t = C_{\mu} \rho k^2 / \epsilon$ که C_{μ} یک ضریب ثابت است و بر اساس مطالعه بر روی جریان‌های مغشوش ساده تخمین زده می‌شود). معادله $k - \epsilon$ استاندارد به طور رضایت بخشی در فرآیندهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی CFD مخازن همزن‌دار توسط مدل $k - \epsilon$ استاندارد می‌توان به مراجع [۱۲]-[۱۶] اشاره کرد.

از میان تحقیقات انجام شده برای شبیه‌سازی مخازن همزن‌دار دوفازی گاز-مایع توسط مدل جریان مغشوش $k - \epsilon$ می‌توان به نتایج پژوهش لان و همکاران [۱۷] و مورتی و همکاران [۱۸] اشاره نمود. لان و همکاران [۱۷]

کوچک (مقیاس‌هایی در حدود مقیاس کولموگروف) مورد مطالعه قرار داد و در نتیجه مدل دقیقی از رفتار جریان بدست آورد. از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از روش DNS می‌توان به مقالات [۱-۳] اشاره کرد. یکی از محدودیت‌های روش DNS زمان‌بر بودن محاسبات به خصوص در مقیاس‌های بزرگ و صنعتی است. اگرچه روش DNS را می‌توان به‌عنوان کامل‌ترین روش حل معادلات حرکت دانست ولی این روش از لحاظ محاسباتی بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. برای آنکه درکی از هزینه محاسباتی بالای روش DNS پیدا کنیم باید بدانیم که نسبت مقیاس گردابه‌های بزرگ به گردابه‌های کوچک متناسب با $Re_t^{3/2}$ می‌باشد که Re_t رینولدز جریان مغشوش است. بنابراین تعداد مش مورد نیاز برای آنکه همه مقیاس‌های گردابه‌ها در روش DNS در ۳ جهت مکانی حل شوند در حدود $Re_t^{9/2}$ مش برای دامنه محاسباتی لازم می‌باشد [۴].

۲.۲ روش LES

تکنیک دیگری که می‌توان برای غلبه بر مشکل مش ریز در روش DNS برای شبیه‌سازی مخازن همزن‌دار استفاده کرد مدل‌هایی است که برای بیان رفتار جریان مغشوش نیاز به مش‌های بسیار ریز ندارند. در این نوع از مدل‌ها می‌توان اثر رفتار جریان مغشوش را به کمک روابط و یا معادلاتی که توانایی بیان اثرات جریان مغشوش را دارند پیش‌بینی کرد. روش شبیه‌سازی گردابه بزرگ (LES) تکنیکی است که به کمک اندازه مش بزرگتر نسبت به روش DNS می‌توان رفتار جریان مغشوش را به دقت بسیار خوبی مدل کرد. در این روش گردابه‌های بزرگتر یا هم‌سایز مش به صورت مستقیم ردیابی شده و یک مدل زیر-مش^۴ به منظور تخمین اثر رفتار گردابه‌هایی با مقیاس کوچک‌تر از اندازه مش (مقیاس‌هایی که در حقیقت رفتار ایزوتروپیک دارند) استفاده می‌شود. نقش اصلی مدل‌های زیر-مش ارائه یک مدل پیش‌بینی‌کننده از چگونگی انتقال انرژی از گردابه‌های مقیاس بزرگ به گردابه‌های کوچک است [۴]. از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی مخازن همزن‌دار توسط روش LES می‌توان به مراجع [۵-۱۰] اشاره کرد. روش LES دارای ویژگی‌های مهمی است که از جمله می‌توان موارد زیر را برشمرد [۴]:

- روشی بسیار ارزان‌تر (از نظر محاسباتی و زمانی) نسبت به روش DNS.
- ارائه با جریانات خواص و رفتار میدان جریان به خصوص فرآیندهای صنایع شیمیایی.
- شاید بتوان گفت ویژگی اصلی استفاده از روش LES پیش‌بینی مستقیم رفتار گردابه‌های بزرگ است، زیرا این گردابه‌ها غالباً نقش اصلی را در رفتار هیدرودینامیکی، انتقال حرارت و سایر پدیده‌های مورد علاقه مهندسان دارد در حالی که اهمیت بررسی گردابه‌های کوچک از جهت بررسی اثر آن‌ها بر روی گردابه‌های بزرگ است [۴]. برخی از مدل‌های مورد استفاده در پیش‌بینی تنش گردابه‌های کوچک عبارت‌اند از: (۱) مدل اسماگورینسکی (۲) مدل دینامیک اسماگورینسکی (۳) مدل تشابه مقیاس (۴) معادله انرژی سینماتیک مقیاس زیر-مش و غیره [۴]. این مدل‌ها به طور کامل تری توسط مپتی و جُشی [۱۱]

^۴sub-grid

کارهای انجام شده در زمینه شبیه سازی مخازن همزن دار توسط مدل RSM می توان به مراجع [۱۹، ۲۶-۲۹] اشاره کرد. مدل تنش جبری^۶ (ASM) مدل ساده شده روش RSM می باشد که در آن معادلات دیفرانسیل روش RSM توسط روابط جبری تخمین زده شده است. در این مدل به صورت ضمنی تنش های رینولدز محلی به صورت تابعی از انرژی جنبشی جریان مغشوش، نرخ اتلاف و گرادیان سرعت متوسط تخمین زده می شوند. این مدل به علت ساده سازی هایی که در معادلات آن وجود دارد هزینه و زمان محاسباتی کمتری نسبت به روش RSM دارد. از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه شبیه سازی CFD مخازن همزن دار می توان به مراجع [۳۰، ۳۱] اشاره کرد.

۳ شبیه سازی اثر پره

یکی از مهم ترین مسائل موجود در زمینه شبیه سازی CFD مخازن همزن دار نحوه بررسی اثر چرخش پره و اثر آن بر سیال درون مخزن است. امروزه رهیافت های مختلفی برای بیان اثر پره در مخازن همزن دار ارائه شده است. در این بخش به بررسی برخی از مهم ترین رهیافت ها در زمینه مدل سازی اثر پره در مخازن همزن دار خواهیم پرداخت.

۱.۳ تکنیک قاب مرجع چندگانه (MRF)

در تکنیک MRF با تعریف دو ناحیه چرخان و ثابت، اثر پره مورد بررسی قرار می گیرد. ناحیه اول شامل پره است که با سرعت برابر پره چرخش می کند و ناحیه دوم، محدوده خارج از ناحیه اول، ناحیه شامل بافل وجود دارد که ثابت در نظر گرفته می شود. در تکنیک MRF هیچگونه همپوشانی بین ناحیه داخلی و خارجی وجود ندارد. در این روش مشخصات جریان در ناحیه داخلی بر اساس داده های یک قاب چرخان محاسبه می شود. نتایج ناحیه داخلی به عنوان شرط مرزی برای محاسبه ناحیه خارجی مورد استفاده قرار می گیرد و متقابلاً نتایج ناحیه خارجی به عنوان شرایط مرزی برای ناحیه داخلی مورد استفاده قرار می گیرد تا در نهایت مسئله به همگرایی عدد برسد. در روش MRF باید به این نکته دقت کرد که انتخاب صفحه (قاب) میان ناحیه داخلی و خارجی دلخواه نیست. این قاب باید به شکلی تعریف شود که کل پره را شامل شده و مکان صفحه در جایی باشد که مشخصات جریان با تغییر موقعیت زاویه ای و با زمان تغییرات قابل توجه نداشته باشد [۴]. روش MRF در کدهای مختلف تجاری CFD مانند نرم افزار Ansys Fluent مورد استفاده قرار می گیرد. برخی از شبیه سازی های انجام شده توسط روش MRF می توان به مراجع [۱۹-۲۱، ۲۳، ۳۲-۳۵] اشاره کرد.

۲.۳ رهیافت مش لغزشی

رهیافت مش لغزشی برای شبیه سازی اثر پره در مخازن همزن دار توسط مورفی و همکاران [۳۶] مورد استفاده قرار گرفته است. در این رهیافت از دو ناحیه جداگانه (ناحیه داخلی و ناحیه بیرونی) و مش بندی شده برای شبیه سازی اثر

اندازه حباب ها را بر اساس معادله دانسیته تعداد حباب و همچنین افزایش ضریب درگ به علت برهمکنش میان حباب ها و جریان مغشوش را مورد بررسی قرار دادند. آن ها نشان دادند که میزان اتلاف انرژی جریان مغشوش به خوبی توسط معادله $k - \epsilon$ پیش بینی نمی شود. با اعمال یک ضریب تصحیح رفتار معادله $k - \epsilon$ اصلاح شد اما نتایج حاصل نشان داد که مقدار اتلاف جریان مغشوش کمتر از مقدار واقعی پیش بینی می گردد. مورتی و همکاران [۱۸] برای نخستین بار به کمک روش CFD حفره های تزریق گاز به مایع در مخزن همزن دار با همزن تزریق کننده گاز را بهینه سازی کردند. در مدل CFD آن ها از دیدگاه اولری-اولری و دیدگاه جریان مغشوش $k - \epsilon$ در شبیه سازی استفاده شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که به منظور حداکثر کردن نرخ خروجی گاز از پره، حفرات تزریق گاز باید در مکان هایی از پره قرار بگیرند که در آن میزان فشار حداقل باشد. این نواحی در سیستم تک فاز و سیستم دو فاز در یک موقعیت قرار دارند و بنابراین می توان از نتایج سیستم تک فاز برای بهینه کردن موقعیت حفرات تزریق گاز برای سیستم دو فاز استفاده کرد.

۲.۳.۲ مدل $k - \epsilon$ RNG

مدل $k - \epsilon$ RNG نیز مانند مدل $k - \epsilon$ استاندارد از دو معادله (معادله k و معادله ϵ) برای بیان رفتار جریان مغشوش استفاده می کند. این معادلات با استفاده از روش گروه های نرمالیز شده که بر روی معادلات ناویر استوکس اعمال شده است حاصل می شود. این مدل می تواند اثرات رفتار تولید و اضمحلال انرژی جریان مغشوش را نسبت به مدل $k - \epsilon$ بهتر محاسبه نماید [۴]. از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از مدل $k - \epsilon$ RNG در شبیه سازی مخازن همزن دار می توان به مراجع [۱۳، ۱۹-۲۲] اشاره کرد. در این بخش پژوهش ارائه شده توسط پهلوانی و همکاران [۲۳] بر مبنای مدل $k - \epsilon$ RNG مورد بررسی قرار گرفته است. پهلوانی و همکاران [۲۳] به کمک مدل $k - \epsilon$ RNG یک راکتور همزن دار چندفازی را مورد بررسی قرار دادند. آن ها با بررسی اثر جهت چرخش همزن، نحوه توزیع فاز گاز در راکتور را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد همزن توربینی با جهت جریان به سمت پایین باعث اختلاط مناسب تر فاز گاز و مایع در راکتور می گردد. همچنین با مقایسه نتایج CFD و نتایج آزمایشگاهی موجود در منابع نشان داده شده که مدل CFD ارائه شده به خوبی توانایی پیش بینی رفتار هیدرودینامیک مخازن چندفازی را دارد.

۳.۳.۲ مدل تنش رینولدز (RSM)^۵

مطالعات نظری مختلف در شبیه سازی جریان های مغشوش نشان داده است که مدل $k - \epsilon$ استاندارد توانایی پیش بینی رفتار جریان غیرایزوتروپیک را ندارد [۲۴، ۲۵]. همچنین در مدل سازی معادلات انتقال برای k و ϵ مشکلات زیادی در بیان انحناء خط جریان، تغییر شکل چرخشی و نیروهای بدنه وجود دارد که نمی توان آن ها را توسط مدل $k - \epsilon$ استاندارد به درستی پیش بینی کرد. در حالت تئوری، روش RSM می تواند بر مشکلات مذکور غلبه و هر یک از جملات استرس رینولدز را به کمک یک معادله دیفرانسیل بیان کند. از جمله

^۵Reynolds Stress Model (RSM) ^۶Algebraic stress model (ASM)

۴ شبیه‌سازی CFD مخازن چند فازی گاز-مایع

در سال‌های اخیر به واسطه توسعه نرم‌افزارهای تحلیل عددی جریان و همچنین توسعه و بهینه‌سازی مدل‌های رفتار جریان مغشوش و چندفازی و افزایش توانایی سیستم‌های محاسباتی، شبیه‌سازی CFD این دسته از فرآیندها مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این بخش ابتدا به بررسی کلی دیدگاه‌ها و مدل‌های استفاده‌شده در شبیه‌سازی CFD مخازن همزن‌دار دوفازی گاز-مایع پرداخته می‌شود و سپس تحقیقات انجام‌شده در سال‌های اخیر توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱.۴ دیدگاه‌های شبیه‌سازی CFD مخازن همزن‌دار دوفازی گاز-مایع

در شبیه‌سازی CFD مخازن همزن‌دار گاز-مایع دو دیدگاه اصلی به منظور بیان رفتار جریان چند فازی توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. این دو دیدگاه عبارتند از:

- دیدگاه اولری-لاگرانژی: استفاده از دیدگاه اولری برای بیان رفتار فاز مایع (فاز پیوسته) و دیدگاه لاگرانژی برای بیان رفتار فاز پراکنده (فاز گسسته)
- دیدگاه اولری-اولری: در این دیدگاه فاز گاز (فاز پراکنده) و فاز مایع (فاز پیوسته) بر اساس دیدگاه اولری مدل می‌شوند. این دیدگاه را می‌توان پرکاربردترین روش در شبیه‌سازی CFD مخازن همزن‌دار دانست.

۱.۱.۴ دیدگاه اولری-لاگرانژی

دیدگاه اولری-لاگرانژی روش مرسوم شبیه‌سازی برای سیستم‌هایی می‌باشد که کسر حجمی فاز پراکنده در سیستم اندک است. در این دیدگاه، فاز پیوسته توسط معادلات ناویر-استوکس مدل شده در حالی که فاز ناپیوسته بر اساس حل معادلات حرکت برای هر یک از ذرات و محاسبه نیروهای وارد به ذرات در میدان جریان، ردیابی و محاسبه می‌شود. مشکل اصلی روش اولری-لاگرانژی زمانی محاسباتی مرتبط با تعداد ذرات است. در این مدل افزایش تعداد ذرات باعث افزایش تعداد معادلات می‌شود و زمان محاسبات را افزایش می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که روش اولری-لاگرانژی روش مناسبی برای سیستم‌هایی است که تعداد ذرات در سیستم اندک باشد [۴۰].

در اینجا به منظور بررسی نتایج شبیه‌سازی CFD به کمک دیدگاه اولری-لاگرانژی پژوهش‌ویز و همکاران [۴۱] مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها با شبیه‌سازی CFD یک بیوراکتور شامل سه پره راشتون، رفتار جریان دوفازی گاز-مایع را در مقیاس صنعتی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به کمک دیدگاه اولری-لاگرانژی و روش شبکه بولتزمن همراه با محاسبات بر مبنای کارت‌ها گرافیکی قدرتمند، راکتور مقیاس صنعتی را شبیه‌سازی کردند. در مدل آن‌ها رفتار توزیع اندازه ذرات بر اساس پدیده‌های شکست و به هم پیوستگی بر اساس مدل‌های آماری پیش‌بینی گردید. همچنین به کمک سنسور اندازه‌گیری

چرخش پره استفاده می‌شود. ناحیه داخلی شامل پره و ناحیه بیرونی که ناحیه خیر چرخشی است شامل بافل است. در روش مش لغزشی مش ناحیه داخلی با سرعت پره در حال چرخش است. به منظور اصلاح معادله حرکت در ناحیه داخلی، یک جمله شتاب به معادلات حرکت به عنوان نتیجه اثر چرخش مش اضافه می‌گردد. این جمله برابر با نیروهای بدنه‌ای است که از دستگاه مختصات غیرلخت، ناحیه در حال چرخش همراه با پره، به معادلات حرکت اعمال می‌شود و باعث پیش‌بینی مناسب اثر چرخش پره در معادلات می‌گردد [۴]. مشکلات حل عددی در روش مش لغزشی به خصوص در زمانی که شکل پره پیچیده است یکی از عواملی است که ممکن است دقت محاسبات را نسبت به دیدگاه‌های مش ثابت دچار مشکل کند. البته باید به این نکته اشاره کرد اگرچه قابلیت‌های محاسباتی در سال‌های اخیر به صورت قابل توجهی پیشرفت کرده است اما اکنون نیز برای انجام محاسبات به روش مش لغزشی نیازمند روزها و حتی هفته‌ها محاسبات کامپیوتری می‌باشیم.

از میان تحقیقات اخیر انجام‌شده در شبیه‌سازی اثر پره در مخازن همزن‌دار می‌توان به نتایج ارائه‌شده توسط دین و همکاران [۳۷] و جاهدا و همکاران [۳۸] اشاره کرد. دین و همکاران [۳۷] به کمک روش‌های مش لغزشی و دیدگاه اولری و مقایسه نتایج با داده‌های PIV^۷ آزمایشگاهی مخزن همزن‌دار دوفازی گاز-مایع را مورد بررسی قرار دادند. مخزن آزمایشگاهی آن‌ها شامل یک توربین راشتون بود. با بررسی ضرایب درگ متفاوت و افزایش کیفیت مش، توافق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی در پیش‌بینی سرعت شعاعی مشاهده کردند اما نتایج عددی و آزمایشگاهی در پیش‌بینی سرعت سیال در جهت محوری با یکدیگر توافق مناسبی نداشتند. جاهدا و همکاران [۳۸] به بررسی اثر دیدگاه MRF^۸ و مش لغزشی در میزان همگنی فاز مایع پرداختند. آن‌ها به کمک مدل آشفتگی $k-\epsilon$ برای مخلوط گاز-مایع و دیدگاه اولری-اولری میدان جریان و اثر ردیاب در سیستم را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش مش لغزشی توافق خوبی در پیش‌بینی داده‌های آزمایشگاهی دارد.

۳.۳ تکنیک مش جابجا شونده-تغییر شکل دهنده

این تکنیک توسط پرنگ و مورفی [۳۹] معرفی شده و در آن یک مش منفرد ارتباط‌دهنده بین ناحیه چرخشی و ناحیه ساکن است. شبکه مش متصل به پره با پره حرکت کرده و سبب تغییر شکل مش در کل مخزن می‌شود. در این روش، مش رفتار وابسته به زمان دارد و حرکت آن باعث تغییر شکل مش در طول محاسبات می‌شود. شبکه مش اطراف پره پس از چرخش با پره و پس از آنکه تغییر شکل مطلوب حاصل شد (این تغییر شکل به نحوی است که چولیدگی^۹ مش از یک حداقل که به عنوان قید تغییر شکل استفاده می‌شود کمتر نباشد)، مجدداً به شکل اصلی برگردانده شده و مشخصات جریان به شبکه ترمیم‌شده برگردانده می‌شود. مشکل اصلی در این روش کنترل مش بازتولیدشده و دقت نتایج عددی می‌باشد. همچنین هزینه محاسباتی در این روش به علت شیوه مدل‌سازی اثر پره بالا است [۴].

⁷Particle Image Velocimetry (PIV) ⁸skewness

به سمت بالا به شدت افزایش پیدا کرده به طوری که در فضای بالای مخزن مقدار کسر حجمی در حدود ۵۰٪ مشاهده می‌شود. مقایسه نتایج مدل CFD آن‌ها با داده‌های آزمایشگاهی، توافق خوب میان نتایج CFD و آزمایشگاهی را نشان داد.

ژانگ و همکاران [۴۷] به بررسی میزان بزرگی نیروهای بین فازی (نیروی درگ، نیروی لیفت و نیروی جرم مجازی) در مخزن همزن‌دار گاز-مایع به کمک روش CFD پرداختند. آن‌ها به طور ویژه میدان جریان و میزان ماندگی فاز گاز را با در نظر گرفتن نیروهای جرم مجازی و لیفت مورد بررسی قرار دادند و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که اثر نیروی لیفت در شرایط یک مخزن همزن‌دار گاز-مایع نسبت به اثر نیروی درگ و نیروی جرم مجازی بسیار اندک و قابل صرف نظر کردن است. همچنین بررسی‌ها نشان داد که از اثر نیروی جرم مجازی در نزدیکی لبه‌های پره نمی‌توان صرف نظر کرد. این نیرو به ویژه در نواحی خروج گاز از اسپارجر بیشترین مقدار خود را دارد اگرچه از لحاظ بزرگی از نیروی درگ کوچک‌تر است. با بررسی اثر ماندگی در مخزن نشان داده شد که اعمال اثر نیروی درگ و جرم مجازی باعث پیش‌بینی بهتر ماندگی فاز گاز در مخزن خواهد شد. بائو و همکاران [۴۸، ۴۹] به کمک شبیه‌سازی CFD اثر قطر پره را بر ماندگی محلی و کلی فاز گاز در یک مخزن همزن‌دار با سه همزن مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در مدل CFD از دیدگاه اولری-اولری همراه با موازنه جمعیت به منظور پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار فاز گاز استفاده کردند. ساختار مخزن شامل دو پره هیدروفویل با جهت پمپاژ به سمت پایین همراه با یک همزن با ۶ پره سهموی در پایین همزن‌های هیدروفویل است. با بررسی اثر قطر همزن سهموی بر میزان توان مورد نیاز همزن نشان داده شده که با افزایش قطر همزن، میزان توان مورد نیاز اندکی افزایش پیدا می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش قطر مخزن در سرعت ظاهری ثابت فاز گاز، میزان ماندگی فاز گاز (محلی و کلی) افزایش پیدا می‌کند. داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج نشان‌دهنده توافق خوب داده‌های شبیه‌سازی CFD با داده‌های آزمایشگاهی بود.

۵ جمع‌بندی

بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشتر تحقیقات انجام‌شده در زمینه شبیه‌سازی CFD مخازن همزن‌دار گاز مایع شامل ویژگی‌های زیر است:

- عدم تأثیر قابل توجه نیروهای جرم مجازی و نیروی لیفت در نتایج شبیه‌سازی
- برشمردن اثر نیروی درگ به عنوان نیروی غالب در فرآیند
- ثابت در نظر گرفتن اندازه ذرات حباب در مدل عددی و استفاده از یک قطر غالب به عنوان متوسط قطر حباب‌ها
- استفاده از روابط مختلف برای بهبود پیش‌بینی نیروی درگ، مانند اثر جریان مغشوش بر ضریب درگ و اثر سیستم چند فازی بر محاسبه ضریب درگ
- استفاده از رهیافت پایا در مدل‌سازی اثر پره مانند دیدگاه MRF به

هدایت الکتریکی، اندازه حباب‌ها و کسر حجمی فاز گاز تخمین زده شد. بعلاوه به طور آزمایشگاهی چندین رژیم جریانی در راکتور بر اساس تغییر دبی گاز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که داده‌های عددی حاصل انطباق خوبی بر داده‌های آزمایشگاهی دارند و دیدگاه اولری-لاگرانژی می‌تواند رفتار جریان چندفازی را درون مخزن به خوبی مدل نماید.

۲.۱.۴ دیدگاه اولری-اولری

در دیدگاه اولری-اولری فاز پیوسته و گسسته به صورت فازهای در هم نفوذ کرده مدل می‌شوند. تمام فازها دامنه محاسباتی مشترک داشته و در هنگام حرکت فازها در یکدیگر نفوذ می‌کنند [۱۴]. بیشتر تحقیقات انجام‌شده در زمینه شبیه‌سازی CFD مخازن همزن‌دار بر اساس دیدگاه اولری-اولری می‌باشد. مهم‌ترین مسئله در استفاده از دیدگاه اولری-اولری پیش‌بینی نیروهای بین فازی در مدل CFD است. این نیروها عبارت‌اند از [۴۲]:

- نیروی درگ: در محاسبه نیروی درگ وارد بر فاز پراکنده، مسئله رفتار جریان مغشوش بر ضریب درگ از جمله مواردی است که تلاش‌های اندکی برای شناخت اثر آن بر نیروی درگ انجام شده است [۱۷، ۴۳، ۴۴].
- نیروی جرم مجازی^۹ و نیروی لیفت: دو نیروی مهم دیگر در نیروهای بین فازی عبارتند از نیروی لیفت و نیروی جرم مجازی. اهمیت نیروی جرم مجازی هنگامی است که دانسیته فاز ثانویه بسیار کمتر از دانسیته فاز اولیه باشد. اثر نیروی جرم مجازی توسط خوپکار و همکاران [۴۵] مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اثر نیروی جرم مجازی بر الگوی جریان گاز فقط در ناحیه تخلیه اطراف پره مهم و تأثیرگذار است و اثر آن در توده سیال قابل صرف نظر کردن است.

در مورد نیروی لیفت نیز باید به این نکته اشاره کرد که اثر این نیرو همانند نیروی جرم مجازی بر الگوی توزیع فاز گاز در محل تخلیه جریان توسط پره و ناحیه زیر پره تأثیرگذار می‌باشد. نتایج بدست‌آمده با در نظر گرفتن نیروی لیفت باعث تخمین کمتر میزان ماندگی مایع در زیر پره می‌شود. همچنین در توده سیال مشاهده شده است که اثر نیروی لیفت در پیش‌بینی رفتار هیدرودینامیکی و توزیع ماندگی جریان گاز تأثیرگذار نمی‌باشد [۴۴].

در این بخش نتایج تحقیقات توباو و همکاران [۴۶]، ژانگ و همکاران [۴۷] و بائو و همکاران [۴۸، ۴۹] به عنوان پژوهش‌های اخیر CFD که به کمک دیدگاه اولری-اولری انجام شده است ارائه می‌شود. در پژوهش انجام‌شده توباو و همکاران [۴۶]، بر اساس دیدگاه اولری-اولری مخزن همزن‌دار دو فازی شامل سه پره (یک پره نیم‌بیضی و دو پره پهن-پره با جهت پمپاژ رو به بالا) مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها اثر قطر پره بالایی مخزن را بر میزان مصرف توان، ماندگی فاز گاز و کسر حجمی محلی فاز گاز مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که هنگامی که نسبت قطر پره بالایی به قطر مخزن افزایش پیدا می‌کند مقدار توان اندکی کاهش می‌یابد در حالی که افزایش در میزان ماندگی مایع مشاهده می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش قطر پره بالایی میزان کسر حجمی محلی فاز گاز از موقعیت پره میانی

^۹Virtual Mass

- [9] Sungkorn, R., Derksen, J. J., and Khinast, J. G. Euler-lagrange modeling of a gas-liquid stirred reactor with consideration of bubble breakage and coalescence. *AIChE Journal*, 58(5):1356-1370, 2012.
- [10] Zhang, Qinghua, Yang, Chao, Mao, Zai-Sha, and Mu, Junjuan. Large eddy simulation of turbulent flow and mixing time in a gas-liquid stirred tank. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(30):10124-10131, Aug 2012.
- [11] Mathpati, C. S. and Joshi, J. B. Insight into theories of heat and mass transfer at the solid-fluid interface using direct numerical simulation and large eddy simulation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46(25):8525-8557, Dec 2007.
- [12] Ranade, V.V., Perrard, M., Le Sauze, N., Xuereb, C., and Bertrand, J. Trailing vortices of rushton turbine: Piv measurements and cfd simulations with snapshot approach. *Chemical Engineering Research and Design*, 79(1):3 - 12, 2001.
- [13] Jones, Raymond M., Harvey, Albert D., III, and Acharya, Sumanta. Two-Equation Turbulence Modeling for Impeller Stirred Tanks. *Journal of Fluids Engineering*, 123(3):640-648, 03 2001.
- [14] Ranade, Vivek V., Tayalia, Yatin, and Krishnan, H. Cfd predictions of flow near impeller blades in baffled stirred vessels: Assessment of computational snapshot approach. *Chemical Engineering Communications*, 189(7):895-922, 2002.
- [15] Kálal, Zbyněk, Jahoda, Milan, and Fořt, Ivan. Modelling of the bubble size distribution in an aerated stirred tank: Theoretical and numerical comparison of different breakup models. *Chemical and Process Engineering*, (No 3 September):331-348, 2014.
- [16] *Numerical Study of Single Phase Liquid Mixing in Stirred Tanks Fitted With Rushton Turbine and Flotation Impeller*, vol. Volume 7A: Fluids Engineering Systems and Technologies of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 11 2013. V07AT08A047.
- [17] Lane, G.L., Schwarz, M.P., and Evans, G.M. Numerical modelling of gas-liquid flow in stirred tanks. *Chemical Engineering Science*, 60(8):2203 - 2214, 2005. 5th International Symposium on Mixing in Industrial Processes (ISMIP5).
- [18] Murthy, B.N., Deshmukh, N.A., Patwardhan, A.W., and Joshi, J.B. Hollow self-inducing impellers: Flow visualization and cfd simulation. *Chemical Engineering Science*, 62(14):3839 - 3848, 2007.
- [19] Chtourou, Wajdi, Ammar, Meriem, Driss, Zied, and Abid, Mohamed. Effect of the turbulence models on rushton turbine generated flow in a stirred vessel. *Open Engineering*, 1(4):380 - 389, 01 Dec. 2011.
- [20] Ammar, Meriem, Driss, Zied, Chtourou, Wajdi, and Abid, Mohamed S. Effects of baffle length on turbulent flows generated in stirred vessels. *Central European Journal of Engineering*, 1(4):401, Aug 2011.
- [21] Ammar, M., Chtourou, W., Driss, Z., and Abid, M.S. Numerical investigation of turbulent flow generated in baffled stirred vessels equipped with three different turbines in one and two-stage system. *Energy*, 36(8):5081 - 5093, 2011. PRES 2010.

علت توانایی بالا در پیش‌بینی اثر پره و زمان محاسباتی پایین‌تر و همچنین عدم ایجاد مشکلات محاسباتی نسبت به روش‌هایی مانند مش لغزشی

● استفاده از مجموعه مدل‌های آشفتگی $k - \epsilon$ به علت قابلیت و زمان محاسباتی اندک نسبت به سایر مدل‌ها مانند روش DNS و LES تحقیقات CFD بر اساس روش‌های فوق نشان می‌دهد که این روش‌ها و تکنیک‌ها می‌توانند رفتار هیدرودینامیک و خواص جریان درون مخازن همزن‌دار را با دقت مناسبی مدل کنند. اما باید به این نکته اشاره کرد در نواحی اطراف پره به علت فرضیات ساده‌کننده، مانند نادیده گرفتن نیروی لیفت، نیروی جرم مجازی و صرف نظر از معادله موازنه جمعیت حباب‌ها (ثابت گرفتن اندازه حباب‌های گاز و عدم بررسی برخورد و شکست حباب‌ها) در مدل عددی، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی مقداری اختلاف نشان می‌دهند. لازم به ذکر است بر اساس آنچه که در منابع دیده می‌شود، ویژگی تنظیم ثوابت در هر یک از روابط و معادلات (معادلات آشفتگی، ضریب درگ، ضریب لیفت و غیره) به منظور انطباق مناسب داده‌های عددی و آزمایشگاهی ضروری به نظر می‌رسد.

مراجع

- [1] Verzicco, R., Fatica, M., Iaccarino, G., and Orlandi, P. Flow in an impeller-stirred tank using an immersed-boundary method. *AIChE Journal*, 50(6):1109-1118, 2004.
- [2] Sbrizzai, Fabio, Lavezzo, Valentina, Campolo, Marina, and Soldati, Alfredo. Direct numerical simulation of turbulent particle dispersion in an unbaffled stirred-tank reactor. *Chemical Engineering Science*, 61:2843-2851, 05 2006.
- [3] Derksen, J.J. Highly resolved simulations of solids suspension in a small mixing tank. *AIChE Journal*, 58(10):3266-3278, 2012.
- [4] Joshi, Jyeshtharaj B., Nere, Nandkishor K., Rane, Chinmay V., Murthy, B. N., Mathpati, Channamallikarjun S., Patwardhan, Ashwin W., and Ranade, Vivek V. Cfd simulation of stirred tanks: Comparison of turbulence models. part i: Radial flow impellers. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89(1):23-82, 2011.
- [5] Hartmann, H., Derksen, J. J., and van den Akker, H. E. A. Macroinstability uncovered in a rushton turbine stirred tank by means of les. *AIChE Journal*, 50(10):2383-2393, 2004.
- [6] Bakker, A. and Oshinowo, L.M. Modelling of turbulence in stirred vessels using large eddy simulation. *Chemical Engineering Research and Design*, 82(9):1169 - 1178, 2004. In Honour of Professor Alvin W. Nienow.
- [7] Yeoh, S.L., Papadakis, G., and Yianneskis, M. Determination of mixing time and degree of homogeneity in stirred vessels with large eddy simulation. *Chemical Engineering Science*, 60(8):2293 - 2302, 2005. 5th International Symposium on Mixing in Industrial Processes (ISMIP5).
- [8] Sungkorn, R., Derksen, J.J., and Khinast, J.G. Modeling of aerated stirred tanks with shear-thinning power law liquids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 36:153 - 166, 2012.

- with population balance equations of a stirred tank bioreactor for high cell density cultivation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 94(1):20–32, 2016.
- [36] Murthy, J. Y., Mathur, S. R., and Choudhary, D. Cfd simulation of flows in stirred tank reactors using a sliding mesh technique. 8th European Conference on Mixing, pp. 21–23, Cambridge, UK, 1994. Institution of Chemical Engineers.
- [37] Deen, Niels G., Solberg, Tron, and Hjertager, Bjørn H. Flow generated by an aerated rushton impeller: Two-phase piv experiments and numerical simulations. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 80(4):1–15, 2002.
- [38] Jahoda, M., Tomášková, L., and Moštěk, M. Cfd prediction of liquid homogenisation in a gas–liquid stirred tank. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(4):460 – 467, 2009. 13th European Conference on Mixing: New developments towards more efficient and sustainable operations.
- [39] Perng, Chin Yuan, Murthy, J. Y., Calabrese, R. V., and Tatterson, G. B. A moving-deforming-mesh technique for simulation of flow in mixing tanks, symposium, process mixing: chemical and biochemical applications. in *AICHE SYMPOSIUM SERIES, Process mixing: chemical and biochemical applications, Symposium, Process mixing: chemical and biochemical applications*, no. 293, pp. 37–41, New York, NY, 1992. American Institute of Chemical Engineers;.
- [40] Derksen, J. J. Numerical simulation of solids suspension in a stirred tank. *AICHE Journal*, 49(11):2700–2714, 2003.
- [41] Witz, Christian, Treffer, Daniel, Hardiman, Timo, and Khinast, Johannes. Local gas holdup simulation and validation of industrial-scale aerated bioreactors. *Chemical Engineering Science*, 152:636 – 648, 2016.
- [42] Joshi, Jyeshtharaj B., Nere, Nandkishor K., Rane, Chinmay V., Murthy, B. N., Mathpati, Channamallikarjun S., Patwardhan, Ashwin W., and Ranade, Vivek V. Cfd simulation of stirred tanks: Comparison of turbulence models (part ii: Axial flow impellers, multiple impellers and multiphase dispersions). *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89(4):754–816, 2011.
- [43] Pinelli, D., Montante, G., and Magelli, F. Dispersion coefficients and settling velocities of solids in slurry vessels stirred with different types of multiple impellers. *Chemical Engineering Science*, 59(15):3081 – 3089, 2004.
- [44] Khopkar, Avinash R. and Ranade, Vivek V. Cfd simulation of gas–liquid stirred vessel: Vc, s33, and l33 flow regimes. *AICHE Journal*, 52(5):1654–1672, 2006.
- [45] Khopkar, A. R., Kasat, G. R., Pandit, A. B., and Ranade, V. V. Computational fluid dynamics simulation of the solid suspension in a stirred slurry reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(12):4416–4428, Jun 2006.
- [46] Bao, Yuyun, Yang, Jie, Chen, Lei, and Gao, Zhengming. Influence of the top impeller diameter on the gas dispersion in a sparged multi-impeller stirred tank. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(38):12411–12420, Sep 2012.
- [47] Zhang, Yanhong, Bai, Yulan, and Wang, Hualin. Cfd analysis of inter-phase forces in a bubble stirred vessel. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(1):29 – 35, 2013.
- [22] Jenne, Marc and Reuss, Matthias. A critical assessment on the use of k– turbulence models for simulation of the turbulent liquid flow induced by a rushton-turbine in baffled stirred-tank reactors. *Chemical Engineering Science*, 54(17):3921 – 3941, 1999.
- [۲۳] پهلوانی، صادق، هاشم‌آبادی، سید حسن، و حیدری، امیر. شبیه‌سازی CFD هیدرودینامیک راکتور حبابی– دوغایی همزن‌دار تولید ترفتالیک اسید پتروشیمی شهید تندگویان. پژوهش نفت، ۲۴(۷۹):۸۳–۹۴، ۲۰۱۴.
- [24] Launder, B. E. *Current capabilities for modelling turbulence in industrial flows*, pp. 37–59. Springer Netherlands, Dordrecht, 1991.
- [25] Hanjalić, K. Advanced turbulence closure models: a view of current status and future prospects. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 15(3):178 – 203, 1994.
- [26] Aghbolaghy, Mostafa and Karimi, Afzal. Simulation and optimization of enzymatic hydrogen peroxide production in a continuous stirred tank reactor using cfd–rsm combined method. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(1):101 – 107, 2014.
- [27] Vlček, Petr, Skočilas, Jan, and Jirout, Tomáš. Cfd simulation of a stirred dished bottom vessel. *Acta Polytechnica*, 53, 12 2013.
- [28] Han, Ying, Wang, Jia-Jun, Gu, Xue-Ping, and Feng, Lian-Fang. Numerical simulation on micromixing of viscous fluids in a stirred-tank reactor. *Chemical Engineering Science*, 74:9 – 17, 2012.
- [29] Wucherpennig, Thomas, Krull, Rainer, and Esfandabadi, Manely. Agitation induced mechanical stress in stirred tank bioreactors-linking cfd simulations to fungal morphology. *JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN*, 45:742–748, 01 2012.
- [30] Abu-Farah, L., Al-Qaessi, F., and Schönbacher, A. Cyclohexane/water dispersion behaviour in a stirred batch vessel experimentally and with cfd simulation. *Procedia Computer Science*, 1(1):655 – 664, 2010. ICCS 2010.
- [31] Gillis, Paul, Hommersom, Gerrit, and Schäfer, Matthias. A comparison of several cfd approaches for predicting gas-liquid contacting in a cylindrical tank agitated with a single rushton turbine. vol. 448, 01 2002.
- [32] Kerdouss, F., Bannari, A., Proulx, P., Bannari, R., Skrga, M., and Labrecque, Y. Two-phase mass transfer coefficient prediction in stirred vessel with a cfd model. *Computers & Chemical Engineering*, 32(8):1943 – 1955, 2008.
- [33] Wodolazski, Artur. Cfd-population balance modelling of catalyst particles in solid-liquid rushton turbine-agitated tank reactor in scale-up study. *Powder Technology*, 313:312 – 322, 2017.
- [34] Kamla, Y., Bouzit, M., Hadjeb, A., Arab, I. M., and Beloudane, M. Cfd study of the effect of baffles on the energy consumption and the flow structure in a vessel stirred by a rushton turbine. *Mechanika*, 22:190+, 2020/8/30/ 2016. 3.
- [35] Azargoshasb, Hamidreza, Mousavi, Seyyed Mohammad, Jamialahmadi, Oveis, Shojaosadati, Seyed Abbas, and Mousavi, Seyyed Babak. Experiments and a three-phase computational fluid dynamics (cfd) simulation coupled

- [48] Bao, Yuyun, Yang, Jie, Wang, Bingjie, and Gao, Zhengming. Influence of impeller diameter on local gas dispersion properties in a sparged multi-impeller stirred tank. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(4):615 – 622, 2015.
- [49] Bao, Yuyun, Wang, Bingjie, Lin, Mingli, Gao, Zhengming, and Yang, Jie. Influence of impeller diameter on overall gas dispersion properties in a sparged multi-impeller stirred tank. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(6):890 – 896, 2015.