

بررسی اثر زاویه پره بر عملکرد مخازن اختلاط

چکیده: در این پژوهش تاثیر زاویه پره بر توزیع جریان دو فازی (جامد-مایع) در مخزن همزن دار دارای پروانه جریان محوری (PBT) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه سازی شد. مدل جریان آشفته $k-\varepsilon$ استاندارد همراه با مدل چند فازی اولری-اولری (E-E) برای شبیه سازی جریان دو فازی استفاده شد. خواص جریان دو فازی در امتداد محور مخزن با داده های موجود در ادبیات اعتبارسنجی و تطابق خوبی مشاهده شد. در ادامه تاثیر زاویه پره بر شرایط هیدرودینامیکی جریان سیال درون مخزن و همچنین توزیع کسر حجمی فاز جامد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، حداکثر مولفه ی سرعت شعاعی با افزایش زاویه پره از ۴۵ به ۷۵ درجه نسبت به افق، به مقدار ۴۵/۶٪ افزایش می یابد. همچنین مشاهده گردید، با افزایش زاویه پره در سرعت همزنی ثابت، میزان توان مورد نیاز برای اختلاط به ۲/۱۷ برابر افزایش می یابد.

واژه های راهنما: مخزن همزن دار، دینامیک سیالات محاسباتی، مدل $k-\varepsilon$ استاندارد، جریان دو فازی، کسر حجمی

راضیه صفا

دکتری مهندسی شیمی

الهام سلطانی

کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، مرکز پژوهش و توسعه فناوریانه مهندسی مکانیک، گروه شرکت های ایبکو، کرمان

مرتضی عبدالزاده*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۸

Raziyeh Safa

PhD. of Chemical Engineering

Elham Soltani

M.Sc. of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering Research and Technological Development, IBKO Group of Companies, Kerman

Morteza Abdolzadeh*

Associate Professor of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical and Material Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman

Investigation of the impeller angle effect on the performance of mixing tanks

Abstract: In the present study, the effect of blade angle on two-phase flow (liquid-solid) distribution in a stirred tank with a pitched-blade turbine (PBT) was simulated using computational fluid dynamics (CFD). To simulate the solid-liquid two-phase flow, the standard $k-\varepsilon$ turbulence model coupled with the Eulerian-Eulerian (E-E) Multi-Fluid Model was employed. The two-phase flow properties along the tank axis were computed and validated by the available data in the literature. Then, the effect of the blade angle on the fluid flow inside the tank as well as the solid phase volume fraction distribution were investigated. Results indicated that increasing the blade angle from 45 to 75 degrees at a constant speed, increased the maximum radial velocity and power consumption by 45.6% and 217%, respectively.

Keywords: Stirred tank, CFD, Standard $k-\varepsilon$ model, Two phase flow, Volume fraction

۱- مقدمه

مخزن، از رایج ترین مشکلات در زمینه همزنی در مخازن همزن دار است، که با اصلاح طراحی تیغه ها و تغییر در زاویه پره ها، می توان رفتار اختلاط را بهبود داد و از تشکیل نواحی مرده و نشست در زیر پروانه جلوگیری کرد.

لی و همکاران در سال ۲۰۲۱ یک مطالعه جامع CFD برای درک ویژگی های هیدرودینامیکی یک مخزن سر پوشیده بدون بفل انجام دادند. آن ها در کار خود برای شبیه سازی جریان آشفته در مخزن، از مدل اغتشاش تنش رینولدز^۲ (RSM) استفاده کردند و چرخش پروانه را با استفاده از رویکرد تک قاب مرجع^۳ (SRF) شبیه سازی کردند. آن ها عنوان کردند که فاصله پره از کف مخزن و ضخامت تیغه ها تأثیرات کمی بر میدان جریان در مخزن بدون بفل دارد. همچنین بیان کردند که تأثیر پارامترهای عملیاتی و هندسی بر روی عدد توان در مخزن بدون بفل بسیار متفاوت از مخزن دارای بفل است [۴].

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ به دلیل کمبود مطالعات در راستای ساختار جریان و ویژگی های میدان جریان در همزن های ترکیبی، اثر سه تیغه ترکیبی^۴ (TBC) بر روی میدان جریان را مورد بررسی قرار دادند. در نهایت آن ها عنوان کردند که همزن های ترکیبی TBC می تواند به طور کامل سیال را تحت جریان آرام، جریان گذرا و جریان آشفته مخلوط کنند. علاوه بر این، همزن نوع TBC-B همیشه دارای درصد ناحیه مرده کمتری نسبت به همزن نوع TBC-A است، که نشان می دهد اثر اختلاط همزن نوع TBC-B نسبت به همزن نوع TBC-A برتر است [۵].

شرون و همکاران به بررسی تأثیر هندسه پروانه بر هیدرودینامیک راکتور بیو لیچینگ دو طبقه جامد-مایع که بیشترین استفاده را در مقیاس صنعتی دارند، پرداختند. آنها از مدل اولری-اولری گرانولار با شش طرح متفاوت پروانه شعاعی و محوری استفاده کردند. نتایج نشان داد که عدد توان در واحد حجم می تواند برای پیش بینی کیفیت تعلیق مورد استفاده قرار گیرد، زیرا کیفیت اختلاط مستقل از طراحی بیو راکتور برای یک P/V معین است. آنها همچنین نشان دادند که افزایش بار جامد، باعث افزایش قابل توجه میزان مصرف برق در واحد حجم، برای دستیابی به کیفیت تعلیق معین می شود [۶]. کاظم زاده و همکاران به دلیل اهمیت تعلیق در سیستم های متراکم از ذرات جامد، به پیش بینی رفتار چنین سیستم هایی پرداختند. زیرا حضور بالای ذرات (تراکم بالای فاز ثانویه) به شدت بر هیدرودینامیک جریان تولید شده توسط پروانه ها، تأثیر می گذارد. هدف اصلی آنها ارزیابی عملکرد سه نوع پروانه متفاوت در هم زدن دوغاب های بسیار غلیظ با ذرات جامد درشت بود [۷]. گو و همکاران هیدرودینامیک فرآیند اختلاط ذرات شناور و

استخراج جامد-مایع یکی از روش های استخراج فلزات از باطله های معدنی است. در استخراج جامد-مایع، در طی یک واکنش شیمیایی با کمک حلال مناسب، ماده معدنی هدف، از باطله های معدنی جدا می شود. پخش یکنواخت مواد شرکت کننده در واکنش، مهمترین دلیل جهت پیشرفت واکنش شیمیایی است. باید خاطر نشان کرد، که فرایند اختلاط و نفوذ، به دلیل ماهیت آن، فرایندی کند است، به همین دلیل، جهت پیشرفت واکنش شیمیایی باید از همزنی استفاده شود. برای همزنی و اختلاط، روش های مختلفی وجود دارد، که از بین روش های مختلف، اختلاط توسط همزن بالاترین کاربرد را دارد. بر همین اساس، استخراج جامد-مایع برای داشتن بازده و عملکرد بالا، با استفاده از راکتور های همزن دار انجام می شود [۱].

همان گونه که عنوان شد، جهت انتقال جرم بهینه و اختلاط مطلوب فازها، از دستگاه های همزنی مکانیکی استفاده می شود. پارامترهای زیادی همچون جزئیات هندسی مخزن، تعداد بفل و مشخصات پروانه، بر عملکرد مخازن همزن دار تأثیرگذار است. درک اینکه چگونه این پارامترها بر عملکرد مخزن های همزن دار تأثیر می گذارد، به طور قابل توجهی به بهینه سازی عملکرد این تجهیزات کمک می کند. اما ذکر این نکته حائز اهمیت است، که بررسی راکتور های صنعتی به دلیل مقیاس بالای این تجهیزات، به دلیل تامین مواد اولیه و تنظیم دقیق راکتور، هزینه بر و وقت گیر است. اما می توان به کمک شبیه سازی، فرآیند را با خطای کمتری پیاده سازی و نتایج را مشاهده کرد. این کار علاوه بر اینکه باعث کاهش هزینه ها می گردد، باعث می شود که در مدت زمان کمتری به نتیجه مطلوب رسید. در عصر حاضر، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به عنوان یک ابزار موثر و قدرتمند در تحقیقات کاربردی و بنیادی برای پیش بینی دینامیک سیالات محلی، واکنش های شیمیایی و پدیده های مرتبط مانند انتقال گرما و جرم در مخازن همزن دار، ظاهر شده است [۲،۳].

در مرحله ی اول، مطالعه هیدرودینامیک جریان های دو فازی جامد-مایع، برای طراحی و عملکرد مخازن همزن دار به عنوان سیستم های اختلاط، ضروری است. در زمینه تعلیق ذرات جامد در مایع، مطالعات متعددی صورت گرفته است که تأثیر پارامترهای مختلفی همچون نوع پروانه، زاویه پره ها و ... را بر چگونگی اختلاط مورد بررسی قرار داده اند. مشکلات ناشی از تشکیل مناطق مرده در درون مخزن، نشست ذرات جامد در کف

³ Single Reference Frame

⁴ Three-Blade Combined

¹ Computational Fluid Dynamic (CFD)

² Reynolds Stress Turbulence Model

ویکتور و همکاران در سال ۲۰۲۲ با هدف کاهش توان مصرفی در فرآیند اختلاط درون مخازن همزن دار، طرح جدیدی از پروانه PBT به همراه فلنج را ارائه کردند. عملکرد تیغه های جدید با شکل فلنج های پیشرو، مشخص کرد که تاثیر اصلی فلنج ها، کاهش مومنتوم بیش از اندازه ی سیال در بالای تیغه ها و کاهش جداسازی جریان است. این کاهش، تاثیر تشکیل گردابه ها را محدود کرده و پمپاژ پروانه را افزایش می دهد و با کاهش درگ فشاری، راندمان را بهبود می بخشد [۱۲].

پاتیل و همکاران به توسعه مدل CFD مخزن اختلاط و بهینه سازی ابعاد ناحیه سیال دوار داخلی برای مدل MRF پرداختند [۱۳]. آنها عنوان کردند که بهترین منطقه همزنی سیال دوار درون ناحیه اطراف پروانه، با داده های وو و همکاران برای میانگین سرعت شعاعی، میانگین سرعت مماسی و میانگین سرعت محوری تطابق دارد [۱۴].

کاظم زاده و همکاران به بررسی تاثیر مشکلات عددی بر پیش بینی نتایج مبتنی بر مدل RANS در مخازن تک فاز پرداختند. آنها تاثیر پارامترهای مختلف از جمله اندازه شبکه، طرح های گسسته سازی، سرعت متوسط، نرخ اتلاف آشفتگی را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که اتلاف آشفتگی با افزایش اندازه ذرات، به دلیل افزایش فعل و انفعالات فازهای جامد-جامد و جامد-مایع افزایش می یابد. همچنین در یک محدوده مشخص از اندازه ذرات، سیالیت بیشتری در مقایسه با ذرات با اندازه های بزرگ تر مشاهده می شود و این موضوع باعث همگنی بیشتر دوغاب می گردد. آنها نشان دادند که شدت جریان متلاطم و نیروی درگ اعمال شده بر ذرات جامد در نتیجه افزایش غلظت جامد، کاهش می یابد. در واقع، تعلیق ذرات بزرگ در دوغاب های بسیار غلیظ، به شدت تلاطم بالاتر (سرعت محوری بالاتر) و گردش مایع قوی (نیروی درگ) نیاز دارد، تا اثر نیروهای گرانشی و اینرسی بالا بر روی ذرات جامدات را جبران کند. بنابراین، سرعت پروانه و عدد توان مورد نیاز برای شرایط فقط تعلیق، با افزایش غلظت جامد افزایش می یابد [۱۵].

مخزن اختلاط، قلب فرایند استخراج جامد-مایع محسوب می شود. طراحی این تجهیز باید به گونه ای صورت گیرد که توانایی اختلاط بین فاز ها وجود داشته باشد. مشخصات طراحی چون هندسه و ساختار مخزن، هندسه پروانه، فاصله پروانه از کف مخزن، زاویه پره ها و سرعت پروانه بر عملکرد بهینه تجهیز در شرایط عملیاتی مختلف تاثیر بسزایی دارند. از سوی دیگر، هر گونه پیشرفت در درک هیدرودینامیکی اتفاقات درون مخزن، می تواند به افزایش راندمان اختلاط کمک کند. از آنجایی که گروه شرکت های ایبکو در زمینه فرایند های معدنی فعالیت دارد، در

فرورفته در یک مخزن همزن دار با پروانه شیب تیغه^۱ (PBT) دارای چهار تیغه و پره های فراکتال^۲ را با استفاده از CFD مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان می دهد که کیفیت اختلاط ذرات شناور و فرورفته با افزایش سرعت پروانه افزایش می یابد. اختلاف چگالی کمتر بین دو فاز مایع-جامد و قطر ذرات کوچکتر منجر به درجه تعلیق بالاتری می شود. پروانه فراکتال می تواند سرعت یکپارچه آب را افزایش دهد و کیفیت تعلیق را در مقایسه با پروانه PBT، تحت مصرف برق ثابت، به طور فزاینده ای بهبود ببخشد. در همین حال، پروانه فراکتال می تواند اندازه گردابه عقبی را کاهش دهد و مصرف برق را نسبت به پروانه PBT در همان سرعت پروانه به طور قابل توجهی کاهش دهد [۸]. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ برای بهبود عملکرد هم زنی در سیستم های اختلاط جامد-مایع، تاثیر سه پروانه مختلف از جمله، پروانه شیب تیغه دارای پره های سوراخ شده^۳ (PBPT)، پروانه شیب تیغه دارای پره های لب اره ای^۴ (BCBT) و پروانه شیب تیغه دارای پره های سوراخ شده و لب اره ای^۵ (BCPBT) را مورد بررسی قرار دادند. برای مدل سازی اختلاط و همزنی، از روش E-E با تئوری جنبشی جریان دانه ای استفاده کردند. نتایج آن ها نشان می دهد که پروانه های جدید، به ویژه BCPBT، قادر به تولید جت های پر سرعت در فرآیند چرخش هستند که نه تنها می توانند اندازه گرداب های عقب و اختلاف فشار تیغه پروانه را کاهش دهند، بلکه پارامترهای گرادیان سرعت و تلاطم را نیز افزایش می دهند و باعث بهبود کیفیت تعلیق جامد-مایع و کاهش مصرف برق می شوند [۹].

حسینی و همکاران با توجه به اهمیت اختلاط و توان مصرفی در راکتور های صنایع شیمیایی، یک چهار چوب محاسباتی برای به حداقل رساندن مصرف برق راکتور همزن دار ارائه کردند. آن ها الگوی جریان، پارامتر های تلاطم و توان مصرفی را در سه نوع پروانه توربین راشتون، به صورت تجربی و عددی با استفاده از CFD بررسی کردند. نتایج محاسباتی آن ها نشان می دهد که عدد توان می تواند با تغییر شکل پره های پروانه تا میزان ۴۸٪ کاهش یابد [۱۰]. لی و همکاران در سال ۲۰۲۲ با هدف بررسی اثر طراحی جدید پروانه PBT بر روی پارامتر های توان مصرفی، ظرفیت پمپاژ، راندمان پمپاژ، تعلیق جامدات، توزیع جامدات و انرژی جنبشی آشفته، پنج طرح جدید پروانه PBT را بررسی کردند. بررسی آن ها کاهش عدد توان، افزایش راندمان پمپاژ را برای پروانه های اصلاح شده گزارش می کند. علاوه بر این، آن ها بیان کردند که افزودن اتصالات بر روی تیغه ها هم اثرات مثبت و هم منفی بر عملکرد پروانه و اختلاط جریان های چند فازی دارد که به موقعیت نسبی اتصالات و به جهت چرخش بستگی دارد [۱۱].

⁴ Bionic Cut Blade Turbine (BCBT)

⁵ Bionic Cut punched Blade Turbine (BCBT)

¹ Pitched-Blade Turbine (PBT)

² Fractal

³ Pitched-Blade Punched Turbine (PBPT)

این مخزن در واقع از یک بدنه استوانه ای با کف محدب (عدسی مانند) تشکیل شده است. ارتفاع بدنه استوانه ای شکل (H_c)، قطر داخلی مخزن (T) و ارتفاع عدسی کف (H_e) به ترتیب برابر با ۱۳۰۰، ۱۳۰۰ و ۲۲۰ میلی متر می باشد. چهار بفل با زاویه ۹۰ درجه نسبت به همدیگر، درون مخزن قرار گرفته اند. کف این مخزن در راستای کاهش مناطق مرده و برای داشتن اختلاط بهینه، محدب در نظر گرفته شده است. بر همین اساس، ارتفاع سیال درون مخزن به اضافه نصف ارتفاع عدسی، برابر با قطر مخزن در نظر گرفته شد. شکل (۱ ب)، شماتیک پروانه PBT، که دارای چهار پره با پمپاژ رو به بالا با چرخش پاد ساعتگرد است، را نشان می دهد. سایر پارامترهای طراحی مخزن در جدول (۱) گزارش شده است. در این مخزن، چگالی سیال ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، چگالی ذرات جامد ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، اندازه متوسط ذرات جامد ۱۰۶ میکرون، نسبت جامد به مایع ۴۵۵ گرم بر لیتر، درصد جرمی ذرات جامد ۳۲٪ و درصد حجمی ذرات جامد تقریباً ۱۸٪ می باشد.

جدول ۱ مشخصات هندسی مخزن همزن دار

ردیف	پارامتر	نماد	مقدار (mm)
۱	قطر مخزن	T	۱۳۰۰
۲	ارتفاع عدسی	H _e	۲۲۰
۳	قطر پروانه	D	۵۷۰
۴	فاصله پروانه از کف مخزن	C	۴۸۶
۵	قطر هاب	D _{hub}	۷۰
۶	قطر شفت	D _s	۶۰/۳
۷	عرض پره ها	B _w	۹۰
۸	طول پره ها	B _l	۲۵۰
۹	عرض بفل	w _b	۱۳۰
۱۰	طول بفل	H _b	۱۳۰۰

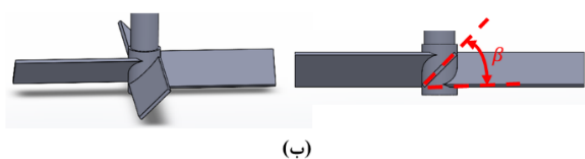
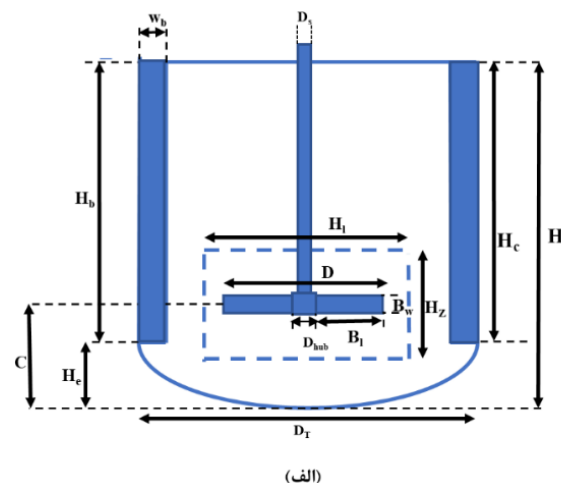
۲-۱- معادلات حاکم و شرایط مرزی

در این پژوهش جهت بررسی رفتار هیدرودینامیکی جریان دو فازی جامد-مایع درون مخزن همزن دار، از شبیه سازی سه بعدی جریان ناپایدار استفاده شد. روش اولری-اولری به دلیل بالا بودن درصد حجمی فاز ثانویه برای توصیف رفتار هر فاز به صورت جداگانه به کار برده شد. رابطه (۱) و (۲)، معادله پیوستگی و معادله مومنتوم را بر اساس اصول بقای جرم و مومنتوم، گزارش کرده است.

مرکز پژوهش و توسعه فناورانه مهندسی مکانیک گروه شرکت های ایبکو، مخزن اختلاطی با حجم مفید ۱/۸ متر مکعب برای فرآیند استخراج جامد-مایع طراحی شده است. در پژوهش حاضر با هدف بررسی چگونگی عملکرد مخزن اختلاط طراحی شده و تاثیر زاویه پره ها بر عملکرد این مخزن اختلاط، شبیه سازی جریان دو فازی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی صورت گرفت. برای این هدف، مخزن همزن دار دارای بفل، شامل پروانه PBT که دارای چهار تیغه با زاویه ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه ای رو به بالا بودند، مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله اول، با استفاده از مدل های مناسب جریان های دو فاز، صحت شبیه سازی انجام شده، بررسی شد. سپس، تاثیر زاویه پروانه بر عملکرد مخزن مورد بررسی تحت شرایط عملیاتی یکسان، بررسی گردید. همچنین، تاثیر محل تشکیل نواحی گردابه ای و اندازه ی آنها بر کیفیت اختلاط مورد ارزیابی قرار گرفت. در پایان، گشتاور و میزان توان مصرفی پره در شرایط یکسان عملیاتی و در زاویه های مختلف پره، نیز محاسبه و گزارش شد.

۲- توصیف سیستم

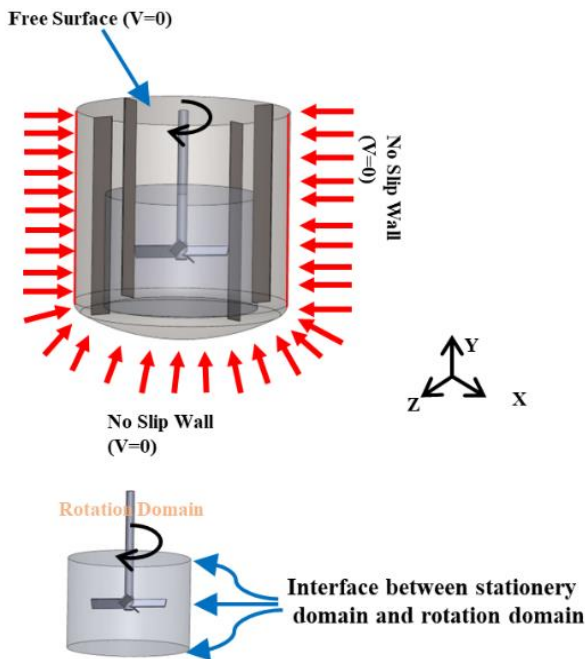
در شکل (۱ الف)، شماتیک مخزن همزن دار طراحی شده توسط مرکز پژوهش و توسعه فناورانه مهندسی مکانیک گروه شرکت های ایبکو به تصویر کشیده شده است.



شکل ۱ الف- مخزن اختلاط طراحی شده با کف محدب، ب- پروانه PBT دارای چرخش پاد ساعتگرد

$k-\varepsilon$ استاندارد برابر با $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ، $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ، $\sigma_k = 1.0$ و $\sigma_\varepsilon = 1.3$ است.

در شکل (۲)، شرایط مرزی به کار برده شده برای هندسه مورد نظر گزارش شده است. همان گونه که از شکل (۲) مشخص است، دیواره های کف مخزن، دیواره های جانبی، پره ها و بفل ها به عنوان دیوار با شرط مرزی بدون لغزش و دیواره سطح مخزن، به عنوان دیوار ثابت با تنش برشی صفر تعریف شده است. از شرط مرزی دیواره متحرک از نوع چرخان با سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه، برای شفت مخزن استفاده شده است. همچنین از مدل چار چوب مرجع چندگانه (MRF) برای شبیه سازی حرکت پره ها استفاده شد. بر اساس این مدل، یک ناحیه داخلی دیسک مانند (شکل (۲)) در اطراف پره ها لحاظ می شود، تا بتوان چرخش را در این حجم به کمک مدل MRF اعمال کرد. دیواره های این ناحیه به عنوان مرز مشترک بین ناحیه داخلی و ناحیه خارجی آدر نظر گرفته شده اند.



شکل ۲ شرایط مرزی مخزن و محدوده ی ناحیه مدل MRF

۳- روش حل عددی

در این تحقیق از مدل چند فازي اولری-اولری برای شبیه سازی جریان دو فازي استفاده گردید. برای شبیه سازی هر چه بهتر جریان آشفته، از مدل جریان آشفته $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شد. معادلات با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بر پایه روش حجم محدود جداسازی شدند و این در حالی بود که شبیه سازی

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_q \rho_q \vec{u}_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q \vec{u}_q) \\ = -\alpha_q \nabla P + \nabla \cdot \tau_q + \alpha_q \rho_q g + \vec{F}_{drag,q} \\ + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q} \end{aligned} \quad (2)$$

از آنجایی که این معادلات برای هر فاز به صورت جداگانه حل می شوند، اندیس q در این معادلات هم اشاره به فاز سیال (1) و هم اشاره به فاز جامد (s) دارد. در این معادلات، پارامتر α کسر حجمی هر فاز، ∇P گرادیان فشار، \vec{u} سرعت، g شتاب جاذبه، ρ دانسیته و τ_q تانسور تنش-کرنش، است. در رابطه ی (۲)، $F_{drag,q}$ نیروی درگ، $F_{wl,q}$ نیروی جرم مجازی، $F_{td,q}$ انتشار آشفستگی، $F_{lift,q}$ نیروی لیفت و $F_{vm,q}$ نیروی روانکاری دیواره است. از بین نیروهای نام برده شده در بالا، بر طبق تحقیقات انجام شده، تاثیر نیروی درگ بین فازي از تاثیر سایر نیروها بیشتر است [۱۶]. همین مبنای، در این شبیه سازی تنها اثر نیروی درگ با استفاده از مدل درگ شیلر و نیومن در نظر گرفته شد.

جهت شبیه سازی رفتار جریان آشفته در این شبیه سازی، از معادله $k-\varepsilon$ استاندارد، استفاده شد. این مدل کامل ترین مدل جریان ناآرام چند فازي می باشد. در این مدل همان گونه که از اسم آن مشخص است، معادلات انرژی جنبشی آشفته (k) و همچنین شدت پخش توربولانسی (ε) برای هر فاز به صورت جداگانه محاسبه می گردد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} k) \\ = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_k - \rho \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \varepsilon) \\ = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) \end{aligned} \quad (4)$$

در روابط (۳) و (۴)، پارامترهای G_k و μ_T به ترتیب تولید تلاطم ناشی از گرادیان های سرعت متوسط و لزجت گردابه ای است. در نهایت، $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ ، σ_k و σ_ε پارامترهای ثابتی هستند. مقدار ثابت ها بر اساس ثابت های تجربی مورد استفاده در مدل

³ Outer Domain

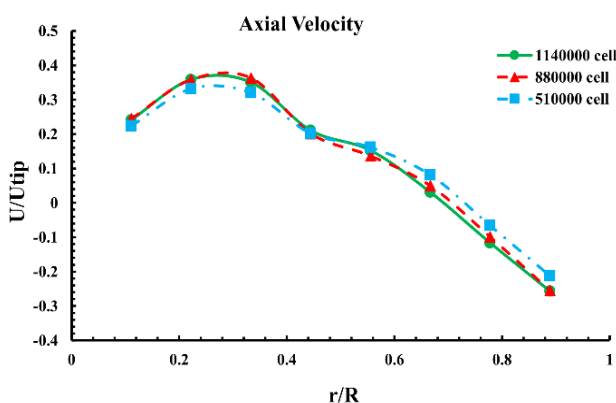
¹ Multiple Reference Frame

² Inner Domain

محاسبات، مش ۸۸۰۰۰۰ برای انجام محاسبات و ارائه نتایج استفاده شد.

جدول ۲ تعداد سلول ها و زمان محاسبات

نوع شبکه	تعداد سلول ها	زمان محاسبات (hr)
نوع ۱	۵۱۰۰۰۰	۴۶
نوع ۲	۸۸۰۰۰۰	۹۱
نوع ۳	۱۱۴۰۰۰۰	۱۳۶



شکل ۳ بررسی استقلال از مش با مولفه بدون بعد سرعت محوری

۴-۲- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی شبیه سازی حاضر، به دلیل فقدان داده های آزمایشگاهی جهت کالیبره کردن داده های آزمایشگاهی با داده های شبیه سازی، اعتبارسنجی روش حل، با کمک نتایج تجربی [۱۷] و نتایج عددی [۱۶] تحقیقات گذشته، انجام شد.

مشخصات هندسه مورد استفاده برای اعتبارسنجی، در مرجع [۱۶] آورده شده است. جهت شبیه سازی پروانه از روش MRF استفاده شد و ناحیه داخلی یا قاب چرخانی که برای این منظور در نظر گرفته شد، دارای ارتفاع ۱۴۰ میلی متر و قطر ۲۱۶ میلی متر (متوسط قطر مخزن و قطر پروانه) است و فاصله این ناحیه از کف مخزن ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شد. ابتدا سیستم به صورت تک فاز و در مرحله بعد، دو فاز شبیه سازی شد. همچنین شبیه سازی به صورت ناپیوسته انجام شد. به این معنی که ذرات جامد و سیال از ابتدا در مخزن حضور داشتند. ارتفاع اولیه بستر ذرات جامد ۷۰ میلی متر از کف مخزن در نظر گرفته شد و شعاع این بستر ۱۰ میلی متر لحاظ شد و سرعت ذرات جامد و سیال در ابتدا روی صفر تنظیم شد.

به دلیل پیچیدگی مسئله ابتدا شبیه سازی سیال تک فازی بدون ذرات انجام شد، تا ابتدا از عملکرد صحیح همزنی و شرایط هیدرودینامیکی جریان، اطمینان حاصل شود. در این حالت به دلیل تک فاز بودن سیال، سرعت چرخش پروانه، ۳۶۰ دور بر

به صورت ناپایدار، با گام زمانی ۰/۱ ثانیه انجام گرفت. جهت حل همزمان میدان سرعت و فشار، از الگوریتم SIMPLE استفاده گردید. به دلیل تراکم ناپذیری جریان از حلگر Pressure-Based و برای فرمولاسیون سرعت، گزینه فرمولاسیون مطلق به دلیل استفاده از مدل MRF در نظر گرفته شد. جهت گسسته سازی معادلات مومنتوم، انرژی جنبشی توربولانسی، شدت پخش توربولانسی و معادله کسر حجمی، از طرح بالادست مرتبه دوم استفاده شد.

سرعت چرخش پروانه (N) ۱۵۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شد. در شروع فرایند شبیه سازی، فرض گردید که فاز ثانویه، در کف مخزن با ارتفاع ۰/۴ متر به صورت ساکن قرار دارد. به منظور اطمینان از نتایج حاصل از شبیه سازی و همگرایی در هر گام زمانی، باقیمانده مربوط به معادلات، 10^{-5} در نظر گرفته شد. همچنین شرط دومی نیز جهت همگرایی لحاظ شد، که با پایدار شدن میانگین کسر حجمی فاز ثانویه در صفحه افقی انتخاب شده در موقعیت $Y=0.3H$ ، حل همگرا شود.

۴- نتایج و بحث

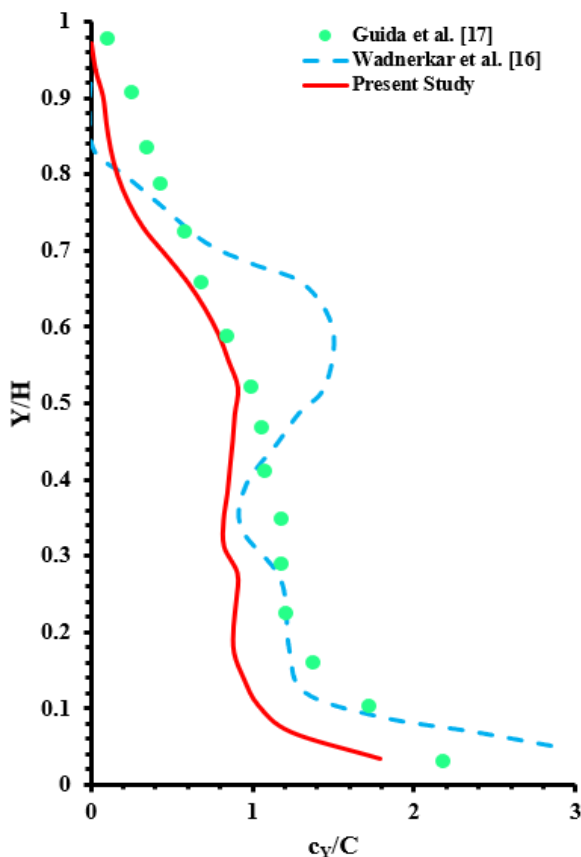
۴-۱- استقلال از شبکه

جهت اطمینان از تعداد سلول های محاسباتی بهینه و صرفه جویی در زمان محاسبات، سه شبکه با تعداد تقریبی ۵۱۰۰۰۰، ۸۸۰۰۰۰ و ۱۱۴۰۰۰۰ سلول ایجاد شد. در این مسئله از شبکه غیر سازمان یافته چهار وجهی استفاده شد. در بعضی نواحی مخزن به دلیل وجود گرادین های بالای سرعت، نیاز گردید که شبکه ریزتر از سایر نواحی انتخاب شود. افزایش تعداد سلول های محاسباتی در نواحی حساس به همزنی باعث گردید که در محدود خارج از ناحیه همزنی نیز، تعداد سلول های محاسباتی افزایش یابد. در زمانی که افزایش تعداد سلول های محاسباتی جهت رسیدن به جواب مطلوب انجام گردید، در کل سیستم اختلاف قابل ملاحظه ای در جواب های مسئله مشاهده نشد (شکل (۳)) و فقط زمان انجام محاسبات افزایش یافت (جدول (۲)). در واقع با افزایش تعداد سلول های محاسباتی جهت رسیدن به جواب بهینه، تغییر قابل توجهی در توزیع مولفه بدون بعد سرعت محوری سیال مشاهده نگردید، که این موضوع در شکل (۳) قابل مشاهده است.

همان گونه که از شکل (۳) و جدول (۲) قابل مشاهده است با تغییر تعداد مش، تغییر قابل توجهی در توزیع مولفه بدون بعد سرعت محوری سیال مشاهده نمی شود. در نتیجه بنابر زمان

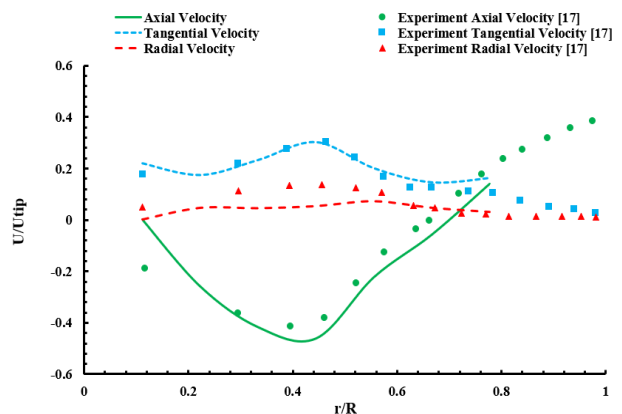
چرخش پروانه با توجه به مرجع [۱۷]، ۴۸۰ دور بر دقیقه لحاظ شد. این بار مولفه غلظت محوری بدون بعد ذرات جامد در راستای محور طولی مخزن (Y/H) و در موقعیت شعاعی نوک پروانه $(r/R=0.5)$ ، با دو مرجع داده های تجربی گویدا و همکاران [۱۷] و داده های عددی وندرکار و همکاران [۱۶]، در شکل (۵) مقایسه شد.

همان گونه که از شکل (۵) مشخص است، غلظت بدون بعد فاز ثانویه در بالای مخزن کمتر از ۱ و در انتهای مخزن از ۱ بیشتر است. این موضوع نشان دهنده نشست فاز ثانویه در کف مخزن و کاهش حضور ذرات جامد در بالای مخزن است. اما در میانه مخزن، مقدار غلظت بدون بعد ذرات جامد، تقریباً برابر با مقدار ۱ است، که همگنی کامل فاز ثانویه را در این محدوده، گزارش می کند. از سوی دیگر، با مقایسه غلظت بدون بعد شبیه سازی حاضر با نتایج گویدا و همکاران [۱۷]، مطابقت معقول تری را نسبت به نتایج شبیه سازی وندرکار و همکاران [۱۶]، گزارش می کند، که این اعتبارسنجی نشان داد، که روش انتخاب شده برای شبیه سازی مخزن طراحی شده توسط مرکز پژوهش و توسعه فناوریانه مهندسی مکانیک گروه شرکت های ایبکو بر اساس نتایج گزارش شده، با دقت قابل قبولی، مناسب است.



شکل ۵ مقایسه پروفایل غلظت محوری بدون بعد ذرات جامد در راستای محور مخزن با داده های تجربی [۱۷] و عددی [۱۶]

دقیقه در نظر گرفته شد [۱۷]. شکل (۴) مولفه های سرعت محوری، شعاعی و مماسی جریان را بر روی خطی در مکان $Y=0.2H$ نشان می دهد، که با مولفه های سرعت محوری، شعاعی و مماسی کار گویدا و همکاران [۱۷] در همین ناحیه مقایسه شده است.



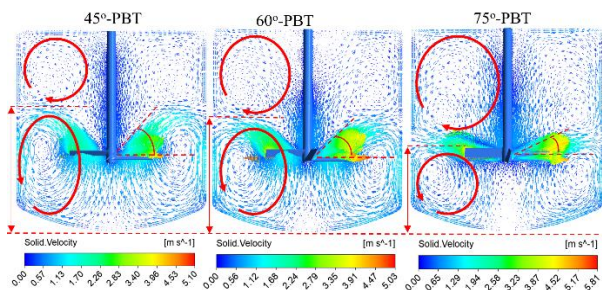
شکل ۴ مقایسه مولفه های سرعت محوری جریان شبیه سازی شده در تک فاز با نتایج تجربی [۱۷]

در شکل (۴)، پارامتر محور عمودی با سرعت نوک پروانه، بی شده است. در این صورت مولفه های سرعت سیال، از سرعت چرخش پروانه و قطر پروانه مستقل می شوند. در پژوهش حاضر، سرعت در نوک پره برابر با $U_{tip} = ND\pi = 2.7 \text{ m/s}$ است. همان گونه که مشاهده می شود، سرعت محوری بسیار منفی در صفحه پروانه به وجود آمده است و در ناحیه تخلیه پره (از نوک پره تا نزدیکی دیواره مخزن)، جهت حرکت سیال رو به بالا می شود. این حرکت سیال، یک حلقه جریان چرخشی در نزدیکی پروانه ایجاد می کند. در هنگام خروج از ناحیه پره، اگر قدر مطلق سرعت محوری مبنا قرار داده شود، کاهش در سرعت محوری مشاهده می شود. اما در ادامه، به دلیل خروج رو به بالای جریان در نزدیکی دیواره مخزن، به سرعت محوری افزوده می شود. همچنین حرکت مماسی سیال درون مخزن، به دلیل شیب ۴۵ درجه پره ها، ایجاد می شود. با توجه به نمودارهای موجود، می توان نتیجه گرفت که بزرگی مولفه سرعت شعاعی، در بین سایر مولفه های سرعت، از همه کمتر است. در نتیجه، با توجه به جواب های بدست آمده حاصل از شبیه سازی حاضر و مقایسه آن با کار [۱۷] می توان نتیجه گرفت که مولفه های سرعت از نظر میزان خطا، دارای خطای قابل قبولی هستند، که بیشترین میزان خطا قابل مشاهده، برابر با ۳/۵ درصد است.

در ادامه، فاز ثانویه (ذرات جامد)، به سیستم اضافه شد، که درصد جرمی ذرات جامد ۲۰٪ لحاظ شد. بر همین اساس سرعت

۴-۳- تاثیر زاویه پره ها بر کیفیت اختلاط فاز جامد

مخزن به دلیل سطح مایع، تغییر جهت را تجربه می کند. این باعث ایجاد حلقه گردش ثانویه با جریان رو به پایین می شود. در شکل (۶)، مسیر حرکت جریان (الگوی دوبل هشت) و کنتور سرعت فاز جامد آورده شده است. طبق این شکل، در نوک پروانه بیشترین سرعت وجود دارد. در ادامه تاثیر زاویه پروانه بر روی بردار سرعت فاز جامد در شکل (۷) نشان داده شده است. مطابق با این شکل، با افزایش زاویه پره ها نسبت به افق (از ۴۵ تا ۷۵ درجه)، زاویه خروج جریان از نوک پره ها کاهش می یابد. به گونه ای که در زاویه های بزرگتر، تمایل جریان خارج شده از نوک پروانه در راستای حرکت به سمت بالای مخزن، کمتر است. این کاهش تمایل حرکت جریان به سمت بالای مخزن، باعث می شود که ارتفاع حلقه چرخشی پایین، کمتر شود. با کاهش ارتفاع حلقه چرخشی پایین، شدت و بزرگی جریان شعاعی در پروانه با زاویه ۷۵ درجه نسبت به دو پروانه دیگر، بیشتر می شود و شدت جریان شعاعی با کاهش زاویه پره نسبت به افق (۴۵ درجه) کمتر می شود. در واقع در پروانه PBT-45، به دلیل کم بودن قدرت مولفه سرعت شعاعی، جریان تا بالای مخزن کشیده می شود. بر همین اساس است که اختلاط در راستای محوری در پروانه PBT-45 نسبت به دو پروانه دیگر، بهتر است.

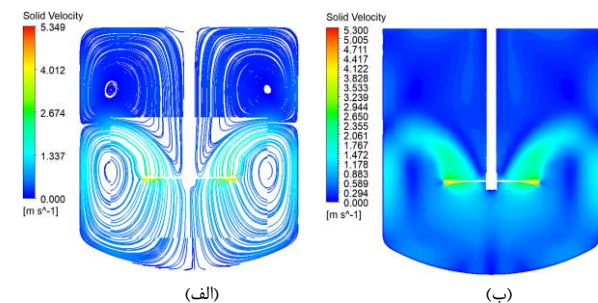


شکل ۷ تاثیر زاویه پروانه بر روی بردار سرعت فاز جامد

همچنین باید عنوان کرد که با افزایش زاویه پره نسبت به افق و غالب شدن جریان شعاعی بر جریان محوری درون مخزن، میزان نشست ذرات جامد در کف مخزن هم افزایش می یابد، که این موضوع در شکل (۸) با نمایش نقاط با مقدار ثابتی از کسر حجمی فاز جامد در حجم مخزن (ردیف اول شکل (۸)) و همچنین نمایش کنتور کسر حجمی فاز جامد (ردیف دوم شکل (۸)) قابل تشخیص است. ردیف اول شکل (۸)، حضور ذرات جامد با کسر حجمی ۰.۲۵ را در مخزن اختلاط گزارش می کند و ردیف دوم شکل (۸)، کنتور تغییرات کسر حجمی ذرات جامد را از ۰ تا ۲۵ درصد گزارش می کند. در واقع با افزایش زاویه پره ها نسبت به افق، با غالب شدن مولفه جریان شعاعی، مساحت ناحیه کم سرعت زیر پروانه افزایش می یابد و میزان نشست ذرات جامد بیشتر می شود.

همان گونه که در مقدمه هم عنوان شد، هدف استخراج جامد-مایع، انجام کامل واکنش شیمیایی در راستای آزاد شدن ماده هدف از باطله های معدنی است، که در این راستا مخازن همزن دار دارای پروانه های جریان محوری بسیار مفید می باشند. یکی از پارامترهای مهم در اختلاط بهینه این نوع پروانه ها، اثر زاویه پره ها نسبت به افق (β) است. با تغییر زاویه پره ها، الگوی جریان درون مخزن و کیفیت اختلاط درون مخزن، تحت تاثیر قرار می گیرد. در همین راستا، اثر سه زاویه مختلف ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه نسبت به افق بر عملکرد مخزن اختلاط در ادامه مورد بررسی قرار گرفت، که موقعیت این زاویه در شکل (۱) نشان داده شده است.

الگوی جریان در مخازنی که شامل پروانه PBT دارای جهت پمپاژ رو به بالا است، به صورت دوبل هشت می باشد، که در شکل (۶ الف) این الگو به تصویر کشیده شده است. بدین صورت که دو حلقه گردش جریان، یکی در قسمت بالایی مخزن و دیگری در قسمت پایین مخزن تشکیل می شود. حلقه جریانی که در بالای مخزن و در نزدیکی سطح مایع تشکیل شده است، مسئول تخلیه ذرات جامد است، این حلقه با سرعت نسبتاً کم، تلاطم کم و جریان معکوس شعاعی به داخل مخزن، در نزدیکی سطح مخزن مشخص می شود. در واقع جریانی که از نوک همزن خارج می شود، به سمت دیواره جانبی مخزن پرتاب می شود.



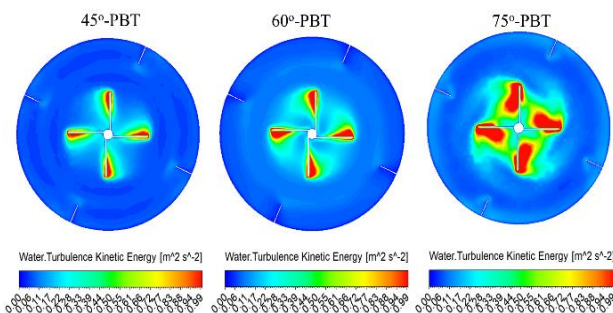
شکل ۶ الف- مسیر حرکت جریان و ب- کنتور سرعت سیال درون مخازن دارای پروانه PBT با پمپاژ رو به بالا

با توجه به مولفه شعاعی جریان، مایع به سمت دیواره مخزن، در محلی که دو مسیر محوری، یکی به سمت سطح مایع مخزن و دیگری به سمت پایین مخزن پیش روی خود دارد، حرکت می کند. در نیمه پایینی مخزن، مایع با فشار از دیواره مخزن پایین می آید و با برخورد با کف مخزن، حرکت آن در جهت بالا هدایت می شود و به قسمت زیرین ناحیه جاروب شده پروانه، کشیده می شود. این مسیر گردش، حلقه گردش اولیه را تشکیل می دهد. حرکت محوری مایع نزدیک به سطح تانک در ناحیه بالایی

۴-۴- انرژی جنبشی آشفته

انرژی جنبشی آشفته یکی از پارامترهای مهم جریان آشفته است که با استفاده از آن می توان اغتشاش و نا آرامی را در نواحی مختلف مخزن بررسی کرد [۲۳-۱۸]. در این بخش تاثیر زاویه پره ها بر روی انرژی جنبشی مورد بررسی قرار گرفته است.

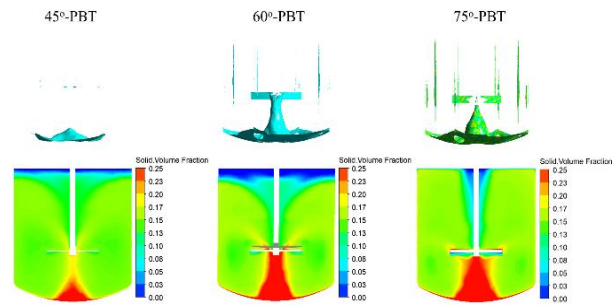
همان گونه که از شکل (۱۰) مشخص است، همزنی باعث آشفته شدن در جریان سیال درون مخزن می شود. این آشفته شدن در ناحیه اطراف پروانه نسبت به سایر نواحی مخزن بیشتر است. در ناحیه ای که توسط پروانه جاروب می شود، حداکثر مقدار آشفته شدن در نوک پروانه گزارش شده است. این در حالی است که در خارج از این ناحیه، مقدار انرژی جنبشی آشفته پایین و برابر با صفر می باشد. همچنین تاثیر زاویه پره ها نسبت به افق بر روی شدت اغتشاش و انرژی جنبشی آشفته در شکل (۱۰) نیز گزارش شده است. با توجه به این شکل، اغتشاش و شکل موج با افزایش زاویه پروانه، افزایش می یابد. در پروانه 750-PBT، موجی که در پشت پره ها تشکیل شده است، به صورت بیضی مانند است. در واقع با افزایش شدت مولفه شعاعی، شدت اغتشاش در راستای شعاعی و در پشت پره ها افزایش می یابد هر چه که زاویه پره نسبت به افق کمتر می شود، از بزرگی موج تشکیل شده در پشت پره ها، کاسته می شود. در نهایت می توان نتیجه گرفت، با کاهش زاویه پروانه از ۷۵ تا ۴۵ درجه، جریان شعاعی به محوری تبدیل می شود. این موضوع برای پروانه PBT که خاصیت اصلی آن ایجاد الگوی جریان محوری درون مخازن با هدف اختلاط و همگنی یکنواخت می باشد، مناسب می باشد.



شکل ۱۰ توزیع انرژی جنبشی آشفته در یک صفحه ای افقی عبوری از میانه پروانه در زاویه های مختلف

۴-۵- توان مصرفی

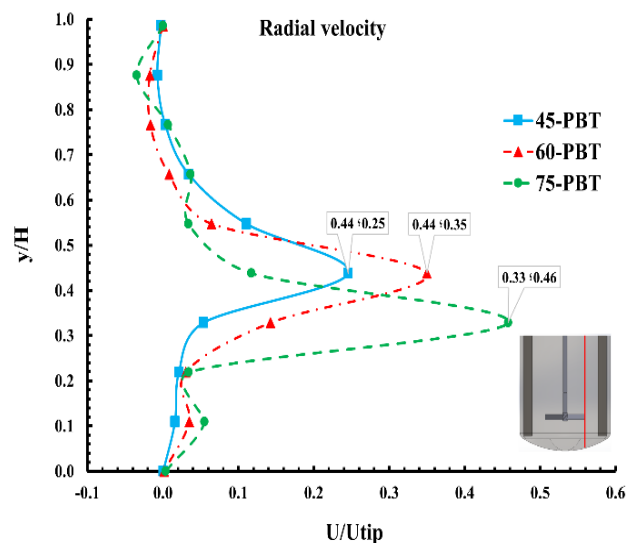
توان مصرفی (P) و عدد توان (N_p) به عنوان یک مشخصه اصلی در طراحی مخازن همزن استفاده می شود. علاوه بر این، عدد توان را می توان به عنوان پارامتر اعتبارسنجی در شبیه سازی ها استفاده کرد. برای محاسبه عدد توان در مخازن همزن دار دو روش، اتلاف آشفته و روش گشتاور وجود دارد.



شکل ۸ تاثیر زاویه پروانه بر مقدار ثابتی از کسر حجمی فاز جامد (ردیف اول) و کنتور کسر حجمی دو بعدی فاز جامد (ردیف دوم)

تاثیر زاویه پره ها نسبت به افق، بر روی مولفه سرعت شعاعی بدون بعد فاز ثانویه (U/U_{tip}) در شکل (۹) به صورت کمی گزارش شده است. در این شکل، تغییرات مولفه بدون بعد سرعت شعاعی بر روی خطی در لبه پروانه و در راستای محور مخزن رسم شده است. با کاهش زاویه پروانه نسبت به افق، شدت مولفه بدون بعد سرعت شعاعی کمتر می شود و هرچه زاویه پروانه نسبت به افق بیشتر باشد، شدت مولفه بدون بعد سرعت شعاعی بیشتر می گردد.

در واقع با افزایش زاویه پره ها نسبت به افق (از ۴۵ تا ۷۵ درجه)، شدت و بزرگی مولفه بدون بعد سرعت شعاعی از ۰/۲۵ به ۰/۴۶ افزایش می یابد. باید این موضوع را نیز عنوان کرد، که با افزایش زاویه پره نسبت به افق، مکانی (Y/H) که در آن بیشترین مقدار مولفه ی سرعت شعاعی رخ می دهد، نیز تغییر کرده و به سمت کف مخزن (از ۰/۴۴ تا ۰/۳۳) نزدیک تر می شود، که این موضوع خود دلیل بر کوچک شدن حلقه چرخشی پایین و عدم رسیدن جریان کافی به سطح مخزن است.



شکل ۹ تاثیر زاویه پروانه بر روی مولفه بدون بعد سرعت شعاعی فاز جامد در امتداد محور مخزن در ۱۵۰ دور بر دقیقه

۴-۶- دبی پمپاژ پروانه

در ادامه، تاثیر زاویه پروانه بر روی دبی پمپاژ (q) یا عدد پمپاژ (Nq) پروانه بررسی شد و نتایج در جدول ۴ گزارش گردید. عدد پمپاژ در واقع میزان ظرفیت پمپاژ یک پروانه است. این عدد، همانند عدد توان پروانه ها تابع عدد رینولدز، هندسه مخزن و نوع پروانه می باشد [۹،۱۱]. در سیستم های دو فازی جهت محاسبه ظرفیت پمپاژ پروانه، باید از مجموع دبی های تخلیه از نوک پروانه برای هر دو فاز جامد و سیال استفاده کرد.

$$N_q = \frac{q}{ND^3} = \frac{q_l + q_s}{ND^3} = \frac{\int \alpha_l u_l dA + \int \alpha_s u_s dA}{ND^3} \quad (8)$$

در این رابطه، q دبی تولید شده توسط پروانه است یا به عبارت دیگر دبی تخلیه پروانه می باشد. اگر سیستم دو فازی باشد، q، مجموع دبی های تخلیه از نوک پروانه برای دو فاز جامد و سیال ($q = q_s + q_l$) است. برای محاسبه دبی تخلیه پروانه، باید یک سطح دایره ای با قطری برابر با قطر پروانه، در مکان تخلیه پروانه زده شود (نزدیکترین سطح در بالای پروانه، به دلیل چرخش پاد ساعتگرد پروانه) و انتگرال روی سطح گرفته شود. با رسم سطح در ناحیه تخلیه سه پره مذکور، دبی تخلیه پروانه محاسبه شد و نتایج گزارش شد. با افزایش زاویه پروانه، طبق انتظار، چون الگوی جریان شعاعی در مخزن حاکم می شود و بیشترین تخلیه جریان در راستای شعاعی انجام می گیرد، میزان دبی تخلیه از پروانه در راستای محور کاهش می یابد و عدد پمپاژ نیز کاهش می یابد.

جدول ۴ تاثیر زاویه پره بر روی عدد پمپاژ پروانه

نوع پروانه	45°-PBT	60°-PBT	75°-PBT
عدد جریان (Nq)	۰/۶۹۷۳	۰/۶۶۷۳	۰/۲۸

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار ناپایدار یک مخزن همزن دار جریان دو فازی جامد-مایع با یک پروانه جریان محوری از نوع ۴ پره ای PBT به کمک CFD شبیه سازی شد. مدل k-ε استاندارد، برای جریان آشفته، مدل اولری-اولری (E-E) برای شبیه سازی جریان دو فازی و رویکرد چار چوب مرجع چندگانه (MRF) برای شبیه سازی دامنه چرخش استفاده شد. در این تحقیق با بررسی تاثیر

در روش اتلاف آشفتگی، توان تلف شده توسط پروانه (P_ε) در درون مایع با توان مصرف شده توسط همزن برابر است. این روش بر مبنای محاسبه انتگرال میزان اتلاف انرژی (ε) در مخزن است. در نهایت، عدد توان پروانه را می توان از انتگرال روی حجم نرخ انرژی اتلاف آشفتگی پیش بینی کرد [۲۴]، که در رابطه (۵) گزارش شده است.

$$P_\epsilon = \rho \int_V \epsilon dV \quad (5)$$

در روش گشتاور، توان مصرفی متناسب با گشتاور اعمال شده بر روی تمام سطوح پروانه است. توان مصرفی از روش گشتاور (P_τ)، مطابق با رابطه (۶) قابل محاسبه است.

$$P_\tau = 2\pi N\tau \quad (6)$$

در این معادله، τ گشتاور، N سرعت همزنی می باشد. در میان روش های گزارش شده جهت محاسبه توان مصرفی، روش گشتاور و یا روش ممان نیرو بر روی پروانه، نسبت به روش اتلاف آشفتگی از دقت بالاتری جهت محاسبه توان مصرفی پره برخوردار است. بر همین اساس در این پژوهش، از روش اول برای محاسبه توان پره استفاده شد. باید عنوان کرد توان مصرفی یک مخزن دو فازی در مقایسه با مخزن تک فازی به دلیل حضور ذرات جامد در مخزن بیشتر است. در ادامه در رابطه (۷) طبقه محاسبه عدد توان نیز گزارش شده است.

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (7)$$

در نتیجه برای سه زاویه مختلف، با محاسبه گشتاور اعمال شده بر روی پروانه در سرعت چرخش ۱۵۰ دور بر دقیقه، توان مصرفی در جدول (۳) گزارش شده است. نتایج گزارش شده در جدول نشان می دهد که توان همزنی با افزایش زاویه پره ها نسبت به افق افزایش می یابد. در واقع با افزایش زاویه پره نسبت به افق و غالب شدن مولفه سرعت شعاعی بر مولفه سرعت محوری، شدت اغتشاش و نا آرامی در راستای شعاع مخزن افزایش می یابد. در نتیجه پروانه به توان بیشتری برای همزنی نیازمند است. به گونه ای که در پروانه 75°-PBT، میزان توان مصرفی، ۲/۱۷ برابر بیشتر از پروانه 45°-PBT است.

جدول ۳ تاثیر زاویه پره بر روی عدد توان در سرعت چرخش ۱۵۰ دور بر دقیقه

نوع پروانه	45°-PBT	60°-PBT	75°-PBT
گشتاور (N.m)	۹۴/۱۵	۱۵۱/۱۳۷	۲۰۴/۱۳
توان (W)	۱۴۷۸/۱۵	۲۳۷۲/۸۵	۳۲۰۴/۸۴
عدد توان (N _p)	۱/۴۳	۲/۲۹	۳/۱

نیروی انتشار آشفنگی (N)	F_{td}
نیروی روانکاری دیواره (N)	F_{wl}
نیروی جرم مجازی (N)	$F_{vm,q}$
شتاب جاذبه (m/s^2)	g
تولید تلاطم ناشی از گردآیدان‌های سرعت	G_k
ارتفاع بفل (mm)	H_b
ارتفاع استوانه ای مخزن (mm)	H_c
ارتفاع عدسی (mm)	H_e
قطر ناحیه داخلی (mm)	H_i
ارتفاع سیال (mm)	H
ارتفاع ناحیه داخلی (mm)	H_z
سرعت چرخش (rpm)	N
عدد توان	N_p
عدد جریان	N_q
توان (W)	P
عدد رینولدز ذرات	Re_p
ضخامت بفل (mm)	t_b
بردار سرعت (m/s)	\vec{u}
سرعت نوک پروانه (m/s)	U_{tip}
عرض بفل (mm)	W_b

علائم یونانی

درصد حجمی ذرات (%)	α
دانسیته سیال (kg/m^3)	ρ_q
دانسیته ذرات جامد (kg/m^3)	ρ_p
تنسور تنش	τ
ویسکوزیته دینامیکی ($kg/m.s$)	μ_q

۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، از مرکز پژوهش و توسعه فناورانه مهندسی مکانیک گروه شرکت‌های ایبکو به دلیل حمایت‌های مادی و معنوی از این پژوهش تشکر می‌نمایند.

۸- مراجع

- [1] F. K. Crundwell, "Progress in the mathematical modelling of leaching reactors," *Hydrometallurgy*, vol. 39, no. 1, pp. 321-335, 1995/10/01/ 1995, doi: 10.1016/0304-386X(95)00039-J.
- [2] R. S. S. Raja Ehsan Shah, B. Sajjadi, A. A. Abdul Raman, and S. Ibrahim, "Solid-liquid mixing analysis in stirred vessels," vol. 31, no. 2, pp. 119-147, 2015, doi: 10.1515/revce-2014-0028.
- [3] L. Xie and Z.-H. Luo, "Modeling and simulation of the influences of particle-particle interactions on dense solid-liquid suspensions in stirred vessels," *Chemical Engineering Science*, vol. 176, pp. 439-453, 2018/02/02/ 2018, doi: 10.1016/j.ces.2017.11.017.
- [4] L. Li and B. Xu, "Numerical analysis of hydrodynamics characteristics in a top-covered

زاویه پره نسبت به افق، چگونگی توزیع فاز جامد در مخزن، تشکیل نواحی گردابه ای، مکان تشکیل و اثر آنها بر رفتار هیدرودینامیکی مخزن، مورد بررسی قرار گرفت، که نتایج پژوهش در ادامه آورده شده است.

- افزایش زاویه پره نسبت به افق، باعث کاهش ارتفاع حلقه چرخشی جریان در قسمت پایین مخزن و افزایش ارتفاع حلقه چرخشی بالای مخزن می‌شود.
 - مولفه سرعت شعاعی جریان با افزایش زاویه پره نسبت به افق بیشتر می‌شود و سهم مولفه محوری جریان کاهش می‌یابد. این موضوع نشست بیشتر فاز جامد در کف مخزن را نتیجه می‌دهد.
 - افزایش زاویه پروانه و متعاقباً افزایش مولفه سرعت شعاعی، باعث افزایش شدت اغتشاش در جهت شعاعی و در پشت پره های پروانه می‌شود.
 - بررسی عدد توان و میزان گشتاور مصرفی پروانه نشان داد که با افزایش زاویه پره نسبت به افق، به علت شعاعی شدن الگوی جریان درون مخزن، توان مورد نیاز برای چرخش پره در سرعت همزنی ثابت، افزایش می‌یابد.
 - قرارگیری پره در زاویه کم نسبت به افق، باعث می‌شود که توانایی پروانه در تخلیه جریان از سطح خود، افزایش یابد و پره، عدد پمپاژ بالاتری را گزارش کند.
- در نهایت می‌توان عنوان کرد برای رسیدن به اختلاط یکنواخت و بهینه در مخازن همزن دار جهت انجام کامل واکنش های شیمیایی، تشکیل الگوی جریان به صورت محوری در این گونه مخازن دارای اهمیت است. در این راستا باید از پروانه هایی که خاصیت ایجاد جریان در راستای محور مخزن را دارند، استفاده کرد. همچنین جهت و زاویه قرارگیری پره های پروانه، نیز باید به گونه ای تعیین شود، که باعث تغییر الگوی جریان پروانه نشود.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

طول پره ها (mm)	B_l
ضخامت پره ها (mm)	B_T
ارتفاع پره ها (mm)	B_w
فاصله پروانه از کف (mm)	C
قطر پروانه (mm)	D
قطر هاب (mm)	D_{Hub}
قطر میانگین ذرات جامد (mm)	d_p
قطر شفت (mm)	D_s
قطر مخزن (mm)	D_T
نیروی درگ (N)	F_D
نیروی لیفت (N)	F_{lift}
نیروی حجمی (N)	F

- ISH Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. 200-209, 2021/04/03 2021, doi: 10.1080/09715010.2018.1535921.
- [14] H. Wu and G. K. Patterson, "Laser-Doppler measurements of turbulent-flow parameters in a stirred mixer," *Chemical Engineering Science*, vol. 44, no. 10, pp. 2207-2221, 1989/01/01/ 1989, doi: 10.1016/0009-2509(89)85155-3.
- [15] A. Kazemzadeh, F. Ein-Mozaffari, and A. Lohi, "Hydrodynamics of solid and liquid phases in a mixing tank containing high solid loading slurry of large particles via tomography and computational fluid dynamics," *Powder Technology*, vol. 360, pp. 635-648, 2020/01/15/ 2020, doi: 10.1016/j.powtec.2019.10.040.
- [16] D. Wadnerkar, M. O. Tade, V. K. Pareek, and R. P. Utikar, "CFD simulation of solid-liquid stirred tanks for low to dense solid loading systems," *Particuology*, vol. 29, pp. 16-33, 2016/12/01/ 2016, doi: 10.1016/j.partic.2016.01.012.
- [17] A. Guida, A. W. Nienow, and M. Barigou, "PEPT measurements of solid-liquid flow field and spatial phase distribution in concentrated monodisperse stirred suspensions," *Chemical Engineering Science*, vol. 65, no. 6, pp. 1905-1914, 2010/03/15/ 2010, doi: 10.1016/j.ces.2009.11.005.
- [18] M. Yadegari and A. Bak Khoshnevis, "Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers," *The European Physical Journal Plus*, vol. 136, pp. 1-19, 2021, doi: 10.1140/epjp/s13360-021-01071-1.
- [19] M. Yadegari and A. B. Khoshnevis, "Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems," *The European Physical Journal Plus*, vol. 135, no. 6, p. 534, 2020, doi: 10.1140/epjp/s13360-020-00545-y.
- [20] M. Yadegari and A. B. Khoshnevis, "Numerical study of the effects of adverse pressure gradient parameter, turning angle and curvature ratio on turbulent flow in 3D turning curved rectangular diffusers using entropy generation analysis," *The European Physical Journal Plus*, vol. 135, no. 7, p. 548, 2020, doi: 10.1140/epjp/s13360-020-00561-y.
- [21] M. Yadegari, "An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm," *The European Physical Journal Plus*, vol. 136, no. 10, p. 1019, 2021, doi: 10.1140/epjp/s13360-021-01999-4.
- unbaffled stirred tank," *Chemical Papers*, vol. 75, pp. 5873-5884, 2021, doi: 10.1007/s11696-021-01767-9.
- [5] Y. Zhang, L. Zhang, H. Wang, X. Ma, S. Yu, Y. Yan, and H. Bu, "Comparative Study on the Power Consumption and Flow Field Characteristics of a Three-Blade Combined Agitator," *Processes*, vol. 9, no. 11, doi: 10.3390/pr9111962.
- [6] Y. Zhang, L. Zhang, H. Wang, X. Ma, S. Yu, Y. Yan, and H. Bu, "Comparative Study on the Power Consumption and Flow Field Characteristics of a Three-Blade Combined Agitator," *Processes*, vol. 9, no. 11, doi: 10.3390/pr9111962.
- [7] A. Kazemzadeh, F. Ein-Mozaffari, and A. Lohi, "Effect of impeller type on mixing of highly concentrated slurries of large particles," *Particuology*, vol. 50, pp. 88-99, 2020/06/01/ 2020, doi: 10.1016/j.partic.2019.07.004.
- [8] D. Gu, M. Ye, X. Wang, and Z. Liu, "Numerical investigation on mixing characteristics of floating and sinking particles in a stirred tank with fractal impellers," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 116, pp. 51-61, 2020/11/01/ 2020, doi: 10.1016/j.jtice.2020.11.013.
- [9] W. Zhang, Z. Gao, Q. Yang, S. Zhou, and D. Xia, "Study of Novel Punched-Bionic Impellers for High Efficiency and Homogeneity in PCM Mixing and Other Solid-Liquid Stirs," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 21, doi: 10.3390/app11219883.
- [10] S. S. Hoseini, G. Najafi, B. Ghobadian, and A. H. Akbarzadeh, "Impeller shape-optimization of stirred-tank reactor: CFD and fluid structure interaction analyses," *Chemical Engineering Journal*, vol. 413, p. 127497, 2021/06/01/ 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.127497.
- [11] B. Li and J. Wang, "Mixing intensification through modifications of PBT impellers studied by DEM-VOF method," *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, vol. 177, p. 109001, 2022/07/01/ 2022, doi: 10.1016/j.cep.2022.109001.
- [12] V. X. Mendoza-Escamilla, G. Rivadeneyra-Romero, H. Mollinedo, J. A. Yañez-Varela, I. Gonzalez-Neria, A. Alonzo-Garcia, and S. A. Martínez-Delgadillo, "Effect of Modified Impellers with Added Leading Edges Flanges on Pumping Efficiency in Agitated Tanks," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 62, no. 1, pp. 535-544, 2023/01/11 2023, doi: 10.1021/acs.iecr.2c03321.
- [13] H. Patil, A. K. Patel, H. J. Pant, and A. Venu Vinod, "CFD simulation model for mixing tank using multiple reference frame (MRF) impeller rotation,"

- Plus*, vol. 137, no. 9, p. 1042, 2022, doi: 10.1140/epjp/s13360-022-03260-y.
- [24] D. Chapple, S. M. Kresta, A. Wall, and A. Afacan, "The Effect of Impeller and Tank Geometry on Power Number for a Pitched Blade Turbine," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 80, no. 4, pp. 364-372, 2002/05/01/ 2002, doi: 10.1205/026387602317446407.
- [22] M. Yadegari and A. Bak Khoshnevis, "A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, pp. 1-15, 2020, doi: 10.1007/s40430-020-02495-z.
- [23] H. Haghightajoo, M. Yadegari, and A. Bak Khoshnevis, "Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel," *The European Physical Journal*