

بهینه سازی انرژی جنبشی توربالانسی در مخازن همزن دار با استفاده از پروانه های اصلاح شده جریان محوری: مطالعه عددی

چکیده: در این تحقیق، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، تأثیر پروانه های اصلاح شده جریان محوری (PBT) بر توزیع انرژی جنبشی توربالانسی و توان مصرفی در مخازن همزن دار بررسی شد. برای شبیه سازی جریان دو فازی جامد-مایع از مدل اولرین-اولرین (E-E) و برای تحلیل جریان آشفته از مدل $k-\epsilon$ استاندارد استفاده گردید. به منظور شبیه سازی ناحیه چرخشی پروانه از روش چارچوب مرجع چندگانه (MRF) استفاده گردید. در این پژوهش، ابتدا توزیع فشار اطراف تیغه ها و سپس توزیع انرژی جنبشی آشفتگی و یکنواختی آن بررسی شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که اصلاح تیغه ها با کاهش انرژی جنبشی توربالانسی و بهبود در یکنواختی توزیع آن می تواند توان مصرفی را کاهش دهد. به طور مشخص اصلاح تیغه ها در جهت عرضی باعث افزایش ۷۱٪ یکنواختی آشفتگی و کاهش ۱۰٪ توان مصرفی و اصلاح در جهت طولی باعث افزایش ۶۸٪ یکنواختی و کاهش ۲۲٪ توان مصرفی می شود.

واژه های راهنما: مخزن همزن دار، پروانه های اصلاح شده، انرژی جنبشی توربالانسی، توان مصرفی، دینامیک سیالات محاسباتی

راضیه صفا*

دکتری مهندسی شیمی،
مرکز پژوهش و توسعه فناوریانه
مهندسی مکانیک، گروه شرکت های
ایکو، کرمان/
استاد مدعو، دانشکده مهندسی
شیمی، دانشگاه شهید باهنر کرمان،
کرمان

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

Optimizing turbulent kinetic energy in agitated tanks using modified axial flow impellers: A numerical study

Raziyeh Safa*
PhD. of Chemical
Engineering, Department of
Mechanical Engineering
Research and Technological
Development, IBKO Group
of Companies, Kerman/
Lecture, Department of
Chemical Engineering,
Shahid Bahonar University
of Kerman, Kerman

Abstract: In this study, Computational Fluid Dynamics (CFD) was employed to investigate the impact of modified pitched blade turbines (PBT) on turbulent kinetic energy distribution and power consumption in agitated tanks. The solid-liquid two-phase flow was simulated using the Eulerian-Eulerian (E-E) approach combined with the Multiple Reference Frame (MRF) method, while the standard $k-\epsilon$ turbulence model was applied to capture the turbulent flow characteristics. The pressure distribution around the impeller blades was first analyzed, followed by an evaluation of turbulent kinetic energy distribution and mixing homogeneity. The simulation results demonstrated that modifying the blade geometry can significantly reduce turbulent kinetic energy and lower power consumption. Specifically, transverse blade modifications improved turbulence uniformity by 71% and reduced power consumption by 10%, while longitudinal modifications enhanced turbulence uniformity by 68% and achieved a 22% reduction in power consumption.

Keywords: Agitated tank, Modified impellers, Turbulent kinetic energy, Power consumption, Computational Fluid Dynamics

۱- مقدمه

سرعت چرخش و اندازه ذرات را جهت سنجش بهبود اختلاط بررسی کردند و نشان دادند که پروانه‌های فراکتال قادر به افزایش کارایی اختلاط و کاهش مصرف انرژی در مخازن همزن‌دار هستند.

ژانگ و همکاران [۴] عملکرد سه نوع پروانه شامل پروانه پیچ‌بلید پانچ‌شده^۳، پیچ‌بلید تیغه برش بیونیک^۴ و پیچ‌بلید پانچ‌شده برش بیونیک^۵ را بر عملکرد اختلاط مواد جامد و مایع، به ویژه در مخلوط‌های شامل تغییر فاز^۶ با کمک دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار دادند. بررسی آنها نشان داد که این پروانه‌ها منجر به بهبود اختلاط ذرات جامد، کاهش زمان اختلاط و کاهش مصرف انرژی در مقایسه با پروانه‌های سنتی می‌شوند. همچنین استفاده از این پروانه‌ها در سرعت‌های بالای همزنی و در سیالات با ویسکوزیته بالا، نتایج بهتری را ارائه می‌دهد، که نشان دهنده توانایی بالای این پروانه‌ها برای فرآیندهای اختلاط در مقیاس بزرگ، به ویژه در کاربردهای تغییر فاز است. سریگو و همکاران [۵]، جریان آشفتگی و گردابه‌های ایجاد شده توسط پروانه‌های جدید با تیغه‌های شیاردار (U و V شکل) در یک مخزن همزن‌دار را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، محققین با استفاده از شبیه‌سازی گردابه‌های جداشونده^۷ و آزمایش‌های تجربی با تکنیک پایش تصویر ذرات^۸ نشان دادند که پروانه‌های شیار دار با شکل‌های U و V، به طور موثری انرژی جنبشی توربالانسی را در مقایسه با پروانه‌های معمولی کاهش می‌دهند. همچنین باعث کاهش مصرف انرژی (۴ تا ۶ درصد) و بهبود کارایی در محدوده عدد رینولدز مشخص، نسبت به پروانه‌های معمولی می‌شوند.

استلماچ و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۲ به بررسی کارایی پروانه‌های پلیمری نوع جریان محوری با مقاطع عرضی متفاوت پرداختند. این تحقیق تأثیر هندسه تیغه‌ها بر توزیع سرعت و انرژی اختلاط در یک مخزن همزن‌دار را با استفاده از تکنیک‌های پایش تصویر ذرات بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که پروانه‌ها با تیغه‌های متقارن، انرژی کمتری برای اختلاط نیاز دارند و این میزان تا ۲۰٪ کمتر از پروانه استاندارد جریان محوری است. این موضوع نشان می‌دهد که با استفاده از پروفیل‌های مناسب تیغه‌ها می‌توان به بهبود کارایی در فرایند اختلاط دست یافت و از مصرف انرژی کاست. لی و همکاران [۷]، با استفاده از روش‌های المان گسسته^۹ و VOF^{۱۰} به شبیه‌سازی رفتار

یکی از فرآیندهای مهم در صنایع مهندسی و معدنی، جداسازی جامد از مایع است که به دلیل کاربرد فراوان، این فرایند توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. مخازن همزن‌دار یکی از ابزارهایی هستند که این فرآیند در آنها انجام می‌شود. انرژی جنبشی توربالانسی (TKE) در فرآیند همزنی و اختلاط نقش کلیدی دارد و بر جنبه‌های مختلف همزنی تأثیر می‌گذارد. مقدار انرژی جنبشی توربالانسی به ازای واحد جرم سیال، مستقیماً بر میزان اختلاط و پراکندگی مواد تأثیرگذار است. برای دستیابی به بهترین نتیجه، توزیع یکنواخت انرژی جنبشی توربالانسی در مخزن لازم است. اما عواملی مانند نوع پروانه، ساختار مخزن و موقعیت بفل‌ها می‌توانند باعث شکل‌گیری نواحی با انرژی جنبشی توربالانسی بالا و نواحی ساکن با انرژی جنبشی توربالانسی پایین شوند که این امر مانع از اختلاط بهینه می‌شود. اگر مقدار انرژی جنبشی توربالانسی بسیار بالا باشد، ناآرامی شدید بین سیال و تجهیزات درون مخزن به وجود می‌آید که باعث فرسایش و خرابی احتمالی تجهیزات می‌شود. از این رو، بهینه‌سازی شدت آشفتگی برای بهبود فرآیند اختلاط و کاهش مصرف انرژی ضروری است. استفاده از پروانه‌های جدید با طراحی بهینه می‌تواند به کاهش شدت آشفتگی و بهبود یکنواختی آن، کمک کند. در ادامه، به بررسی یافته‌های پژوهشی در این زمینه پرداخته شده است.

لی و همکاران [۱]، نشان دادند که پروانه‌های فراکتال به دلیل طراحی منحصر به فرد خود باعث ایجاد الگوهای پیچیده‌تر جریان و توزیع یکنواخت‌تر انرژی جنبشی در داخل مخازن همزن‌دار می‌شوند. این نوع پروانه‌ها توانایی بالایی در افزایش راندمان اختلاط دارند، زیرا باعث کاهش نقاطی با آشفتگی بیش از حد یا بسیار کم در محیط سیال می‌شوند. در نتیجه، اتلاف انرژی کاهش و بهره‌وری کلی فرایند، افزایش می‌یابد. استفاده از این نوع پروانه‌ها نه تنها می‌تواند باعث کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های صنعتی شود، بلکه همچنین عمر تجهیزات را به دلیل کاهش تنش‌های مکانیکی ناشی از جریان‌های توربالانسی بالا افزایش می‌دهد. همچنین گو و همکاران نیز [۲،۳] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۲ رفتار مخلوط‌های جامد-مایع را در حضور پروانه‌های فراکتال مطالعه کردند. آنها پارامترهایی نظیر

⁶ Phase Change Material (PCM)

⁷ Detached Eddy Simulation (DES)

⁸ Particle Image Velocimetry (PIV)

⁹ Discrete Element Method (DEM)

¹⁰ Volume of Fluid (VOF)

¹ Turbulent Kinetic Energy (TKE)

² Computational Fluid Dynamics (CFD)

³ Pitched-Blade Punched Turbine (PBPT)

⁴ Bionic Cut Blade Turbine (BCBT)

⁵ Bionic Cut punched Blade Turbine (BCBT)

دارای سوراخ‌های فرکتالی باعث کاهش مصرف انرژی نسبت به پره‌های سنتی در سرعت‌های همزنی برابر می‌شود. همچنین، آنها بیان کردند که افزایش تعداد تکرارهای آرایش فرکتالی موجب افزایش مصرف انرژی و توان مصرفی می‌شود، اما همچنان این افزایش از نمونه‌های مرسوم و سنتی کمتر است. این طراحی نوین باعث افزایش شدت آشفستگی، تقویت اثر برش در سیال، کاهش ابعاد گردابه‌های پشت پره‌ها و بهبود گردش محوری ذرات جامد شده که در نهایت کیفیت تعلیق ذرات جامد را نسبت به پره‌های تیغه‌ای زاویه‌دار بهبود می‌بخشد. در مطالعه دیگری توسط گو و همکاران [۱۱]، پره‌های با برش‌های فرکتال دارای الگوی H بر روی همزن مخزن مایع-جامد متراکم پیاده‌سازی و به صورت تجربی و عددی با پره‌های سنتی جریان محوری مقایسه شدند. نتایج نشان داد که پره‌های فرکتال نسبت به پره‌های سنتی در سرعت همزن برابر، مصرف توان و عدد توان کمتری دارند و افزایش تعداد تکرارهای فرکتالی بر روی پره‌ها به کاهش بیشتر این مقادیر کمک می‌کند.

همان‌طور که اشاره شد، انرژی جنبشی توربالانسی نقشی کلیدی در فرایند اختلاط ایفا می‌کند و نوسانات زیاد یا کم این انرژی می‌تواند مشکلات جدی برای فرایند ایجاد کند. تاکنون تأثیر پارامترهای هیدرودینامیکی مختلف مانند نرخ اتلاف انرژی، انرژی جنبشی آشفته و سرعت جریان بر اختلاط، توسط محققان بسیاری بررسی شده است. با این حال، تحقیقات کمی به بررسی تأثیر اصلاحات در طراحی پروانه بر عملکرد مخزن‌های اختلاط، انرژی جنبشی توربالانسی و میزان توان مصرفی پرداخته‌اند. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر اصلاحات در پروانه جریان محوری بر عملکرد مخزن اختلاط انجام شده است.

۲- توصیف سیستم

در این پژوهش از یک ظرف همزن‌دار که توسط مرکز پژوهش و توسعه مهندسی مکانیک گروه شرکت‌های ایبکو طراحی شده است، استفاده شده است. این ظرف دارای شکل استوانه‌ای استاندارد با کف عدسی شکل و قطر $T=1300$ mm است. پروانه‌ای که برای هم‌زدن سیال به کار برده شده است، یک پروانه جریان محوری چهار پره است که زاویه حمله منفی ۴۵ درجه دارد. قطر پروانه برابر با $D=T/3$ و فاصله آن از کف مخزن معادل $C=T/3$ است. به منظور جلوگیری از چرخش مماسی سیال و ایجاد جریان محوری در مخزن، از چهار بفل با عرض $T/12$

هیدرودینامیکی و مشخصات اختلاط در تانک‌های همزن‌دار دارای سطح آزاد پرداختند. هدف این پژوهش، بهبود کارایی فرآیند اختلاط از طریق تغییر در طراحی پره‌های پروانه جریان محوری بوده است. آنها با ایجاد تغییراتی مانند افزودن شیارها یا قطعاتی به پره‌های پروانه جریان محوری، انواع مختلفی از پروانه‌های اصلاح‌شده را به دست آوردند. آنها عنوان کردند که تغییر در طراحی پروانه‌های جریان محوری می‌تواند به بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی در فرایندهای صنعتی منجر شود.

گونزالس-نریا و همکاران [۸] با استفاده از تکنیک تصویربرداری PIV و روش شبیه‌سازی مقیاس بزرگ^۱، به تحلیل رفتار جریان و اختلاط در سیستم‌های همزن‌دار با هدف اصلی، درک بهتر نحوه ایجاد جریان‌های آشفته و اختلاط در سیستم‌های همزن‌دار با تیغه‌های خاص که می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی این تجهیزات کمک کند، پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که تیغه‌ها با شیار V شکل، تأثیر قابل توجهی بر الگوی جریان و فرآیند اختلاط دارند و با علم بر این موضوع، می‌توان به بهبود عملکرد و کارایی همزن‌ها کمک کرد. آنها همچنین گزارش کردند که همزن با تیغه V شکل، نیروی شعاعی کمتری نسبت به یک همزن با تیغه تخت معمولی ایجاد می‌کند، که ناشی از ایجاد گردابه توسط همزن با تیغه V شکل در نزدیکی نوک همزن است.

لی و همکاران [۹]، جریان چندفازی جامد-مایع در تانک مجهز به همزن با طراحی نوین پره‌های Intermig را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. صحت نتایج شبیه‌سازی با آزمایش‌های مدل آبی تأیید گردید و تطابق بسیار خوبی مشاهده شد. مقایسه دقیق عملکرد اختلاط و تعلیق جامد در نمونه‌های مختلف همزن Intermig نشان داد که نسخه بهبود یافته این همزن، علاوه بر افزایش کیفیت اختلاط و تعلیق ذرات جامد، بیش از ۲۰٪ مصرف انرژی را نسبت به نمونه استاندارد کاهش می‌دهد. همچنین، تأثیر پره‌های داخلی بر مصرف توان ناچیز بوده و زاویه بهینه آنها ۴۵ درجه است، در حالی که پره‌های خارجی نقش مهمی در مصرف توان دارند و زاویه بهینه آنها نیز ۴۵ درجه تعیین گردید.

گو و همکاران [۱۰] با استفاده از طراحی جدیدی از پروانه‌ها که شامل آرایش فرکتالی با سوراخ‌های مشبک است به بررسی ویژگی‌های اختلاط جریان دو فاز جامد-مایع در مخزن‌های همزن‌دار پرداختند. نتایج کار آنها نشان داد که استفاده از پره‌ها

¹ Large Eddy Simulation (LES)

۲-۱- معادلات حاکم و شرط مرزی

برای ساده‌سازی محاسبات، سیال تراکم‌ناپذیر و ذرات جامد، به شکل کره‌ای و با اندازه یکسان در نظر گرفته شدند. همچنین جریان به صورت هم‌دما و به صورت دو فاز مایع-جامد مدل‌سازی شد. معادلات پیوستگی برای هر دو فاز (معادلات (۱) و (۲)) و معادلات مومنتوم (معادلات (۳) و (۴)) به‌طور هم‌زمان و به صورت جداگانه حل شدند [۱۲].

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \bar{U}_\alpha) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\beta \rho_\beta) + \nabla \cdot (r_\beta \rho_\beta \bar{U}_\beta) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha \bar{U}_\alpha) + \bar{U}_\alpha \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \bar{U}_\alpha) = \bar{F}_\alpha \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\beta \rho_\beta \bar{U}_\beta) + \bar{U}_\beta \nabla \cdot (r_\beta \rho_\beta \bar{U}_\beta) = \bar{F}_\beta \quad (4)$$

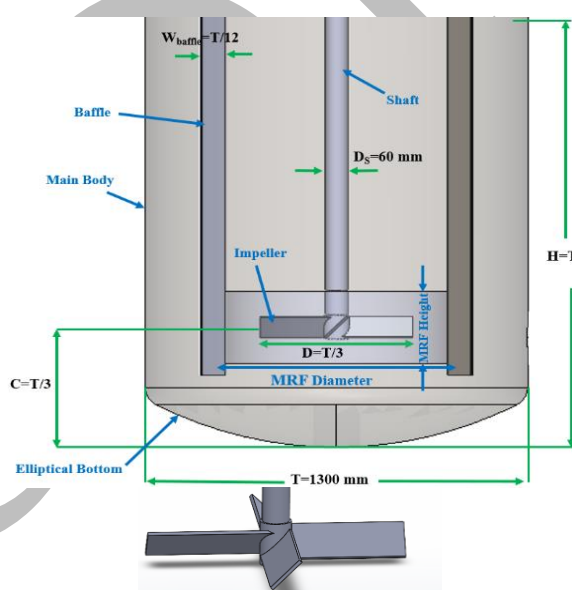
در معادلات فوق، زیرنویس‌های α و β به ترتیب نشان‌دهنده فازهای پیوسته و پراکنده است. r کسر حجمی، ρ چگالی و \bar{U} سرعت متوسط است و به‌طور واضح، $r_\alpha + r_\beta = 1$ می‌باشد. نیروهای وارد بر فازهای مایع (\bar{F}_α) و جامد (\bar{F}_β) که در معادلات مومنتوم (معادلات (۳) و (۴)) معرفی شده‌اند، شامل گرادیان فشار، نیروی گرانش و نیروی مومنتوم بین فاز می‌باشند که در ادامه در معادلات (۵) و (۶) تعریف شده‌اند.

$$\bar{F}_\alpha = \nabla \cdot (r_\alpha (\mu_\alpha + \mu_t) (\nabla \bar{U}_\alpha + (\nabla \bar{U}_\alpha)^T)) - r_\alpha \nabla P + r_\alpha \rho_\alpha \bar{g} + \bar{M}_{\alpha\beta} \quad (5)$$

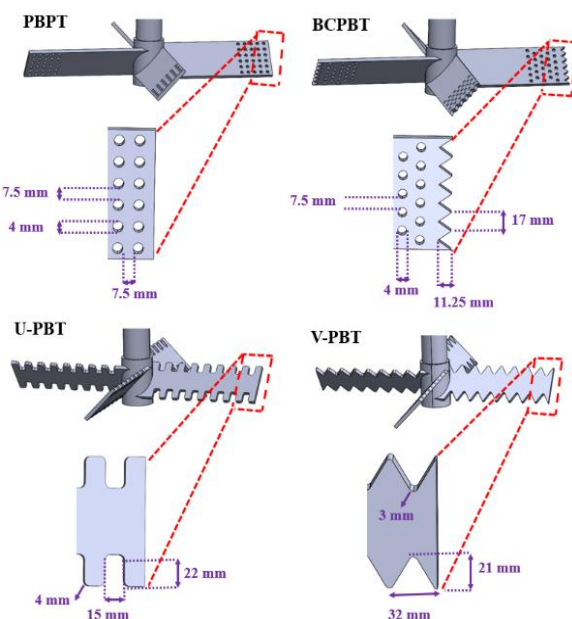
$$\bar{F}_\beta = \nabla \cdot (r_\beta \mu_\beta (\nabla \bar{U}_\beta + (\nabla \bar{U}_\beta)^T)) - r_\beta \nabla P + r_\beta \rho_\beta \bar{g} + \bar{M}_{\beta\alpha} \quad (6)$$

پارامترهای g شتاب گرانش، μ ویسکوزیته و P فشار (با فرض میدان فشار یکسان برای هر دو فاز) در معادلات فوق لحاظ شده‌اند. همچنین، نیروی مومنتوم بین فاز می‌باشد با نماد M در نظر گرفته شده است. در مدل مرجع چرخان، نیروی گریز از مرکز به عنوان نیروی حجمی در معادلات فوق گنجانده می‌شود. از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ همگن (معادلات (۷) و (۸)) برای شبیه‌سازی جریان نا آرام استفاده شده است که نتایج مناسبی را در این زمینه ارائه می‌دهد. همچنین ترم S و μ_t در معادلات (۷) و (۸) نیز در ادامه در معادلات (۹) تا (۱۱) معرفی شده‌اند.

استفاده شده است. سرعت چرخش پروانه $N=150$ rpm لحاظ شده است، که معادل با سرعت $U_{tip} = \pi DN = 4.5$ m/s در نوک پروانه است. دوغاب داخل مخزن، مخلوطی از آب با چگالی 1000 kg/m³ است و ذرات جامد با چگالی برابر با 2500 kg/m³ است. اندازه متوسط ذرات جامد 106 μ m و درصد حجمی این ذرات تقریباً ۱۸٪ می‌باشد. سایر مشخصات هندسی این تجهیز نیز در شکل (۱) آورده شده است. همچنین در شکل (۲) شماتیک پروانه‌های اصلاح‌شده PBT به همراه دیگر مشخصات ساختاری آنها نمایش داده شده است. پروانه‌های V-PBT و U-PBT به لحاظ طولی اصلاح شده‌اند، در حالی که پروانه‌های PBPT و BCPBT تغییرات عرضی داشته‌اند.



شکل ۱ شماتیک مخزن همزن‌دار به همراه پروانه PBT



شکل ۲ شماتیک پره‌های اصلاح‌شده PBT

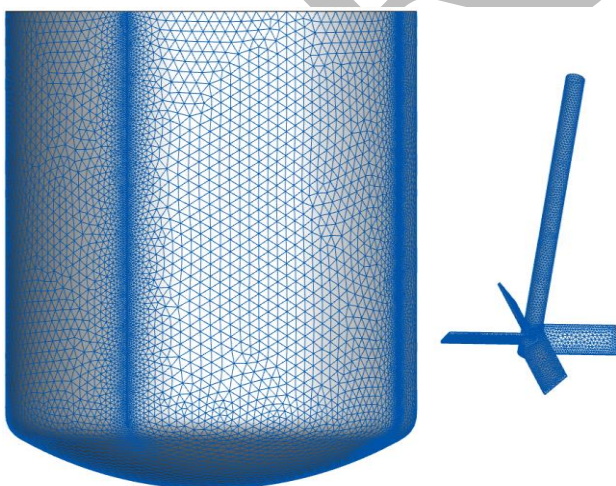
در مخزن دو فازی جامد-مایع موجود، برای ناحیه MRF، شرط مرزی Frame Motion، برای دیوار مخزن و پروانه از شرط مرزی دیوار، برای شفت، از شرط مرزی دیوار متحرک و چرخان استفاده شده است.

۳- روش حل عددی

در این مطالعه، به منظور مدل‌سازی جریان دو فازی مایع-جامد که درصد حجمی ذرات جامد بالا است، از نرم افزار فلوئنت و روش شبیه‌سازی عددی E-E استفاده شد [۱۳، ۱۴]. شبیه‌سازی به صورت غیر دائم و با گام زمانی ۰/۰۱ s انجام گرفت. از آنجا که سیال تراکم‌ناپذیر فرض شده است، از حل گر مبتنی بر فشار استفاده گردید و برای شبیه‌سازی چرخش پره‌ها از رویکرد MRF بهره گرفته شد.

به منظور در نظر گرفتن تعاملات بین فاز مایع و جامد، از ضریب درگ شیلر-نیومن استفاده شد. برای حل میدان‌های سرعت و فشار، از الگوریتم Simple استفاده گردید و معادله فشار با روش مرتبه دوم حل شد. معادلات مومنتوم، کسر حجمی، انرژی سینماتیکی آشفتگی و نرخ اتلاف آشفتگی با روش Upwind مرتبه اول حل گردیدند.

جهت بررسی همگرایی، مقدار باقی‌مانده‌ها برابر ۱۰^{-۵} انتخاب شد. همچنین برای ارزیابی تأثیر شبکه‌بندی بر نتایج، سه شبکه غیرسازمان‌یافته با اندازه‌های مختلف (درشت، متوسط و ریز) مورد استفاده قرار گرفت (شکل (۳)).



شکل ۳ شماتیکی از شبکه به همراه مش پروانه

در نهایت، تغییر پارامترهایی مانند گشتاور، توان مصرفی و کسر حجمی ذرات جامد در ناحیه چرخان تحلیل شد. در آخر، تأثیر اندازه شبکه بر روی مؤلفه سرعت محوری بدون بعد در

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_{\alpha}\rho_{\alpha}k) + \nabla \cdot \left[r_{\alpha}\rho_{\alpha}\bar{U}_{\alpha}k - r_{\alpha}\left(\mu_{\alpha} + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k \right] = r_{\alpha}S_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_{\alpha}\rho_{\alpha}\varepsilon) + \nabla \cdot \left[r_{\alpha}\rho_{\alpha}\bar{U}_{\alpha}\varepsilon - r_{\alpha}\left(\mu_{\alpha} + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}}\right)\nabla \varepsilon \right] = r_{\alpha}S_{\varepsilon} \quad (8)$$

$$S_k = \mu_t \nabla \bar{U}_{\alpha} (\nabla \bar{U}_{\alpha} + (\nabla \bar{U}_{\alpha})^T) - \rho_{\alpha} \varepsilon \quad (9)$$

$$S_{\varepsilon} = C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \nabla \bar{U}_{\alpha} (\nabla \bar{U}_{\alpha} + (\nabla \bar{U}_{\alpha})^T) - C_2 \rho_{\alpha} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

$$\mu_t = \rho_{\alpha} C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

معادلات تلاطم، تنها برای فاز پیوسته (مایع) به کار رفته و برای ذرات در نظر گرفته نشده است. علیرغم اینکه هیچ شرط تبادل آشفتگی در نظر گرفته نشده است، برهمکنش بین فازها در حضور اغتشاش در عبارت نیروی پسا که شامل تأثیر اغتشاش جریان آزاد مایع بر روی ضریب درگ ذرات (C_D) است، در نظر گرفته می‌شود. برهمکنش‌های بین دو فاز مستقیماً فقط با شرط نیروی کشش بین فازی در معادلات مومنتوم، مدل‌سازی شده است (کوپلینگ دو طرفه):

$$\bar{M}_{\alpha\beta} = C_{\alpha\beta} (\bar{U}_{\beta} - \bar{U}_{\alpha}) = \left[\frac{3 C_D}{4 d_p} r_{\beta} \rho_{\alpha} |\bar{U}_{\beta} - \bar{U}_{\alpha}| \right] (\bar{U}_{\beta} - \bar{U}_{\alpha}) \quad (12)$$

$$\bar{M}_{\beta\alpha} = -\bar{M}_{\alpha\beta} \quad (13)$$

در اینجا $C_{\alpha\beta}$ ضریب درگ بین فازی، d_p قطر میانگین ذره و C_D ضریب درگ ذرات است. سایر ترم‌های مومنتوم بین فازی مانند، نیروی روانکاری، نیروی جرم مجازی و نیروی لیفت به‌طور کلی سهم کمی در هیدرودینامیک جامد-مایع دارند، به خصوص اگر نسبت چگالی ذره به مایع بیش از ۲ باشد و در این تحقیق، نادیده گرفته شده‌اند [۱۲].

برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی حاضر به دلیل عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی برای کالیبراسیون مدل، از نتایج تجربی گویدا و همکاران [۱۵] و نتایج عددی وندرکار و همکاران [۱۶] استفاده شد. مشخصات هندسه مورد استفاده، در مرجع [۱۶] شرح داده شده است. در این اعتبارسنجی، درصد جرمی فاز ثانویه (ذرات جامد) ۲۰٪ و سرعت چرخش پروانه ۴۸۰ rpm در نظر گرفته شده است.

تغییرات غلظت محوری بدون بعدشده ذرات جامد در راستای طول مخزن (Y/H) و در موقعیت شعاعی نوک پروانه ($r/R=0.5$) با داده‌های تجربی گویدا و همکاران [۱۵] و نتایج عددی وندرکار و همکاران [۱۶] در شکل (۵) مقایسه گردید.

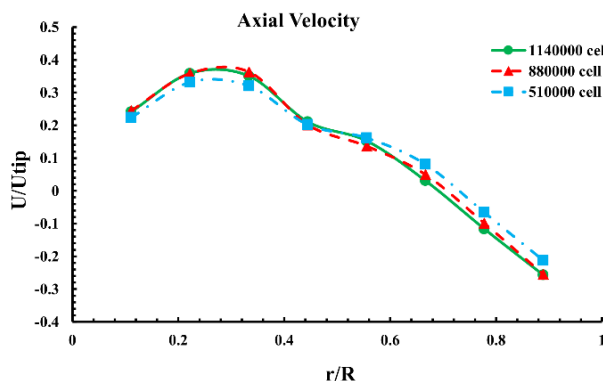
نتایج نشان می‌دهد که غلظت بدون بعدشده فاز ثانویه در بخش بالایی مخزن کمتر از ۱ و در قسمت پایینی بیشتر از ۱ است که بیانگر نشست ذرات جامد در کف مخزن و کاهش حضور آن‌ها در بالای مخزن می‌باشد. در میانه مخزن، غلظت بدون بعدشده تقریباً برابر با ۱ است که نشان‌دهنده همگنی کامل فاز ثانویه در این ناحیه است.

مقایسه غلظت‌های بدون بعدشده حاصل از شبیه‌سازی این پژوهش با نتایج گویدا و همکاران [۱۵] مطابقت بهتری نسبت به نتایج وندرکار و همکاران [۱۶] دارد. این اعتبارسنجی نشان می‌دهد که روش شبیه‌سازی انتخاب‌شده برای مخزن طراحی‌شده توسط مرکز پژوهش و توسعه فناوریانه مهندسی مکانیک گروه شرکت‌های ایبکو، با دقت و اعتبار مناسبی، نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.

۴-۲- تأثیر اصلاح پره‌ها بر توزیع فشار اطراف پروانه

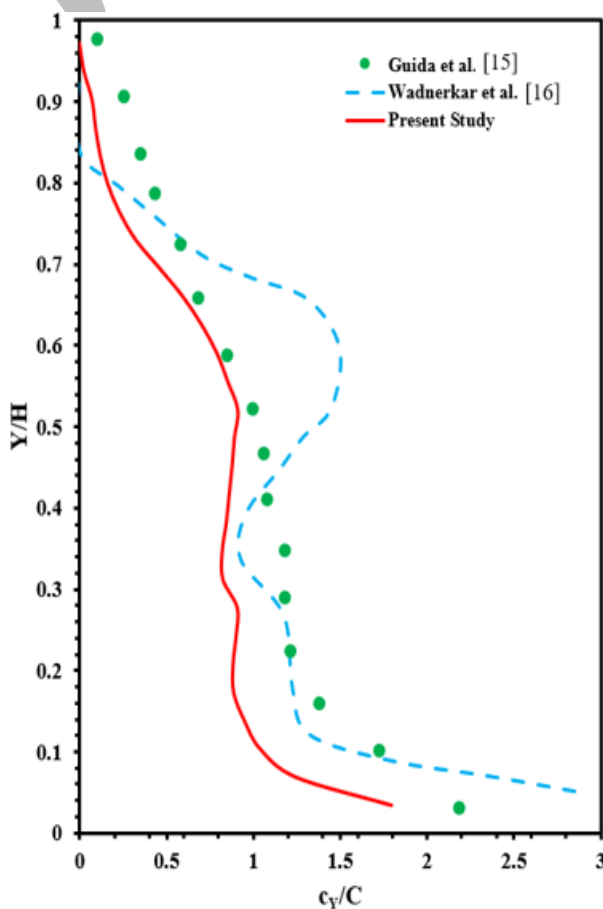
در سیستم‌های اختلاط، پارامتر فشار به عنوان نیرو محرکه اصلی عمل کرده و نقش مستقیمی در میزان مصرف انرژی الکتریکی مخازن همزن‌دار دارد. در شکل‌های (۶) و (۷) کانطور فشار در اطراف پروانه گزارش شده است. این گزارش در صفحه‌ای صورت گرفته است که از میان پره‌های پروانه عبور کرده است. نتایج حاکی از آن است که توزیع فشار در اطراف پره‌های پروانه وجود دارد و در سمت مکش پروانه، فشار منفی شکل می‌گیرد. بنابراین، برای جبران این اختلاف فشار و ایجاد اختلاط مؤثر در زمان چرخش پروانه، به انرژی ورودی نیاز است. در این میان، پروانه PBT نسبت به سایر پروانه‌ها اختلاف فشار بیشتری ایجاد می‌کند. اما پروانه‌های جدید طراحی‌شده قادر هستند این اختلاف فشار را کاهش‌دهنده و مانع از انسداد جریان شوند. علت این امر وجود جت‌های کوچکی در اطراف شکاف‌ها و روزنه‌های موجود بر روی پره‌های پروانه‌های جدید است، که منجر به ایجاد

راستای شعاع مخزن (شکل (۴)) بررسی و مشاهده گردید با ریزتر شدن شبکه تغییر قابل توجهی در توزیع مؤلفه بدون بعد سرعت محوری سیال مشاهده نمی‌شود و تنها زمان محاسبات افزایش می‌یابد. در نتیجه، شبکه متوسط با ۸۸۰ هزار سلول برای ادامه شبیه‌سازی انتخاب گردید.

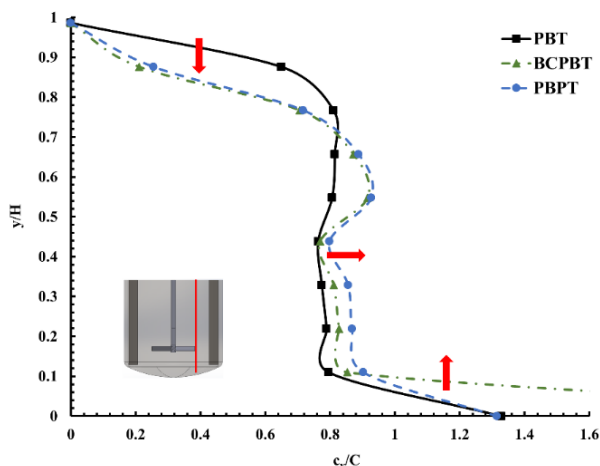


شکل ۴ بررسی استقلال از شبکه با مؤلفه سرعت محوری بدون بعد

۴- نتایج و بحث ۴-۱- اعتبارسنجی

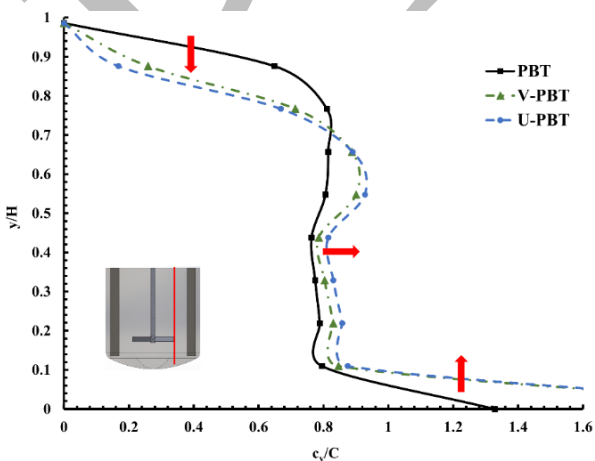


شکل ۵ مقایسه پروفایل غلظت محوری بدون بعد ذرات جامد در راستای محور مخزن با داده‌های تجربی [۱۵] و عددی [۱۶].



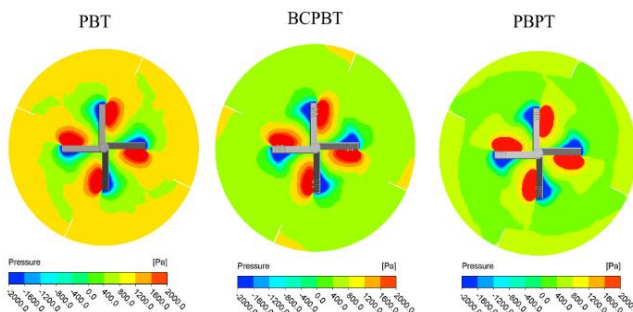
شکل ۸ توزیع غلظت محوری فاز جامد در پروانه‌های PBT، BCPBT و PBPT

بر اساس داده‌های ارائه‌شده در شکل (۸) مخزن دارای پروانه PBPT در مقایسه با مخازن مجهز به پروانه‌های BCPBT و PBT کیفیت اختلاط بالاتری را نشان می‌دهد. به‌طور مشابه، شکل (۹) از کیفیت اختلاط مناسب پروانه U-PBT نسبت به پروانه‌های V-PBT و PBT در راستای محور مخزن گزارش می‌کند. در نهایت، شکل‌های (۸) و (۹) نشان می‌دهند که پروانه‌های PBPT و U-PBT دارای قابلیت تعلیق جامد پیشرفته‌تری نسبت به پروانه‌های دیگر هستند. همانطور که قبلاً هم بیان شد این موضوع با این واقعیت توضیح داده می‌شود که روزنه‌ها و شکاف‌های اطراف پروانه‌های اصلاح‌شده باعث ایجاد یک سری جت‌های پر سرعت در اطراف تیغه‌ها می‌شوند و اینکه اثر برشی جت‌ها بر روی مایع اطراف گرداب‌های پایدار در مقیاس کوچک ایجاد می‌کند. بنابراین، سرعت توزیع انرژی محلی در اطراف پروانه را افزایش می‌دهد که باعث بهبود اثر اختلاط در راستای محور مخزن می‌شود.

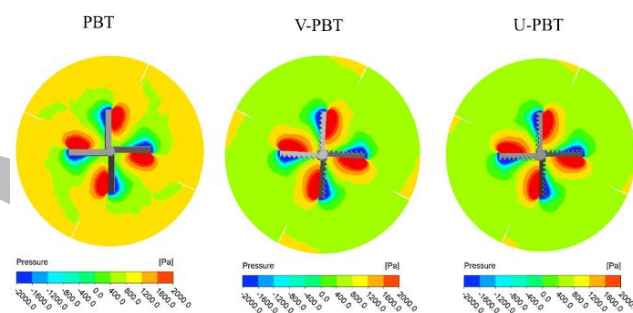


شکل ۹ توزیع غلظت محوری فاز جامد در پروانه‌های PBT، V-PBT و U-PBT

گردابه‌های کوچک‌تر و کاهش شدت آشفتگی می‌شود. در نتیجه، اختلاف فشار در دو طرف پره‌ها کاهش یافته و بازده انتقال انرژی به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند.



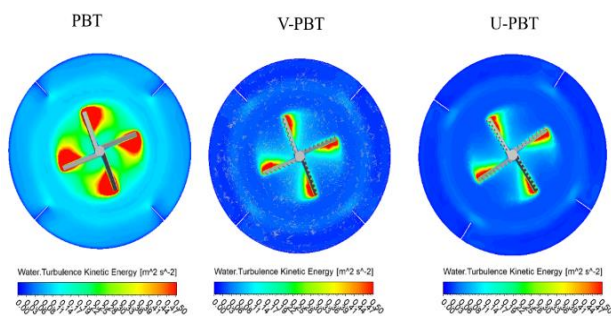
شکل ۶ توزیع فشار در صفحه عبوری از میان پره پروانه‌های PBT، BCPBT و PBPT



شکل ۷ توزیع فشار در صفحه عبوری از میان پره پروانه‌های PBT، V-PBT و U-PBT

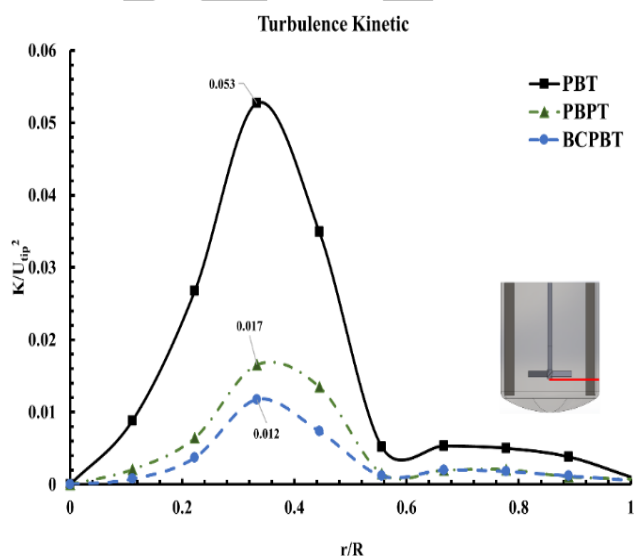
۴-۳- اصلاح شده توزیع غلظت محوری بدون بعد در پروانه‌های

کمی‌سازی توزیع فاز جامد، برای درک دقیق هیدرودینامیک مخازن همزن‌دار جامد-مایع ضروری است، زیرا کمی‌سازی درک دقیقی از شدت انتقال جرم دو فاز ارائه می‌کند و بیان می‌کند که نحوه توزیع و تماس سطح ذرات جامد با سیال به چه صورت است. بر این اساس در ادامه در شکل‌های (۸) و (۹) توزیع کسر حجمی ذرات جامد در راستای محور مخزن گزارش شده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است، تجمع و نشست ذرات در کف مخزن برای تمامی انواع پره‌ها غیر قابل اجتناب است ($C_y/C > 1$). نشست ذرات برای پروانه‌های اصلاح‌شده بیشتر از پروانه PBT است؛ این در حالی است که کیفیت اختلاط در راستای محور مخزن برای پروانه‌های اصلاح‌شده نسبت به پروانه PBT بهبود یافته است. در نزدیکی سطح مخزن نیز کاهش کیفیت اختلاط برای پروانه‌های طرح جدید قابل مشاهده است و ضخامت لایه مایع شفاف در سطح مخزن بزرگتر از پروانه PBT است.



شکل ۱۱ انرژی جنبشی آشفتگی پروانه‌های PBT، V-PBT و U-PBT

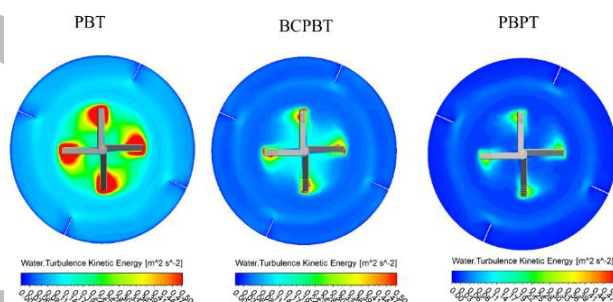
شکل‌های (۱۲) و (۱۳) توزیع انرژی جنبشی توربالانسی را در پروانه‌های اصلاح‌شده در راستای شعاع مخزن، نشان می‌دهند. در تمام انواع پروانه‌ها (چه پروانه‌های اصلاح‌شده در نوک و چه پروانه‌های اصلاح‌شده در طول)، انرژی جنبشی توربالانسی در نزدیکی نوک تیغه پروانه بالاترین مقدار است. روند تغییر انرژی جنبشی در راستای شعاع مخزن بدین صورت است که از مرکز پروانه تا نوک پروانه، تغییرات انرژی جنبشی افزایشی است. بعد از محدوده پروانه، تغییرات انرژی جنبشی کاهش می‌یابد تا اینکه در دیواره مخزن به صفر می‌رسد. مقدار بیشینه این انرژی برای پروانه‌های طرح جدید خیلی کمتر از پروانه PBT است که نشان‌دهنده این موضوع است که گردابه‌های دنباله‌دار کوچک‌تر در پشت پره‌های طرح جدید، در فاصله کوتاه‌تری از بین می‌روند. کاهش مقدار انرژی جنبشی توربالانسی در پروانه BCPBT نسبت به پروانه PBPT، ۲۹٪ و نسبت به PBT، ۷۱٪ است. این کاهش برای پروانه U-PBT نسبت به V-PBT، ۲۱٪ و نسبت به پروانه PBT، ۶۸٪ است.



شکل ۱۲ تغییرات انرژی جنبشی بدون بعد برای پروانه‌های PBT، PBPT و BCPBT در راستای شعاع مخزن

۴-۴- انرژی جنبشی توربالانسی در پروانه‌های اصلاح‌شده

در این بخش، ویژگی شدت توربالانسی (گردابه‌های دنباله‌دار) مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) کانتور گردابه‌های دنباله‌دار را در پشت پره‌های مختلف نشان می‌دهد. دنباله‌هایی که در پشت پره پروانه‌ها ایجاد می‌شود، باعث می‌شود که بخش زیادی از انرژی پروانه در اثر این اغتشاش و تولید گردابه، مصرف شود. فقط بخش کوچکی از انرژی می‌تواند به میدان جریان، برای فرآیند تعلیق ذرات جامد منتقل شود. مطابق شکل (۱۰) مشخص است که اغتشاش و گردابه دنباله‌دار که باعث مصرف انرژی و برق می‌شوند، برای پروانه PBT دارای شدت و بزرگی بیشتری است. اما در طرح پروانه PBPT و BCPBT این شدت و اغتشاش به طور قابل توجهی تغییر کرده و گردابه دنباله‌دار مشاهده شده در پشت پره‌ها، با گردابه‌های ضعیف‌تر جایگزین شده‌اند.



شکل ۱۰ کانتور انرژی جنبشی آشفتگی پروانه‌های PBT، BCPBT و PBPT

همان‌گونه که از شکل (۱۰) مشخص است پروانه PBPT که فقط دارای سوراخ‌هایی در نوک است، نسبت به پروانه BCPBT که علاوه بر سوراخ‌های موجود در نوک پروانه، دارای شکاف نیز در نوک پروانه می‌باشد، مثبت‌تر در زمینه کاهش اغتشاشات توربالانسی عمل کرده است.

انرژی جنبشی توربالانسی برای پروانه‌های U-PBT و V-PBT در شکل (۱۱) رسم شده است. در مورد پروانه U-PBT و V-PBT به دلیل حضور شکاف‌های U و V شکل در کل طول پره، اغتشاش و گردابه دنباله‌دار در کل طول پره کشیده شده است و از بزرگی انرژی جنبشی توربالانسی نسبت به حالت بدون شکاف (PBT) کاسته شده است. در نهایت می‌توان ثابت کرد که پروانه‌های جدید می‌توانند به‌طور مؤثر اندازه گرداب دنباله‌دار را از طریق شکاف‌های اطراف تیغه‌های پروانه کاهش دهند که منجر به بهبود مصرف انرژی و افزایش راندمان اختلاط می‌شود. این کاهش میزان اغتشاش نیز تابع شکل شکاف‌ها می‌باشد.

جدول ۱ مقایسه گشتاور، توان و عدد توان در پره‌های PBT، PBPT و BCPBT

نوع پروانه	گشتاور (N.m)	توان (W)	عدد توان
PBT	۹۴/۱۵	۱۴۷۸/۱۵	۱/۴۳
PBPT	۸۹/۲۱	۱۴۰۰/۶	۱/۳۵
BCPBT	۸۵/۱۷	۱۳۳۷/۸	۱/۲۹

جدول ۲ مقایسه گشتاور، توان و عدد توان در پره‌های PBT، V-PBT و U-PBT

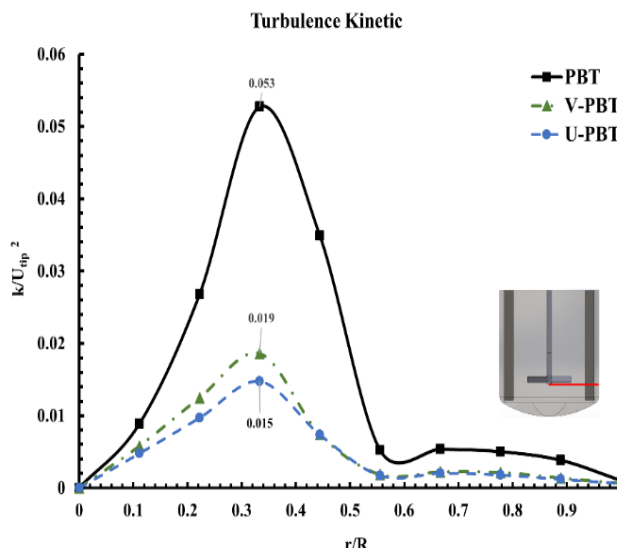
نوع پروانه	گشتاور (N.m)	توان (W)	عدد توان
PBT	۹۴/۱۵	۱۴۷۸/۱۵	۱/۴۳
U-PBT	۷۵/۳۷	۱۱۸۳/۳۰	۱/۱۵
V-PBT	۷۳/۴۲	۱۱۵۲/۷	۱/۱۱

مکان‌های اصلی برای تولید انرژی آشفته و تلفات توان در یک مخزن همزن‌دار، جت خروجی از نوک پروانه و جریان سیال متلاطم در اطراف ناحیه پروانه است. ساختار پروانه‌های مورد مطالعه در اینجا نشان می‌دهد که سهم تلفات توربالانسی از جریان سیال اطراف پروانه بیشتر از جت خروجی از نوک پروانه است. بدین ترتیب تغییر ساختار پروانه‌ها در جهت طول آن‌ها، نسبت به تغییرات عرضی آن‌ها در کاهش توان با فرض یکنواختی برابر اتلاف توربالانسی، مؤثرتر است. در نتیجه، کاهش مصرف برق در پروانه V-PBT بیشتر از پروانه BCPBT است.

۵- نتیجه‌گیری

پایداری دینامیکی مخزن همزن‌دار دو فازی جامد-مایع با استفاده از یک پروانه چهار پره‌ای جریان محوری و به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی در این پژوهش شبیه‌سازی شد. برای توصیف جریان آشفته، مدل استاندارد $k-\epsilon$ و برای شبیه‌سازی جریان دو فازی، مدل اولرین-اولرین (E-E) به کار گرفته شد. همچنین، از روش چارچوب مرجع چندگانه برای مدل سازی ناحیه چرخشی استفاده شد. در این تحقیق به بررسی تأثیر اصلاح پره‌ها بر توزیع فاز جامد در مخزن و توزیع انرژی جنبشی توربالانسی پرداخته شده است. نتایج به دست آمده در ادامه آورده شده است.

- اصلاح پره‌ها در جهت طولی و عرضی باعث شکست گردابه‌های بزرگ‌تر به گردابه‌های کوچک‌تر شده و در نهایت کاهش افت فشار در جلو و پشت پره‌ها و توزیع یکنواخت‌تر انرژی جنبشی توربالانسی را به دنبال دارد.



شکل ۱۳ تغییرات انرژی جنبشی بدون بعد برای پروانه‌های PBT، V-PBT و U-PBT در راستای شعاع مخزن

۴-۵- توان مصرفی در پروانه‌های اصلاح شده

توان مصرفی (P) و عدد توان (N_p) به عنوان یک مشخصه اصلی در طراحی مخازن همزن‌دار استفاده می‌شوند. در ادامه توان مصرفی پروانه‌ها بر اساس گشتاور اعمال شده (T) بر روی پروانه (رابطه (۱۴)) و طریقه محاسبه عدد توان نیز گزارش شده است.

$$P = 2\pi NT \quad (14)$$

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (15)$$

همان‌گونه که از جدول (۱) و (۲) مشخص است گشتاور اعمال شده بر روی شفت با تغییر طراحی پروانه تغییر کرده است و مقدار آن کاهش یافته است. این کاهش گشتاور به دلیل تغییر در گردابه‌های دنباله‌دار است که باعث شده است گشتاور اعمال شده در مخزن تغییر کند. کاهش گردابه‌های دنباله‌دار باعث کاهش اختلاف فشار در اطراف پره‌ها شده است و همچنین فشار در مرکز این گردابه‌های مقیاس کوچک که در اطراف شکاف‌ها و روزنه‌ها ایجاد می‌شود کم است و می‌تواند مقداری نیروی محرکه اضافی به پروانه دهد و مصرف انرژی را تا حدی کاهش دهد.

با توجه به جدول‌های (۱) و (۲) کاهش مصرف برق ۲۲ درصدی زمانی که پروانه‌های اصلاح طولی به جای پروانه PBT استفاده می‌شود و کاهش مصرف برق ۱۰ درصدی، زمانی که پروانه‌های اصلاح عرضی به جای پروانه PBT به کار برده می‌شود، قابل مشاهده است.

۷- تشکر و قدردانی

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

۸- مراجع

[1] H. Li, X. Li, J. Zhan, W. Chen, and W. Zong, "Study of turbulent kinetic energy and dissipation based on fractal impeller," *Sustainability*, vol. 15, no. 10, p. 7772, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su15107772>.

[2] 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.11.013>.

[3] D. Gu, C. Cheng, Z. Liu, and Y. Wang, "Numerical Simulation of Solid-Liquid Mixing Characteristics in a Stirred Tank with Fractal Impellers," *Advanced Powder Technology*, Vol. 30, No. 10, pp. 2126-2138, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.06.028>.

[4] 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, p. 9883, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/app11219883>.

[5] S. A. Martínez-Delgadillo, A. Alonzo-Garcia, V. X. Mendoza-Escamilla, I. González-Neria, and J. Antonio Yáñez-Varela, "Analysis of the Turbulent Flow and Trailing Vortices Induced by New Design Grooved Blade Impellers in a Baffled Tank," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 358, pp. 225-235, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.015>.

[6] J. Stelmach, R. Musoski, C. Kuncewicz, T. Jirout, and F. Rieger, "Efficiency of PBT Impellers with Different Blade Cross-Sections," *Energies*, vol. 15, no. 2, p. 585, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/en15020585>.

[7] 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109001>.

[8] I. González-Neria, A. Alonzo-Garcia, S. A. Martínez-Delgadillo, V. X. Mendoza-Escamilla, J. A. Yáñez-Varela, P. G. Verdin, and G. Rivadeneyra-Romero, "PIV and Dynamic LES of the Turbulent Stream and Mixing Induced by a V-grooved Blade Axial Agitator," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 374, pp. 1138-1152, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.06.033>.

• پروانه‌های اصلاح‌شده به دلیل تولید گردابه‌های پایدار در مقیاس کوچک، سرعت توزیع انرژی محلی در اطراف پروانه را افزایش می‌دهند که باعث بهبود اثر اختلاط در راستای محور مخزن می‌شود.

• توزیع یکنواخت انرژی جنبشی توربالانسی در پره‌های اصلاح‌شده نسبت به پره‌های سنتی باعث کاهش ۲۲٪ توان مصرفی در پره‌های اصلاح‌شده می‌شود.

در پایان می‌توان نتیجه گرفت برای مخازن همزن‌دار با هدف انجام اختلاط بهینه با کمترین میزان توان مصرفی، کاهش انرژی جنبشی توربالانسی در پروانه‌ها دارای اولویت است. در این راستا باید از پروانه‌های که خاصیت شکست گردابه‌های دنباله‌دار را دارند استفاده کرد؛ به گونه‌ای که کیفیت اختلاط در راستای محور مخزن تحت تاثیر قرار نگیرد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

C	فاصله پروانه از کف (mm)
C _D	ضریب درگ
C _{aβ}	ضریب درگ بین فازی
D	قطر پروانه (mm)
d _p	قطر میانگین ذرات جامد (dp)
D _s	قطر شفت (mm)
F	نیروی حجمی (N)
g	شتاب جاذبه (m/s ²)
G _k	تولید تلاطم ناشی از گرداب‌های سرعت
H	ارتفاع سیال (mm)
N	سرعت چرخش (rpm)
N _p	عدد توان
P	توان (W)
T	قطر مخزن (mm)
U	بردار سرعت (m/s)
U _{tip}	سرعت نوک پروانه (m/s)
W _{baffel}	عرض بفل (mm)

علائم یونانی

μ	ویسکوزیته دینامیکی (kg/m.s)
r	درصد حجمی ذرات (%)
α	فاز پیوسته
β	فاز پراکنده
ρ	دانسیته (kg/m ³)
σ	عدد پراتل
τ	تنسور تنش

- [13] R. Safa, E. Soltani, and M. Abdolzadeh, "Investigation of the Impeller Angle Effect on the Performance of Mixing Tanks," [in Persian], *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 32, No. 5, pp. 47-59, 2023, doi: <https://doi.org/10.30506/mmep.2023.2009634.2103>.
- [14] R. Safa and A. Soltani Goharrizi, "CFD Simulation of an Industrial Hydrocyclone with Eulerian–Eulerian Approach: A Case Study," *International Journal of Mining Science and Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 643-648, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.07.010>.
- [15] 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.11.005>.
- [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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2016.01.012>.
- [9] X. Li, H. Zhao, Z. Zhang, Y. Liu, and T. a. Zhang, "Numerical optimization for blades of Intermig impeller in solid–liquid stirred tank," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 29, pp. 57-66, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.08.044>.
- [10] D. Gu, J. Chen, Y. Song, and Q. Chen, "Modification of impeller blades for the efficient mixing of particulate suspensions in a stirred tank," *Advanced Powder Technology*, vol. 35, no. 5, p. 104444, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2024.104444>.
- [11] D. Gu, C. Li, X. Gu, and J. Wang, "Solid-liquid mixing characteristics in a fractal cut impeller stirred reactor with dense solid loading," *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, vol. 196, p. 109655, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109655>.
- [12] A. Tamburini, A. Cipollina, G. Micale, A. Brucato, and M. Ciofalo, "CFD Simulations of Dense Solid–Liquid Suspensions in Baffled Stirred Tanks: Prediction of Suspension Curves," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 178, pp. 324-341, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.016>.