



CFD Simulation to Evaluate the Mixing quality by Mixers with Different Blade Shapes

Y. Basereh¹, R. Beigzadeh^{2*}

1- M. Sc. in Chemical Engineering, University of Kurdistan

2- Associate Professor of Chemical Engineering, University of Kurdistan

Email: r.beigzadeh@uok.ac.ir

Abstract

The optimum design of mixing tank reactors is very important to increase the mixing in industries. This study examined how varying operational factors, such as the type and angle of stirring blades, as well as the rotational speed, affect mixing rates. Four types of mixers (Rushton, Smith Turbine, Reversible Rushton, and Reversible Propeller) were modeled using computational fluid dynamics techniques to assess their mixing performance. The study analyzed the effects of varying rotational speeds (20, 40, and 60 rpm) and inlet flow velocities (0.028, 0.03, 0.04, and 0.05 m/s) on the mixing efficiency. The results showed that, among the designed models, the Reversible Rushton has the best mixing rate and the closest behavior to the ideal state. Where θ is equal to 3, its mixing factor is equal to 0.083879. Additionally, it was noted that as the inlet velocity increased, the rate of change in mixing also became more pronounced. It was observed that the Reversible Rushton shows the least sensitivity to the change of rotational speed compared to the other three blades. The Reversible Rushton model at 20 rpm rotational speed and 0.03 m/s inlet velocity demonstrated the highest mixing rate among all investigated cases.

Received: 2 March 2024

Accepted: 9 May 2024

Page Number: 136-147

Keywords:

Simulation,
Computational Fluid
Dynamics,
Stirred Tank,
Blade Shape,
Mixing

Please Cite this Article Using:

Basereh, Y., & Beigzadeh, R. (2025). CFD Simulation to Evaluate the Mixing quality by Mixers with Different Blade Shapes. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(139), 136-147, [In Persian].



شبهه سازی CFD برای بررسی کیفیت اختلاط به وسیله همزن هایی با تیغه هایی به اشکال هندسی مختلف

یاسان باسره^۱، رضا بیگزاده^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه کردستان

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه کردستان

پیام نگار: r.beigzadeh@uok.ac.ir

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۰
شماره صفحات: ۱۳۶ تا ۱۴۷

طراحی بهینه مخازن همزن دار به منظور افزایش میزان اختلاط در صنایع، بسیار مهم است. این تحقیق، به بررسی تأثیر مشخصه های عملیاتی مختلف، مانند نوع و زاویه پره های همزن و همچنین، دور همزن بر میزان اختلاط اختصاص داده شد. چهار نوع مختلف پره، شامل: راشتون^۱، اسمیت توربین^۲، راشتون برگشتی^۳ و پروانه برگشتی^۴ طراحی و در دورهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دور بر دقیقه و همچنین، در سرعت های مختلف جریان ورودی به مخزن؛ شامل ۰/۰۲۸، ۰/۰۳، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ متر بر ثانیه به منظور بررسی عملکرد اختلاط با روش دینامیک سیالات محاسباتی مدل سازی شد. نتایج نشان داد که در بین مدل های طراحی شده، پره راشتون برگشتی بهترین میزان اختلاط و نزدیک ترین رفتار را نسبت به حالت آرمانی دارد که در نسبت زمان اختلاط به زمان ماند (θ) برابر با ۳، نسبت اختلاط آن برابر با ۰/۰۱۳۸۱۷۹ تعیین شد. همچنین، مشاهده شد که با افزایش سرعت ورودی، شیب تغییرات اختلاط نیز تندتر شده است. مشاهده شد که پره راشتون برگشتی، کمترین حساسیت را نسبت به تغییر دور در مقایسه با سه پره دیگر از خود نشان می دهد. از میان کلیه موارد مطالعه شده، بهترین میزان اختلاط برای پره راشتون برگشتی در دور برابر با ۲۰ rpm و سرعت ۰/۰۳ متر بر ثانیه به دست آمد.

کلیدواژه ها:

شبهه سازی،
دینامیک سیالات محاسباتی،
مخزن همزن دار،
شکل پره،
اختلاط

* کردستان، سنج، دانشگاه کردستان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

باسره، یاسان، و بیگزاده، رضا. (۱۴۰۴). شبهه سازی CFD برای بررسی کیفیت اختلاط به وسیله همزن هایی با تیغه هایی به اشکال هندسی مختلف، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴ (۱۳)، ۱۳۶-۱۴۷.

1. Rushton Impelle
3. Backswept Rushton

2. Smith Turbine
4. Backswept Impeller

۱. مقدمه

به‌تازگی، پژوهشگران در زمینه بهینه‌سازی فرایندهای اختلاط مربوط به مخازن همزن‌دار، با در نظر گرفتن توان مورد نیاز، میزان کیفیت و زمان اختلاط و نیز هزینه‌ها، تحقیقات بسیاری انجام داده‌اند. پیچیدگی فرایند اختلاط سبب مهم‌شدن پژوهش‌ها و نیز، تأکید بر مطالعات تجربی و تئوری شده‌است. اصلاح طراحی یک مخزن همزن‌دار برای افزایش کارایی، مانند طراحی یک سامانه اختلاطی جدید، نیازمند دقت و مطالعات بسیاری است. مخزن همزن‌دار^۱ پرکاربردترین نوع راکتور در صنعت است که به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و هزینه‌های عملیاتی پایین، معمولاً در صنایع فرایند شیمیایی برای انجام عملیات مختلفی؛ مانند همگن‌سازی، پخش گاز، تعلیق جامد، انتقال حرارت و غیره استفاده می‌شود [۱].

شاران^۲ و همکاران [۲] به مطالعه و پیش‌بینی رفتار جریان در فرایند اختلاط در یک مخزن همزن‌دار با استفاده از پره راشتون و تعیین طراحی مناسب برای ایجاد آشفتگی لازم برای تولید یک مخلوط یکنواخت پرداختند. این مقاله تأکید دارد که با بهره‌گیری از محاسبات دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، می‌توان به آسانی طراحی مناسب‌ترین مخزن‌های اختلاط را پیدا کرد که تضمین‌کننده بهترین کیفیت اختلاط یکنواخت با کاهش زمان و هزینه است. حسینی و همکاران [۳]، مصرف توان راکتور، تنش معادل پروانه، الگوی جریان و مشخصه‌های آشفتگی سه نوع پره، تحت عنوان شش پره توربین راشتون، پره U شکل و پره V شکل را با دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند و نشان دادند که حداکثر نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی پره U شکل، بیشتر از پره V شکل است. راناد و جوشی^۳ [۴] اثر گام تیغه پروانه را بر روی الگوی جریان بررسی و ثابت کردند که زاویه تیغه پروانه در توربین پره‌شیب‌دار به‌طور قابل توجهی بر ویژگی‌های جریان تأثیر می‌گذارد. وی مینگ^۴ و همکاران [۵] نقش عرض پره را بر روی ساختار گردابی تولیدشده در نوک تیغه پروانه با استفاده از یک توربین دیسکی با توان ورودی برابر بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که پروانه با یک تیغه بزرگ‌تر، یک جریان گردابی کاملاً توسعه‌یافته و پروانه تیغه کوچک‌تر به دلیل ظهور دو گرداب متقارن، تنش برشی قوی‌تری ایجاد می‌کند. فیروز و

همکاران [۶] با استفاده از نقشه‌های گردابی، استحکام ساختارهای گردابی دنباله‌دار نزدیک به توربین چهارپره ۴۵ درجه‌شیب‌دار را مطالعه کردند و با طراحی مناسب شکل نوک تیغه توانستند اندازه گرداب را به حداقل برسانند و راندمان جریان محوری این پروانه‌ها را بهبود ببخشند. فاسانو^۵ و همکاران [۷] نشان دادند که گرداب بزرگ دنباله‌دار در یک توربین ۴۵ درجه چهارپره در مقایسه با پروانه سه‌پره Chemineer HE-3، راندمان کمتری دارد. علاوه بر این، آن‌ها دریافتند که پروانه سه‌پره HE-3 نسبت به پروانه PBTB چهارپره، پروفایل انتقال حرارت پایدارتری را فراهم می‌کند. بر اساس نتایج راجاواتساوای^۶ و همکاران [۸]، هرچه عدد رینولدز (Re) و دور پره‌ها (N) بیشتر باشد، اختلاط به حالت آرمانی نزدیک‌تر می‌شود؛ اما تأثیر میزان گرانروی به میزان دور پره‌ها وابسته‌است. کارلز^۷ و همکاران [۹] برای یک پروانه و یک سیال نیوتنی، گزارش داده‌اند که زمان اختلاط با افزایش گریز از مرکز شفت و هزینه‌های انرژی اضافی، کاهش می‌یابد. یانگ^۸ و همکاران [۱۰] اختلاط دو سیال امتزاج‌پذیر لایه‌ای را در یک مخزن هم‌زده‌شده با یک پروانه چهارپره را بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که محل خروج از مرکز پروانه برای اختلاط مایعات امتزاج‌پذیر با گرانروی کم که از یک حالت لایه‌ای شروع می‌شوند، مناسب نیست. یکی دیگر از روش‌های تعیین زمان اختلاط، همان‌طور که گفته شد، استفاده از شناساگر اسید-باز است که طبق نظر گادلسکی و اسمیت^۹ [۱۱] طولانی‌ترین زمان مخلوط‌شدن با نسبت مخلوط حجمی $X=1:1$ (اسید: باز) به‌دست می‌آید. ژانگ^{۱۰} و همکاران [۱۲] به کمک دیدگاه اولری-اولری اثر مشخصه‌های عملیاتی مختلف را شامل محل ورود خوراک، سرعت پره و دبی گاز ورودی بر روی زمان اختلاط بررسی کردند. آکیتی^{۱۱} و همکاران [۱۳] اثر هیدرودینامیک سیال مورد بررسی بر روی اختلاط یک راکتور آزمایشگاهی را با استفاده از CFD مطالعه کردند. آن‌ها، روی اثر نوع و سرعت همزن، تعداد بافل‌ها و محل ورود جریان، تحقیق و تأثیر آشفتگی جریان را بر بازده واکنش ارائه کردند. کومارسان و جوشی^{۱۲} [۱۴] تأثیر شکل تیغه را بر الگوی جریان و فرایند اختلاط بررسی کردند.

5. Fasano
6. Rajavathsavai
7. Karcz
8. Yang
9. Godleski & Smith
10. Zhang
11. Akiti
12. Kumaresan & Joshi

1. Stirred Tank
2. Sharan
3. Ranade & Joshi
4. We-Ming

پروانه، قطر و سرعت چرخش بر پراکندگی جامد و مصرف برق در یک راکتور مخزن همزن‌دار را بررسی کردند. آزمایش‌ها نشان داد که توان لازم برای تأمین تعلیق جامد پایین و پراکندگی جامد را می‌توان با افزایش ارتفاع دوغاب به‌جای شتاب‌دادن به پروانه در صورت امکان، به‌طور چشم‌گیری کاهش داد. چوپانی و همکاران [۲۲] نقش جریان‌های شعاعی و محوری ایجادشده با پروانه‌های گوناگون را بر اختلاط، مطالعه و مشاهده کردند که پروانه‌های توربینی مناسب‌ترین پروانه برای اختلاط محلول‌های بررسی شده است و هم‌چنین، نوع شش‌پره بهترین نوع برای بهره‌برداری در صنعت است.

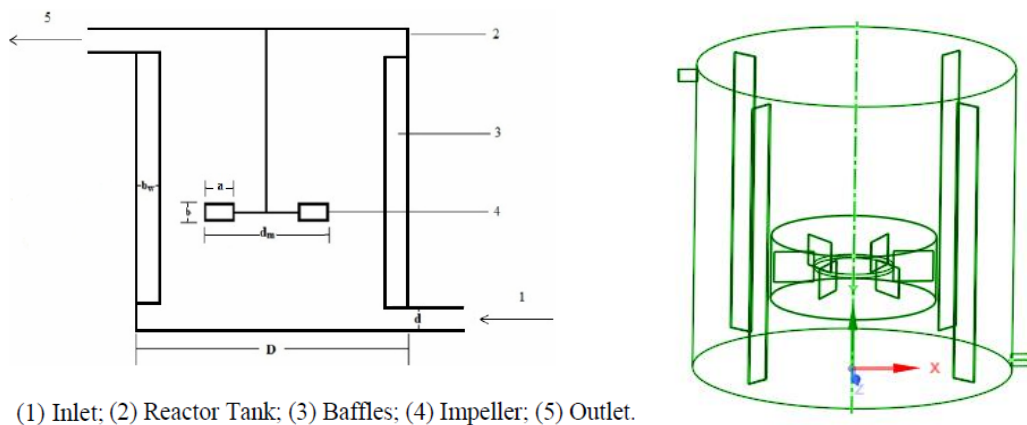
در این تحقیق، اهمیت طراحی بهینه مخازن همزن‌دار به‌منظور افزایش اختلاط بررسی شده است. به‌کمک شبیه‌سازی CFD اثرات مشخصه‌های مختلفی هم‌چون نوع و زاویه پره‌ها و دور همزن، بر میزان اختلاط ارزیابی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که باتوجه به ارتباط پیچیده مشخصه‌های مختلف، چگونه انتخاب صحیح پره‌ها و تنظیمات عملیاتی مناسب منجر به بهبود عملکرد اختلاط می‌شود.

۲. مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی

در این تحقیق، طراحی سه‌بعدی هندسه مخزن و هم‌چنین چهارپره مورد نظر با ابعاد و اندازه‌های یکسان به‌وسیله روش دینامیک سیالات محاسباتی مدل‌سازی شده است. ابتدا هر چهار پره در سرعت جریان ورودی ثابت 0.28 متر بر ثانیه و مقدار دورهای 20 ، 40 و 60 دور بر دقیقه با هم و هم‌چنین، نسبت به خط آرمانی بررسی شد. در مرحله بعد، میزان اختلاط هر چهار پره در دور ثابت 20 دور بر دقیقه و در سرعت‌های ورودی 0.28 ، 0.3 ، 0.4 و 0.5 متر بر ثانیه با هم و هم‌چنین، نسبت به خط آرمانی مطالعه شده است. در نهایت، همه پره‌ها در سرعت ثابت 0.28 متر بر ثانیه و میزان دور 20 دور بر دقیقه با هم و نسبت به خط آرمانی مقایسه شدند. شکل (۱)، نمایی از هندسه مخزن مورد بررسی را به‌همراه جزئیات مهم نشان می‌دهد. هم‌چنین، ابعاد مخازن در جدول (۱) آورده شده است. در این تحقیق، سیال عامل محلول آب و KCl است. همزن‌های بررسی‌شونده این مطالعه را می‌توان در شکل (۲) مشاهده کرد.

توروتا و جی [۱۵] آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی را برای بررسی ویژگی‌های جریان چهار طرح پروانه (لنگر، دندان‌اره، جریان مخالف و توربین راشتون) در دستیابی به همگنی محلول، انجام دادند و نتیجه گرفتند که از راه آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی، می‌توان اطلاعات دقیقی را برای طراحی بهینه دستگاه اختلاط به‌دست آورد. ساتریجانون^۲ و همکاران [۱۶] به‌صورت تجربی و عددی تقاطع دو میدان را بررسی کردند: (۱) تک‌محور، پروانه‌های ضد چرخش و (۲) شناوری تعلیق جامد. نتایج نشان داد که برای اختلاط ذرات سبک‌تر، پیکربندی مخالف با جریان مخالف به‌داخل، عملکرد بهینه بالاترین راندمان اختلاط را در کمترین گشتاور مورد نیاز ارائه می‌دهد. مورتی^۳ و همکاران [۱۷] با بهره‌گیری از دینامیک سیالات محاسباتی یک مخزن همزن‌دار سه‌فازی را شبیه‌سازی کردند. آنان، اثرات قطر مخزن، قطر پروانه، طراحی، محل پروانه، سرعت، اندازه ذرات، بارگذاری جامد و سرعت سطحی گاز را در محدوده وسیعی بررسی کردند و توافق بسیار خوبی را بین پروفایل‌های سرعت و کسر حجمی گاز و جامد پیش‌بینی شده و تجربی در پراکندگی‌های گاز-مایع مشاهده کردند. امانی و بیگزاده [۱۸] عملکرد هیدرودینامیکی سه نوع همزن استاتیکی را با استفاده از مدل‌سازی CFD بررسی کردند. آن‌ها، هم‌چنین از مدل شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین داده‌ها بهره گرفتند. ایلینا^۴ و همکاران [۱۹] طرح‌های مدرن موجود از دستگاه‌های همزن را در نظر گرفتند و کاربرد آن‌ها را در فرایندهای مختلف صنعتی در کانون نظر گرفتند. نتایج مطالعه تجربی نشان داد که استفاده از یک همزن نوسانی در مقایسه با یک پروانه با سرعت بالا بیش از 20 برابر کارآمدتر بود؛ در حالی که هزینه برق را تنها 25 تا 30 درصد افزایش داد. رویول^۵ و همکاران [۲۰] روش جدیدی را برای توسعه شکل همزن پروانه‌ای برای شرایط عملیاتی دلخواه در سیالات شبه‌پلاستیک با روش‌های تحلیلی معرفی کردند که بر اساس تئوری تکانه عنصر تیغه اجرا شده بود. این روش با فرض یک همبستگی معتبر بین جریان سیال نیوتنی و غیرنیوتنی است که فیزیکی نیست. کاشانی و همکاران [۲۱] اثر اندازه ذرات چند نوع خاک، ارتفاع دوغاب خام و رس و هم‌چنین نوع

1. Torotwa & Ji
2. Satjaritanun
3. Murthy
4. Ilina
5. Reviol



(1) Inlet; (2) Reactor Tank; (3) Baffles; (4) Impeller; (5) Outlet.

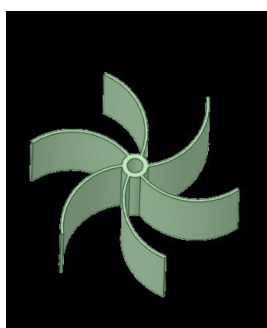
شکل ۱. نمایی از هندسه مخزن همزن‌دار مورد بررسی.

Figure 1. A view of the studied reactor.

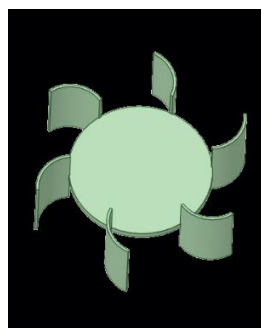
جدول ۱. مشخصه‌های شکل هندسی مورد مطالعه.

Table 1. Parameters of the studied geometric shape.

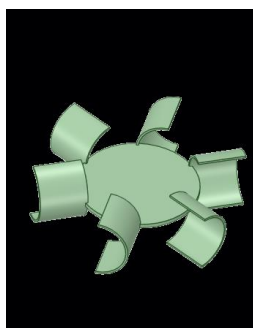
Parameters	Value
Tank diameter (D)	0.170 m
Inlet diameter (d)	0.0066 m
Number of baffles	4
Width of baffles	D/12
Number of blades in propeller	6
Ratio of mixer diameter to tank diameter	$3/d_m/D=1$
Propeller blade length (a)	$d_m/4$
Propeller blade height (b)	$d_m/5$
Stirrer diameter	d_m
Blade radius of curvature Backswept Rushton	0.01 m
Blade radius of curvature Backswept impeller	0.0172 m
Blade radius of curvature Smith turbine	0.007 m



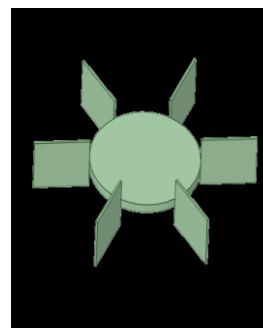
Backswept impeller



Backswept rushton



Smith turbine



Rushton impeller

شکل ۲. نمایی از هندسه همزن‌های مورد بررسی.

Figure 2. A view of the geometry of the examined mixers.

همگرایی 10^{-6} قرار داده شد. جریان سیال داخل راکتور به صورت تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شد.

مدلسازی CFD شامل حل عددی معادلات بقا است. معادله ناویر-استوکس و مدل تلاطم k-ε به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{T' u'_j}) \quad (3)$$

$$-\overline{u'_i u'_j} = 2 \nu_t \bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad (4)$$

$$-\overline{T' u'_j} = \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \quad (5)$$

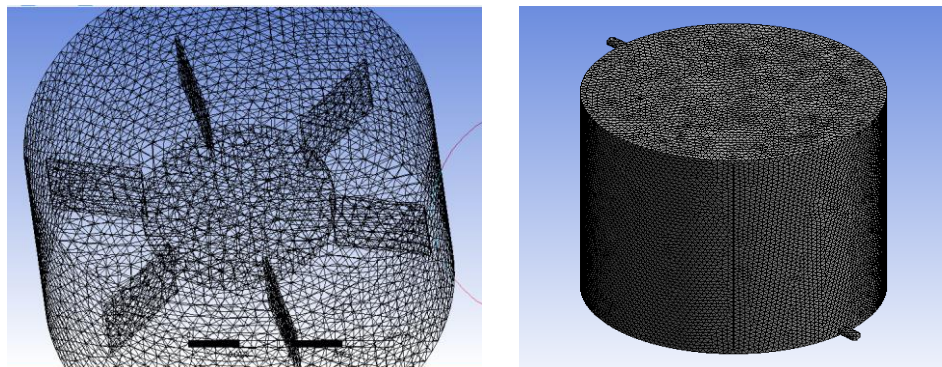
$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \left[\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

یکی از مراحل بسیار مهم در یک فرایند شبیه‌سازی با استفاده از روش CFD، مرحله‌ی مش‌بندی سامانه است. از آنجایی که در شبیه‌سازی از روش حجم محدود^۱ برای حل مسائل استفاده شده است، کیفیت و اندازه شبکه‌ها بسیار حائز اهمیت است. شبکه‌بندی هندسه براساس مش چهاروجهی - که دارای پایداری نسبتاً مناسبی است - انجام گرفته است. در مناطقی از فضای شبیه‌سازی مانند نزدیک دیواره‌ها، حفره‌ها و برش‌ها که تغییرات سرعت به شدت افزایش می‌یابد، مش‌بندی به شکل دقیق‌تر و با تراکم بیشتر انجام می‌شود. بدین منظور، با تعیین اندازه مناسب مش در نزدیکی این نواحی، مش‌بندی با یک الگوی افزایشی در اندازه مش اجرامی شود. نمایی از شبکه‌بندی مخزن همزن دار و ناحیه متحرک همزن در شکل (۳) نشان داده شده است.

از آنجایی که اختلاط شدیدی در این نوع راکتور رخ می‌دهد، مرجع رژیم جریان به صورت درهم، در نظر گرفته شد. برای شروع مدل‌سازی جریان درهم سیال، ابتدا باید معادلات ناویر-استوکس برای جریان سیال در خطوط جریان حل شود و با استفاده از اصول بقای جرم، مومنتوم و انرژی، شرایط مرزی برای هر خط جریان تعیین شود. همچنین، برای کوپل کردن فشار-سرعت از الگوریتم SIMPLE استفاده شد. در CFD این الگوریتم به طور گسترده‌ای با استفاده از روش عددی حل معادلات ناویر-استوکس به کار گرفته می‌شود. به منظور گسسته‌سازی فشار از روش PRESTO برای مومنتوم و برای حل معادله مومنتوم روش بالادست مرتبه دوم به کار گرفته شد. فرمول ضمنی مرتبه دوم برای محاسبات در نظر گرفته شده است. هم‌چنین، در این تحقیق برای مشخصه‌های قابل پیش‌بینی معیار



شکل ۳. نمایی از شبکه‌بندی مخزن همزن دار و ناحیه متحرک همزن.

Figure 3. A view of the mesh of the tank and the moving area of the mixer.

اختلاط مورد نیاز در هنگام استفاده از همزن مکانیکی تعیین شده است. در صورتی که اختلاط کامل رخ ندهد، عدد پکله به‌عنوان یک تابع از سایر مشخصه‌های اختلاط تعیین می‌شود. تأیید اعتبار مدل‌سازی به‌وسیله نتایج این تحقیق آزمایشگاهی انجام گرفت. برای تعیین میزان اختلاط از نسبت $I(\theta)$ استفاده شد که از فرمول زیر به‌دستی می‌آید:

$$I(\theta) = \frac{C_0^+ - C(t)}{C_0^+ - C_0^-} \quad (10)$$

در این رابطه، غلظت KCl در ورودی از C_0^- به C_0^+ تغییر می‌کند و $C(t)$ غلظت KCl خروجی در زمان مورد نظر است. هشت شبکه باتراکم‌های متفاوت و شیوه‌ای همانند در تولید، برای یافتن مناسب‌ترین شبکه بررسی شد. نتایج استقلال از مش در شکل (۴) آورده شده است.

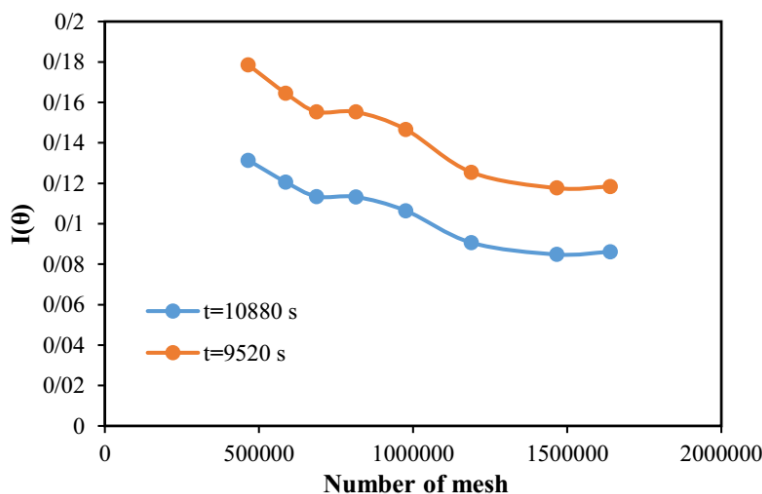
همان‌طور که در شکل پیدا است؛ بین مش‌های هفتم با ۱۴۶۶۷۳۴ و هشتم با ۱۶۳۹۶۴۹ مش، تفاوت معناداری بین نسبت اختلاط مشاهده نشد. تغییرات در نسبت اختلاط برای $t=10880$ s و $t=9520$ s به ترتیب ۰/۶۷ و ۲/۴۳ درصد به‌دست آمد. به‌همین دلیل و به‌منظور کاهش هزینه و زمان محاسبات، تعداد مش ۱۴۶۶۷۳۷ به‌عنوان مش بهینه انتخاب شد که سایر شبیه‌سازی و محاسبات بر مبنای آن انجام گرفت.

در این روابط، u سرعت سیال، g شتاب گرانش، ν گرانروی، P فشار و $\sigma_k, \sigma_\epsilon, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ ثوابت معادلات هستند. در بخش مدل اجزاء^۱ گزینه انتقال اجزاء در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی اختلاط با معرفی یک مایع ثانویه به‌عنوان یک ردیاب بی‌اثر به مایع اولیه در ظرف انجام می‌شود. توزیع زمانی و مکانی غلظت ردیاب از حل معادله انتقال جزء به‌دستی می‌آید. این معادله را برای یک مخلوط بدون واکنش، می‌توان به‌شکل زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial(\rho\omega_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \nabla \cdot (\rho u_j \omega_k) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho D_{eff} \frac{\partial \omega_k}{\partial x_j}) \quad (9)$$

که در آن ω_k کسر جرمی k امین‌گونه و D_{eff} نفوذ مؤثر گونه در مخلوط است. برای محاسبه خواص مخلوط از جمله دانسیته، گرمای ویژه، هدایت حرارتی و گرانروی از قواعد اختلاط^۲ استفاده شده است. برای ضریب نفوذ جرمی از گزینه تخمین رقیق^۳ استفاده و ضریب نفوذ همه ترکیبات به نرم‌افزار معرفی شده است.

از جمله کارهای آزمایشگاهی مربوط به بررسی اختلاط در مخازن همزن‌دار، می‌توان از تحقیق لیپوسکا^۴ و همکاران [۲۳] نام برد. هدف از تحقیق آنان، تعیین محدوده مشخصه‌هایی بود که در آن‌ها برای آب و سایر مایعات با گرانروی بالاتر پدیده اختلاط آرامانی مایع در یک راکتور پیوسته رخ می‌دهد. شرایطی که در آن مایع به‌طور آرامانی تنها با انرژی جریان ورودی ترکیب می‌شود و هم‌چنین، شدت



شکل ۴. نتایج استقلال از مش.

Figure 4. The results of independence from the mesh.

1. Species

2. Mixing Law

3. Dilute-Approximation

4. Lipowska

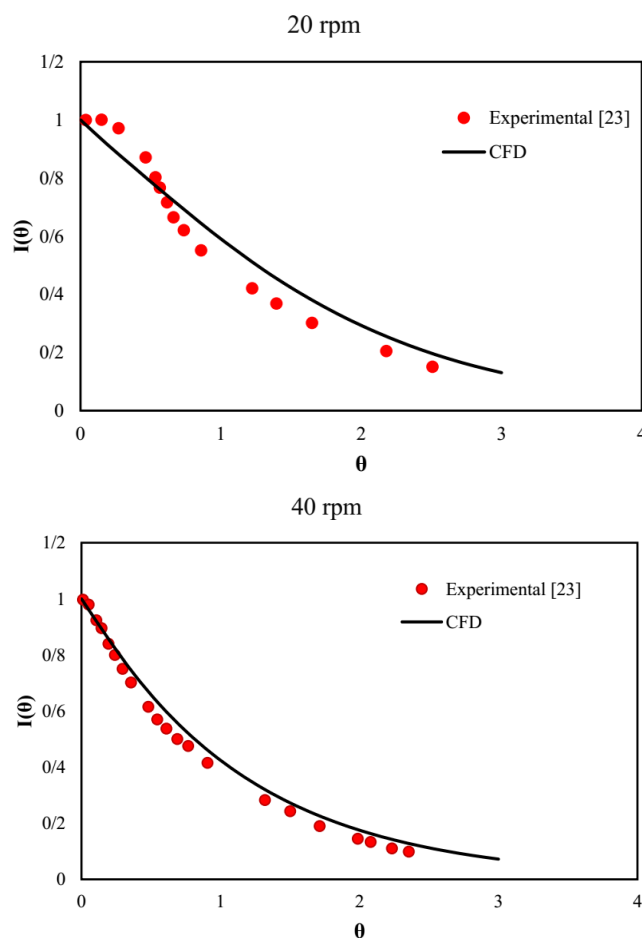
اسمیت توربین، راشتون برگشتی و پروانه برگشتی در دور ثابت ۲۰ rpm و سرعت‌های ورودی مختلف با حالت آرمانی مقایسه شده‌است.

همان‌گونه که پیدا است در هر چهار پره با افزایش سرعت جریان ورودی به مخزن از ۰/۰۲۸ به ۰/۰۳ متربرثانیه نسبت اختلاط کم‌شده، به حالت آرمانی نزدیک‌تر می‌شود؛ اما در سرعت‌های ۰/۰۴ و ۰/۰۵ متربرثانیه میزان اختلاط به‌طرز معناداری از حالت آرمانی فاصله گرفته و کمتر می‌شود. هم‌چنین، مشاهده شد که با افزایش سرعت شیب تغییرات اختلاط تندتر می‌شود. درمورد پره توربین اسمیت هرچه به پایان شبیه‌سازی نزدیک می‌شویم، میزان اختلاط برای تمام سرعت‌ها کمتر از حالت آرمانی به‌دست‌آمده که این تغییر رفتار در $\theta=2/25$ مشاهده می‌شود.

برای اعتبارسنجی تحقیق از مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۲۳] استفاده شده‌است. نتایج اعتبارسنجی در شکل (۵)، برای سرعت‌های دور پره ۲۰ و ۴۰ دوربردقیقه آورده شده‌است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، نسبت اختلاط در زمان‌های بی‌بعد (نسبت زمان به زمان ماند محلول در مخزن) مختلف برای دو حالت رسم شده‌است. می‌توان گفت که نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر به حالت آزمایشگاهی نزدیک است و این مسئله تأییدکننده نتایج شبیه‌سازی CFD است.

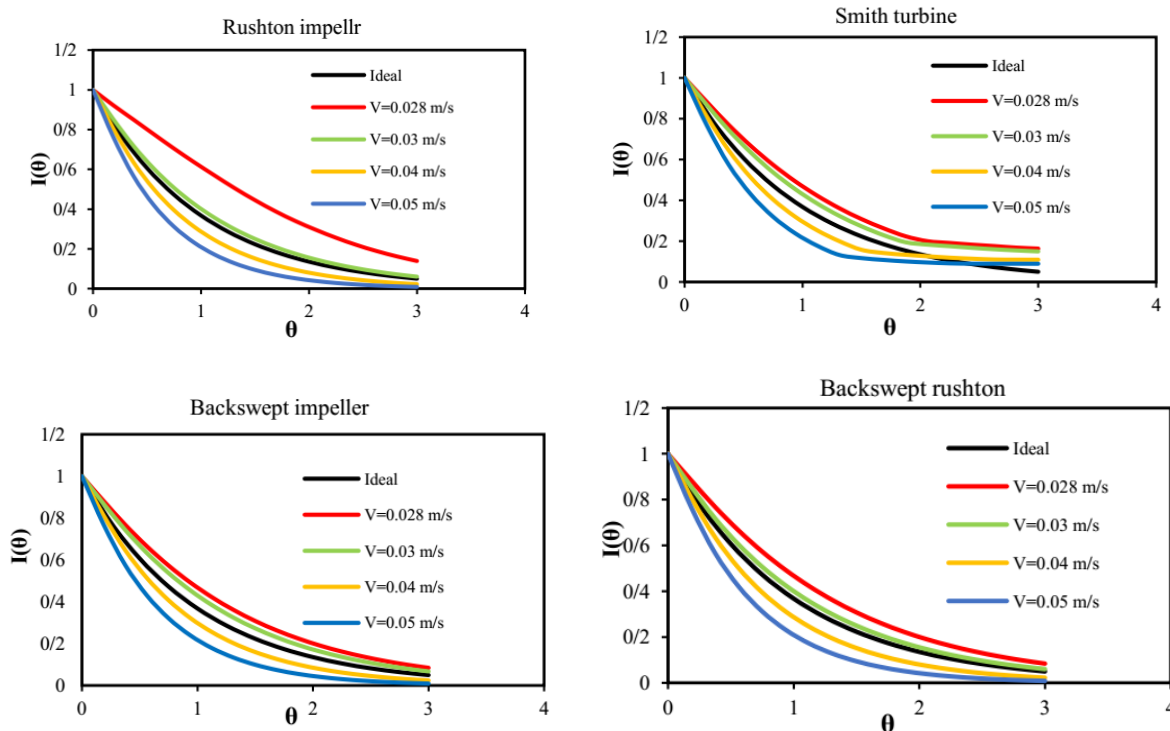
۳. بحث و بررسی نتایج

در این تحقیق تأثیر مشخصه‌های مختلف مخازن همزن‌دار بر عملکرد اختلاط به کمک شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مطالعه و تحلیل شد. در شکل (۶)، میزان اختلاط چهار پره راشتون،



شکل ۵. نتایج اعتبارسنجی مخزن اختلاط پره راشتون دور ۲۰ و ۴۰ rpm.

Figure 5. Validation results of mixing tank – Rashton impeller for 20 and 40 rpm.



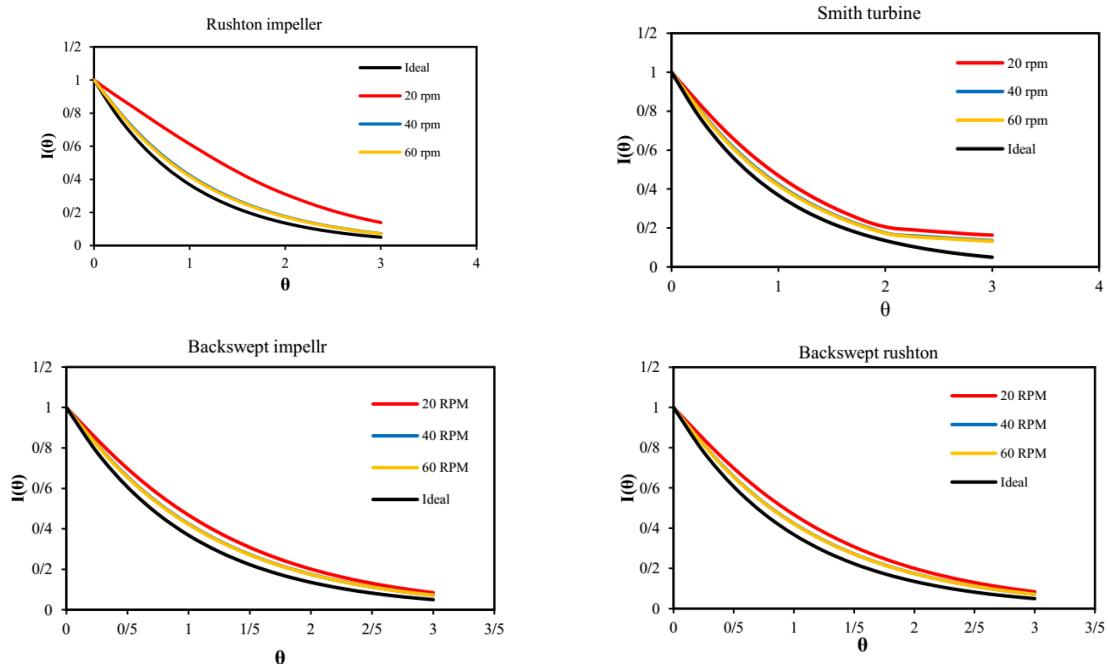
شکل ۶. میزان اختلاط چهار پره در دور ۲۰ rpm و سرعت‌های مختلف جریان ورودی.

Figure 6. Mixing of 4 blades at 20 rpm and different inlet velocity.

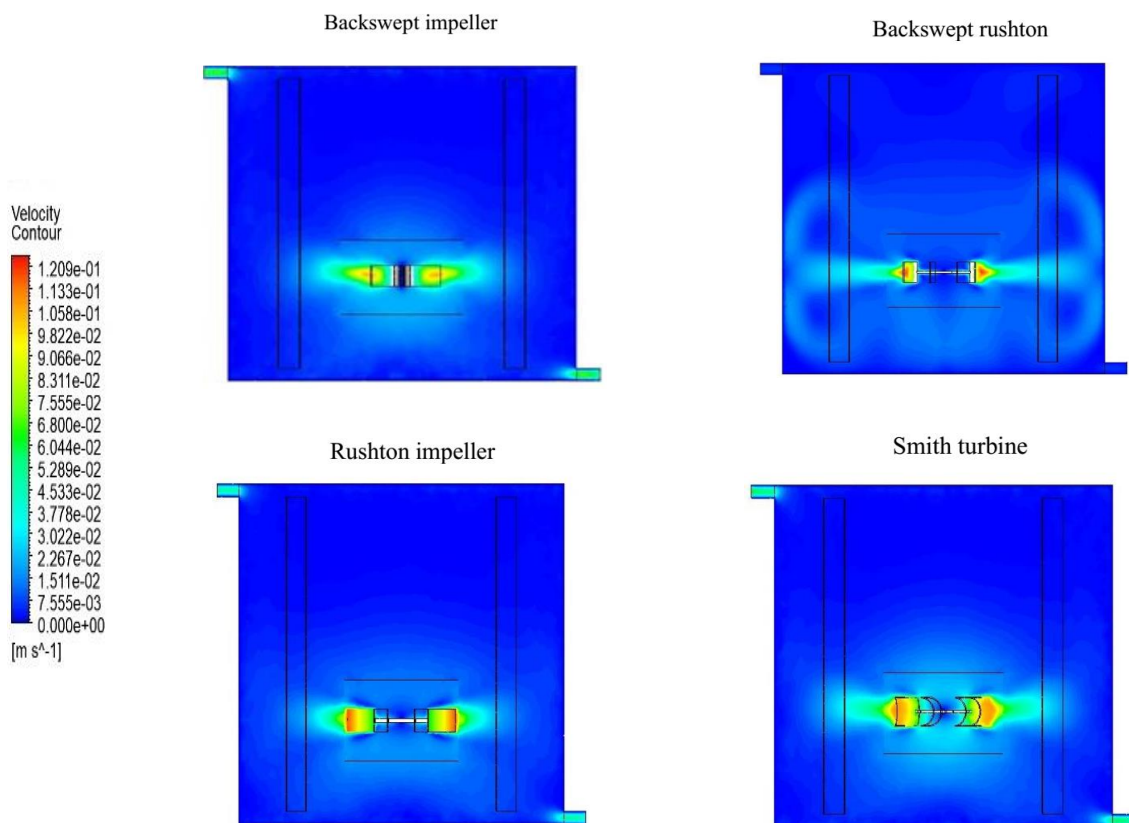
سرعت در اطراف پره‌ها قابل رویت است. در پره راشتون برگشتی برخلاف سه نوع دیگر، توزیع مومنوم یکنواخت‌تر و بردارهای سرعت همگرا است که می‌تواند ناشی از تغییر شکل ظاهری و انحنای خاص این پره باشد. شکل (۹) میزان اختلاط چهار پره مورد مطالعه در این تحقیق را در سرعت ورودی ثابت 0.028 متر بر ثانیه و مقدار دور ۲۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، پره راشتون برگشتی بهترین میزان اختلاط و نزدیک‌ترین رفتار را نسبت به حالت آرمانی دارد و در θ برابر با ۳، نسبت اختلاط آن برابر با 0.083879 است. پس از آن پره پروانه برگشتی قرار دارد که تقریباً منطبق بر منحنی راشتون برگشتی است و در θ برابر با ۳، نسبت اختلاط آن برابر با 0.084289 به دست آمد. با مشاهده توزیع سرعت در شکل (۸)، بین این دو پره می‌توان تشابه توزیع سرعت بین آن‌ها و نیز برتری اختلاط نسبت به دو پره دیگر را مشاهده کرد. پره توربین اسمیت رفتار متفاوتی در θ های مختلف از خود نشان داده است و تا θ برابر با $2/06$ تقریباً منطبق بر منحنی‌های راشتون برگشتی و پروانه برگشتی بوده و پس از آن با شیب ملایم از حالت آرمانی فاصله گرفته است تا در θ برابر با ۳، نسبت اختلاط آن

شکل (۷)، میزان اختلاط چهار پره راشتون، اسمیت توربین، راشتون برگشتی و پروانه برگشتی در سرعت ورودی ثابت 0.028 متر بر ثانیه و دورهای مختلف با حالت آرمانی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که برای هر چهار پره مورد نظر، بیشترین میزان اختلاط در نسبت اختلاط نسبت به حالت آرمانی در ۲۰ دور بر دقیقه حاصل شده است. همچنین، مشاهده شد که منحنی‌های ۴۰ و ۶۰ دور بر دقیقه بر یکدیگر منطبق هستند و پس از ۴۰ دور بر دقیقه، افزایش دور تأثیر زیادی بر میزان اختلاط نمی‌گذارد. همچنین، برای پره اسمیت توربین مشاهده شد که در $\theta = 2$ اختلاط از حالت آرمانی بیشتر شده است. پره راشتون برگشتی کمترین حساسیت را نسبت به تغییر دور در مقایسه با سه پره دیگر نشان می‌دهد.

با به‌کارگیری نتایج محاسبات شبه‌سازی CFD، توزیع سرعت در چهار نوع پره مورد بررسی در این مطالعه، در شکل (۸) نشان داده شده است. تفاوت آشفتگی در راستای شعاع و محور همزن آشکار است. مشاهده شد که در تمامی اندازه‌های سرعت روی سطح پره و دیواره‌های مخزن نزدیک به صفر است که این امر ناشی از اصطکاک و نیروهای مقاومتی است. همچنین، بیشترین اندازه



شکل ۷. میزان اختلاط چهار پره در سرعت ورودی ۰/۰۲۸ متر بر ثانیه و دورهای مختلف پره.
 Figure 7. Mixing of 4 blades at the inlet velocity of 0.028 m/s and different rotational speed.



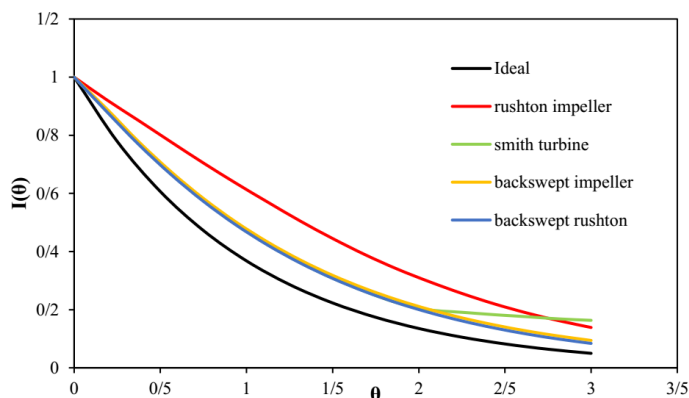
شکل ۸. توزیع سرعت پره‌ها در سرعت ورودی ۰/۰۲۸ متر بر ثانیه و سرعت ۴۰ rpm.
 Figure 8. Blade velocity distribution at the input velocity of 0.028 m/s and 40 rpm.

برابری ۰/۱۶۳۳ به‌دست آمد که در این زمان بیشترین اختلاف را با حالت آرمانی دارد. پره راشتون تا θ برابر با ۲/۴۳ بیشترین انحراف را از حالت آرمانی دارد و پس از آن با شیب تقریباً ثابت پیش‌می‌رود تا در θ برابر با ۳، نسبت اختلاط آن برابر با ۰/۱۳۸۷۷ به‌دست آمد. میزان اختلاط کمتر این پره در مقایسه با سه مورد دیگر در شکل (۸)، پیدا است. یکی از کاستی‌های پره راشتون این است که در تماس با سیال تنش برشی بالایی ایجاد می‌کند که باعث افزایش مصرف انرژی می‌شود. با انحنادادن به این پره در جهت‌های مختلف، می‌توان مصرف انرژی را به مقدار زیادی کاهش داد که این تأثیر تغییر انحنا در نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی قابل مشاهده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر مشخصه‌های عملیاتی مختلف بر میزان اختلاط، بررسی شد. این مشخصه‌ها شامل نوع و زاویه پره‌های همزن و دور همزن بود. چهار نوع مختلف پره، شامل: راشتون، اسمیت توربین، راشتون برگشتی و پروانه برگشتی به‌طور مجزا بررسی شد. هم‌چنین، دورهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دوربردقیقه و سرعت‌های مختلف جریان ورودی به مخزن، شامل: ۰/۰۳، ۰/۰۲۸، ۰/۰۴ و ۰/۰۵ متربرثانیه در مدل‌سازی اختلاط به‌وسیله روش CFD مطالعه شد. تعداد مش ۱۴۶۶۷۳۷ به‌عنوان مش بهینه انتخاب شد که سایر شبیه‌سازی و محاسبات بر مبنای آن انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پره راشتون برگشتی، با بهترین میزان اختلاط و رفتار نزدیک‌تر به حالت آرمانی، در θ برابر با ۳، نسبت اختلاط آن برابر با ۰/۰۸۳۸۷۹ است، پس از آن پره

پروانه برگشتی قرار دارد که تقریباً منطبق بر منحنی راشتون برگشتی است و در θ برابر با ۳، نسبت اختلاط آن برابر با ۰/۰۸۴۲۸۹ به‌دست آمد. پره توربین اسمیت، رفتار متفاوتی در θ های مختلف از خود نشان داد و تا θ برابر با ۲/۰۶ تقریباً منطبق بر منحنی‌های راشتون برگشتی و پروانه برگشتی بوده و پس از آن با شیب ملایم از حالت آرمانی فاصله گرفته است تا در θ برابر با ۳، نسبت اختلاط آن برابر با ۰/۱۶۳۳ به‌دست آمد که در این زمان بیشترین اختلاف را با حالت آرمانی دارد. پره راشتون تا θ برابر با ۲/۴۳ بیشترین انحراف از حالت آرمانی را دارا است و پس از آن با شیب تقریباً ثابت پیش‌می‌رود، تا در θ برابر با ۳، نسبت اختلاط آن برابر با ۰/۱۳۸۷۷ به‌دست آمد. هم‌چنین، مشاهده شد که با افزایش سرعت جریان ورودی، شیب تغییرات اختلاط نیز تندتر شده است. به‌جز در سرعت ۰/۰۵ متربرثانیه، میزان اختلاط در سرعت‌های مختلف، اختلاف کمتری با حالت آرمانی از خود نشان می‌دهد. نیز، مشاهده شد که پره راشتون برگشتی کمترین حساسیت را نسبت به تغییر دور نسبت به سه پره دیگر از خود نشان می‌دهد. در میان کلیه اجزای پژوهش حاضر، بهترین میزان اختلاط برای پره راشتون برگشتی در دور برابر با ۲۰ rpm و سرعت ۰/۰۳ متربرثانیه به‌دست آمد. انتخاب همزن مناسب در راکتورها اهمیت بسیاری دارد؛ زیرا همزن عاملی اساسی در بهبود عملکرد و بهره‌وری راکتورها است. انتخاب نوع و اندازه همزن مناسب به توانایی مخلوط کردن مواد و ایجاد آشفتگی در جریان سیالات کمک می‌کند و در نهایت، میزان تبادل حرارت و انتقال جرم را بالایی برد.



شکل ۹. مقایسه میزان اختلاط چهار پره در سرعت ورودی ۰/۰۲۸ متربرثانیه و دور ۲۰ rpm.

Figure 9. The comparison of mixing of 4 blades at the input velocity of 0.028 m/s and rotational speed of 20 rpm.

- [1] Karpinska, A. M., & Bridgeman, J. (2016). CFD-aided modelling of activated sludge systems – A critical review. *Water Research*, 88, 861–879.
- [2] Sharan, V., Rohit, K., Ravishankar, M., Bhuvaneshwar, D., & Harish, R. (2020, December). CFD simulation of turbulent flow behaviour in a mixing reactor with Rushton impeller. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1716, 012025.
- [3] Hoseini, S. S., Najafi, G., Ghobadian, B., & Akbarzadeh, A. H. (2021). Impeller shape-optimization of stirred-tank reactor: CFD and fluid structure interaction analyses. *Chemical Engineering Journal*, 413, 127497.
- [4] Ranade, V. V., Joshi, J. B. (1989). Flow generated by pitched blade turbines I. Measurements using laser Doppler anemometer. *Chemical Engineering Communications*, 81, 197–224.
- [5] We-Ming, L., Hong-Zhang, W., Nai-Yu, C., & Yu-Li, L. (2000). Effect of the blade size on the vortex structure and gas dispersion in gas–liquid stirred vessels with a single Rushton turbine impeller. *Proceedings of the National Science Council, Republic of China*, 24, 166–175.
- [6] Firoz, R. K., Chris, D. R., & Graham, K. H. (2004). A multi-block approach to obtain angle resolved PIV measurements of the mean flow and turbulence fields in a stirred vessel. *Chemical Engineering & Technology*, 27, 264–269.
- [7] Fasano, J. B., Bakker, A., Penney, W. R. (1994). Advanced impeller geometry boosts liquid agitation. *Chemical Engineering*, 101, 110–116.
- [8] Rajavathsavai, D., Khapre, A., & Munshi, B. (2014). Study of mixing behavior of cstr using CFD. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31, 119-129.
- [9] Karcz, J., & Cudak, M. (2003, October). Local momentum and heat transfer in a liquid and gas–solid–liquid systems mechanically stirred in a jacketed vessel. In *11th European Conference on Mixing*, 14-17.
- [10] Yang, F. L., Zhou, S. J., Zhang, C. X., & Wang, G. C. (2013). Mixing of initially stratified miscible fluids in an eccentric stirred tank: Detached eddy simulation and volume of fluid study. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 30, 1843.
- [11] Godleski, E. S., & Smith, J. C. (1962). Power requirements and blend times in the agitation of pseudoplastic fluids. *AIChE Journal*, 8, 617-620.
- [12] Zhang, Q., Yang, C., Mao, Z. S., & Mu, J. (2012). Large eddy simulation of turbulent flow and mixing time in a gas–liquid stirred tank. *Industrial & engineering chemistry research*, 51, 10124-10131.
- [13] Akiti, O., Yeboah, A., Bai, G., & Armenante, P. M. (2005). Hydrodynamic effects on mixing and competitive reactions in laboratory reactors. *Chemical engineering science*, 60, 2341-2354.
- [14] Kumaresan, T., Joshi, J. B. (2006). Effect of impeller design on the flow pattern and mixing in stirred tanks. *Chemical Engineering Journal*, 115, 173–193.
- [15] Torotwa, I., Ji, C., (2018). A Study of the Mixing Performance of Different Impeller Designs in Stirred Vessels Using Computational Fluid Dynamics. *Designs*, 2, 10.
- [16] Satjaritanun, P., Bringley, E., Regalbuto, J. R., Regalbuto, J. A., Register, J., Weidner, J. W., & Shimpalee, S. (2018). Experimental and computational investigation of mixing with contra-rotating, baffle-free impellers. *Chemical Engineering Research and Design*, 130, 63–77.
- [17] Murthy, B. N., Ghadge, R. S., & Joshi, J. B. (2007). CFD simulations of gas–liquid–solid stirred reactor: Prediction of critical impeller speed for solid suspension. *Chemical Engineering Science*, 62, 7184–7195.
- [18] Amani, R., & Beigzadeh, R. (2021). Comparison of Hydrodynamic Performance of Three Types of Static Mixers Using Computational Fluid Dynamics and Artificial Neural Network. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 20, 94-109, [In Persian].
- [19] , L. A., Shagarova, A. A., & Goncharov, I. O. (2020). Comparative Analysis of the Performance of Oscillating and Propeller Stirrers, *International Conference on Industrial Engineering*, 1340-1347.
- [20] Reviol, T., Kluck, S., & Böhle, M. (2018). A new design method for propeller mixers agitating non-Newtonian fluid flow. *Chemical Engineering Science*, 190, 320–332.
- [21] Moayeri Kashani, M., Lai, S. H., Ibrahim, S., & Moradi Bargani, P. (2016). Design factors affecting the dynamic performance of soil suspension in an agitated, baffled tank. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24, 1664–1673.
- [22] Choupani, M., Ghaibi, S., Taghavi, M., & Moghadas, J., (2009). The effect of impeller type on mixing time in stirred tanks. *Journal of Iranian Chemical Engineering*, 8, 60-65, [In Persian].
- [23] Burghardt, A., & Lipowska, L. (1972). Mixing phenomena in a continuous flow stirred tank reactor. *Chemical Engineering Science*, 27, 1783-1795.