

مقاله پژوهشی

شبیهسازی هیدرودینامیکی بیورآکتور گاز–مایع همزن دار جهت بهینهسازی سرعت چرخش پروانههای–راشتون به کمک CFD

پدرام ناصحی و احمد آذری *

۱– دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران ۲– دانشیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

(دریافت مقاله: ۲/۰۴/۲۸ – دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹)

چکیده – در این تحقیق، تأثیر تغییرات سرعت چرخش پروانه راشتون درون بیورآکتور به منظور پخش مناسب هوا، بررسی نرخ کرنش برشی، شبیهسازی و بررسی شد. شبیهسازی انجام شده با رویکرد چند فازی، مدل فاز پراکنده صفر معادله، با کمک مدل اغتشاش K-Epsilon Standard، به صورت پایا و سهبعدی توسط مجموعه نرمافزاری ANSYS Products ورژن 2019 R3 و نرم افزار Ansys CFX انجام گرفت. معادلات حاکم بر سیستم با روش حجم محدود برای کل سیستم محاسبه شد. به منظور تزریق مناسب هوا به درون بیورآکتور، از یک حلقهٔ حبابساز که در زیر پروانه قرار گرفته است، استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش سرعت چرخش پروانه میتواند به پخش بهتر هوا درون بیورآکتور کمک کند؛ اما از طرفی موجب افزایش نرخ کرنش برشی درون بیورآکتور میشود. همچنین، افزایش سرعت چرخش پروانه بیش از ۱۰۵ دور بر دقیقه موجب افزایش اغتشاش در مایع شده و تأثیرات آن روی فاز گاز کاهش مییابد. علاوه بر این، با در نظر گرفتن سرعت چرخش پروانه و ا برای از بر روی میزان اختلاط فاز گاز و مایع شده و تأثیرات آن روی فاز گاز کاهش مییابد. علاوه بر این، با در نظر گرفتن سرعت چرخش پروانه در نیز میزان اختلاط فاز گاز و مایع شده و تأثیرات آن روی فاز گاز کاهش می میاوان سرعت ۵۰۳ تا ۲۵۰ دور بر دقیقه را برای از محیان اختلاط فاز گاز و مایع شده افزایش سرعت چرخش پروانه نمیتوان به اختلاط بهتر در بیورآکتور رسید و میایست سرعت بهینه در نظر گرفت. در نهایت، مشخص شد

واژههای کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، بیورآکتور، پروانه راشتون، بیورآکتور گاز–مایع، مدل اغتشاش K-Epsilon.

Hydrodynamic simulation of stirred gas-liquid bioreactor for the optimization of the rotation speed of Rushton impellers using CFD

P. Nasehi' and A. Azari^{2*}

Faculty of Petroleum, Gas and Petrochemical Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran.

Abstract: In the present research, the effect of altering the rotational speed of the Rushton impeller inside the bioreactor was simulated and investigated for proper air distribution and changes in the shear stress rate. The simulation was performed using the multiphase approach of the zero-equation scattered phase model, via the K-Epsilon Standard perturbation model, in stable three-dimensional manner using ANSYS Products 2019 R3 and Ansys CFX software packages. The governing equations of the system were solved by the finite volume method for the entire system. To properly inject air into the bioreactor, a sparger ring was used under the impeller. The results revealed that increasing the impeller rotation speed could help better disperse the air inside the bioreactor. However, it also increases the shear stress rate inside the bioreactor. It was also shown that increasing the speed

ch (

and getting more energy from it creates turbulence in the liquid. Additionally, its effect on the gas phase is reduced for the rotation speeds more than 150 rpm. Considering the rotation speed of the impeller and its effect on the mixing of gas-liquid phase, the intra-liquid stress and the average mass transfer rate, the speed of 350 to 450 rpm may be considered as the optimal speed. Finally, it was found that by increasing the rotation speed of the impeller, better mixing in the bioreactor could not be achieved and the optimal speed had to be determined.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Bioreactor, Rushton impeller, Gas-Liquid Bioreactor, K-Epsilon model.

			ست علائم
ونانى	علائم ي	بردار سرعت (سرعت سیال)	u
ويسكوزيته گردابهاي	$\boldsymbol{\mu}_t$	انرژی جنبشی ناشی از اثرات تراکمپذیری جریان	Ym
عدد پرانتل متناسب با k	σk	انرژی ناشی از نیروی شناوری'	Gb
عدد پرانتل متناسب با SK	σε	انرژی تولیدی ناشی از گرادیانهای سرعت	Gk
نرخ کرنش برشی	Ϋ́	توان مورد نیاز برای چرخش پروانه	Р
دانسيته	ρ	قطر پروانهها	D
کسر حجمی	α	سرعت پروانه	Ν
میانگین کل متغیر در المان	$\overline{\varphi}_a$	فاصلهٔ دو صفحه	hd
سها	زيرنويس		
یک سطح متغیر از n سطح متغیر موجود در المان	i		

۱ – معرفی

راکتورهای گاز-مایع کاربرد وسیعی در صنایع مختلفی همچون هیدروژناسیون^۳، اکسیداسیون^۴، تخمیرهای هوازی^۵ به ویژه فر آیندهای بیو تکنولوژی^۶ دارند [۱]. فر آیند مخلوط کر دن نیز در صنایع مختلف به خصوص در راکتورهای گاز-مایع بخش مهمی از فرآیندهای شیمیایی برای پیشبرد واکنش به شمار میرود. تأثیرگذاری مستقیم فرآیند مخلوط کردن، در بازدهٔ راکتورهای گاز-مایع باعث می شود که برای به دست آوردن بیشترین راندمان در آزمایشها و پژوهشهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد. فرآیند مخلوط کردن، به معنای ایجاد حرکت و آشفتگی در جریان مایع یا گاز موجود درون رآکتورمیباشد. دلیل اصلی استفاده از مخلوط کردن در صنعت، افزایش سرعت انجام واكنشها به دليل افزايش برخورد مواد درون راكتور است[۲]. اختلاط معمولاً مي تواند به منظور انجام يک تغيير فیزیکی یا شیمیایی انجام شود[۳]. بکارگیری راکتورهای گاز-

مايع بدون ايجاد اختلاط مناسب، معمولاً باعث مي شود، انتقال جرم و انتقال حرارت درون بيورآكتور به صورت مناسب صورت نگیرد. این مشکلات موجب می شوند که فرآیند کاری این دسته از راکتورها به صورت ناهمگن ادامه پیدا کند [۴]. ناهمگن بودن بيورآكتورها موجب چگالي بالا يا يايين هوا در بخشهای مختلف میشود. این موضوع میتواند فرآیندهای زیستی^۷ درون بیورآکتور را تحت تأثیر خود قرار دهد [۵]. در نتیجه، فرآیندهای انتقال جرم از فاز گاز به مایع می تواند با چالشهای فراوانی روبرو شود؛ از جمله این چالشها میتوان به مشکلاتی همچون پخش نشدن درست گاز اشاره کرد. این مشكلات موجب ناهمگن تر شدن كل سيستم مى شوند. ناهمگن بودن راکتور به ویژه در فرآیندهای زیستی هوازی بسیار مخاطره انگیز است. در نتیجه، انتقال گاز (اکسیژن) به صورت همگن و بهینه بسیار ضروریست و هرگونه کمبود اکسیژن در فرآیندهای وابسته به فاز گازی، عملکرد کلی آن را تحت تأثیر قرار

پروانه جریان شعاعی است که برای بسیاری از کاربردهای اختلاط در مهندسی فرآیند مورد استفاده قرار می گیرد. طراحی این پروانه بر اساس یک دیسک تخت با تیغههای عمودی است. وجود پروانهها برای هم زدن فازهای موجود در راکتور میتواند عملیات اختلاط و همگن کردن را بهبود ببخشد [۱۰]. از طرفی دیگر، وجود بافل^{۱۹} نیز میتواند موجب یکپارچه شدن سریعتر و پخش بهتر اکسیژن در کل سیستم شود. سرعت چرخش پروانه درون بیورآکتور تأثیر فراوانی در عملکرد کلی بیورآکتور دارد [۱۱]. بهینه کردن سرعت چرخش پروانه بر میزان مصرف انرژی و اختلاط ایجاد شده در بیورآکتور تأثیر بسزایی دارد. بدیهی است افزایش سرعت پروانه و افزایش بافلها میتواند همگنسازی و پخش بهتری از اکسیژن را ایجاد کند، اما مشخص است که افزایش این پارامترها موجب افزایش تلاطمهای موجود در راکتور می شود. این تلاطمها در نهایت منجر به آسیب دیدن واکنشهای بیولوژیکی در حال انجام درون راکتورها گردد [۱۲]. به همین دلیل، دستیابی به سرعت بهینه در پروانههای بیورآکتورها میتواند بسیار پُراهمیت باشد. بررسی این فرآیندها با سیستمهای آزمایشگاهی کاری زمانبر و پُرهزینه است. هزینهٔ بالای آزمایشها در کنار زمانبر بودن آنها، تمایل برای استفاده از روشهای شبیهسازی را افزایش داده است. طی سالهای اخیر، با پیشرفت قدرت رایانهها، استفاده از تکنیکهای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^{°۲} در محاسبهٔ جریانهای چندفازی بسیار افزایش پیدا کرده است [۱۳]. اولین استفاده از سیالات دینامیک محاسباتی در سال ۱۹۴۷ برای تشریح حرکت جریان هوا پیرامون مخروط های نوک تیز در سرعت های مافوق صوت توسط کار کوپل و همکاران انجام گرفت. در این کار جداول کاملی برای بررسی این جریانها با کمک کامپیوترهای مؤسسه فن آوری ماساچوست انجام گرفت [۲۹]. توسعه دینامیک سیالات محاسباتی همزمان با به وجود آمدن کامپیوترهای سریعتر در دهه های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ صورت گرفت. بررسی های انجام گرفته در آن زمان پیرامون حرکت سریع اشیاه در جو زمین بود.

گاز در مایع، این نوع پره مناسبترین انتخاب است. پرکاربردترین پروانه را در این دسته میتوان پروانه دیسکی راشتون^{۱۸} یا توربین راشتون دانست [۳]. این پروانه یک نوع

میدهد[۴]. اغلب واکنشهای زیستی در محیطهای آبی انجام

میشوند. فازهای آبی به دلیل دارا بودن نمکهای یونی، مواد

معدنی و مصرف اکسیژن برای واکنش ها یا مصرف اکسیژن

توسط میکروارگانیسمها قابلیت انحلال گازهای بسیار اندکی را

دارند [٧]. از اینرو، انتقال بهینهٔ اکسیژن بسیار مهمتر نیز می شود

و غالباً این امر به عنوان یک مرحلهٔ محدودکنندهٔ سرعت برای

فرآيندهاي زيستي آبي^ خواهد بود [٧].. بنابراين، طراحي دقيق

این دسته از راکتورها، تأثیر فراوانی در بهرهوری نهایی آنها

دارد. همانند سایر پدیدههای محیطی که مابین فازهای مختلف

صورت می گیرند، سرعت انتقال، همگن بودن راکتور و پخش

شدن گاز در بیورآکتورها عمیقاً تحت تأثیر شرایط هیدرودینامیکی^۹ در راکتور است؛ لذا، تغییر در شرایط و

خصوصيات هيدروديناميكي راكتور ميتواند موجب بهبود انتقال

گاز و همگن شدن بیورآکتور شود [۵]. از اینرو، استفاده از

همزن ٔ در راکتورها بسیار فراگیر شده است [۸]. امروزه،

راکتورهای همزندار مکانیکی به صورت گستردهای در صنایع

مختلف مورد استفاده و بهرهبرداری قرار میگیرند. نوع

پروانههای ۱۱ استفاده شده درون راکتور می تواند در عملکرد کلی

بيورآكتور تأثير بسياري داشته باشد. پرههاي ملخي ۲٬ توربيني۳٬

پارویی^{۱۴}، از مهمترین انواع پرهها هستند که برای همزدن

مايعات با ويسكوزيته پايين بكار مىروند [٩]. اين نوع همزنها

با سرعت زیاد دوران میکنند. پرهٔ لنگری^{۱۵} و پرهٔ حلزونی^{۱۶}

برای هم زدن مایعات با ویسکوزیته زیاد بکار میروند. این دو

نوع همزن با سرعت کم دوران میکنند. یکی از مهمترین انواع

پروانهها، پرههای توربینی هستند. با حرکت این پرهها، سیال در

امتداد شعاع ظرف (عمود بر محور) حرکت میکند. به همین

دلیل به این نوع پره، جریانشعاعی^{۱۷} میگویند. پرههای توربینی

در محدودهٔ گستردهای از سیالات با ویسکوزیتههای مختلف

کاربرد دارند [۵]. در صنایع شیمیایی، بخصوص برای اختلاط

پارامترهای است که در عمل به سختی میتوان مورد بررسی قرار داد، مواردی همچون جریانهای آشفته درون راکتورها و سرعت میانگین جریان درون راکتور [۲۸]. این پژوهش، یک بیورآکتور شیمیایی همزندار با یک حلقهٔ حبابساز ^{۲۱} که در زیر پروانهی آن قرار دارد، طراحی شده است. برای اعتبارسنجی نتایج، دادههای به دست آمده از شبیهسازی با دادههای آزمایشگاهی موجود در منابع مقایسه و بررسی شده است. به منظور مشخص شدن سرعت بهينة چرخش پروانه براي بهترين حالت عملکرد بیورآکتور، سرعت چرخش پروانه از ۵۰ تا ۷۵۰ دور بر دقیقه (RPM) تغییر داده شد. سپس پارامترهای عملیاتی مورد بررسی قرار گرفت. برای مشخص شدن بهترین سرعت چرخش پروانه و تأثیر سرعت آن بر عملکرد بیورآکتور، پارامترهای تنش برشی^{۳۳} متوسط، تنش برشی یکنواخت شده، تغییرات درصد هوا در بیورآکتور در سرعتهای مختلف چرخش پروانه و همچنین، رابطهی مابین افزایش سرعت چرخش پروانه و نرخ فرم يكنواخت شدهٔ كسر حجمي فاز گاز، مورد بررسي قرار گرفت. برای بررسی بهتر تأثیر سرعت چرخش پروانه درون بيوراكتور، پروانه راشتون انتخاب شد. سرعت چرخش پروانه از ۵۰ تا ۷۵۰ دور بر دقیقه با پرش های ۱۰۰ دور بر دقیقه بررسی شد. نتایج به دست آمده برای پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. پارامترها به گونهای طراحی شد تا بتوان به این نتیجه رسید که بهترین سرعت چرخش پروانه برای عملکرد بهینهٔ بيورآكتور چند دور بر دقيقه است. اين سرعت بايد بتواند هم بهترین نرخ پخش هوا را داشته باشد و هم تأثیر تنش ها را نیز در حداقل خود قرار دهد.

۲- مدلسازی CFD

در اینکار از مجموعه نرم افزاری ANSYS Products ورژن R۳ ورژن ۲۰۱۹ ۲۰۱۹ و نرمافزار Ansys CFX با کمک روش حجم محدود استفاده شده است. هندسهٔ طراحی شده شامل یک مخزن استوانهای با قطر T برابر با ۲۶۰ میلیمتر است. این مخزن تا ارتفاع h برابر با ۲۶۰ میلیمتر پُر از آب شده و آب درون مخزن

در این زمان بررسیهای دقیق رفتار مواد در گرمایی بالا ناشی از حركت مافوق صوت سرعت گرفت. همچنين تحقيقات قابل توجهای از این محاسبات، در زمینه لایه مرزی توسط فی و ريدل [٣٠] و بلوتنر [٣١ و ٣٢] همراه با تحقيقات هال و همکاران [۳۳] در مورد جریان های غیر لزج موجب افزایش توجهها بر روی این روش شد. پیش بینیهای مهندسی به قدری قوی شده است که امروزه می توان آن را به عنوان یک بعد جدید در دینامیک سیالات محاسباتی در نظر گرفت [۳۴]. هدف کلی از این شبیهسازیها را میتوان پیشبینی نتایج فرآیندها با استفاده از حل معادلات ریاضی بیان کرد [۱۴]. چرخش و حرکت پروانهها در کنار وجود بافل می تواند حرکت سیال درون راکتور را از حرکت جریان آرام به طرف جریانهای آشفته هدایت کند. همان گونه که پیشتر گفته شد، جریانهای آشفته با سرعت و انرژی بالا میتواند موجب آسیب به فرآیند شود. به همین دلیل توانایی پیش بینی رفتار جریان در راکتورها، یکی از مهمترین بخشها در طراحی راکتور است. بهترین راهحل برای درک و بررسی سرعتهای عملیاتی در زمان کارکرد پروانه، شبیهسازی حرکت پروانهها است. به عبارتی دیگر، می توان بیان کرد که شبیه سازی می تواند یکی از راههای بسیار با ارزش برای پیش بینی رفتارهای مختلف سیستمها باشد [16]. دینامیک سیالات محاسباتی، فرآیندی است که در طول آن با استفاده از آنالیز عددی و الگوریتمهای عددی، میتوان مسائل مشتمل بر شارههای سیالاتی را تجزیه و تحلیل کرد. در این روش، با تبدیل معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر سیالات به معادلات جبري، امكان حل عددي اين معادلات فراهم میشود[۱۶]. همچنین هزینه بر بودن طراحی و انجام آزمایش های درون راکتور موجب می شود استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بیش از پیش با ارزش شود[۲۶]. باید توجه شود که با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی میتوان بسیار ساده تر پدیده های انتقال جرم، انتقال حرارت، جریان های چندفازی و واکنشهای شیمیایی درون راکتور را بررسی کرد [۲۷]. همچنین از ویژگیهای کلیدی این روش بررسی

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \epsilon \right) + \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\rho k u_{i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[\left(\mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{k}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \right] +$$
(Y)

$$\begin{split} \mathbf{C}_{_{\mathrm{YE}}} & \frac{\varepsilon}{k} \Big(\mathbf{G}_{_{\mathrm{K}}} + \mathbf{G}_{_{\mathrm{YE}}} \mathbf{G}_{_{\mathrm{b}}} \Big) - \mathbf{G}_{_{\mathrm{YE}}} \rho \frac{\varepsilon}{k} + \mathbf{S}_{_{\mathrm{E}}} \\ \mathbf{C}_{_{\mathrm{\mu}}} &= \circ / \circ \mathbf{A}, \quad \mathbf{C}_{_{\mathrm{YE}}} = 1 / \mathbf{A} \mathbf{Y} \end{split} \tag{(f)}$$

$$\sigma_k = 1/\circ, \quad \sigma_E = 1/\%$$
 (a)

در معادله فوق، \mathfrak{S} و \mathfrak{s} ترمهای قابل تعریف توسط اپراتور هستند. برای شبیه سازی جریان هوا در بخش مدل شناوری سیال^{۲۸}، از مدل فاز پراکندهٔ صفر معادله^{۲۹} استفاده شد. برای جفت شدن سیالها^{۳۰} ضرایب پارامترهای ضریب کشش سطح^{۳۱} و نیروی درگ^{۳۳} به ترتیب ^۱-N/m⁻¹ و ۲ قرار گرفته شد. همچنین، مرز^{۳۳} بالای مخزن برای خروج گاز از نوع شرایط گاززدایی^{۳۴} در نظر گرفته شد.

به منظور شبیهسازی جریانهای چندفازی از معادلات ناویر استوک^{۳۵} و رویکرد اولرین^{۳۶} استفاده شد. مدلسازی آشفتگی با استفاده از روشهای RANS ^{۲۷} انجام شد. روشهای RANS بر اساس میانگینگیری معادلات ناویر استوکس توسعه یافتهاند. معادلات ۶ تا ۹ به ترتیب معادلهٔ پیوستگی، معادلهٔ اندازه حرکت^{۲۸}، معادلهٔ انرژی و معادله حالت ناویر استوک می باشند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho u\right) = \circ \tag{9}$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u}_{i})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mathbf{u}_{i} \mathbf{u}_{j})}{\partial \mathbf{x}_{j}} =$$
(V)

$$-\frac{\partial p}{\partial x_{i}} + \mu \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left({}^{\gamma}S_{ij} - \frac{\gamma}{\gamma} \frac{\partial u_{k}}{\partial x_{k}} \delta_{ij} \right)$$
$$\frac{\partial \left(\rho E\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho H u_{j}\right)}{\partial x_{j}} =$$
$$\frac{\partial}{\partial x_{i}} + \left(u_{ij} \tau_{ij} + K \frac{\partial T}{\partial x_{i}} \right)$$
(A)

$$\rho H = \rho E + \rho = \rho C_{\rm P} T \tag{4}$$

روش برخورد RANS با تفکیک خصوصیات میدان و جریان، به دو بخش مقدار متوسط و مقدار ناشی از نوسانات جریان تقسیم شده است. در این روش، معادلات زیر مفهوم با کمک یک پروانه راشتون ۶ پرهای به هم زده می شد. قطر پروانه برابر است با $\frac{T}{7} = D$ ، ارتفاع آن برابر با $\frac{D}{6}$ و عرض آن برابر با $\frac{T}{7}$ بوده است. برای پخش گاز درون آب از یک حباب ساز حلقه ای در زیر همزن استفاده شده است. برای ایجاد اختلال بهتر در هندسه از ۶ بافل استفاده شد. بافل ها در بالای هندسه نیز ادامه پیدا کرده اند، تا از ایجاد گردابه ها جلوگیری کنند و در ایجاد اختلاط بهتر موجب افزایش راندمان راکتور شوند. در شکل (۱) هندسهٔ طراحی شده نمایش داده شده است. ابعاد مورد استفاده برای شبیه سازی، برابر با ابعاد در نظر گرفته شده در مدل تجربی لاککنن و همکاران است [۴].

به منظور کاهش حجم محاسبات و متعاقب آن، کاهش بار محاسباتی سیستم از شرط مرزی تقارن^{۲۴} در هندسه استفاده شد. هندسهٔ طراحی شده به ۶ قسمت مساوی تقسیم شد. در شکل (۲) هندسهٔ نهایی شده همراه با مشربندی نمایش داده شده است.

برای ایجاد شرط تقارن هر دو صفحه رابط^{۲۵} با شرط مرزی تناوب چرخشی^{۲۶} در ارتباط با هم قرار گرفتند.

شبیهسازی در فشار محیطی و دمای ۲۵ درجهٔ سانتی گراد انجام شد. حجم هوای وارد شده به بیورآکتور در دهانهٔ حباب ساز ۷۷۲۳^{۲۰} ۲۵/۰ در نظر گرفته شد. برای بررسی تأثیر سرعت چرخش پروانه درون بیورآکتور، سرعت چرخش پروانه در سرعتهای ۵۵، ۵۵۰، ۵۵۰، ۵۵۰، ۵۵۰، ۵۵۰ و ۷۵۰ دور بر دقیقه (RPM) تنظیم شد. در جدول (۱) خواص فیزیکی مواد مورد استفاده بیان شده است. همچنین در شبیه سازی، اثر گرانش زمین در نظر گرفته شده است.

برای شبیهسازی جریان متلاطم مایع، از مدل اغتشاش K-Epsilon Standard استفاده شده است. معادلات ۱ تا ۵ مدل K-Epsilon Standard به همراه ثابتهای آن را نشان میدهند [۱۷].

$$\mu_{t} = \rho C_{\mu} \frac{K^{\tau}}{\varepsilon}$$
(1)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \varepsilon\right) + \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left(\rho k u_{i}\right) = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[\left(\mu + \frac{\mu_{i}}{\sigma_{k}}\right) \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \right] + G_{k} + G_{b} + \rho \varepsilon - Y_{M} + S_{k}$$
^(Y)



شکل ۱- هندسهی طراحی شده در زاویههای مختلف. (الف) نما از بالا، (ب) نما از روبرو، (ج) نمای زاویه دار



شکل ۲– هندسهی نهایی به همراه مش بندی. (الف) هندسه از زاویه کناری، (ب) هندسه از بالا

جدول ۱- خواص فیزیکی مواد

فاز گاز (هوا)	فاز مايع (آب)	خاصيت
1/170	٩ ٩٨/٢	دانسیته (kg/m [°])
0/0001VA9F	۰/۰۰/۰۰۳	ويسكوزيته (kg/m.s)

$$\mathbf{f} = \overline{\mathbf{f}} + \mathbf{f} \,' \tag{10}$$

$$\overline{f} = \frac{\gamma}{\Delta t} \int_{t_{c}}^{t_{c}+\Delta t} f dt$$
(11)

$$\overline{f}' = \frac{1}{\Delta t} \int_{t}^{t_{c} + \Delta t} \int_{t}^{t_{c} + \Delta t} f' dt = 0$$
 (17)

$$\overline{\overline{\mathbf{f}} + \mathbf{g}} = \overline{\mathbf{f}} + \overline{\mathbf{g}} , \quad \overline{\overline{\mathbf{f}}} = \overline{\mathbf{f}}$$

$$\overline{\left(\mathbf{f}' + \mathbf{f}'\right)^{\mathsf{r}}} = \overline{\mathbf{f}^{\mathsf{r}}} + \overline{\mathbf{f}^{\mathsf{r}^{\mathsf{r}}}}$$
(17)

$$\overline{\mathbf{f}'+\mathbf{g}'}\neq \circ , \ \overline{\mathbf{f}''}\neq \circ$$

$$\overline{fg} = \overline{fg}$$

$$u_i = \overline{u_i} + u' \qquad (1\%)$$

Eddy Viscosity در تقریب بوزینسک بوده که به Turbulence Viscosity یا همان µt نیز معروف است. همچنین در این روش از متوسط گیری زمانی رینولدز برای جریانهای تراکم ناپذیر استفاده میشود. معادلات ۱۰ تا ۲۲ تعریف میانگین گیری به روش رینولدز، معادله ۱۳ مجموعه خصوصیات میانگین گیری رینولدز، معادلات ۱۴ تا ۱۶ میانگین گیری پارامتها به روش رینولدز هستند. همچنین معادلات ۱۷ تا ۱۹ به ترتیب فُرم بازنویسی شدهٔ معادلهٔ پیوستگی برای جریانهای تراکم ناپذیر به فرم RANS، معادلهٔ اندازه حرکت و مفهوم ویسکوزیته گردابهای (تقریب بوزینسک) هستند.

$$N_{\rm P} = \frac{P}{\rho.D^{\circ}.N^{\rm r}} \tag{(7 \circ)}$$

به منظور شبیهسازی بهتر نتایج، از مشبندی به صورت ترکیبی استفاده شد. به این ترتیب که از مش بندی ساختاریافته^{۴۳} و غیر ساختاريافته ۴۴ استفاده شد. اين موضوع باعث شد تا تراكم مشبندی در تمامی بخش های هندسه به صورت یکسان در نظر گرفته نشده باشد. به این صورت که در قسمتهای بافلها، همزن و حبابساز از تراکم مش بیشتر استفاده شد. استفاده از مشبندی با تراکم متفاوت به دلیل اختلاط شدیدتر جریان، گرادیان بالاتر متغیرها، ایجاد نقاط مرده و تشکیل گردابهها در قسمتهای مختلف هندسه است. برای بررسی استقلال از مش، مشبندی موجود در هر مرحله کوچکتر و شبیه سازی مجدداً تکرار شد. نتایج بیان شده در جدول (۲) نشان میدهد که حداکثر ۶/۹۴۹۴ درصد خطا مابین دادههای آزمایشگاهی و نتایج شبیهسازی شده وجود دارد. این نتایج بیان کننده درستی و دقت شبیه سازی است. از طرفی، نتایج به دست آمده از دادههای مش برای نوع دوم و سوم نشان میدهد که کوچکتر کردن مشها از نوع دوم به نوع سوم تأثیر بر دادهها ندارد. همچنین تأثیر تغییر در سایز مش در نوع اول تا نوع دوم نیز بسیار اندک است و عملاً تأثیر اندکی بر نتایج دارد. اما برای دقت هرچه بیشتر نتایج، از مشبندی نوع دوم برای ادامه کار استفاده شد.

برای بررسی دادههای شبیهسازی پارامترهای سرعت چرخش پروانه بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان میدهد، افزایش سرعت در دورهای اولیه باعث بهبود عمل رآکتور به دلیل افزایش پخش شوندگی گاز می شود. برخلاف تصور اولیه، پخش شدن بهتر گاز درون راکتور با افزایش سرعت رابطه مستقیم ندارد. همچنین افزایش سرعت چرخش پروانه پارامترهای دیگری را تحت تاثیر قرار میدهد که باعث کاهش راندمان رآکتور می شود. این پارامترها در بخش بعد بررسی شدهاند.

۴- تأثیر سرعت چرخش همانگونه که پیش تر بیان شد، یکی از پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد بیورآکتور تغییر سرعت چرخش پروانه است. به همین

$$\mathbf{P} = \overline{\mathbf{P}} + \mathbf{P}' \tag{10}$$

$$\mathbf{T} = \overline{\mathbf{T}} + \mathbf{T}' \tag{19}$$

$$\frac{\partial \overline{\mathbf{u}_{i}}}{\partial \mathbf{x}_{i}} = \mathbf{o} \tag{1V}$$

$$\rho \frac{\overline{\mathbf{a}_{i}}}{\mathbf{\partial}} + \rho \frac{\overline{\mathbf{a}_{j}} \overline{\mathbf{u}_{i}}}{\mathbf{a}_{j}} = \rho \overline{\mathbf{f}_{i}} + \mu \frac{\mathbf{\partial}}{\mathbf{a}_{j}} \left(-\overline{P} S_{ij} + \mu \left(\frac{\overline{\mathbf{a}_{i}}}{\mathbf{a}_{j}} + \frac{\overline{\mathbf{a}_{j}}}{\mathbf{a}_{j}} \right) - \rho \overline{\mathbf{u}_{i}} \overline{\mathbf{u}_{i}} \right)$$
(1A)

$$-\rho \overline{u_i} \overline{u_i} = \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_j}\right) - \frac{\gamma}{\gamma} \left(\rho k + \mu t \left(\frac{\partial u_k}{\partial xk}\right)\right) \delta_{ij}$$
(19)

نتايج و بحث

۳– ۱– اعتبار سنجی مدل

هدف از این قسمت، بررسی مدلسازی انجام شده و نتایج به دستآمده با نتایج گزارش شده در مقالهٔ لاککنن ۳۹ و همکاران [۴] و کوشل^۴ و همکاران [۶] است. شمای راکتور مورد استفاده قرار گرفته در مدلسازی لاککنن و همکاران در شکل (۳) آمده است. سرعت چرخش برای کار ۴۵۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. سایر پارامترها نیز به صورت مشترک در نظر گرفته شدهاند. ابعاد هندسه در زمان محاسبهٔ پارامترهای مورد بررسی به صورت برابر در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن تغییر توان در سیستمهای همراه با فاز هوا، مدل بهینه شده معرفی شده در پژوهش ارمنته^{۴۱} و همکاران نیز بررسی و دادههای پژوهش این محققان نیز در نظر گرفته شد [۱۸]. به منظور مشربندی و بررسی استقلال از شبکه، مشربندی در سه سطح انجام گرفت. به دست آوردن تعداد مشهای کافی و بررسی استقلال از شبکه، یک بخش کلیدی برای اعتبارسنجی شبیهسازی های CFD است. در جدول (۲) مقایسه دادههای تجربی با دادههای شبیهسازی آورده شده است. برای بررسی نتایج، دادههای NP ^{۴۲}NP استفاده شد. برای محاسبه پارامتر NP از فرمول شمارة ٢٠ استفاده شد [١٩] .



شکل ۳– شمای هندسهی راکتور لاککنن و همکاران

جدول ۲– مقایسهٔ پارامتر شبیهسازی شده و اعتبارسنجی مدل با دادههای آزمایشگاهی

اختلاف ٪	NP بەدستآمدە از أزمايش	NP بەدستآمدە از مدلسازى	تعداد سلول براي هندسهٔ تقسيمشده*	رديف
6/9494	$\circ/\Lambda\Lambda\pm\circ/11$	11/207714	مش نوع ۱. ۱۱۴۵۵۶	١
8/94AV	$1 \circ / \Lambda \Lambda \pm \circ / 11$	11/VaT88a	مش نوع ۲. ۱۲۹۶۷۶	۲
۶/٩۴۸۷	$\wedge / AA \pm o / M$	11/203880	مش نوع ۳. ۱۳۴۷۳۹	٣

*هندسه برای افزایش سرعت محاسبات به ۶ قسمت مساوی تقسیم شده است.

تغییرات سرعت سیال ناشی از چرخش پروانه و به خصوص تغییرات سرعت در دو قسمت نزدیک پروانه و نزدیک بافل ها را مشاهده کرد. به نظر می رسد تغییرات شدید سرعت در نزدیکی این دو قسمت، ناشی از ایجاد گردابه ها در نزدیکی این محل ها باشد. برای بررسی بهتر این موضوع می بایست خطوط جریان درون بیورآکتور را بررسی کنیم. همچنین نتایج دیداری نشان می دهد افزایش سرعت به صورت خطی در جهت حرکت پروانه در صفحه یه مراز با پروانه افزایش می یابد.

بدیهی است افزایش سرعت چرخش پروانهها علاوه بر افزایش سرعت سیال حول پروانه در بیورآکتور، میتواند حرکت سیال درون کل هندسه را نیز تغییر دهد. برای بررسی دلیل برای ادامه کار، سرعت چرخش پروانه در هندسه طراحی شده را با پرشهای ۱۰۰ دور بر دقیقه تغییر داده شد و مورد بررسی قرار گرفت. سرعتهای انتخابی برای چرخش پروانه به ترتیب برای کمترین سرعت تا بیشترین سرعت ۵۵، ۱۵۰، ۲۵۰، ۱۵۵۰ ۵۵۰، ۵۵۰ ۵۵۰ و ۵۷۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. مشخص است افزایش سرعت چرخش پروانه می تواند اولین تأثیر خود را بر روی سرعت چرخش سیال درون بیورآکتور بگذارد. برای بررسی بهتر تأثیر سرعت چرخش پروانه بر سرعت سیال درون هندسه، در شکل (۴) تغییرات سرعت سیال درون بیورآکتور در سرعتهای مختلف چرخش پروانه نشان داده شده است. از شکل (۴) به خوبی می توان



شکل ۴- تغییرات سرعت سیال درون بیورآکتور در سرعتهای مختلف چرخش پروانه

بیشتر تأثیر افزایش سرعت چرخش پروانه بر روی حرکت سیال درون بیورآکتور، در شکل (۵) خطوط جریان درون تمام هندسه نشان داده شده است.

با توجه به تغییرات سرعت و خطوط جریان در دو شکل (۴) و (۵) می توان نتیجه گرفت که از سرعت ۵۰ تا ۳۵۰ دور بر دقيقه، افزايش سرعت چرخش پروانه ها موجب افزايش خطوط جریان در کل هندسه میشود؛ اما پس از آن خطوط جریان تشکیل شده در جای خود باقی میمانند و سرعت حرکت سیال در آنها افزایش می یابد. این مهم می تواند موجب افزایش سرعت ایجاد تنش در هندسه گردد. همچنین با مشاهده دقیق خطوط جریان و تغییرات سرعت آنها در شکل (۵)، می توان دریافت که افزایش سرعت چرخش پروانه، علاوه بر ایجاد اغتشاش حول محور پروانه، باعث تغییر سرعت سیال در تمام هندسه نيز مي شود. در نتيجه اين امر، سرعت پخش بهتر گاز در هندسه افزایش می یابد. همچنین بدیهی است که سرعتهای کم پروانه نیز نمی تواند سرعت مناسبی را درون کل هندسه ایجاد کند؛ بنابراین، سرعت کم چرخش پروانه موجب به وجود آمدن نقاط مرده درون بيورآکتور می شود. بديهي است که افزايش سرعت سیال درون هندسه موجب افزایش تنش برشی درون بيورآكتور نيز مي شود. افزايش اين تنش ها مي تواند موجب از

هم گسیختگی و نابودی میکروارگانیسمها و سلولهای زیستی شود. به عبارتی، تغییرات نیروی مکانیکی مانند نیروی تنش برشی میتواند بر رشد و بازسازی سلولهای زیستی تأثیر بگذارد [۲۰]. ازطرفی، افزایش سرعت باعث افزایش توان مصرفی نیز میشود [۱۹]. به همین دلیل بررسی تنشهای ایجاد درون بیورآکتور با افزایش سرعت بسیار مهم به نظر میرسد. در شکل (۶) حجم های با نرخ کرنش برشی بیش از ۱۰۰ (⁻S) نمایش داده شده اند. نرخ کرنش برشی^{۵۹} سرعت صفحه فوقانی نمایش داده شده اند. نرخ کرنش برشی متابیه تقسیم بر فاصله بین دو صفحه (لایههای سیال) (بر حسب متر بر ثانیه) تقسیم بر فاصله بین از واحد [۱/۶] و یا (⁻S) استفاده میشود. برای محاسبه نرخ کرنش برشی میتوان از معادلهی ۲۱ استفاده کرد [۲۱ و ۲۲].

$$\dot{\gamma} = \frac{u}{hd} \left[\frac{m}{s.m} \right] \left[\frac{\gamma}{s} \right] = \left[S^{-\gamma} \right]$$
(71)

بررسی سرعت سیال درون بیورآکتور در یک سطح مشخص نمی تواند نتایج بهینه ای را برای بررسی نهایی و تصمیم گیری برای آن ایجاد کند. دلیل این موضوع این است که، برخی اوقات سلولهای زیستی در بخشهای مشخص شدهای قرار می گیرند و یا درون تمامی بخشهای بیورآکتور پخش هستند.





روش های عددی در مهندسی، سال ۴۲، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۲

کرد. بنابراین، برای مشخص شدن بهتر تنشهای ایجاد شده درون بیورآکتور با تغییر سرعت، تنش برشی میانگین و تنش برشی یکنواخت شده بررسی میشود. در شکل (۸) تنش برشی میانگین و در شکل (۹) تنش برشی یکنواخت شده نشان داده شده است.

نتایج به دست آمده به خوبی نشان می دهد که با افزایش سرعت چرخش پروانه در بیور آکتور، نرخ کرنش برشی نیز افزایش یافته و این افزایش در کل حجم بیور آکتور به خصوص در اطراف پروانه به دلیل ایجاد حرکت و در اطراف بافل ها به دلیل ایجاد مانع در حرکت تو ده های سیال، دیده می شود. بدیهی است که افزایش بیش از حد نرخ کرنش برشی موجب آسیب دیدن محصول نهایی می شود.

بررسی نتایج به دستآمده از محاسبات عددی مطابق پیش بینی نشان میدهد که با افزایش سرعت چرخش پروانه درون بیورآکتور نرخ کرنش برشی میانگین نیز حرکتی افزایش را نشان میدهد. اما با بررسی نرخ کرنش برشی یکنواخت شده می توان نتیجه گرفت که از سرعت ۵۰ دور بر دقیقه تا سرعت ۳۵۰ دور بر دقیقه نرخ کرنش برشی یکنواخت شده با شیب زیادی در حال افزایش است و پس از آن شیب افزایشی آن کاهشی شده و افزایش سرعت تأثیر زیادی بر افزایش این پارامتر ندارد. همچنین، می توان نتیجه گرفت که پس از عبور از سرعتی مشخص در حدود ۳۵۰ دور بر دقیقه، افزایش سرعت پروانه تأثیر چندانی بر روی یکنواختتر شدن سیال درون بيورآكتور نخواهد گذاشت. برای بررسی بهتر این موضوع میبایست تغییرات حجم گاز درون بیورآکتور را بررسی کرد. در شکل (۱۰) مسیر حرکت جریان هوا در غلظتهای بالای جریان هوا در سرعتهای مختلف پروانه نمایش داده شده است. همچنین، شکل (۱۱) درصد هوا در کل بیوراکتور در سرعتهای مختلف چرخش پروانه را نشان میدهد.

با بررسی نتایج میتوان چنین نتیجه گرفت که درسرعتهای کم چرخش پروانه، مسیر عبوری هوا از خروجی حباب سازها به صورت مستقیم به طرف بیرون بیورآکتور است و عملاً بیورآکتور نمیتواند پخش مناسبی را از هوا در خود

در نتیجه، بررسی پروفایلهای سرعت نیاز به بررسی سه بعدی دارد. باید دقت شود که سرعتهای زاویه ای درون قسمتهای مختلف بهصورت خطى با سرعت چرخش پروانه هماهنگ نیست. از این رو برای بررسی توزیع تنش برشی درون کل بیورآکتور نیاز به تجزیه و تحلیل عددی است [۲۳]. به منظور تجزیه و تحلیل صحیح و منظم توزیع تنش برشی در تمامی محيط بيورآكتور، شاخصي به نام "يكنواختي ٢٤" ايجاد شد. شاخص یکنواختی را می توان با کمک روابط (۲۲) و (۲۳) محاسبه كرد. شاخص يكنواختي، تغييرات يك متغير انتخابي را در کل حجم مشخص شده، بررسی میکند. به عبارتی دیگر، شاخص يكنواختي با عدد ١ نشان دهندهي بالاترين يكنواختي در کل محیط است. شاخص یکنواختی را می توان با مساحت المان يا جرم مواد سنجش كرد. سنجش شاخص يكنواختي مي تواند با استفاده از مساحت تغييرات مقدار يک متغير را بررسی کند (همانند غلظت یک گونه). سنجش شاخص يكنواختي با جرم نشان دهنده تغييرات شار مواد است. شاخص يكنواختى وزنى متغير كه شاخص يكنواختى گاما نيز ناميده می شود. با استفاده از مقدار متوسط متغیر در میانگین سطح به دست می آید. شاخص یکنواختی گاما با کمک یک متغیر مشخص ϕ توسط معادله های زیر محاسبه می شود [۲۴].

$$\gamma = \gamma - \frac{\sum_{i=\gamma}^{n} \left[\left| \phi_{i} - \overline{\phi_{a}} \right| A_{i} \right]}{\gamma \left| \overline{\phi_{a}} \right| \sum_{i=\gamma}^{n} A_{i}}$$
(77)

$$\overline{\phi_a} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[\phi_i A_i\right]}{\sum_{i=1}^{n} A_i}$$
(17)

با مشاهده شکل (۶) میتوان به این نتیجه رسید که افزایش سرعت چرخش پروانه با وجود این که موجب کاهش نقاط مرده در هندسه میشود، اما از طرفی موجب افزایش تنش درون بیورآکتور میشود. در شکل (۷) میتوان درصد حجم پرتنش بیورآکتور با نرخ کرنش برشی بیش از ۱۰۰ (^۱-S) را مشاهده



بیرون بیوراکتور تحت تأثیر چرخش پروانهها قرار بگیرد و در کل بیوراکتور پخش شود. این موضوع باعث میشود جریان با غلظت

داشته باشد. با مشاهده شکل (۱۰) میتوان بیان کرد که سرعت بالاتر چرخش پروانهها موجب میشود، جریان یکنواخت هوا به



شکل ۱۰ مسیر حرکت جریان هوا در سرعتهای مختلف چرخش پروانه

با تغییرات کمتری همراه است. برای بررسی بهتر این تغییرات میتوان میزان نرخ کرنش برشی را در فاز هوا نیز درون بیورآکتور محاسبه کرد. در شکل (۱۲) نرخ تغییر تنش برشی در فاز هوا درون بیورآکتور در سرعتهای مختلف چرخش پروانه نشان داده شدهاند. همچنین در شکل (۱۳) تغییرات نرخ کرنش برشی یکنواخت شده درون فاز هوا در سرعتهای مختلف چرخش پروانه نشان داده شده است.

بدیهی است که نتایج حاصل از محاسبه عددی نیز برای نرخ کرنش برشی در فاز گاز نیز با افزایش سرعت چرخش نرخ افزایشی را از خود نشان دهد. نتایج یکنواخت شده از تنش برشی در فاز گاز نشان میدهد که پس از عبور از سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه تنشهای برشی یکنواخت شده ناشی از فاز گاز، نرخ ثابتی را نشان میدهد. این حالت میتواند ناشی بالای هوا به طرف خارج بیورآکتور وجود نداشته باشد. وجود این موضوع به خوبی میتواند عملکرد بیورآکتور را تحت تأثیر خود قرار دهد. از طرفی با دقت به خروجیهای حباب سازها در سرعتهای ۴۵۰ دور تا ۷۵۰ دور بر دقیقه میتوان دید که خروجیهای حباب سازها به صورت گردابهای در آمده و از الت خطی خود خارج میشوند. این مهم میتواند تایید کننده افزایش سرعتهای گردابهای باشد که در نهایت میتواند به ولیدات زیستی آسیب برساند. وجود این موضوع باعث میشود گاز از حالت پخش بهینه به حال گردابه وارد شود. همچنین با دقت به نتایج به دست آمده مجددا میتوان تاکید کرد که، سرعت چرخش پروانه از ۵۰ دور در دقیقه تا ۵۳۰ دور در دقیقه میتوان تغییرات مناسبی را در توزیع هوا در محیط بیورآکتور ایجاد کند، ولی پس از آن توزیع هوا درون بیورآکتور



Bablle.Volume Fraction

شکل ۱۱– تغییرات درصد هوا در بیورآکتور در سرعتهای مختلف چرخش پروانه

از این باشد که پس از عبور از این سرعت، هوا به دلیل ایجاد خطوط جریان یکسان درون تمامی قسمتهای بیورآکتور وجود دارد.

نتایج به دست آمده نویسندگان را به بررسی فرم یکنواخت شده کسر حجمی فاز گاز در بیورآکتور سوق داد. منظور از بررسی این فاکتور به دست آوردن پخش شدگی فاز گاز درون کل بیورآکتور است. بدیهی است هرچه پارامتر یکنواخت شده به

عدد ۱ نزدیک تر شود فاز گاز درون بیورآکتور پخش بهتری دارد. در شکل (۱۴)، فرم یکنواخت شده کسر حجمی فاز گاز در بیورآکتور در دورهای مختلف چرخش پروانه نشان داده است.

نتایج به دست آمده از شکل (۱۴) به خوبی نشان می دهد از سرعت چرخش پروانه از ۵۰ تا ۲۵۰ دور بر دقیقه، کسر حجمی فاز گاز در بیورآکتور در حال افزایش است. اما پس از عبور از این سرعت نرخ کسر حجمی فاز گاز در بیورآکتور حالت



شکل ۱۴– رابطه مابین افزایش سرعت چرخش پروانه و نرخ فرم یکنواخت شده کسر حجمی فاز گاز

شدن فاز گاز درون کل بیورآکتور را نشان میدهند. استفاده از

کاهشی را از خود نشان میدهد. نتایج به دست آمده پخش

دادههای یکنواخت شده کمک کرده است تا دید بهتری از دادهها به دست آید. در این نمودار عددهای بالاتر نشان دهندهی پخش بهتر هوا درون بیوراکتور است. بررسی نمودار به خوبی نشان میدهد که افزایش سرعت چرخش پروانه در سرعتهای کم باعث پخش بهتر گاز شود. اما در سرعتهای بالاتر موجب ایجاد گردابهها میشود. چرخش پروانه با سرعت بالا باعث میشود فاز گاز به همراه پروانه در مسیری گردابهای بچرخد. برای درک بهتر، شکل (۱۵) مسیر حرکت گردابههای فاز گاز درون بیورآکتور در سرعتهای متفاوت چرخش پروانه را

با دقت در شکل (۱۵) میتوان پی برد که مسیر حرکت گاز در سرعتهای کم چرخش پروانه بیشتر به طرف بالای بیورآکتور است. این موضوع به دلیل است که هوای ورودی با فشار به رآکتور وارد می شود. این موضوع در کنار اختلاف چگالی هوا با آب درون رآکتور باعث می شود تا گاز تمایل زیادی برای خروج از بیورآکتور داشته باشد. در نتیجه گاز دمیده شده به درون بیورآکتور نمیتواند کل آن را پوشش دهد. مشخص است با افزایش سرعت چرخش پروانهها این فرم تغییر میکند. در نتیجه فاز گاز بخش بیشتری از بیورآکتور را پوشش مىدهد. مشخص است با افزايش سرعت چرخش پروانهها این فرم تغییر میکند. در نتیجه فاز گاز بخش بیشتری از بیورآکتور را پوشش میدهد. اما پس از عبور از سرعتهای ۲۵۰ دور بر دقیقه و افزایش سرعت، مسیر حرکت فاز گاز به صورت گردابهای و در اطراف پروانه شکل میگیرد و عملاً ایجاد گردابهها و حرکت فاز گاز به دور پروانه موجب کاهش يخش بهينه فاز گاز درون بيورآکتور مي شود.

برای ادامه بررسی پارامترهای تأثیر گذار بر روی شاخصهای عملکردی بیورآکتورها میتوان به بررسی نرخ متوسط انتقال جرم^{۴۷} درون بیورآکتور پرداخت. نرخ متوسط انتقال جرم نشانهای از بازده انتقال مواد (که شامل هوا نیز است) در محیط کشت میباشد. این شاخص و افزایش آن موجب ایجاد اطمینان از عملکرد مناسب انتقال جرم در بیورآکتور و رسیدن تمامی مواد به تمامی سلولهای زنده یا

میکروارگانیسمها درون بیورآکتور است [۲۵]. به طورکلی، بهبود و افزایش این شاخص تأثیر مستقیمی بر بهبود کیفیت فرآیند دارد. برای بررسی این شاخص میزان آن را در سرعتهای مختلف چرخش پروانه به دست آمد. شکل (۱۶) نرخ متوسط انتقال جرم در سرعتهای مختلف چرخش پروانه را نشان میدهد.

نتایج به دستآمده از شکل (۱۶) نیز همانند پارامترهای قبل نشان میدهد که اختلاف آشکاری در تغییر نرخ متوسط انتقال جرم در سرعتهای کم وجود داد به عبارتی بهتر میتوان بیان کرد که از سرعت ۵۰ تا ۱۵۰ دور بر دقیقه اختلاف ایجاد شده بسیار زیاد است. اما پس از عبور از سرعت ۲۵۰ دور بر دقیقه تغییرات نرخ متوسط انتقال جرم کمتر می شود.

برای به دست آوردن سرعت بهینه میبایست مجموع پارامترهای تأثیر گذار را در نظر گرفت. با توجه به درصد ایجاد تنش درون بیورآکتور شکل (۷) می توان تأثیر افزایش سرعت بر ایجاد تنش را بررسی کرد. برای این کار درصد ایجاد تنش در هر تغییر سرعت به نسبت کمترین و بیشترین تنش بررسی شد و در جدول (۳) نشان داده شدهاند.

نتایج نشان میدهند که بیشترین پرش ایجاد تنش را میتوان در دورهای مابین ۳۵۰ تا ۴۵۰ دور بر دقیقه دید. به نظر میرسد با بررسی تمامی نتایج میتوان سرعت مابین ۳۵۰ تا ۴۵۰ دور بر دقیقه را برای سرعت بهینه در نظر گرفت.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله اثر تغییرات سرعت چرخش پروانه راشتون درون بیوراکتور از سرعت چرخش ۵۰ دور بر دقیقه تا سرعت چرخش ۵۵۰ دور بر دقیقه به منظور بررسی پخش مناسب هوا و تغییرات نرخ کرنش برشی شبیه سازی شد. برای بررسی فرآیند و یافتن بهترین سرعت چرخش پروانه پارامترهای نرخ کرنش برشی در دو فاز مایع و گاز، نرخ متوسط انتقال جرم، تنش برشی یکنواخت شده و خطوط جریان درون بیوراکتور بررسی شد. شبیه سازی انجامشده با رویکرد چند فازی مدل فاز پراکنده صفر معادله، مدل اغتشاش K-Epsilon Standard به



شکل ۱۵– مسیر حرکت گردابههای فاز گاز درون بیورآکتور در سرعتهای متفاوت چرخش پروانه



شکل ۱۶– رابطه مابین افزایش سرعت چرخش پروانه و نرخ متوسط انتقال جرم

درصد تغییر نسبت حداقل به حداکثر تغییر	سرعت چرخش (دور بر دقیقه)	رديف
١/٧٤٣	100	١
٧/٢٣ ٠	۲۵۰	۲
18/019	۳۵.	٣
347/V89	400	۴
۵۶/۳۳۸	00 °	۵
<u>۷۷</u> /۳۰۹	60°	6
) o o	۷۵۰	٧

جدول ۳– درصد ایجاد تنش در هر تغییر سرعت به نسبت کمترین و بیشترین تنش

Ansys CFX ورژن ۲۰۱۹ R۳ و نرم افزار ANSYS Products

صورت پایا و سهبعدی توسط مجموعه نرمافزاری

میکند. این تأثیر را میتوان برای پارامتر نرخ متوسط انتقال جرم نیز مشاهده کرد. همچنین مشخص شد که نرخ تنش ایجاد شده در مایع پس از عبور از سرعت ۳۵۰ دور بر دقیقه به شدت افزایش مییابد. افزایش سرعت، موجب ایجاد خطوط جریان بیشتری به صورت خطی نمیشود و فقط باعث افزایش سرعت در خطوط جریان ایجاد شده میشود. همچنین سرعتهای مابین ۳۵۰ تا ۳۵۰ دور بر دقیقه، گازهای خروجی از حبابسازها به جای پخش شدن در هندسه وارد حالت گردابهای میشوند. با افزایش سرعت چرخش پروانه بیش از ۲۵۰ دور بر دقیقه پخش شدن فاز گاز درون بیورآکتور نرخ کاهشی را نشان میدهد. افزایش سرعت چرخش پروانه فرانه میتواند موجب ایجاد گردابه در اطراف پروانه شود و از پخش شدن مناسب فاز گاز جلوگیری کند. انجام گرفت. نتایج نشان داد افزایش سرعت چرخش پروانه و انرژی ناشی از چرخش پروانه در سرعتهای بیش از ۱۵۰ دور بر دقیقه صرف ایجاد اغتشاش در مایع شده و تأثیر آن دورن فاز گاز کم میشود. همچنین، با در نظر گرفتن سرعت چرخش پروانه و تأثیرات آن بر پارامترهای اختلاط فاز گاز و مایع، تنش درون فاز مایع میتوان سرعت ۱۳۵۰ تا ۲۵۰ دور بر دقیقه را برای سرعت بهینه در نظر گرفت. بعلاوه، نتایج نشان داد که تغییر سرعت چرخش پروانه تأثیر مستقیمی بر سرعت فازهای درون بیورآکتور دارد و میتواند سرعت چرخش آنها را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین با افزایش سرعت چرخش پروانهها از م تا دم تا می دور بر دقیقه تنش برشی یکنواخت شده با شیب زیادی افزایش مییابد، اما پس از عبور از سرعت ۵۰ دور بر دقیقه میزان افزایش این پارامتر با شیب بسیار کمتری ادامه پیدا

- buoyancy force
 turbulence viscosity
- hydrogenations
- 4. oxidations
- 5. aerobic fermentations
- 6. biotechnology
- 7. bioprocess
- 8. aqueous bioprocesses
- 9. hydrodynamics
- 10. stirrer
- 11.impeller
- ۱۲. propeller
- 13. turbine
- 14. paddle
- 15. anchor
- 16. helical

2501, 2004.

- 17. radial flow
- 18. Rushton
- 19. Baffle
- 20. Computational Fluid Dynamics
- 21. sparger's ring
- 22. Revolutions Per Minute
- 23. shear rate
- 24. condition symmetry boundary
- 25. interface
- 26. rotational periodicity
- 27. Gas Feed Per Vessel Volume
- 28. fluid buoyancy model
- 29. dispersed phase zero equation
- 30. fluid pair
- 31. surface tension coefficient
- 32. drag force
- 33. boundary

310–313, 2010.

- Campolo, M., Sbrizzai, F., and Soldati, A., "Time-Dependent Flow Structures and Lagrangian Mixing in Rushton-Impeller Baffled-Tank Reactor", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 58, No. 8, pp. 1615–1629, 2003.
- 4. Laakkonen, M., Moilanen, P., Alopaeus, V., and Aittamaa, J., "Modelling Local Bubble Size Distributions in Agitated Vessels", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 62, No. 3, pp. 721–740, 2007.
- 5. Niño, L., Gelves, R., H. Ali, Solsvik, J., and
- روش های عددی در مهندسی، سال ۴۲، شماره ۲، زمستان ۱۴۰۲

1. Garcia-Ochoa, F. and Gomez, E., "Theoretical

Prediction of Gas-Liquid Mass Transfer Coefficient,

Specific Area and Hold-up in Sparged Stirred

Tanks", Chem. Eng. Sci., Vol. 59, No. 12, pp. 2489-

"Evaluation of Powder Mixing Operation During

Batch Production: Application to Operational

Qualification Procedure in the Pharmaceutical

Industry", Powder Technol., Vol. 198, No. 2, pp.

2. Mendez, A. S. L., De Carli, G., and Garcia, C. V.,

مراجع

179

واژەنامە

39. M. Laakkonen

34. degassing condition

36. Eulerian Approach

37. Reynold-Average Navier- Stokes

35. Navier Stokes

40. M. Kuschel

38. momentum

- 41. P. M. Armenante
- 42. power number
- 43. structure mesh
- 44. unstructure mesh
- 45. shear rate
- 46. uniformity
- 47. Average Mass Transfer Coefficient

Jakobsen, H., "Applicability of A Modified Breakage and Coalescence Model Based on The Complete Turbulence Spectrum Concept for CFD Simulation of Gas-Liquid Mass Transfer in a Stirred Tank Reactor", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 211, pp. 115272, 2020.

- Kuschel, M., and Takors, R., "Simulated Oxygen and Glucose Gradients as A Prerequisite for Predicting Industrial Scale Performance A Priori", *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 117, No. 9, pp. 2760–2770, 2020.
- Gogate, P. R. and Pandit, A. B., "Survey of Measurement Techniques for Gas–Liquid Mass Transfer Coefficient in Bioreactors", *Biochem. Eng. J.*, Vol. 4, No. 1, pp. 7–15, 1999.
- 8. Doukhan, P., "*Mixing: Properties and Examples*", Vol. 85. Springer Science & Business Media, 2012.
- Salehi, S., Heydarinasab, A., Shariati, F. P., Nakhjiri, A. T., and Abdollahi, K., "Parametric Numerical Study and Optimization of Mass Transfer and Bubble Size Distribution in a Gas-Liquid Stirred Tank Bioreactor Equipped with Rushton Turbine Using Computational Fluid Dynamics", *Int. J. Chem. React. Eng.*, 2021.
- Qiu, N., Wang, P., Si, Q., Pettang, W. E. K., and Yuan, S., "Scale Process Effect on The Power Consumption Characteristics of A Novel Curved Rushton Turbine Within A Reactor Vessel", *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 166, pp. 109–120, 2021.
- Agarwal, A., Singh, G., and Prakash, A., "Numerical Investigation of Flow Behavior in Double-Rushton Turbine Stirred Tank Bioreactor", *Mater. Today Proc.*, Vol. 43, pp. 51–57, 2021.
- 12. Botlagunta, M., Rewaria, V., and P. Mathi, "Oxygen Mass Transfer Coefficient and Power Consumption in A Conventional Stirred-Tank Bioreactor Using Different Impeller in A Non-Newtonian Fluid: An Experimental Approach", *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, 2020.
- 13. Nasehi, P., Moghaddam, M. S., Kandomal, M., Layghizadeh, A., and Moghaddam, A. M., "Process Simulation of Dodecyl Benzene Production Along with Energy Optimization in The Distillation Tower".
- 14. Gimbun, J., Rielly, C. D., and Nagy, Z. K., "Modelling of Mass Transfer in Gas–Liquid Stirred Tanks Agitated by Rushton Turbine and CD-6 Impeller: A Scale-up Study", *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 87, No. 4, pp. 437–451, 2009.
- 15. Shen, R., Jiao, Z., Parker, T., Sun, Y., and Wang, Q., "Recent Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in Process Safety and Loss Prevention: A Review", *J. Loss Prev. Process Ind.*, pp. 104252, 2020.
- 16. Golshan, S., Sotudeh-Gharebagh, R., Zarghami, R., Mostoufi, N., Blais, B., and Kuipers, J. A. M., "Review and Implementation of CFD-DEM Applied to Chemical Process Systems", *Chem. Eng. Sci.*, Vol.

221, pp. 115646, 2020.

- 17. Wilcox, D. C., "*Turbulence Modeling for CFD*", Vol. 2. DCW Industries La Canada, CA, 1998.
- Armenante, P. M. and Chang, G.-M., "Power Consumption in Agitated Vessels Provided with Multiple-Disk Turbines", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 37, No. 1, pp. 284–291, 1998.
- 19. Kaiser, S. C., Werner, S., Jossen, V., Kraume, M., and Eibl, D., "Development of A Method for Reliable Power Input Measurements in Conventional and Single-Use Stirred Bioreactors at Laboratory Scale", *Eng. Life Sci.*, Vol. 17, No. 5, pp. 500–511, 2017.
- Charoenpong, H., Osathanon, T., Pavasant, P., Limjeerajarus, N., Keawprachum, B., Limjeerajarus, C. N., Cheewinthamrongrod, V., Palaga, V., Lertchirakarn, V., Ritprajak, P., "Mechanical Stress Induced S100A7 Expression in Human Dental Pulp Cells to Augment Osteoclast Differentiation", Oral Dis., Vol. 25, No. 3, pp. 812–821, 2019.
- 21. Pascal, B., "Mathematician, Physicist and Thinker About God", New York, NY: St. Martin, 1995.
- 22. Guicciardini, N., "Isaac Newton, Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, (1687)", in Landmark Writings in Western Mathematics 1640-1940, Elsevier, 2005, pp. 59–87.
- 23. Keawprachum, B., Limjeerajarus, N., Limjeerajarus, C. N., and Srisungsitthisunti, P., "Improved Design of A Cone-Shaped Rotating Disk for Shear Force Loading in a Cell Culture Plate", In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 297, No. 1, pp. 12025.
- 24. ANSYS® Fluent, Release 16.2 ANSYS Workbench Help (ANSYS, Inc., USA).
- 25. Amer, M., Feng, Y., and Ramsey, J. D., "Using CFD Simulations and Statistical Analysis to Correlate Oxygen Mass Transfer Coefficient to Both Geometrical Parameters and Operating Conditions in a Stirred-Tank Bioreactor", *Biotechnol. Prog.*, Vol. 35, No. 3, pp. e2785, 2019.
- 26. Ochieng, A., Onyango, M. S., Kumar, A., Kiriamiti, K., and Musonge, P., "Mixing in a Tank Stirred by a Rushton Turbine at a Low Clearance", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 47, No. 5 (2008): 842-851.
- 27. Kremer, D. M., and Hancock, B. C., "Process Simulation in the Pharmaceutical Industry: A Review of Some Basic Physical Models", *Journal of Pharmaceutical sciences*, Vol. 95, No. 3 (2006): 517-529.
- Ochieng, A., and Onyango, M. S., "Homogenization Energy in A Stirred Tank", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 47, pp. 1853-1860, 2008.
- 29. Kopal, Z., "Tables of Supersonic Flow Around Cones", Depart of Electrical Engineering, Center of Analysis, Massachusetts Institute of Technology,

Cambridge, 1947.

- Fay, J. A. and Riddell, F. R., "Theory of Stagnation Point Heat Transfer in Dissociated Air", Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 25, No. 2, Feb. 1958, pp. 73–85.
- Blottner, F.G., "Chemical Non Equilibrium Boundary Layer", AIAA Journal, Vol. 2, No. 2, Feb. 1964, pp. 232–239.
- 32. Blottner, F.G., "Non Equilibrium Laminar Boundary-

Layer Flow of Ionized Air", AIAA Journal, Vol. 2, No. 11, Nov. 1964, pp. 1921–1927.

- 33. Hall, H.G., Eschenroeder, A.Q., and Marrone, P.V., "Blunt-Nose Inviscid Airflows with Coupled Non Equilibrium Processes", Journal of the Aerospace Sciences, Vol. 29, No. 9, Sept. 1962, pp. 1038–1051.
- Chapman, D.R., "Computational Aerodynamics Development and Outlook", AIAA Journal, Vol. 17, No. 12, Dec. 1979, pp. 1293–1313.