

Journal of Computational Methods in Engineering

Journal homepage: https://jcme.iut.ac.ir/

ISSN: 2228-7698

EISSN: 2423-5741



Original Article

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

Pedram Nasehi and Ahmad Azari*

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 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 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.

Received: Jul. 19, 2023; Revised: Sep. 20, 2023; Accepted: Sep. 30, 2023; Published Online: March 05, 2024. * Corresponding Author: azari.ahmad@gmail.com or azari.ahmad@pgu.ac.ir

How to Cite: Nasehi Pedram and Azari Ahmad, Hydrodynamic simulation of stirred gas-liquid bioreactor for the optimization of the rotation speed of Rushton impellers using CFD, Journal of Computational Methods in Engineering; 2024, 42(2), 113-133; DOI: 10.47176/jcme.42.2.1008.





مقاله پژوهشی

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

پدرام ناصح 🛛 و احمد آذری 🕬 دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

چکیده – در این تحقیق، تأثیر تغییرات سرعت چرخش پروانه راشتون درون بیور آکتور به منظور پخش مناسب هوا، بررسی نرخ کرنش برشی، شبیه سازی و بررسی شد. شبیه سازی انجام شده با رویکرد چند فازی، مدل فاز پراکنده صفر معادله، با کمک مدل اغتشاش K-Epsilon Standard، به صورت پایا و سه بعدی توسط مجموعه نرم افزاری 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 بیور آکتور، از یک حلقهٔ حباب ساز که در زیر پروانه قرار گرفته است، استفاده شد. نت ایچ به دست آمده نشان داد که افزایش سرعت چرخش پروانه میتواند به پخش بهتر هوا درون بیور آکتور کمک کند؛ اما از طرفی موجب افزایش نرخ کرنش برشی درون بیور آکتور می شود. همچنین، افزایش سرعت چرخش پروانه میتواند به پخش بهتر هوا درون بیور آکتور کمک کند؛ اما از طرفی موجب افزایش نرخ کرنش برشی درون می بیور آکتور می شود. همچنین، افزایش سرعت چرخش پروانه بیش از ۱۵۰ دور بر دقیقه موجب افزایش نرخ کرنش برشی برشی مرون می بیور آکتور می شود. امی شرعت چرخش پروانه میتواند به پخش بهتر هوا درون بیور آکتور کمک کند؛ اما از طرفی موجب افزایش نرخ کرنش برشی درون می بیور آکتور می شود. همچنین، افزایش سرعت چرخش پروانه بیش از ۱۵۰ دور بر روی میزان اختلاط فاز گاز و مایع، تنش درون مایع و نرخ متوسط انتقال جرم، می باید. علاوه بر این، با در نظر گرفتن سرعت چرخش پروانه و تأثیر آن بر روی میزان اختلاط فاز گاز و مایع، تنش درون مایع و نرخ متوسط انتقال جرم، می توان سرعت ۱۵۰۰ تا ۵۰۰ دور بر دقیقه را برای سرعت بهینه در نظر گرفت. در نهایت، مشخص شد که با افزایش سرعت چرخش پروانه نمی توان به اختلاط بهتر در بیور آکتور رسید و می بایست سرعت بهینه را مشخص کرد.

> واژه های کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، بیور آکتور، پروانه راشتون، بیور آکتور گاز-مایع، مدل اغتشاش K-Epsilon. دریافت مقاله: ۱٤۰۲/۰۶/۱۸، بازنگری: ۱٤۰۲/۰۶/۲۹، پذیرش: ۱٤۰۲/۰۷/۰۸، اولین انتشار: ۱٤۰۲/۱۷/۱۵

*: نويسنده مسئول، رايانامه: <u>azari.ahmad@gmail.com or azari.ahmad@pgu.ac.ir</u>



) حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱٤۰۳ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

فهرست علائم

ونانى	علائم ي	بردار سرعت (سرعت سيال)	u
ويسكوزيته گردابهاي ^۲	μ_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
ىھا	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^٤، تخمیرهای هوازی^۵ به ویژه فرآیندهای بیوتکنولوژی دارند [۱]. فرآیند مخلوط کردن نیز در صنایع مختلف به خصوص در راکتورهای گاز-مایع بخش مهمی از فرآیندهای شیمیایی برای پیشبرد واکنش به شمار می رود. تأثیر گذاری 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 واكنش ها 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 [٤].

ناهمگن بودن بیورآکتورها موجب چگالی بالا یا پایین 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 مىشوند. 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 میدهد[7]. اغلب واکنشهای زیستی در محیطهای آبی انجام میشوند. فازهای آبی به دلیل دارا بودن نمکهای یونی، مواد معدنی و مصرف اکسیژن برای واکنشها 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 فرآیندهای زیستی آبی^ خواهد بود [۷]. بنابراین، طراحی دقیق این دسته از راکتورها، تأثیر فراوانی در بهرموری نهایی آنها دارد. همانند سایر پدیدههای محیطی که مابین فازهای مختلف

انرژی و اختلاط ایجاد شده در بیورآکتور تأثیر بسزایی دارد. بدیهی است افزایش سرعت پروانه و افزایش بافلها می تواند 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 واکنش های بیولوژیکی در حال انجام درون راکتورها گردد [۱۲]. به همین دلیل، دستیابی به سرعت بهینه در پروانههای بیورآکتورها می تواند 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) در محاسبهٔ جریانهای چندفازی بسیار افزایش پیدا کرده است [۱۳]. اولین استفاده از سیالات دینامیک محاسباتی در سال ۱۹٤۷ 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 ۱۹٦۰ صورت گرفت. بررسی های انجام گرفته در آن زمان پیرامون حرکت سریع اشیاه در جو زمین بود. 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 [۳۰] و بلوتنر [۳۱ و ۳۲] 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 [۳٤]. هدف کلی از این شبیهسازیها را میتوان پیشبینی نتایج

روش های عددی در مهندسی، سال ٤٢، شماره ۲، ۱٤۰۲

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 [٥]. 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 می گیرند. نوع پروانههای ۱۱ استفاده شده درون راکتور می تواند در عملکرد کلی بيورآكتور تأثير بسيارى داشته باشد. پرههاى ملخى ٢٠، توربينى ١٣، پارویی^۱، از مهمترین انواع پرهها هستند که برای همزدن مایعات با ویسکوزیته پایین بکار میروند [۹]. این نوع همزنها با سرعت زیاد دوران میکنند. پرهٔ لنگری^{۱۰} و پرهٔ حلزونی^۱ 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 [٥]. در صنایع شیمیایی، بخصوص برای اختلاط گاز در مايع، اين نوع پره مناسبترين انتخاب است. پرکاربردترین پروانه را در این دسته میتوان پروانه دیسکی راشتون^{۱۸} یا توربین راشتون دانست [۳]. این پروانه یک نوع 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 می تواند 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

دور بر دقیقه (RPM)^{۲۲} 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 برشی۳۳ 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 ۰۰ تا ۷۵۰ دور بر دقیقه با پرشهای 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 تنشها را نیز در حداقل خود قرار دهد.

۲- مدلسازی CFD

R ورژن ANSYS Products با کمک روش حجم محدود Ansys CFX و نرمافزار Ansys CFX با کمک روش حجم محدود استفاده شده است. هندسهٔ طراحی شده شامل یک مخزن تا استفاده شده است. هندسهٔ طراحی شده شامل یک مخزن تا استوانه ای با قطر T برابر با ۲۰۱۰ میلی متر است. این مخزن تا ارتفاع h برابر با ۲۰۱۰ میلی متر پر از آب شده و آب درون مخزن با کمک یک پروانه راشتون T پرهای به هم زده می شد. قطر پروانه برابر است با $\frac{T}{2}$ و عرض پروانه برابر با تا $\frac{T}{2}$ ماز درون آب از یک مخزن ان برابر با $\frac{D}{4}$ و عرض مند. قان برابر با با تاز با درای پخش گاز درون آب از یک حباب ساز حلقه ای در زیر همزن استفاده شده است. برای ایجاد مندسه نیز ادامه پیدا کرده اند، تا از ایجاد گردابه ها در بالای مندسه نیز ادامه پیدا کردهاند، تا از ایجاد گردابه ها جلوگیری کنند و در ایجاد اختلاط بهتر موجب افزایش راندمان راکتور شوند. در شکل (1) هندسهٔ طراحی شده نمایش داده شده است.

فرآيندها با استفاده از حل معادلات رياضي بيان كرد [١٤]. 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 پیش تر گفته شد، جریان های 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 شبیهسازی می تواند یکی از راههای بسیار با ارزش برای پیشبینی رفتارهای مختلف سیستمها باشد [10]. دینامیک سیالات محاسباتی، فرآیندی است که در طول آن با استفاده از آنالیز عددی و الگوریتمهای عددی، می توان 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[١٦]. همچنین هزینه بر بودن طراحی و انجام آزمایشهای درون راکتور موجب می شود استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بیش از پیش با ارزش شود[۲٦]. باید توجه شود که با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی میتوان بسیار ساده تر پدیده های انتقال جرم، انتقال حرارت، جریان های چندفازی و واکنش های شیمیایی درون راکتور را بررسی کرد [۲۷]. همچنین از ویژگیهای کلیدی این روش بررسی 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 بيورآكتور شيميايي همزندار با يک حلقهٔ حبابساز ^{۲۱} که در زير 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 يروانه براي بهترين حالت عملکرد بیورآکتور، سرعت چرخش پروانه از ٥٠ تا ٧٥٠



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
1/770	٩٩٨/٢	دانسیته (kg/m ^۳)
•/••••١٧٨٩٤	•/•• ١••٣	ويسكوزيته (kg/m.s)

سرعت چرخش پروانه درون بیورآکتور، سرعت چرخش پروانه در سرعتهای ۵۰، ۱۵۰، ۲۵۰، ۳۵۰، ۵۰۰، ۵۰۰، ۲۵۰ و ۷۰۰ دور بر دقیقه (RPM) تنظیم شد. در جدول (۱) خواص فیزیکی مواد مورد استفاده بیان شده است. همچنین در شبیهسازی، اثر گرانش زمین در نظر گرفته شده است.

برای شبیه سازی جریان متلاطم مایع، از مدل اغتشاش K-Epsilon Standard استفاده شده است. معادلات ۱ تا ۵ مدل K-Epsilon Standard به همراه ثابت های آن را نشان می دهند [۱۷].

$$\mu_{t} = \rho C_{\mu} \frac{K^{t}}{\varepsilon} \tag{1}$$

ابعاد مورد استفاده برای شبیهسازی، برابر با ابعاد در نظر گرفته شده در مدل تجربی لاککنن و همکاران است [٤].

به منظور کاهش حجم محاسبات و متعاقب آن، کاهش بار محاسباتی سیستم از شرط مرزی تقارن^{۲۵} در هندسه استفاده شد. هندسهٔ طراحی شده به ٦ 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

برای بیابان شرط میاری او مو دو مینان وابط با میرو مرزو تناوب چرخشی^{۲۱} 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 حبابساز ۷۷۷۳ ۲۰/۰ در نظر گرفته شد. برای بررسی تأثیر

$$\rho H = \rho E + \rho = \rho C_{\rm P} T \tag{9}$$

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 Koscosity Viscosity در تقریب بوزینسک بوده که به در این روش از متوسط گیری زمانی رینولدز برای جریانهای در این روش از متوسط گیری زمانی رینولدز برای جریانهای تراکم ناپذیر استفاده میشود. معادلات ۱۰ تا ۲ تعریف میانگین گیری به روش رینولدز، معادله ۱۳ مجموعه خصوصیات میانگین گیری رینولدز، معادلات ۱۶ تا ۲۱ میانگین گیری پارامتها به روش رینولدز، معادلات ۱۶ تا ۲۱ میانگین گیری پارامتها به روش رینولدز هستند. همچنین معادلات ۱۷ تا ۹۱ به ترتیب فُرم بازنویسی شدهٔ معادلهٔ پیوستگی برای جریانهای تراکم ناپذیر به فرم RANS، معادلهٔ اندازه حرکت و مفهوم

$$\mathbf{f} = \mathbf{f} + \mathbf{f}' \tag{1}$$

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

$$\overline{\mathbf{f}}' = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_{\star}}^{t_{\star} + \Delta t} \mathbf{f}' dt = 0 \tag{11}$$

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

$$\overline{(\overline{f'+f'})^2} = \overline{\overline{f^2}} + \overline{\overline{f'^2}}$$

$$\overline{\overline{f'+g'}} \neq 0 , \quad \overline{\overline{f'^2}} \neq 0$$
(17)

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

$$\mathbf{u}_{i} = \overline{\mathbf{u}_{i}} + \mathbf{u}' \tag{12}$$

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

 $\mathbf{T} = \overline{\mathbf{T}} + \mathbf{T}' \tag{11}$

$$\frac{\partial \overline{\mathbf{u}_{i}}}{\partial \mathbf{x}_{j}} = 0 \tag{1V}$$

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

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

$$C_{\lambda\epsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_{k} + G_{\tau\epsilon} G_{b}) - G_{\tau\epsilon} \rho \frac{\varepsilon}{k} + S_{\epsilon}$$

$$C_{\mu} = 0/09, \quad C_{\lambda\epsilon} = 1/44, \quad C_{\tau\epsilon} = 1/92 \quad (\varepsilon)$$

$$\sigma_{k} = 1/Q, \quad \sigma_{\epsilon} = 1/3$$
 (6)

در معادله فوق، \Im و \Im ترمهای قابل تعریف توسط اپراتور هستند. برای شبیهسازی 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^{۲۳} به ترتیب ۲۰-۱/۳ N/m⁻¹ و ۲ قرار گرفته شد. همچنین، مرز^{۳۳} بالای مخزن برای خروج گاز از نوع شرایط گاززدایی^{۳۲} در نظر گرفته شد.

به منظور شبیهسازی جریانهای چندفازی از معادلات ناویر استوک^{۳۵} و رویکرد اولرین^{۳۳} استفاده شد. مدلسازی آشفتگی با استفاده از روشهای RANS ^{۳۷} انجام شد. روشهای RANS بر اساس میانگین گیری معادلات ناویر استوکس توسعه یافتهاند. معادلات ٦ تا ٩ به ترتیب معادلهٔ پیوستگی، معادلهٔ اندازه حرکت^{۳۸}، معادلهٔ انرژی و معادله حالت ناویر استوک میباشند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . \left(\rho u \right) = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial \left(\rho u_{i}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho u_{i} u_{j}\right)}{\partial x_{j}} = -\frac{\partial p}{\partial x_{i}} + \mu \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(2S_{ij} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_{k}}{\partial x_{k}}\delta_{ij}\right)$$
(V)

$$\frac{\partial \left(\rho E\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho H u_{j}\right)}{\partial x_{j}} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} + \left(u_{ij}\tau_{ij} + K\frac{\partial T}{\partial x_{i}}\right)$$
(A)

روشهای عددی در مهندسی، سال ٤٢، شماره ۲، ۱٤٠٢

۱۱۹



شکل ۳- شمای هندسهی راکتور لاککنن و همکاران

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^{۱۱} و همکاران نیز بررسی و دادههای پژوهش این محققان نیز در نظر گرفته شد [۱۸]. به منظور مش بندی و بررسی استقلال از شبکه، مش بندی در سه سطح انجام گرفت. به دست آوردن تعداد مش های کافی و بررسی استقلال از شبکه، یک بخش کلیدی برای اعتبارسنجی شبیه سازی های CFD است. در جدول (۲) مقایسه دادههای تجربی با دادههای شبیه سازی آورده شده است. برای بررسی نتایج، دادههای شبیه سازی آورده شده است. برای بررسی فرمول شمارهٔ ۲۰ استفاده شد. [۱۹].

$$\mathbf{N}_{\mathbf{P}} = \frac{\mathbf{P}}{\boldsymbol{\rho}.\mathbf{D}^5.\mathbf{N}^3} \tag{(7.)}$$

به منظور شبیهسازی بهتر نتایج، از مشبندی به صورت ترکیبی استفاده شد. به این ترتیب که از مشبندی ساختاریافته³⁷ و غیر ساختاریافته³³ استفاده شد. این موضوع باعث شد تا تراکم مشبندی در تمامی بخشهای هندسه به صورت یکسان در نظر گرفته نشده باشد. به این صورت که در قسمتهای بافلها،

12.7

$$\rho \frac{\boldsymbol{w}_{j}}{t\partial} + \rho \frac{\boldsymbol{w}_{j} \boldsymbol{u}_{i}}{\boldsymbol{w}_{j}} =$$

$$\rho \overline{f_{i}} + \mu \frac{\partial}{\boldsymbol{w}_{j}} \left(-\overline{P} S_{ij} + \mu \left(\frac{\overline{\boldsymbol{w}_{i}}}{\boldsymbol{w}_{j}} + \frac{\overline{\boldsymbol{w}_{j}}}{\boldsymbol{w}_{j}} \right) - \rho \overline{\boldsymbol{u}_{i}} \overline{\boldsymbol{u}_{i}} \right)$$

$$-\rho \overline{\boldsymbol{u}_{i}} \overline{\boldsymbol{u}_{i}} =$$

$$\left(\frac{\partial \overline{\boldsymbol{u}_{i}}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial \overline{\boldsymbol{u}_{j}}}{\partial x_{j}} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu t \left(\frac{\partial \boldsymbol{u}_{k}}{\partial x k} \right) \right) \delta_{ij}$$

$$(14)$$

هدف از این قسمت، بررسی مدلسازی انجام شده و نتایج به دستآمده با نتایج گزارش شده در مقالهٔ لاککنن^{۳۹} و همکاران [3] و کوشل³ و همکاران [7] است. شمای راکتور مورد استفاده قرار گرفته در مدلسازی لاککنن و همکاران در شکل (۳) آمده است. سرعت چرخش برای کار 20۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. سایر پارامترها نیز به صورت مشترک در نظر گرفته شدهاند. ابعاد هندسه در زمان محاسبهٔ پارامترهای

اختلاف ٪	NP بەدستآمدە از آزمايش	NP بەدستآمدە از مدلسازى	تعداد سلول براي هندسهٔ تقسيمشده*	رديف
7/9292	$1 \cdot / AA \pm \cdot / 11$	11/202212	مش نوع ۱. ۱۱٤۵۵	١
7/95/1	$1 \cdot / AA \pm \cdot / 11$	11/202720	مش نوع ۲. ۱۲۹۶۷۶	۲
7/9 2/11	$\cdot / AA \pm \cdot / 11$	11/007770	مش نوع ۳. ۱۳٤۷۳۹	٣

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

*هندسه برای افزایش سرعت محاسبات به ۲ قسمت مساوی تقسیم شده است.

همزن و حباب ساز از تراکم مش بیشتر استفاده شد. استفاده از مش بندی 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، مش بندی موجود در هر مرحله کوچکتر و شبیه سازی مجدداً تکرار شد. نتایج بیان شده در جدول (۲) نشان می دهد که حداکثر تکرار شد. نتایج بیان شده در جدول (۲) نشان می دهد که حداکثر شبیه سازی شده وجود دارد. این نتایج بیان کننده درستی و دقت شبیه سازی است. از طرفی، نتایج به دست آمده از دادههای مش 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 مش بندی 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 میشود. 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 میشود. این پارامترها در بخش بعد بررسی شدهاند.

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

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 ۵۰، ۱۵۰، ۲۵۰، ۳۵۰، ۵۵۰، ۵۰۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. مشخص است افزایش سرعت چرخش پروانه میتواند اولین تأثیر خود را بر روی سرعت چرخش سیال درون بيورآكتور بگذارد. براى بررسى بهتر تأثير سرعت چرخش یروانه بر سرعت سیال درون هندسه، در شکل (٤) تغییرات سرعت سیال درون بیوراکتور در سرعتهای مختلف چرخش پروانه نشان داده شده است. از شکل (٤) به خوبی می توان تغييرات سرعت سيال ناشي از چرخش پروانه و به خصوص تغییرات سرعت در دو قسمت نزدیک پروانه و نزدیک بافل ها را مشاهده کرد. به نظر میرسد تغییرات شدید سرعت در نزدیکی این دو قسمت، ناشی از ایجاد گردابهها در نزدیکی این محلها باشد. برای بررسی بهتر این موضوع می بایست خطوط جریان درون بیورآکتور را بررسی کنیم. همچنین نتایج دیداری نشان میدهد افزایش سرعت به صورت خطی در جهت حرکت پروانه در صفحهی هم تراز با پروانه افزایش مییابد.

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 بیشتر تأثیر افزایش سرعت چرخش پروانه بر روی حرکت سیال درون بیورآکتور، در شکل (٥) خطوط جریان درون تمام هندسه نشان داده شده است.

با توجه به تغییرات سرعت و خطوط جریان در دو شکل



شکل ٤- تغییرات سرعت سیال درون بیورآکتور در سرعتهای مختلف چرخش پروانه



شکل ۵– تغییرات خطوط جریان در کل هندسه با تغییرات سرعت چرخش پروانه



شکل ٦- بخش های با تنش بیش از ۱۰۰ (⁽⁻)

درون بیورآکتور با افزایش سرعت بسیار مهم به نظر میرسد. در شکل (٦) حجم های با نرخ کرنش برشی بیش از ۱۰۰ (⁽⁻S) نمایش داده شده اند. نرخ کرنش برشی^۵ سرعت صفحه فوقانی (لايه بالاي سيال) (بر حسب متر بر ثانيه) تقسيم بر فاصله بين دو صفحه (لایه های سیال) (بر حسب متر) است. برای بیان آن از واحد [۱/s] و یا (S^{-۱}) استفاده می شود. برای محاسبه نرخ کرنش برشی می توان از معادله ی ۲۱ استفاده کرد [۲۱ و ۲۲].

$$\dot{\gamma} = \frac{u}{hd} \left[\frac{m}{s.m} \right] \left[\frac{1}{s} \right] = \left[S^{-1} \right]$$
(11)

بررسی سرعت سیال درون بیوراکتور 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 سلول های زیستی در بخش های مشخص شدهای قرار می گیرند و یا درون تمامی بخش های بیور آکتور پخش هستند. 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

(٤) و (٥) مي توان نتيجه گرفت که از سرعت ٥٠ تا ٣٥٠ دور بر دقيقه، افزايش سرعت چرخش يروانه 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 آن ها در شکل (٥)، می توان دریافت که افزایش سرعت چرخش پروانه، علاوه بر ایجاد اغتشاش حول محور پروانه، باعث تغییر سرعت سیال در تمام هندسه نیز میشود. در نتیجه این 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 بيورآكتور می شود. بديهی است كه 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



مرده در هندسه می شود، اما از طرفی موجب افزایش تنش درون بیورآکتور می شود. در شکل (۷) می توان درصد حجم پرتنش بیورآکتور با نرخ کرنش برشی بیش از ۱۰۰ (⁻S) را مشاهده کرد. بنابراین، برای مشخص شدن بهتر تنش های ایجاد شده درون بیورآکتور با تغییر سرعت، تنش برشی میانگین و تنش برشی یکنواخت شده بررسی می شود. 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 توده 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 دست آمده از محاسبات عددی مطابق پیش بینی نشان می دهد که با افزایش سرعت چرخش پروانه درون بیور آکتور نرخ کرنش برشی میانگین نیز حرکتی افزایش را نشان می دهد. اما با بررسی نرخ کرنش برشی یکنواخت شده می توان نتیجه گرفت که از سرعت ٥٠ دور بر دقیقه تا سرعت می توان نتیجه گرفت که از سرعت ٥٠ دور بر دقیقه تا سرعت زیادی در حال افزایش است و پس از آن شیب افزایشی آن محیط بیور آکتور، شاخصی به نام "یکنواختی³" ایجاد شد. شاخص یکنواختی را میتوان با کمک روابط (۲۲) و (۲۳) محاسبه کرد. شاخص یکنواختی، تغییرات یک متغیر انتخابی را در کل حجم مشخص شده، بررسی میکند. به عبارتی دیگر، شاخص یکنواختی با عدد ۱ نشان دهنده ی بالاترین یکنواختی در کل محیط است. شاخص یکنواختی را میتوان با مساحت المان یا جرم مواد سنجش کرد. سنجش شاخص یکنواختی میتواند با استفاده از مساحت تغییرات مقدار یک متغیر را یکنواختی با جرم نشان دهنده تغییرات شار مواد است. شاخص یکنواختی وزنی متغیر که شاخص یکنواختی گاما نیز نامیده میشود. با استفاده از مقدار متوسط متغیر در میانگین سطح به میشود. با استفاده از مقدار متوسط متغیر در میانگین سطح به مشخص φ توسط معادلههای زیر محاسبه میشود [۲۲].

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[\left| \phi_{i} - \overline{\phi_{a}} \right| \mathbf{A}_{i} \right]}{2 \left| \overline{\phi_{a}} \right| \sum_{i=1}^{n} \mathbf{A}_{i}}$$
(YY)

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

با مشاهده شکل (٦) می توان به این نتیجه رسید که افزایش سرعت چرخش پروانه با وجود این که موجب کاهش نقاط



درسرعتهای کم چرخش پروانه، مسیر عبوری هوا از خروجی حباب سازها به صورت مستقیم به طرف بیرون بیورآکتور است و عملاً بیورآکتور نمی تواند پخش مناسبی را از هوا در خود داشته باشد. با مشاهده شکل (۱۰) می توان بیان کرد که سرعت بالاتر چرخش پروانهها موجب می شود، جریان یکنواخت هوا به بیرون بیورآکتور تحت تأثیر چرخش پروانهها قرار بگیرد و در کل بیورآکتور پخش شود. این موضوع باعث می شود جریان با غلظت بالای هوا به طرف خارج بیورآکتور وجود نداشته باشد. وجود این موضوع به خوبی می تواند عملکرد بیورآکتور را تحت تأثیر خود قرار دهد. از طرفی با دقت به خروجی های حباب سازها در سرعتهای ٤٥٠ دور تا ٥٧٠ دور بر دقیقه می توان دید که 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 یکنواخت تر شدن سیال درون بیورآکتور نخواهد گذاشت. برای بررسی بهتر این موضوع می بیورآکتور نخواهد گذاشت. برای بررسی بهتر این موضوع 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 بیورآکتور در سرعتهای مختلف چرخش پروانه را نشان می دهد.

با بررسی نتایج میتوان چنین نتیجه گرفت که



شکل ۱۰– مسیر حرکت جریان هوا در سرعتهای مختلف چرخش پروانه

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 ۱۰۰ دور بر دقیقه تنشهای برشی یکنواخت شده ناشی از فاز گاز، نرخ ثابتی را نشان میدهد. این حالت میتواند ناشی خروجیهای حباب سازها به صورت گردابهای در آمده و از حالت خطی خود خارج می شوند. این مهم می تواند تایید کننده افزایش سرعتهای گردابهای باشد که در نهایت می تواند به تولیدات زیستی آسیب برساند. وجود این موضوع باعث می شود گاز از حالت پخش بهینه به حال گردابه وارد شود. همچنین با دقت به نتایج به دست آمده مجددا می توان تاکید کرد که، سرعت چرخش پروانه از ٥٠ دور در دقیقه تا ٣٥٠ دور بیورآکتور ایجاد کند، ولی پس از آن توزیع هوا درون بیورآکتور با تغییرات کمتری همراه است. برای بررسی بهتر این تغییرات می توان میزان نرخ کرنش برشی را در فاز هوا نیز درون



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 بیوراکتور 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 (۱٤)، فرم یکنواخت شده کسر حجمی فاز گاز در بیورآکتور در دورهای مختلف چرخش پروانه نشان داده است.

نتایج به دست آمده از شکل (۱٤) 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 ۱٤– رابطه مابین افزایش سرعت چرخش پروانه و نرخ فرم یکنواخت شده کسر حجمی فاز گاز

کاهشی را از خود نشان میدهد. نتایج به دست آمده پخش 🧼 شدن فاز گاز درون کل بیورآکتور را نشان میدهند. استفاده از



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

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 می دهد که افزایش سرعت چرخش پروانه در سرعتهای کم باعث پخش بهتر گاز شود. اما در سرعتهای بالاتر موجب ایجاد گردابهها می شود. چرخش پروانه با سرعت بالا باعث می شود 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 نمایش داده است.

با دقت در شکل (۱۵) می توان 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 نمی تواند کل آن را پوشش دهد. مشخص است با افزایش سرعت چرخش پروانهها این فرم پوشش می دهد. مشخص است با افزایش سرعت چرخش پروانهها این فرم تغییر می کند. در نتیجه فاز گاز بخش بیشتری از بیورآکتور را پوشش می دهد. 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 پخش بهینه فاز گاز درون بیورآکتور می شود.

برای ادامه بررسی پارامترهای تأثیر گذار بر روی شاخصهای عملکردی بیورآکتورها می توان به بررسی نرخ متوسط انتقال جرم^{۷۵} درون بیورآکتور پرداخت. نرخ متوسط انتقال جرم نشانهای از بازده انتقال مواد (که شامل هوا نیز است) در محیط کشت می باشد. 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 (۱۳) نرخ متوسط انتقال جرم در سرعتهای مختلف چرخش پروانه را نشان می دهد.

نتایج به دستآمده از شکل (۱٦) 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 ٥٠ تا ١٥٠ دور بر دقیقه اختلاف ایجاد شده بسیار زیاد است. اما پس از عبور از سرعت ٢٥٠ دور بر دقیقه



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

درصد تغییر نسبت حداقل به حداکثر تغییر	سرعت چرخش (دور بر دقیقه)	رديف
١/٧٤٣	10.	١
٧/٢٣.	70.	۲
17/079	٣٥.	٣
321/14	٤٥٠	٤
٥٦/٣٣٨	00.	٥
VV/ * • ٩	70.	٦
1	V0•	٧

٥- نتيجه گيري

در این مقاله اثر تغییرات سرعت چرخش پروانه راشتون درون بیورآکتور از سرعت چرخش ۵۰ دور بر دقیقه تا سرعت چرخش ۷۰۰ 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 بیورآکتور بررسی شد. شبیه سازی انجامشده با رویکرد چند فازی مدل فاز پراکنده صفر معادله، مدل اغتشاش K-Epsilon Standard به صورت پایا و سهبعدی توسط مجموعه نرمافزاری Ansys CFX ورژن ۳۳ ۲۰۱۹ و نرم افزار ۲۰۱۹

-نتایج نشان میدهند که بیشترین پرش ایجاد تنش را میتوان

در دورهای مابین ۳۵۰ تا ٤٥٠ دور بر دقیقه دید. به نظر میرسد با بررسی تمامی نتایج میتوان سرعت مابین ۳۵۰ تا ٤٥٠ دور بر دقیقه را برای سرعت بهینه در نظر گرفت.

تغييرات نرخ متوسط انتقال جرم كمتر مي شود.

برای به دست آوردن سرعت بهینه می بایست مجموع

پارامترهای تأثیر گذار را در نظر گرفت. با توجه به درصد ایجاد

تنش درون بيورآكتور شكل (۷) مي توان تأثير افزايش 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.

می کند. این تأثیر را می توان 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 می یابد. افزایش سرعت، موجب ایجاد خطوط جریان بیشتری به صورت خطی نمی شود و فقط باعث افزایش سرعت در خطوط جریان ایجاد شده می شود. همچنین سرعتهای مابین ۵۰۰ تا ۵۰۰ دور بر دقیقه، گازهای خروجی از حباب سازها به جای پخش شدن در هندسه وارد حالت گردابهای می شوند. با افزایش سرعت چرخش پروانه بیش از کاهشی را نشان می دهد. افزایش سرعت چرخش پروانه بیش از کاهشی را نشان می دهد. افزایش سرعت چرخش پروانه بیش از می تواند موجب ایجاد گردابه در اطراف پروانه شود و از پخش می تواند موجب ایجاد گردابه در اطراف پروانه شود و از پخش 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 ۲۰۰ تا ۵۰۰ 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 ۲۰۰ دور بر دقیقه تنش برشی یکنواخت شده با شیب زیادی افزایش مییابد، اما پس از عبور از سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه میزان افزایش این پارامتر با شیب بسیار کمتری ادامه پیدا

واژەنامە

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

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
- in Rushton-Impeller Baffled-Tank Reactor", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 58, No. 8, pp. 1615–1629, 2003.
- 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.
 - Niño, L., Gelves, R., H. Ali, Solsvik, J., and 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.

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

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

روش های عددی در مهندسی، سال ٤٢، شماره ۲، ۱٤٠٢

34. degassing condition

- 35. Navier Stokes
- 36. Eulerian Approach
- 37. Reynold-Average Navier- Stokes
- 38. momentum
- 39. M. Laakkonen
- 40. M. Kuschel
- 41. P. M. Armenante
- 42. power number
- 43. structure mesh
- 44. unstructure mesh
- 45. shear rate
- 46. uniformity
- 47. Average Mass Transfer Coefficient

منابع

- 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.
- 10. 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.
- 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.
- 31. Blottner, F.G., "Chemical Non Equilibrium

Boundary Layer", AIAA Journal, Vol. 2, No. 2, Feb. 1964, pp. 232–239.

- 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.

34. Chapman, D.R., "Computational Aerodynamics Development and Outlook", AIAA Journal, Vol. 17, No. 12, Dec. 1979, pp. 1293–1313.