



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

Pedram Nasehi^{ID} and Ahmad Azari*^{ID}

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 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.

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.





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

بدرام ناصح^{ID} و احمد آذری^{ID*}

دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

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 حلقه 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 ۱۵۰ 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 تأثیر آن بر روی میزان اختلاط فاز گاز و مایع، تنش درون مایع و نرخ متوسط انتقال جرم، می‌توان سرعت ۳۵۰ تا ۴۵۰ دور بر دقیقه را برای سرعت بهینه در نظر گرفت. در نهایت، مشخص شد که با افزایش سرعت چرخش پروانه نمی‌توان به اختلاط بهتر در بیورآکتور رسید و می‌بایست سرعت بهینه را مشخص کرد.

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

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸، اولین انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

* نویسنده مسئول، رایانامه: azari.ahmad@gmail.com or azari.ahmad@pgu.ac.ir



فهرست علائم

u	بردار سرعت (سرعت سیال)	علائم یونانی
Ym	انرژی جنبشی ناشی از اثرات تراکم‌پذیری جریان	μ_t ویسکوزیته گردابه‌ای ^۲
Gb	انرژی ناشی از نیروی شناوری ^۱	σk عدد پرانتل متناسب با k
Gk	انرژی تولیدی ناشی از گرادیان‌های سرعت	$\sigma \varepsilon$ عدد پرانتل متناسب با SK
P	توان مورد نیاز برای چرخش پروانه	$\dot{\gamma}$ نرخ کرنش برشی
D	قطر پروانه‌ها	ρ دانسیته
N	سرعت پروانه	α کسر حجمی
hd	فاصله دو صفحه	$\bar{\phi}_a$ میانگین کل متغیر در المان
زیرنویس‌ها		
i	یک سطح متغیر از Π سطح متغیر موجود در المان	

۱- معرفی

راکتورهای گاز-مایع کاربرد وسیعی در صنایع مختلفی همچون هیدروژناسیون^۳، اکسیداسیون^۴، تخمیرهای هوازی^۵ به ویژه فرآیندهای بیوتکنولوژی^۶ 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 می‌رود. تأثیرگذاری مستقیم فرآیند مخلوط کردن، در بازده راکتورهای گاز-مایع باعث می‌شود 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 راکتور می‌باشد. دلیل اصلی استفاده از مخلوط کردن در صنعت، افزایش سرعت انجام واکنش‌ها به دلیل افزایش برخورد مواد درون راکتور است [۲]. اختلاط معمولاً می‌تواند به منظور انجام یک تغییر فیزیکی یا شیمیایی انجام شود [۳]. بکارگیری راکتورهای گاز-مایع بدون ایجاد اختلاط مناسب، معمولاً باعث می‌شود، انتقال جرم و انتقال حرارت درون بیوراکتور به صورت مناسب صورت نگیرد. این مشکلات موجب می‌شوند که فرآیند کاری این دسته از راکتورها به صورت ناهمگن ادامه پیدا کند [۴].

ناهمگن بودن بیوراکتورها موجب چگالی بالا یا پایین هوا در بخش‌های مختلف می‌شود. این موضوع می‌تواند فرآیندهای زیستی^۷ درون بیوراکتور را تحت تأثیر خود قرار دهد [۵]. در نتیجه، فرآیندهای انتقال جرم از فاز گاز به مایع می‌تواند با چالش‌های فراوانی روبرو شود؛ از جمله این چالش‌ها می‌توان به مشکلاتی همچون پخش نشدن درست گاز اشاره کرد. این مشکلات موجب ناهمگن‌تر شدن کل سیستم می‌شوند. 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 [۶]. 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 [۷]. از اینرو، انتقال بهینه اکسیژن بسیار مهم‌تر نیز می‌شود و غالباً این امر به عنوان یک مرحله محدودکننده سرعت برای فرآیندهای زیستی آبی^۸ خواهد بود [۷]. بنابراین، طراحی دقیق این دسته از راکتورها، تأثیر فراوانی در بهره‌وری نهایی آن‌ها دارد. همانند سایر پدیده‌های محیطی که مابین فازهای مختلف

صورت می‌گیرند، 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 خصوصیات هیدرودینامیکی راکتور می‌تواند موجب بهبود انتقال گاز و همگن شدن بیورآکتور شود [۵]. از اینرو، استفاده از همزن^{۱۰} 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 می‌تواند در عملکرد کلی بیورآکتور تأثیر بسیاری داشته باشد. پره‌های ملخی^{۱۲}، توربینی^{۱۳}، پارویی^{۱۴}، از مهم‌ترین انواع پره‌ها هستند که برای هم‌زدن مایعات با ویسکوزیته پایین بکار می‌روند [۹]. این نوع همزن‌ها با سرعت زیاد دوران می‌کنند. پره لنگری^{۱۵} و پره حلزونی^{۱۶} برای هم‌زدن 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 محدوده گسترده‌ای از سیالات با ویسکوزیته‌های مختلف کاربرد دارند [۵]. در صنایع شیمیایی، بخصوص برای اختلاط 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 پروانه جریان‌شعاعی است که برای بسیاری از کاربردهای اختلاط در مهندسی فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد. طراحی این پروانه بر اساس یک دیسک تخت با تیغه‌های عمودی است. وجود پروانه‌ها برای هم‌زدن 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

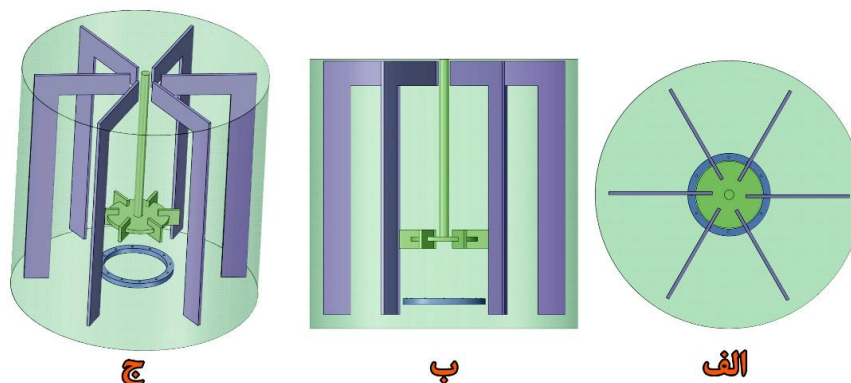
انرژی و اختلاط ایجاد شده در بیورآکتور تأثیر بسزایی دارد. بدیهی است افزایش سرعت پروانه و افزایش بافل‌ها می‌تواند همگن‌سازی و پخش بهتری از اکسیژن را ایجاد کند، اما مشخص است که افزایش این پارامترها موجب افزایش تلاطم‌های موجود در راکتور می‌شود. این تلاطم‌ها در نهایت منجر به آسیب دیدن واکنش‌های بیولوژیکی در حال انجام درون راکتورها گردد [۱۲]. به همین دلیل، دستیابی به سرعت بهینه در پروانه‌های بیورآکتورها می‌تواند بسیار پُراهمیت باشد. بررسی این فرایندها با سیستم‌های آزمایشگاهی کاری زمان‌بر و پُرهزینه است. هزینه 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)^{۲۰} در محاسبه جریان‌های چندفازی بسیار افزایش پیدا کرده است [۱۳]. اولین استفاده از سیالات دینامیک محاسباتی در سال ۱۹۴۷ برای تشریح حرکت جریان هوا پیرامون مخروط‌های نوک تیز در سرعت‌های مافوق صوت توسط کار کوپل و همکاران انجام گرفت. در این کار جداول کاملی برای بررسی این جریان‌ها با کمک کامپیوترهای مؤسسه فن‌آوری ماساچوست انجام گرفت [۲۹]. توسعه دینامیک سیالات محاسباتی همزمان با به وجود آمدن کامپیوترهای سریع‌تر در دهه‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ صورت گرفت. بررسی‌های انجام گرفته در آن زمان پیرامون حرکت سریع اشیاء در جو زمین بود. در این زمان بررسی‌های دقیق رفتار مواد در گرمایی بالا ناشی از حرکت مافوق صوت سرعت گرفت. همچنین تحقیقات قابل توجه‌ای از این محاسبات، در زمینه لایه مرزی توسط فی و ریدل [۳۰] و بلوتنر [۳۱ و ۳۲] همراه با تحقیقات هال و همکاران [۳۳] در مورد جریان‌های غیر لزج موجب افزایش توجه‌ها بر روی این روش شد. پیش‌بینی‌های مهندسی به قدری قوی شده است که امروزه می‌توان آن را به عنوان یک بعد جدید در دینامیک سیالات محاسباتی در نظر گرفت [۳۴]. هدف کلی از این شبیه‌سازی‌ها را می‌توان پیش‌بینی نتایج

فرایندها با استفاده از حل معادلات ریاضی بیان کرد [۱۴]. چرخش و حرکت پروانه‌ها در کنار وجود بافل می‌تواند حرکت سیال درون راکتور را از حرکت جریان آرام به طرف جریان‌های آشفته هدایت کند. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، جریان‌های آشفته با سرعت و انرژی بالا می‌تواند موجب آسیب به فرآیند شود. به همین دلیل توانایی پیش‌بینی 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، می‌توان بیان کرد که شبیه‌سازی می‌تواند یکی از راه‌های بسیار با ارزش برای پیش‌بینی رفتارهای مختلف سیستم‌ها باشد [۱۵]. دینامیک سیالات محاسباتی، فرآیندی است که در طول آن با استفاده از آنالیز عددی و الگوریتم‌های عددی، می‌توان مسائل مشتمل بر شارهای سیالاتی را تجزیه و تحلیل کرد. در این روش، با تبدیل معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر سیالات به معادلات جبری، امکان حل عددی این معادلات فراهم می‌شود [۱۶]. همچنین هزینه بر بودن طراحی و انجام آزمایش‌های درون راکتور موجب می‌شود استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بیش از پیش با ارزش شود [۲۶]. باید توجه شود که با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان بسیار ساده‌تر پدیده‌های انتقال جرم، انتقال حرارت، جریان‌های چندفازی و واکنش‌های 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 بیوراکتور شیمیایی همزن‌دار با یک حلقه 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 بهینه چرخش پروانه برای بهترین حالت عملکرد بیوراکتور، سرعت چرخش پروانه از ۵۰ تا ۷۵۰

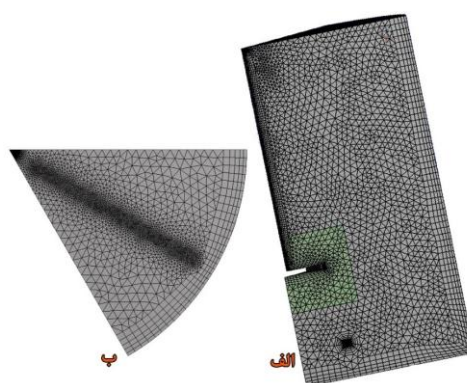
دور بر دقیقه (RPM)^{۲۲} تغییر داده شد. سپس پارامترهای عملیاتی مورد بررسی قرار گرفت. برای مشخص شدن بهترین سرعت چرخش پروانه و تأثیر سرعت آن بر عملکرد بیوراکتور، پارامترهای تنش برشی^{۲۳} متوسط، تنش برشی یکنواخت شده، تغییرات درصد هوا در بیوراکتور در سرعت‌های مختلف چرخش پروانه و همچنین، رابطه‌ی مابین افزایش سرعت چرخش پروانه و نرخ فرم یکنواخت شده کسر حجمی فاز گاز، مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی بهتر تأثیر سرعت چرخش پروانه درون بیوراکتور، پروانه راشتون انتخاب شد. سرعت چرخش پروانه از ۵۰ 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 بهینه بیوراکتور چند دور بر دقیقه است. این سرعت باید بتواند هم بهترین نرخ پخش هوا را داشته باشد و هم تأثیر تنش‌ها را نیز در حداقل خود قرار دهد.

۲- مدل‌سازی CFD

در اینکار از مجموعه نرم افزاری ANSYS Products ورژن R۳ و نرم‌افزار Ansys CFX با کمک روش حجم محدود استفاده شده است. هندسه طراحی شده شامل یک مخزن استوانه‌ای با قطر T برابر با ۲۶۰ میلی‌متر است. این مخزن تا ارتفاع h برابر با ۲۶۰ میلی‌متر پر از آب شده و آب درون مخزن با کمک یک پروانه راشتون ۶ پره‌ای به هم زده می‌شود. قطر پروانه برابر است با $D = \frac{\tau}{3}$ ، ارتفاع آن برابر با $\frac{D}{5}$ و عرض آن برابر با $\frac{D}{4}$ بوده است. برای پخش گاز درون آب از یک حباب‌ساز حلقه‌ای در زیر همزن استفاده شده است. برای ایجاد اختلال بهتر در هندسه از ۶ بافل استفاده شد. بافل‌ها در بالای هندسه نیز ادامه پیدا کرده‌اند، تا از ایجاد گردابه‌ها جلوگیری کنند و در ایجاد اختلاط بهتر موجب افزایش راندمان راکتور شوند. در شکل (۱) هندسه طراحی شده نمایش داده شده است.



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

خاصیت	فاز مایع (آب)	فاز گاز (هوا)
دانشیه (kg/m ^۳)	۹۹۸/۲	۱/۲۲۵
ویسکوزیته (kg/m.s)	۰/۰۰۱۰۰۳	۰/۰۰۰۰۱۷۸۹۴

سرعت چرخش پروانه درون بیورآکتور، سرعت چرخش پروانه در سرعت‌های ۵۰، ۱۵۰، ۲۵۰، ۳۵۰، ۴۵۰، ۵۵۰، ۶۵۰ و ۷۵۰ 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 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].

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (۱)$$

ابعاد مورد استفاده برای شبیه‌سازی، برابر با ابعاد در نظر گرفته شده در مدل تجربی لاککن 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. هندسه طراحی شده به ۶ قسمت مساوی تقسیم شد. در شکل (۲) هندسه نهایی شده همراه با مش‌بندی 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 درجه سانتی‌گراد انجام شد. حجم هوای وارد شده به بیورآکتور در دهانه حباب‌ساز^{۲۷} ۰/۲۵ در نظر گرفته شد. برای بررسی تأثیر

$$\rho H = \rho E + \rho = \rho C_p T \quad (9)$$

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 Eddy Viscosity در تقریب بوزینسک بوده که به Turbulence Viscosity یا همان μ_t نیز معروف است. همچنین در این روش از متوسط گیری زمانی رینولدز برای جریان‌های تراکم ناپذیر استفاده می‌شود. معادلات ۱۰ تا ۱۲ تعریف میانگین گیری به روش رینولدز، معادله ۱۳ مجموعه خصوصیات میانگین گیری رینولدز، معادلات ۱۴ تا ۱۶ میانگین گیری پارامترها به روش رینولدز هستند. همچنین معادلات ۱۷ تا ۱۹ به ترتیب قُرم بازنویسی شده معادله پیوستگی برای جریان‌های تراکم ناپذیر به فرم RANS، معادله اندازه حرکت و مفهوم ویسکوزیته گردابه‌ای (تقریب بوزینسک) هستند.

$$f = \bar{f} + f' \quad (10)$$

$$\bar{f} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_i}^{t_i + \Delta t} f dt \quad (11)$$

$$\bar{f}' = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_i}^{t_i + \Delta t} f' dt = 0 \quad (12)$$

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

$$\overline{(f' + f')^2} = \bar{f'^2} + \bar{f'^2} \quad (13)$$

$$\overline{f' + g'} \neq 0, \quad \bar{f'^2} \neq 0$$

$$\overline{fg} = \bar{f}\bar{g}$$

$$u_i = \bar{u}_i + u' \quad (14)$$

$$P = \bar{P} + P' \quad (15)$$

$$T = \bar{T} + T' \quad (16)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \quad (3)$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{\tau\varepsilon} G_b) - G_{\tau\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{1\varepsilon} = 1/44, \quad C_{\tau\varepsilon} = 1/92 \quad (4)$$

$$\sigma_k = 1/0, \quad \sigma_\varepsilon = 1/3 \quad (5)$$

در معادله فوق، ε و S_ε ترم‌های قابل تعریف توسط اپراتور هستند. برای شبیه‌سازی جریان هوا در بخش مدل شناوری سیال^{۲۸}، از مدل فاز پراکنده صفر معادله^{۲۹} استفاده شد. برای جفت شدن سیال‌ها^{۳۰} ضرایب پارامترهای ضریب کشش سطح^{۳۱} و نیروی درگ^{۳۲} به ترتیب 0.69 N/m^2 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^{۳۷} انجام شد. روش‌های RANS بر اساس میانگین‌گیری معادلات ناویر استوکس توسعه یافته‌اند. معادلات ۶ تا ۹ به ترتیب معادله پیوستگی، معادله اندازه حرکت^{۳۸}، معادله انرژی و معادله حالت ناویر استوک می‌باشند.

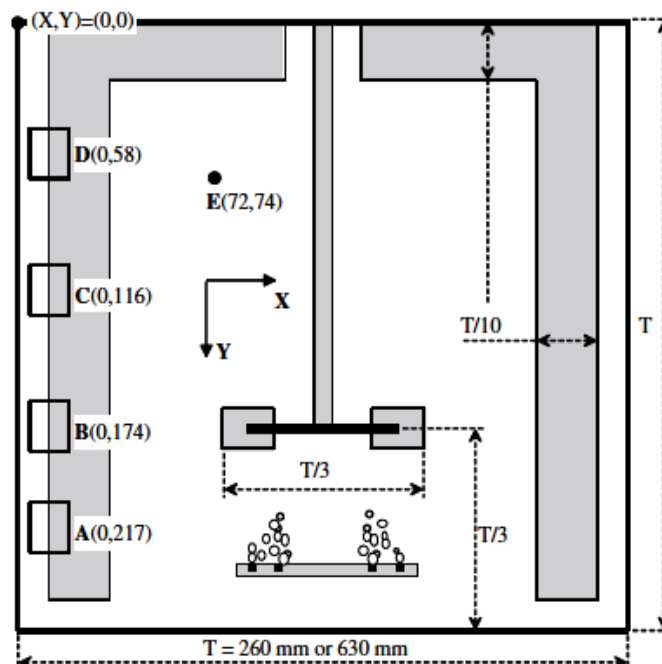
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \quad (7)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho H u_j)}{\partial x_j} = \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_{ij} \tau_{ij} + K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right)$$



شکل ۳- شمای هندسه‌ی راکتور لاککن 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^{۴۱} و همکاران نیز بررسی و داده‌های پژوهش این محققان نیز در نظر گرفته شد [۱۸]. به منظور مش‌بندی و بررسی استقلال از شبکه، مش‌بندی در سه سطح انجام گرفت. به دست آوردن تعداد مش‌های کافی و بررسی استقلال از شبکه، یک بخش کلیدی برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های CFD است. در جدول (۲) مقایسه داده‌های تجربی با داده‌های شبیه‌سازی آورده شده است. برای بررسی نتایج، داده‌های NP^{۴۲} استفاده شد. برای محاسبه پارامتر NP از فرمول شماره ۲۰ استفاده شد [۱۹].

$$N_p = \frac{P}{\rho \cdot D^5 \cdot N^3} \quad (20)$$

به منظور شبیه‌سازی بهتر نتایج، از مش‌بندی به صورت ترکیبی استفاده شد. به این ترتیب که از مش‌بندی ساختاریافته^{۴۳} و غیر ساختاریافته^{۴۴} 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،

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\overline{w_i}}{t\partial} + \rho \frac{\overline{w_j} \overline{u_i}}{x_j^2} = \\ & \rho \overline{f_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{P} S_{ij} + \mu \left(\frac{\overline{w_i}}{x_j} + \frac{\overline{w_j}}{x_i} \right) - \rho \overline{u_i} \overline{u_j} \right) \end{aligned} \quad (1\lambda)$$

$$-\overline{\rho \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i} = \left(\frac{\partial \overline{\mathbf{u}_i}}{\partial \mathbf{x}_j} + \frac{\partial \overline{\mathbf{u}_j}}{\partial \mathbf{x}_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho \mathbf{k} + \mu \mathbf{t} \left(\frac{\partial \mathbf{u}_k}{\partial \mathbf{x}_k} \right) \right) \delta_{ij} \quad (19)$$

نتایج و بحث

۳-۱- اعتبار سنجی مدل

هدف از این قسمت، بررسی مدل‌سازی انجام شده و نتایج به دست‌آمده با نتایج گزارش شده در مقاله لاککن^{۳۹} و همکاران [۴] و کوشل^{۴۰} و همکاران [۶] است. شمای راکتور مورد استفاده قرار گرفته در مدل‌سازی لاککن 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 محاسبه پارامترهای

جدول ۲- مقایسه پارامتر شبیه‌سازی شده و اعتبارسنجی مدل با داده‌های آزمایشگاهی

ردیف	تعداد سلول برای هندسه تقسیم‌شده*	NP به‌دست‌آمده از مدل‌سازی	NP به‌دست‌آمده از آزمایش	اختلاف %
۱	مش نوع ۱. ۱۱۴۵۵۶	۱۱/۷۵۳۷۱۴	۱۰/۸۸ ± ۰/۱۱	۶/۹۴۹۴
۲	مش نوع ۲. ۱۲۹۶۷۶	۱۱/۷۵۳۶۶۵	۱۰/۸۸ ± ۰/۱۱	۶/۹۴۸۷
۳	مش نوع ۳. ۱۳۴۱۳۹	۱۱/۷۵۳۶۶۵	۱۰/۸۸ ± ۰/۱۱	۶/۹۴۸۷

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

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، ۴۵۰، ۵۵۰، ۶۵۰ 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 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 می‌توان تغییرات سرعت سیال ناشی از چرخش پروانه و به خصوص تغییرات سرعت در دو قسمت نزدیک پروانه و نزدیک بافل‌ها 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 می‌بایست 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 (۵) خطوط جریان درون تمام هندسه نشان داده شده است.

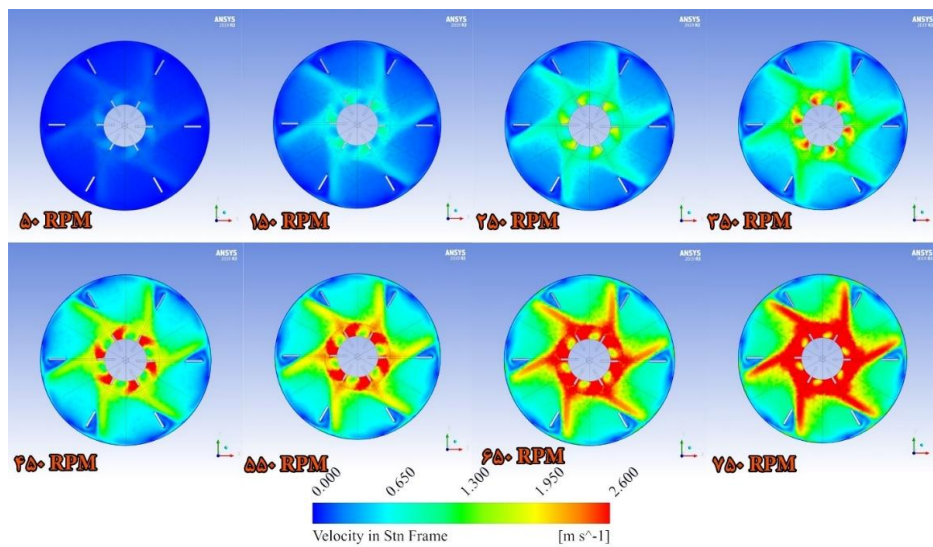
با توجه به تغییرات سرعت و خطوط جریان در دو شکل

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 شبیه‌سازی 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 بیان‌کننده درستی و دقت شبیه‌سازی 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 سائز 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.

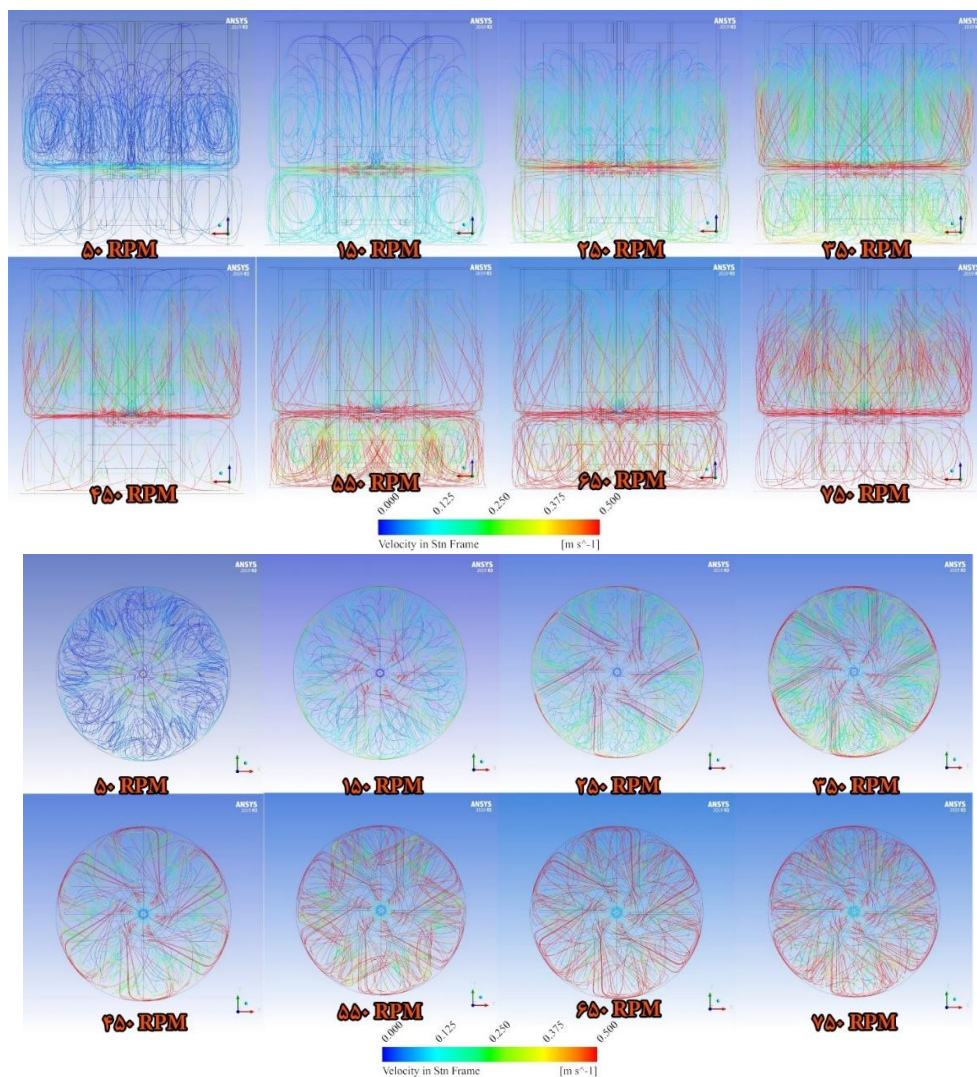
برای بررسی داده‌های شبیه‌سازی پارامترهای سرعت چرخش پروانه بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، افزایش سرعت در دورهای اولیه باعث بهبود عمل رآکتور به دلیل افزایش پخش شونده‌گی گاز می‌شود. برخلاف تصور اولیه، پخش شدن بهتر گاز درون رآکتور با افزایش سرعت رابطه مستقیم ندارد. همچنین افزایش سرعت چرخش پروانه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

۴- تأثیر سرعت چرخش

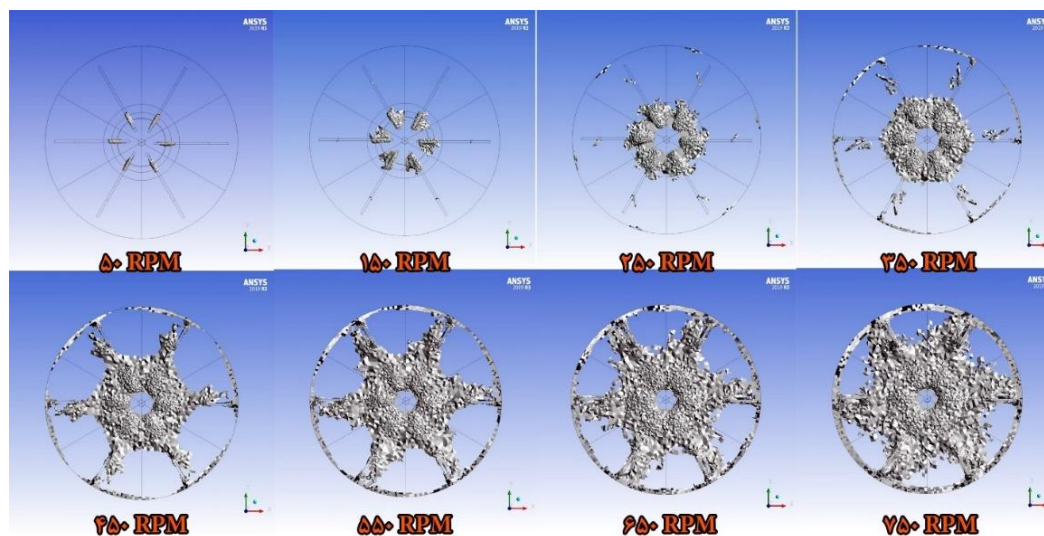
همانگونه که پیش‌تر بیان شد، یکی از پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد بیورآکتور تغییر سرعت چرخش پروانه است. به همین



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



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



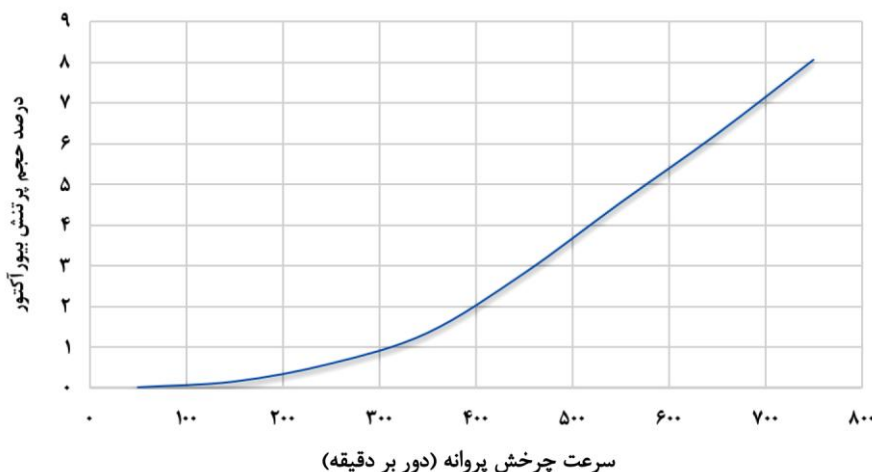
شکل ۶- بخش‌های با تنش بیش از ۱۰۰ (S^{-۱})

درون بیورآکتور با افزایش سرعت بسیار مهم به نظر می‌رسد. در شکل (۶) حجم‌های با نرخ کرنش برشی بیش از ۱۰۰ (S^{-۱}) نمایش داده شده‌اند. نرخ کرنش برشی^{۲۵} سرعت صفحه فوقانی (لایه بالای سیال) (بر حسب متر بر ثانیه) تقسیم بر فاصله بین دو صفحه (لایه‌های سیال) (بر حسب متر) است. برای بیان آن از واحد [۱/s] و یا (S^{-۱}) استفاده می‌شود. برای محاسبه نرخ کرنش برشی می‌توان از معادله‌ی ۲۱ استفاده کرد [۲۱ و ۲۲].

$$\dot{\gamma} = \frac{u}{hd} \left[\frac{m}{s.m} \right] \left[\frac{1}{s} \right] = [S^{-1}] \quad (21)$$

بررسی سرعت سیال درون بیورآکتور در یک سطح مشخص نمی‌تواند نتایج بهینه‌ای را برای بررسی نهایی و تصمیم‌گیری برای آن ایجاد کند. دلیل این موضوع این است که، برخی اوقات سلول‌های زیستی در بخش‌های مشخص شده‌ای قرار می‌گیرند و یا درون تمامی بخش‌های بیورآکتور پخش هستند. در نتیجه، بررسی پروفایل‌های سرعت نیاز به بررسی سه بعدی دارد. باید دقت شود که سرعت‌های زاویه‌ای درون قسمت‌های مختلف به صورت خطی 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

(۴) و (۵) می‌توان نتیجه گرفت که از سرعت ۵۰ تا ۳۵۰ دور بر دقیقه، افزایش سرعت چرخش پروانه‌ها موجب افزایش 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 می‌یابد. این مهم می‌تواند موجب افزایش سرعت ایجاد تنش در هندسه گردد. همچنین با مشاهده دقیق خطوط جریان و تغییرات سرعت آن‌ها در شکل (۵)، می‌توان 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 می‌یابد. همچنین بدیهی است که سرعت‌های کم پروانه نیز نمی‌تواند سرعت مناسبی را درون کل هندسه ایجاد کند؛ بنابراین، سرعت کم چرخش پروانه موجب به وجود آمدن نقاط مرده درون بیورآکتور می‌شود. بدیهی است که افزایش سرعت سیال درون هندسه موجب افزایش تنش برشی درون بیورآکتور نیز می‌شود. افزایش این تنش‌ها می‌تواند 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]. از طرفی، افزایش سرعت باعث افزایش توان مصرفی نیز می‌شود [۱۹]. به همین دلیل بررسی تنش‌های ایجاد



شکل ۷- درصد حجم بیورآکتور با نرخ کرنش برشی بیش از $100 (S^{-1})$

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 $100 (S^{-1})$ را مشاهده 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 دست‌آمده به خوبی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت چرخش پروانه در بیورآکتور، نرخ کرنش برشی نیز افزایش یافته و این افزایش در کل حجم بیورآکتور به خصوص در اطراف پروانه به دلیل ایجاد حرکت و در اطراف بافل‌ها به دلیل ایجاد مانع در حرکت توده‌های سیال، دیده می‌شود. بدیهی است که افزایش بیش از حد نرخ کرنش برشی موجب آسیب دیدن محصول نهایی می‌شود.

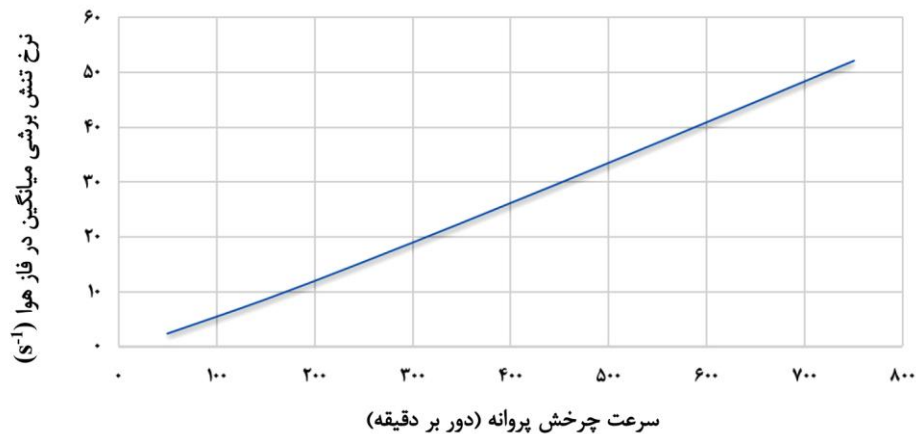
بررسی نتایج به دست‌آمده از محاسبات عددی مطابق پیش‌بینی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت چرخش پروانه درون بیورآکتور نرخ کرنش برشی میانگین نیز حرکتی افزایش را نشان می‌دهد. اما با بررسی نرخ کرنش برشی یکنواخت شده می‌توان نتیجه گرفت که از سرعت ۵۰ دور بر دقیقه تا سرعت ۳۵۰ دور بر دقیقه نرخ کرنش برشی یکنواخت شده با شیب زیادی در حال افزایش است و پس از آن شیب افزایشی آن

محیط بیورآکتور، شاخصی به نام "یکنواختی"^{۲۶} 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 دهنده‌ی 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 بررسی کند (همانند غلظت یک گونه). سنجش شاخص 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 دست می‌آید. شاخص یکنواختی گاما با کمک یک متغیر مشخص φ توسط معادله‌های زیر محاسبه می‌شود [۲۴].

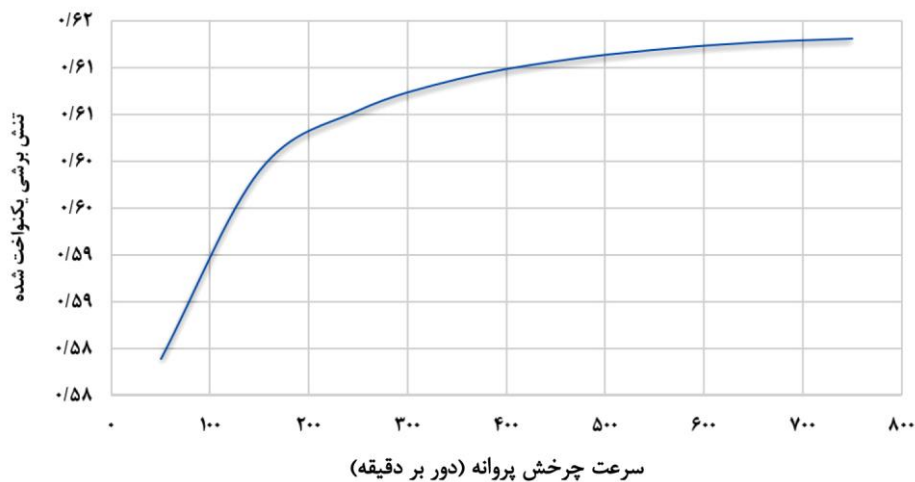
$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [|\varphi_i - \overline{\varphi_a}| A_i]}{2|\overline{\varphi_a}| \sum_{i=1}^n A_i} \quad (22)$$

$$\overline{\varphi_a} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [\varphi_i A_i]}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (23)$$

با مشاهده شکل (۶) می‌توان به این نتیجه رسید که افزایش سرعت چرخش پروانه با وجود این که موجب کاهش نقاط



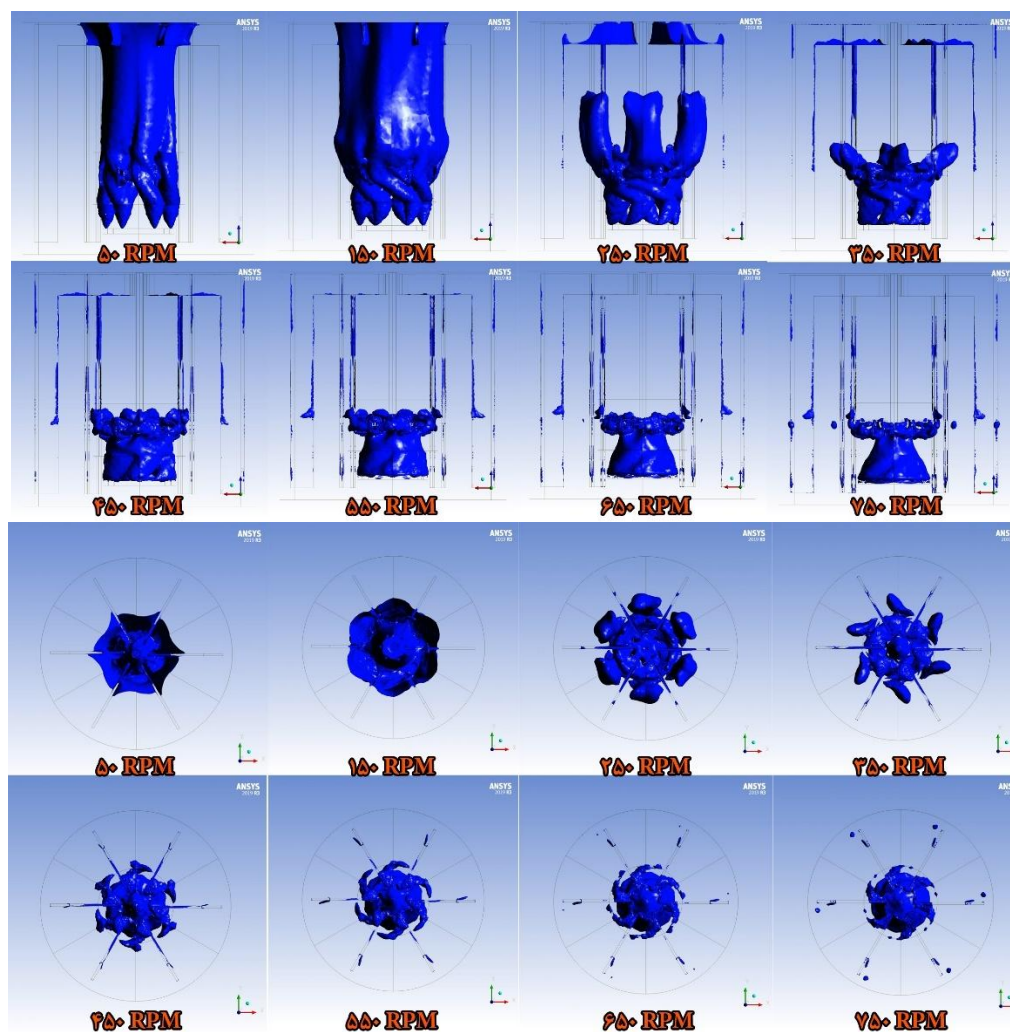
شکل ۸- رابطه مابین افزایش سرعت چرخش پروانه و تنش برشی متوسط



شکل ۹- رابطه مابین افزایش سرعت چرخش پروانه و تنش برشی یکنواخت شده

در سرعت‌های 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 داشته باشد. با مشاهده شکل (۱۰) می‌توان بیان کرد که سرعت بالاتر چرخش پروانه‌ها موجب می‌شود، جریان یکنواخت هوا به بیرون بیورآکتور تحت تأثیر چرخش پروانه‌ها قرار بگیرد و در کل بیورآکتور پخش شود. این موضوع باعث می‌شود جریان با غلظت 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

کاهش یافته و افزایش سرعت تأثیر زیادی بر افزایش این پارامتر ندارد. همچنین، می‌توان 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 بیورآکتور 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 بیورآکتور در سرعت‌های مختلف چرخش پروانه را نشان می‌دهد. با بررسی نتایج می‌توان چنین نتیجه گرفت که

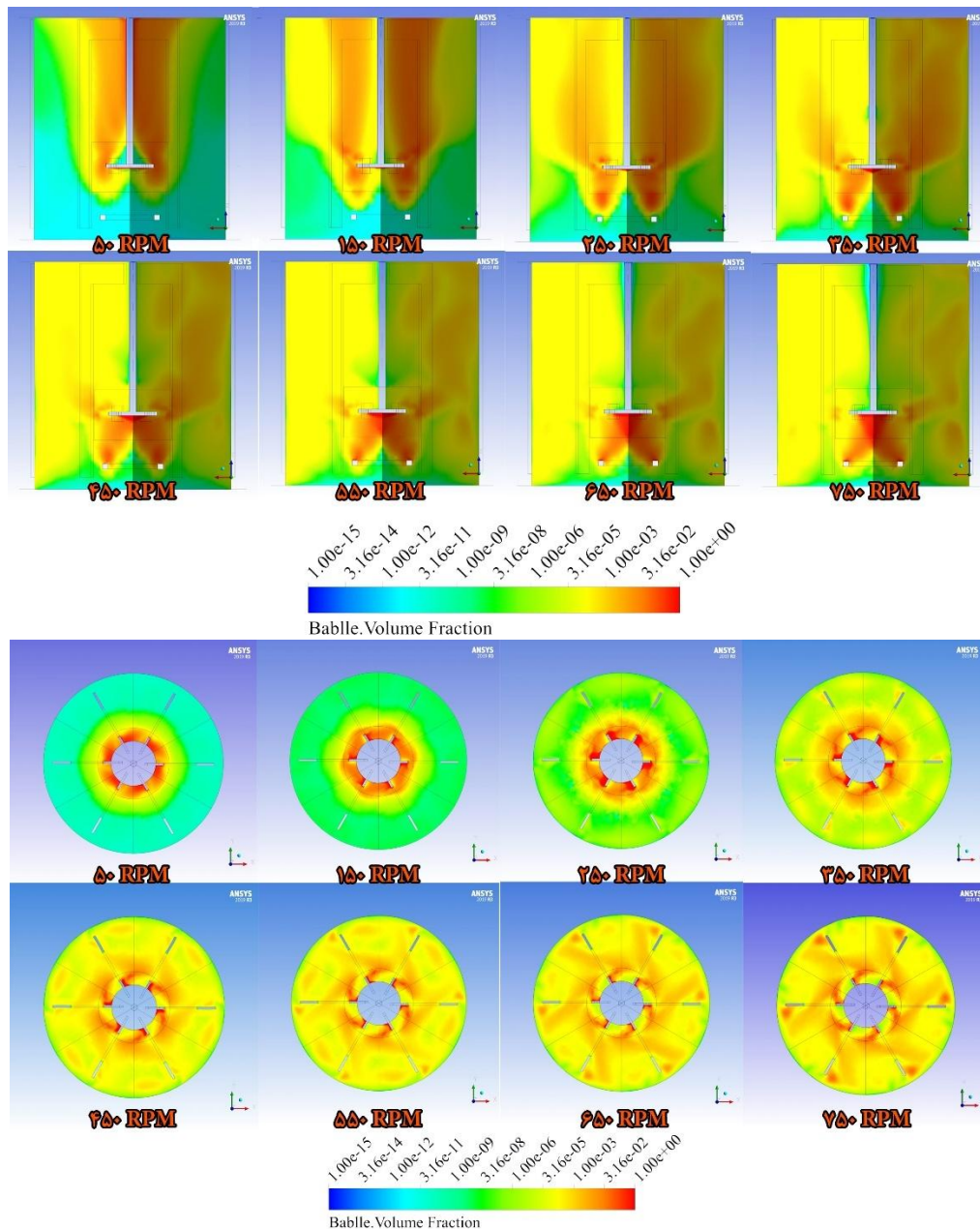


شکل ۱۰- مسیر حرکت جریان هوا در سرعت‌های مختلف چرخش پروانه

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 ۱۵۰ 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 می‌شوند. این مهم می‌تواند تایید کننده افزایش سرعت‌های گردابه‌ای باشد که در نهایت می‌تواند به تولیدات 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 مجدداً می‌توان تاکید کرد که، سرعت چرخش پروانه از ۵۰ دور در دقیقه تا ۳۵۰ دور در دقیقه می‌توان تغییرات مناسبی را در توزیع هوا در محیط بیورآکتور ایجاد کند، ولی پس از آن توزیع هوا درون بیورآکتور با تغییرات کمتری همراه است. برای بررسی بهتر این تغییرات می‌توان میزان نرخ کرنش برشی را در فاز هوا نیز درون



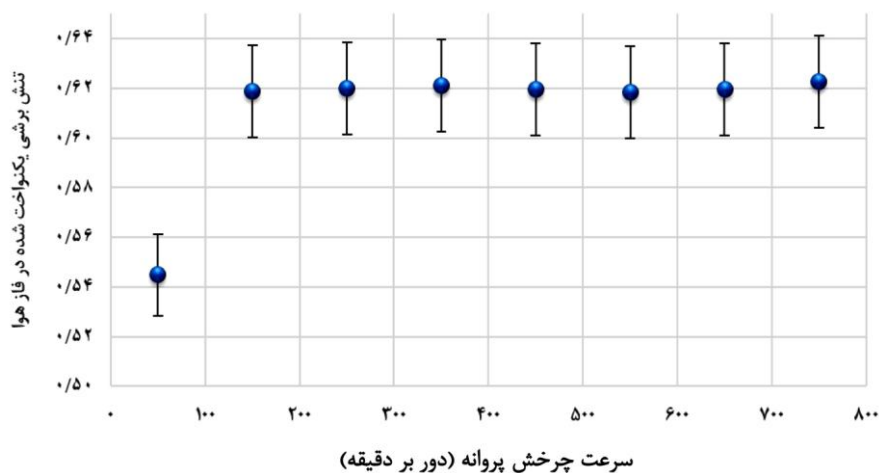
شکل ۱۱- تغییرات درصد هوا در بیورآکتور در سرعت‌های مختلف چرخش پروانه

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.

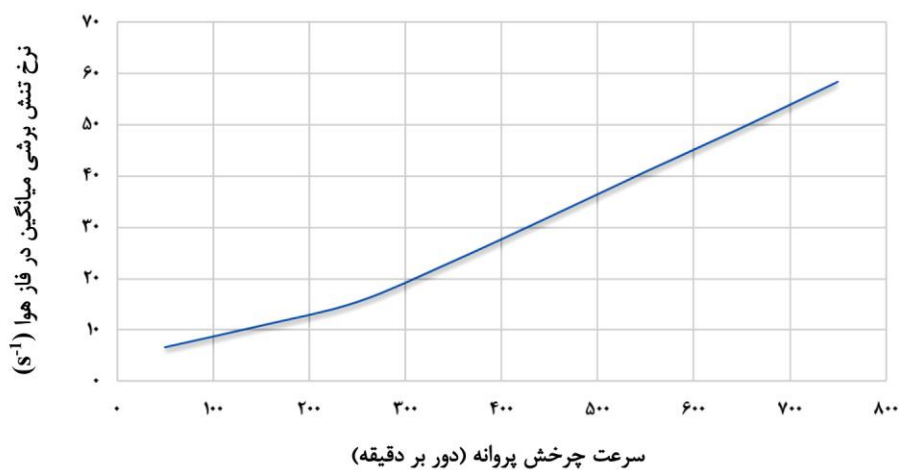
نتایج به دست آمده از شکل (۱۴) به خوبی نشان می‌دهد از سرعت چرخش پروانه از ۵۰ تا ۲۵۰ دور بر دقیقه، کسر حجمی فاز گاز در بیورآکتور در حال افزایش است. اما پس از عبور از این سرعت نرخ کسر حجمی فاز گاز در بیورآکتور حالت

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

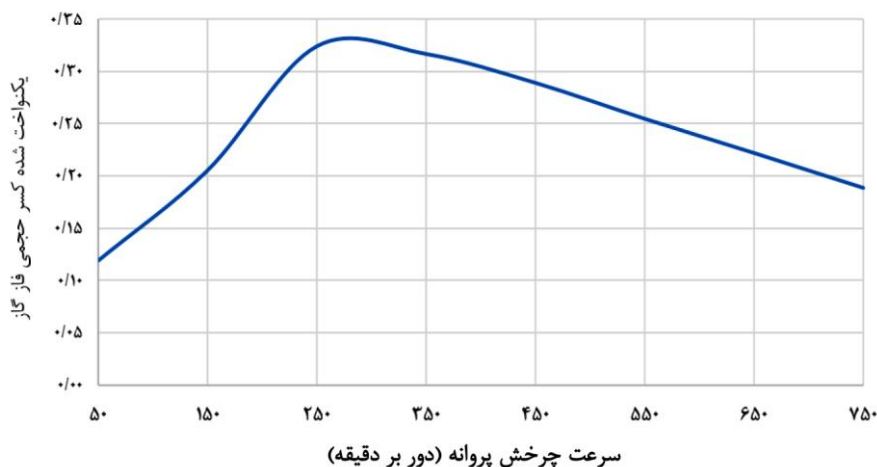
نتایج به دست آمده نویسندگان را به بررسی فرم یکنواخت شده کسر حجمی فاز گاز در بیورآکتور سوق داد. منظور از بررسی این فاکتور به دست آوردن پخش شدگی فاز گاز درون کل بیورآکتور است. بدیهی است هرچه پارامتر یکنواخت شده به



شکل ۱۲- رابطه مابین افزایش سرعت چرخش پروانه و تنش برشی یکنواخت شده در فاز هوا

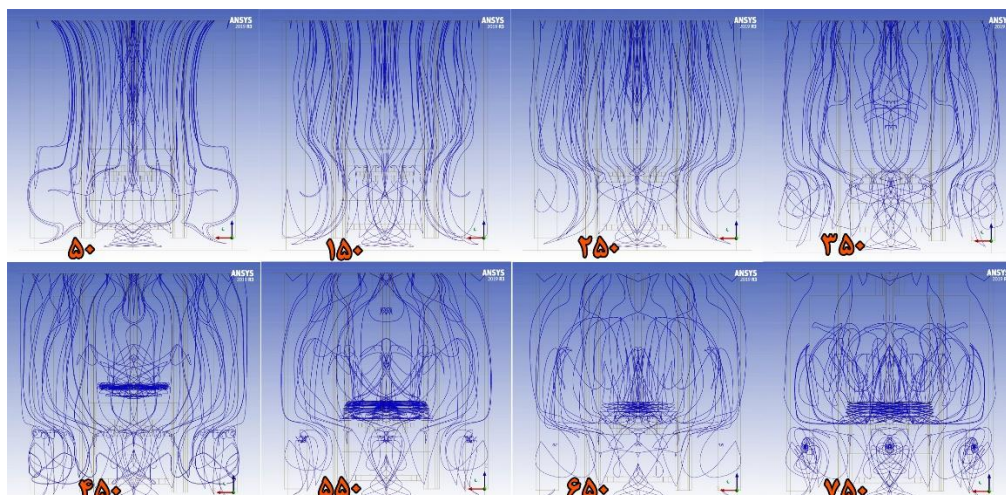


شکل ۱۳- رابطه مابین افزایش سرعت چرخش پروانه و تنش برشی متوسط در فاز هوا



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

کاهش 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

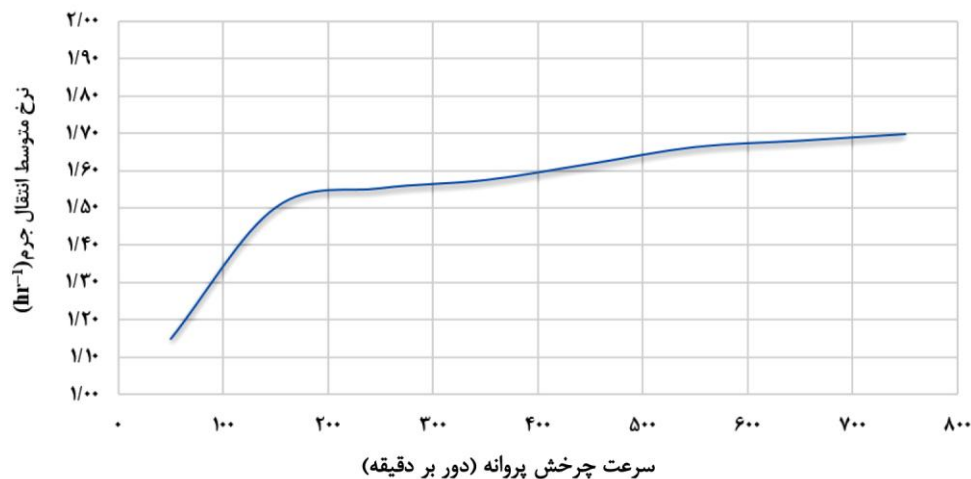
۲۵۰ دور بر دقیقه و افزایش سرعت، مسیر حرکت فاز گاز به صورت گردابه‌ای و در اطراف پروانه شکل می‌گیرد و عملاً ایجاد گردابه‌ها و حرکت فاز گاز به دور پروانه موجب کاهش پخش بهینه فاز گاز درون بیورآکتور می‌شود.

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 طور کلی، 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 دست آمده 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

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 بیورآکتور 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 نمایش داده است.

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 می‌شود. این موضوع در کنار اختلاف چگالی هوا با آب درون رآکتور باعث می‌شود 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 می‌دهد. مشخص است با افزایش سرعت چرخش پروانه‌ها این فرم تغییر می‌کند. در نتیجه فاز گاز بخش بیشتری از بیورآکتور را پوشش می‌دهد. اما پس از عبور از سرعت‌های



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

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

ردیف	سرعت چرخش (دور بر دقیقه)	درصد تغییر نسبت حداقل به حداکثر تغییر
۱	۱۵۰	۱/۷۴۳
۲	۲۵۰	۷/۲۳۰
۳	۳۵۰	۱۶/۵۷۹
۴	۴۵۰	۳۴/۷۶۹
۵	۵۵۰	۵۶/۳۳۸
۶	۶۵۰	۷۷/۳۰۹
۷	۷۵۰	۱۰۰

۵- نتیجه گیری

در این مقاله اثر تغییرات سرعت چرخش پروانه راشتون درون بیورآکتور از سرعت چرخش ۵۰ دور بر دقیقه تا سرعت چرخش ۷۵۰ 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 انجام شده با رویکرد چند فازی مدل فاز پراکنده صفر معادله، مدل اغتشاش K-Epsilon Standard به صورت پایا و سه بعدی توسط مجموعه نرم افزاری ANSYS Products ورژن R3 ۲۰۱۹ و نرم افزار Ansys CFX

تغییرات نرخ متوسط انتقال جرم کمتر می شود.

برای به دست آوردن سرعت بهینه می بایست مجموع پارامترهای تأثیرگذار 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 شده اند.

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

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 ۴۵۰ تا ۷۵۰ دور بر دقیقه، گازهای خروجی از 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 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 درون 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 می‌تواند سرعت ۳۵۰ تا ۴۵۰ 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 ۵۰ تا ۲۵۰ دور بر دقیقه تنش برشی یکنواخت شده با شیب زیادی افزایش می‌یابد، اما پس از عبور از سرعت ۲۵۰ دور بر دقیقه میزان افزایش این پارامتر با شیب بسیار کمتری ادامه پیدا

واژه‌نامه

- | | | |
|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1. buoyancy force | 17. radial flow | 34. degassing condition |
| 2. turbulence viscosity | 18. Rushton | 35. Navier Stokes |
| 3. hydrogenations | 19. Baffle | 36. Eulerian Approach |
| 4. oxidations | 20. Computational Fluid Dynamics | 37. Reynold-Average Navier- Stokes |
| 5. aerobic fermentations | 21. sparger's ring | 38. momentum |
| 6. biotechnology | 22. Revolutions Per Minute | 39. M. Laakkonen |
| 7. bioprocess | 23. shear rate | 40. M. Kuschel |
| 8. aqueous bioprocesses | 24. condition symmetry boundary | 41. P. M. Armenante |
| 9. hydrodynamics | 25. interface | 42. power number |
| 10. stirrer | 26. rotational periodicity | 43. structure mesh |
| ۱۱. impeller | 27. Gas Feed Per Vessel Volume | 44. unstructure mesh |
| ۱۲. propeller | 28. fluid buoyancy model | 45. shear rate |
| 13. turbine | 29. dispersed phase zero equation | 46. uniformity |
| 14. paddle | 30. fluid pair | 47. Average Mass Transfer Coefficient |
| 15. anchor | 31. surface tension coefficient | |
| 16. helical | 32. drag force | |
| | 33. boundary | |

References

- 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. 2489-2501, 2004.
- Mendez, A. S. L., De Carli, G., and Garcia, C. V., "Evaluation of Powder Mixing Operation During Batch Production: Application to Operational Qualification Procedure in the Pharmaceutical Industry", *Powder Technol.*, Vol. 198, No. 2, pp. 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.
- 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.

منابع

6. 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.
7. 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.
9. 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.
11. 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.
18. 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.
20. Charoenpong, H., Osathanon, T., Pavasant, P., Limjeeararus, N., Keawprachum, B., Limjeeararus, 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., Limjeeararus, N., Limjeeararus, 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.
28. 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.
30. 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.
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.
34. Chapman, D.R., "Computational Aerodynamics Development and Outlook", AIAA Journal, Vol. 17, No. 12, Dec. 1979, pp. 1293–1313.