

طراحی همزن مکانیکی برای راکتور بیوگاز و شبیه‌سازی الگوی جریان با استفاده از دینامیک

سیالات محاسباتی (CFD)

راشد محمدرضائی^{۱*}، سمیرا زارعی^۲، ناصر بهروزی خزاعی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان

۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان

* ایمیل نویسنده مسئول: r.mohammadrezaei@agri.uok.ac.ir

چکیده

در این مطالعه به منظور طراحی همزن مکانیکی برای راکتور بیوگاز و شبیه‌سازی الگوی جریان از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شد. زمان اختلاط، الگوی جریان و عدد توان یک راکتور به طراحی همزن و نوع پروانه‌ی آن بستگی دارد. به عبارت دیگر، کارایی پروانه غالباً از طریق این پارامترها ارزیابی می‌گردد. که در این مطالعه از بررسی الگوی جریان استفاده شده است. برای بررسی طراحی بهینه نوع پروانه، یک همزن توربینی شش تیغه‌ای با زاویه ۴۵ درجه طراحی و ارزیابی شد. شبیه‌سازی با رویکرد مدل قاب چرخان (MRF)، مدل آشفتگی استاندارد k-ε به صورت پایه، سه بعدی و توسط نرم‌افزار Fluent 15.0 انجام گرفت. معادلات حاکم به روش حجم محدود برای تمام دامنه محاسباتی سیستم حل گردید و برای شبیه‌سازی رفتار همزن در راکتور نیز از مدل قاب چرخان استفاده شد. هدف اصلی این تحقیق طراحی بهینه همزن مکانیکی برای اختلاط مناسب و کاهش فضاهای مرده در راکتور مورد نظر می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد، همزن توربینی شش تیغه‌ای با زاویه ۴۵ درجه با جریان پایین‌رونده سبب افزایش اختلاط در کف راکتور و شدت اختلاط مناسب مواد داخل راکتور می‌شود. هم‌چنین نتایج نشان داد که این نوع همزن اختلاط مناسبی در مرکز راکتور و دیواره‌های جانبی آن ایجاد می‌کند و در نتیجه باعث کاهش فضای مرده و بهبود انتقال جرم و حرارت داخل راکتور خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، دینامیک سیالات محاسباتی، مخزن همزن‌دار، همزن مکانیکی.

مقدمه

اختلاط عامل مهمی در میزان تولید گاز در راکتورهای بیوگاز است، که معمولاً از طریق همزن مکانیکی و یا چرخش محتوای داخل راکتور بیوگاز انجام می‌شود. راه‌های مختلفی برای انجام عملیات اختلاط در راکتورهای بیوگاز وجود دارد. اختلاط مکانیکی، اسپارجرها و جت‌ها معمولاً برای مقاصد همزنی استفاده می‌شوند. به سبب تنوع فرآیندها و اهداف مختلف آن‌ها تعدادی زیادی از هندسه همزن‌های مختلف توسعه یافته‌اند. اما اختلاط مکانیکی یکی از کارآمدترین و کم هزینه‌ترین روش‌های اختلاط می‌باشد (Schlicht, 1999). اگر چه اهمیت اختلاط برای دستیابی به عملکرد بهینه فرآیند و تولید بیوگاز به خوبی شناخته شده است، اما هیچ توافق واضحی نسبت به اینکه یک رژیم اختلاط بهینه وجود دارد نیست. اختلاط و تماس داخل راکتور می‌تواند به صورت پیوسته و متناوب

انجام شود. اختلاط مطلوب برای به حداقل رساندن سرمایه گذاری و هزینه های عملیاتی، بازدهی بالا هنگامی که انتقال جرم محدود است و در نتیجه افزایش سودآوری مهم است. فرایند هم‌زدن با همزن‌های مکانیکی در هر دو رژیم جریان آرام و یا آشفتنه بسته به عدد رینولدز پروانه رخ می دهد. مکانیسم اصلی اختلاط شامل حرکت فیزیکی مواد بین بخش‌های مختلف از کل توده با استفاده از چرخش پروانه می‌باشد. موفقیت بعضی از مراحل فرآیند هم‌زدن بستگی به چگونگی بهم‌زدن و مخلوط کردن سیال دارد. مخلوط کردن عبارتست از بهم‌زدن یک و یا چند ماده غیر مشابه جهت بدست آوردن یکنواختی (uniformity) چه از نظر فیزیکی و چه از نظر شیمیایی. نظر به این اینکه نفوذپذیری در داخل مایع خیلی پایین است در نتیجه مخلوط کردن مایع اصولاً همراه با بهم‌زدن مایع در داخل تانک صورت می‌گیرد. طراحی بهینه همزن و بازده عملیات اختلاط پارامترهای مهم در کیفیت تولید و هزینه‌های تولید می‌باشند. الگوی جریان در مخازن همزن‌دار پدیده‌ای پیچیده است، که در ناحیه اطراف پروانه جریان آشفتنه و چرخشی وجود دارد. در سال‌های اخیر به طور فزاینده‌ای تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به عنوان جایگزینی برای آزمایشات تجربی و یافتن میدان‌های جریان و هم‌چنین یافتن الگوی جریان بهینه، هندسه پروانه و تانک استفاده می‌شود (Shekhar et al 2002).

راکتورهای همزن‌دار مکانیکی به طور گسترده در صنایعی که با سیستم‌های چند فاز می‌سر و کار دارند، استفاده می‌شود. موارد متعددی از کاربردهای صنعتی این راکتورها گزارش شده است (Nigam and Schumpe, 1996). اگر چه مطالعات زیادی در مورد استراتژی اختلاط در هضم های بی هوازی انجام شده است، اما هنوز یک تصویر واضح و روشن در مورد اثرات اختلاط در هضم بی هوازی از کود حیوانی وجود ندارد. بنابراین، سیستم های همزنی هنوز هم یکی از اجزای مهم نیروگاه‌های بیوگاز هستند (Stroot et al., 2001; Karim et al., 2005). شیرمحمدپور و همکاران در سال ۱۳۸۹ اختلاط در یک راکتور صنعتی چند پروانه ای مجهز به سه پروانه‌ی دریایی را با استفاده از تکنیک مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بررسی کردند. رفتار هیدرودینامیک یک مخزن همزن‌دار دارای همزن منحنی شکل را مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از شبیه سازی (CFD) می‌توان سرعت‌های شعاعی و محوری را به خوبی پیش‌بینی کرد (Li et al., 2004). پیکربندی‌های مختلف جریان در راکتور همزن‌دار گاز-مایع که دو همزن راستون در آن تعبیه شده بود را در شرایط عملیاتی مختلف مطالعه کردند (Ahmed et al., 2010). نشان دادند که نوع و سرعت گردش پروانه تأثیر معنی‌داری بر الگوی جریان دارد، بنابراین پروانه بهینه را برای تولید بیوهیدروژن پیشنهاد دادند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با فرایند آزمایشگاهی به طور واضحی نشان داد که پروانه بهینه‌سازی شده می‌تواند توزیع سرعت بهتری را در راکتور با سرعت کمتر تولید کند (Ding et al., 2010). در مدل‌سازی مخازن همزن‌دار پارامترهای زیادی تأثیر گذار هستند که مهم‌ترین آنها عبارتند از تراکم مناسب مش‌بندی، روش‌های جداسازی، مدل چرخش پره و در نهایت مدل آشفتگی جریان سیال. اثر اختلاط روی هضم بی هوازی از کود حیوانی در مقیاس آزمایشگاهی و مقیاس پایلوت در دمای ۵۵ درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفت. که اثر سه حالت اختلاط پیوسته، متناوب و کمینه را بررسی کردند و دریافتند که حالت و شدت اختلاط روی هضم بی‌هوازی کود حیوانی تأثیر دارد. نتایج مطالعات در مقیاس پایلوت نشان از افزایش ۷ درصدی عملکرد بیوگاز در اختلاط متناوب نسبت به حالت پیوسته دارد (Kaparaju et al., 2008). در یک راکتور به حجم ۱٫۵ متر مکعب با خوارک کود گاو شیری اثر اختلاط هیدرولیکی

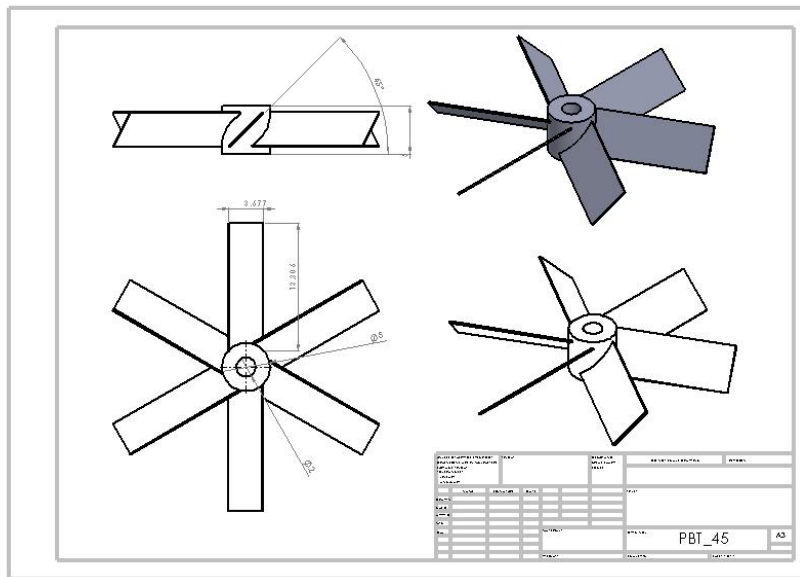
پیوسته و متناوب در دمای کنترل شده ۳۷ درجه و زمان ماند ۱۰ و ۲۰ روز روی عملکرد تولید بیوگاز بررسی شد. نتایج نشان داد که در زمان ماند ۱۰ روز نرخ جریان برگشتی تأثیر کمی روی تولید بیوگاز دارد و جریان برگشتی پیوسته باعث بهبود عملکرد راکتور نشد. در زمان ماند ۲۰ روز نرخ جریان برگشتی تأثیری روی عملکرد راکتور نداشت (Rico et al., 2011). از دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی حالت‌های مختلف اختلاط و توان مصرفی در هاضم‌های تک هضمی و هضم ترکیبی استفاده کردند. از کود گاوی و ذرت علوفه‌ای به عنوان خوارک و راکتور همزده به عنوان هاضم استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل استاندارد k-E نسبت به مدل‌های آشفتگی دیگر مناسب‌تر است. شاخص جدید تولید توان خالص به‌جای تولید گاز برای بهینه‌سازی نسبت خوارک برای هضم ترکیبی بی‌هوازی پیشنهاد شد (Zhang et al., 2016).

مواد و روش‌ها

در مخازن همزن‌دار، وجود همزن زمانی بیش‌تر احساس می‌شود که در آن هدف ایجاد محیطی همگن باشد. سطح همگنی، میزان کاهش اندازه ذرات، میزان نامحلول بودن جامد و سطح انتقال جرم پارامترهایی است که هنگام طراحی همزن باید مورد توجه قرار گیرد. همزنی مؤثر سیالات برای اختلاط و حرکت، نیازمند تحلیل مفصلی از ظرفیت، لزجت و پاسخ دینامیکی برای سیال است، به‌طوری که با در دست داشتن آن توان، سرعت شفت همزن و اندازه پره متناظر با شرایط فوق را می‌توان به دست آورد.

طراحی سیستم پره

برای انتخاب همزن‌های توربینی، باید سیستم پره به‌طور صحیح طراحی شود. این طراحی شامل نوع توربین، تعداد توربین، موقعیت مکانی در مجموعه و قطر پره می‌باشد. برای اختلاط و حرکت معمولاً از توربین تیغه‌ای شیب‌دار استفاده می‌شود. به منظور طراحی پروانه از نرم افزار solidworks 2016 استفاده شده است. ابتدا هندسه پروانه در محیط این نرم‌افزار رسم و تحلیل‌ها براساس آن انجام شد. همان‌طور که در شکل زیر مشاهده می‌شود، در این همزن‌ها از پره‌های تخت با زاویه حدود ۴۵ درجه استفاده شده است، که جریانی بین محوری و شعاعی ایجاد می‌کند. این کار باعث افزایش هم‌زدگی و نیز افزایش انتقال جرم و حرارت می‌شود. همچنین این طراحی پره‌ها به گونه‌ای است که تنش برشی کمی به سیال وارد شده و باعث از بین رفتن باکتری‌های داخل راکتور نمی‌شود. پره‌های شیب‌دار بیش‌تر برای اختلاط در راکتورهای زیستی که حساس به تنش برشی هستند به کار می‌روند. این همزن‌ها غالباً در راکتورهای غیر مداوم استفاده می‌شوند. اما می‌توان از آن‌ها در راکتورهای مداوم نیز استفاده کرد (Mirro and Voll, 2009).



شکل ۱ - نمایی از پروانه طراحی شده در محیط نرم‌افزار solidworks 2016

ابعاد هندسی پروانه طراحی شده برای همزن مکانیکی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱ - ابعاد هندسی پروانه طراحی شده برای همزن مکانیکی

پارامتر	مقدار
طول تیغه	۱۳ (cm)
پهنای تیغه	۵ (cm)
ضخامت تیغه	۰/۲ (cm)
زوایه تیغه	۴۵ درجه

ویژگی‌های توان

به عنوان یک اصل مهم در انتخاب سیستم همزنی، توان مصرفی فرایند اختلاط تا حد زیادی به شدت اختلاط و شرایط جریان سیال وابسته است. عدد توان یک پارامتر مهم در نشان دادن توان اختلاط می‌باشد. توان مورد نیاز برای رسیدن به یک سرعت همزنی مطلوب به مقدار نیروهای اصطکاکی و فرم حرکت سیال در برابر مقاومت چرخش پروانه بستگی دارد. که اصطکاک و فرم حرکت سیال منجر به ایجاد گشتاور روی شفت همزن می‌شود. توان ورودی برای همزن می‌تواند از طریق اندازه‌گیری گشتاور T به صورت تجربی محاسبه شود (Dickey, et al 2001).

روابط بین توان و سرعت پروانه‌ها برای اختلاط



هنگام طراحی هر سیستم اختلاط پروانه‌ای، یک تخمین دقیق از منحنی قدرت / سرعت آن برای انتخاب یک واحد توان که عملکرد اختلاط مورد انتظار را تأمین کند ضروری است. بنابراین، انتخاب یک واحد توان نادرست منجر به تحمیل هزینه های خرید بالا و یا افزایش شکست ناشی از عملیات بیش‌باری خواهد شد. که در آن اطلاعات لازم را می توان با آزمایش در مقیاس کامل به دست آورد، و پس از آن به‌طور واضحی بهترین استراتژی طراحی را اتخاذ کرد (Cumby, 1990). میزان توان مصرفی همزن را می توان از رابطه (۱) محاسبه نمود.

$$P=2\pi N_i T \quad (1)$$

که در آن P توان، T گشتاور و N سرعت همزن است.

وقتی که سیالات به صورت مکانیکی همزده می‌شوند، عدد رینولدز (N_{Re}) به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$N_{Re} = \frac{\rho D_i^2 N_i}{\mu} \quad (2)$$

که در آن N سرعت چرخشی پروانه و D قطر پروانه است. μ نیز ویسکوزیته سیال در هر نرخ برشی است که از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$\dot{\gamma} = k_s N_i \quad (3)$$

k_s مقدار ثابتی است که از آزمایش بدست می‌آید، و $\dot{\gamma}$ نرخ برش می‌باشد.

عدد توان (N_p) و عدد جریان (N_Q) در مخازن همزده را می توان از معادلات (۴) و (۵) بدست آورد.

$$N_p = \frac{P}{\rho N_i^3 D_i^5} \quad (4)$$

که در آن ρ چگالی سیال است.

$$N_Q = \frac{Q}{N_i D_i^3} \quad (5)$$

که N_Q عدد جریان و Q نرخ جریان است.

روش دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی تکنیکی برای تحلیل سیستم هایی شامل جریان سیال، انتقال حرارت و پدیده های همراه، نظیر واکنش‌های شیمیایی، بر اساس شبیه‌سازی کامپیوتر می‌باشد (دهقانی و همکاران ۱۳۸۷). روش بسیار توانایی می باشد، به طوری که طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی و غیر صنعتی را در بر می‌گیرد. در این مطالعه از پکیج نرم‌افزاری، Fluent 15.0



استفاده شه است. در این مطالعه از مدل شبه تک‌فازی استفاده می‌شود تا زمان شبیه‌سازی و متعاقب آن هزینه محاسباتی سیستم کاهش یابد. در این مدل، فاز مایع همراه با ذرات جامد به عنوان یک فاز همگن با دانسیته و ویسکوزیته مخلوط (جامد-مایع) در نظر گرفته می‌شود. هرگاه درصد بار حجمی ذرات جامد و سیال موجود در راکتور به هم نزدیک باشد، می‌توان از مدل شبه تک‌فازی استفاده کرد. هم‌چنین هر چه قطر ذرات جامد ریزتر و اختلاف دانسیته بین فازهای جامد و مایع کمتر باشد، استفاده از مدل شبه تک‌فازی منطقی‌تر است. چرا که در این حالت مخلوط دو فاز مایع و جامد، همگنی مناسبی دارد و رفتارش بسیار نزدیک به رفتار یک مخلوط تک‌فازی است. دانسیته فازهای جامد و مایع به ترتیب 1090 kg/m^3 و 1000 kg/m^3 و درصد حجمی فازهای جامد و مایع ۵۰٪ می‌باشد. لذا در این کار به منظور کاهش هزینه محاسباتی از مدل شبه تک‌فازی استفاده شده است. بنابراین سیستم مورد بررسی یک راکتور همزن دار تک‌فازی است. راکتور حاوی مایع (دوغاب) بوده است. اجرای یک شبیه‌سازی CFD شامل پیش پردازش، راه اندازی مدل، تکرار محاسبات، و پس پردازش نتایج است. تمام دامنه محاسباتی به چند زیر دامنه تجزیه شد، که در آن تنها زیر دامنه پروانه به عنوان (مناطق در حال حرکت) با استفاده از شبکه‌های مثلثی ترکیبی مدل شد. راه اندازی مدل به اختصار در زیر آمده است. تعریف یک حل گر سه بعدی، پایا، ضمنی، و مبتنی بر فشار.

تعریف یک مدل آشفتگی از پانل مدل ویسکوز.

فعال کردن خواص سیال با شرایط جریان آشفته با استفاده از دستور متنی: تعریف / مدل / ویسکوز / مدل آشفتگی

و سپس تعریف مواد.

تعریف شرایط عملیاتی با فعال کردن گرانش

تعریف شرایط مرزی

تنظیم مقدار سرعت، جهت چرخش و مشخص کردن مناطق چرخان با مدل قاب مرجع چرخان در یک سرعت چرخشی.

مشخص گرادیان نرمال صفر برای تمام متغیرها در سطح مایع (مرز تقارن).

مشخص کردن کنترل حل با تنظیم ضرایب زیر-تخفیف و انتخاب طرح‌های ارائه شده.

مقداردهی میدان‌های جریان.

فعال کردن مانیتور باقی مانده و مانیتور سطح برای لحظه‌ای از پره‌های پروانه (گشتاور).

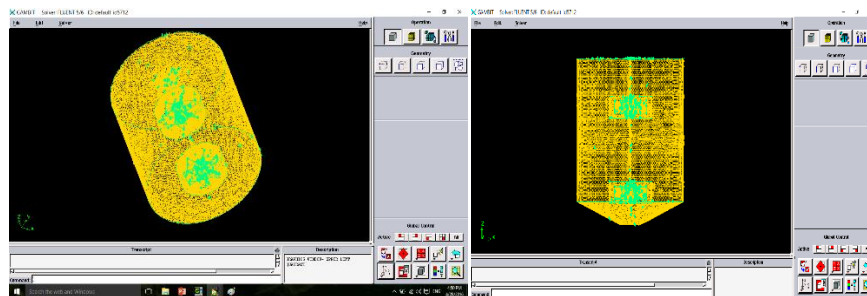
حل میدان‌های جریان در حالت پایدار تا رسیدن به همگرایی.

مش بندی، شرایط مرزی و مدل حل

سیستم مورد بررسی یک راکتور همزن دار با کف مخروطی ناقص با قطر ۱۰۰ cm و ارتفاع ۱۵۰ cm است. راکتور شامل یک همزن توربینی شیب‌دار با شش تیغه مورب با زاویه ۴۵ درجه می‌باشد. مطابق شکل محور همزن در مرکز راکتور و دو پروانه روی محور در فاصله ۵۰ cm از هم و با فاصله ۳۰ cm از انتهای راکتور قرار گرفته است. هندسه سیستم مذکور در محیط نرم افزار Gambit 2.4.6 ساخته شد. مشخصات هندسی سیستم در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲ - مشخصات هندسی راکتور همزن دار

پارامتر	مقدار (cm)
قطر راکتور	۱۰۰
ارتفاع راکتور	۱۵۰
قطر همزن	۳۰
ارتفاع همزن از کف راکتور	۱۵



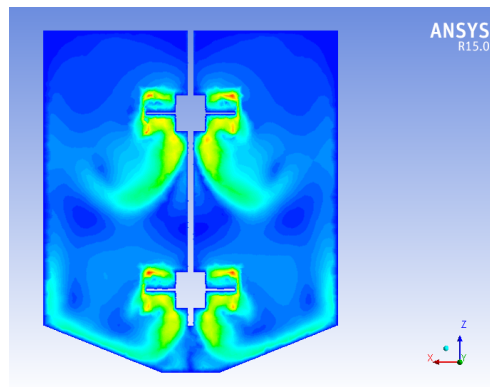
شکل ۲- نمایی از هندسه مش خورده در محیط نرم‌افزار Gambit

به منظور مش‌بندی سیستم از مش مثلثی ترکیبی استفاده شد. این مش ترکیبی از مش‌های ساختاریافته و غیرساختار یافته می‌باشد که برای هندسه‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. هم‌چنین جهت بررسی استقلال نتایج از تعداد مش، در هر مورد از شبیه‌سازی‌ها، مش بندی موجود ریزتر شده و شبیه‌سازی دوباره تکرار شده است. شرایط مرزی مورد استفاده برای سطوح جانبی راکتور، همزن، به صورت مرز دیواره بدون لغزش است. به منظور گسسته‌سازی معادلات حاکم بر سیستم از رویکرد QUICK و جهت حل معادلات گسسته از الگوریتم SIMPLE استفاده شد. معادلات حاکم به روش حجم محدود برای تمام دامنه محاسباتی سیستم حل شد و جهت شبیه‌سازی رفتار دورانی همزن از مدل قاب چرخان^۱ استفاده شد. در این روش دامنه محاسباتی به دو بخش ناحیه دورانی و ناحیه ساکن تقسیم می‌شود. تمام شبیه‌سازی‌ها به صورت پایا، سه بعدی و توسط نرم‌افزار Fluent 15.0 انجام شد.

¹Multiple Reference Frame

نتایج

در شکل (۳) خطوط تراز سرعت در صفحه عمودی که نشان دهنده حلقه‌های جاروب کننده از بالا تا پایین راکتور است نشان داده شده است. در این شکل حلقه‌های قسمت پایین پروانه به کف مخزن برخورد می‌کند و سپس به دیوارهای اطراف متمایل شده جریان خروجی از پروانه‌ها در برگشت تعدادی ورتکس را به وجود می‌آورند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد جریان توسط پروانه‌ها به سمت دیواره‌های اطراف کشیده می‌شود سپس قسمت اعظم سیال در طول دیواره بالا می‌آید این جریان به علت گرادیان فشار شعاعی تولید شده توسط حرکت مماسی به سمت محور مرکزی تانک بر می‌گردند و نهایتاً به علت گرانش، در نزدیکی محور به صورت فرورفتگی به سمت همزن برمی‌گردد.

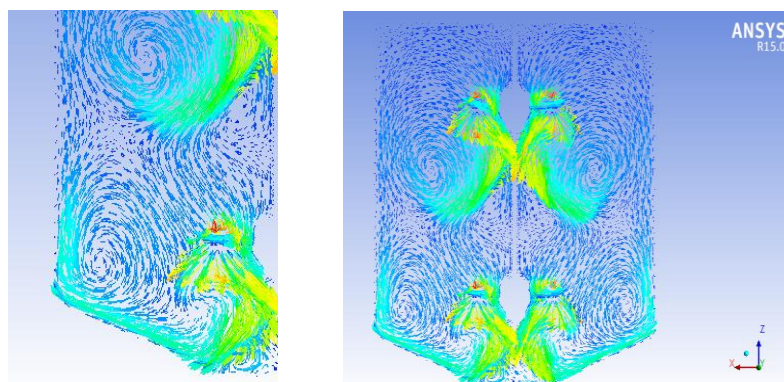


شکل ۳- کانتور سرعت در صفحه تقارن عمودی



الگوی جریان ایجاد شده برای سرعت ۳۰ دور بر دقیقه

تغییرات برداری میدان سرعت در صفحه تقارن عمودی در شکل (۴) نشان داده شده اند. این تغییرات نشان می‌دهد که بخشی از جریان به سمت بالا و بخش دیگر در جهت پایین حرکت می‌کند همچنین بردارهای سرعت نشان از درهم بودن جریان داخلی برای سرعت پایین است. با توجه به کانتور سرعت، در نوک پرها بیشترین مقدار سرعت حاصل می‌شود. حلقه چرخشی محوری را با توجه به جهت بردارهای خروجی از پرها می‌توان مشاهده کرد. در شکل (۴) حلقه‌های چرخشی ایجاد شده در اطراف هر کدام از پروانه‌ها مشخص هستند. این حلقه‌ها در بالا و پایین هر کدام از پروانه‌ها تشکیل شده‌اند. بردارهای سرعت در صفحه افقی به خوبی گواهی چرخشی بودن جریان است که به صورت ورتکس می‌باشد. در شکل زیر نمای نزدیک از بردارهای سرعت در صفحه تقارن عمودی را مشاهده می‌کنیم. جریان متوسط به وسیله حرکت دایره‌ای که در غیاب بفل‌ها یا هر مانع دیگری بوجود می‌آید مشخص می‌شود. با توجه به شکل می‌توان دید که مسیر ذرات سیال در صفحه افقی مسیرهای دایره‌ای هستند. همچنین در شکل‌ها می‌توان فهمید که حرکت شعاعی در مقایسه با مماسی تقریباً در هر جایی در سیال کوچک‌تر است.



ب

الف

شکل ۴ - تغییرات میدان سرعت در راکتور همزن دار برای سرعت ۳۰ دور بر دقیقه (الف) در صفحه تقارن عمودی (ب) از نمای نزدیک

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک راکتور همزن‌دار تک‌فازی جهت شبیه‌سازی رفتار همزن در راکتور با استفاده از مدل قاب چرخان و مدل آشفتگی استاندارد $k-\epsilon$ توسط نرم‌افزار Fluent 15.0 استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که با توجه به نتایج حل عددی و شبیه‌سازی به علت وجود مناطقی با سرعت بالا در مرکز راکتور عمل اختلاط و همچنین سرعت پیشرفت واکنش در این نقطه در حد مطلوب بوده، اما به دلیل وجود مناطق با سرعت کم‌تر در نواحی دورتر از همزن و اطراف دیواره‌های راکتور عمل اختلاط و همچنین سرعت واکنش در این محل‌ها نسبتاً پایین‌تر است. از نکات مهمی که در فرآیند اختلاط باید در نظر گرفته شود، انتخاب پروانه مناسب جهت حصول توان مصرفی کمتر و زمان اختلاط کوتاه‌تر و همچنین از بین بردن یا کاهش اثر گرداب‌های ایجاد شده در سیستم اختلاط است.

منابع

- شیرمحمد پور، ا. رحیمی، م. امیدخواه نسرین، م. ر. بررسی CFD اختلاط در ظروف بهم زن مجهز به سه پروانه دریایی. دومین همایش ملی تحقیقات نوین در مهندسی شیمی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر. تهران. ۱۳۸۹.
- دهقانی سانج، م؛ آشنایی با دینامیک سیالات محاسباتی و توانایی نرم افزار Fluent، فصل اول، کتاب شبیه سازی عددی با نرم افزار Fluent 6.3، شرکت ناقوس اندیشه، تهران، ۱۳۸۷، ۱۶-۱۷.
- Ahmed, S.U., Ranganathan. P., Pandey, A. and Sivaraman, S. 2010. Computational fluid dynamics modeling of gas dispersion in multi impeller bioreactor. *Bioscience and Bioengineering* 109(6): 588-597.
- Cumby, T. R. 1990. Slurry mixing with impellers: Part 1, theory and previous research. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 45(C), 157-173.
- Dickey, D. S., et al. (2001). *Mixing Equipment (Impeller Type): AIChE Equipment Testing Procedure*, 3rd ed., AIChE, New York.
- Ding, J., Wang, X., Zhou, X., Ren, N. and Guo W. 2010. CFD optimization of continuous stirred-tank (CSTR) reactor for biohydrogen production. *Bioresource Technology* 101(18): 7005-7013.
- Kaparaju, P., Buendia, I., Ellegaard, L., and Angelidakia, I. 2008. Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot scale studies. *Bioresource Technology*, 99(11), 4919-4928.
- Karim, K., Klasson, K. T., Hoffmann, R., Drescher, S. R. 2005. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mixing. *Bioresour Technology* 96, 1607-1612.
- Li, M., White, G., Wilkinson, D. and Roberts, K. J. 2004. LDA measurements and CFD modeling of a stirred vessel with a retreat curve impeller. *Industrial & engineering chemistry research*, 43(20), 6534-6547.
- Mirro, R., and Voll, K. 2009. A Guide to Impeller Selection for Stirred-Tank Bioreactors. *bio-process international* 7: 118-122.
- Nigam, K. D. P. and Schumpe, A. 1996. *Three-phase sparged reactors*, Gordon and Breach Science Publishers,
- Rico, C., Rico, J. L., Munoz, N., Gomez, B., and Tejero, I. 2011. Effect of mixing on biogas production during mesophilic anaerobic digestion of screened dairy manure in a pilot plant. *Engineering in Life Sciences*, 11(5), 476-481.
- Schlicht, A., 1999. Digester mixing systems. http://www.walker-process.com/pdf/99_DIG-MIX.pdf. November, 4, 2015.



- Shekhar, S. M., and Jayanti, S. 2002. CFD study of power and mixing time for paddle mixing in unbaffled vessels. *Chemical Engineering Research and Design*, 80(5), 482-498.
- Stroot, P. G., McMahon, K. D., Mackie, R. I., Raskin, L. 2001. Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolids under various mixing conditions-I. Digester performance. *water resources*. 135, 1804–1816.
- Wu, B. 2010. Computational fluid dynamics investigation of turbulence models for non-newtonian fluid flow in anaerobic digesters. *Environmental Science & Technology* 44(23), 8989–8995.
- Zhang, Y., Yu, G., Yu, L., Siddhu, M. A. H., Gao, M., Abdeltawab, A. A. and Chen, X. 2016. Computational fluid dynamics study on mixing mode and power consumption in anaerobic mono-and co-digestion. *Bioresource technology*, 203, 166-172.