

اختلاط آشوبناک سیالات بسیار لزج به کمک نوع جدیدی از مخلوط‌کن پیوسته

سید مصطفی حسینعلی پور^{*}، پیام رحیم مشائی، امیر توحیدی

تهران، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مکانیک، مرکز تحقیقاتی CAE و آزمایشگاه CFD

پیام‌نگار: alipour@iust.ac.ir

چکیده

در این مقاله به طراحی، ساخت و آزمون نوع جدیدی از میکسر پیوسته برای اختلاط سیالات با لزجت بالا پرداخته شده است. دستیابی به محصول همگن در اختلاط دو سیال لزج و یا توزیع یکنواخت پودرهای جامد در سیال لزج یکی از مشکلات عمده‌ای است که صنایع پتروشیمی با آن روبرو می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان در نفوذپذیری کم این سیالات دانست که ناشی از وجود ماکرومولکول‌ها می‌باشد. در دو دهه اخیر استفاده از میکسرهای آشوبناک برای این منظور مورد توجه جدی قرار گرفته است. در مطالعه حاضر نوع جدیدی از میکسر پیوسته برای اختلاط سیالات لزج خمیری و شبه‌خمیری مورد بررسی قرار گرفته است که با آشوبناک کردن جریان امکان اختلاط مناسب را در دوره‌های پایین فراهم می‌آورد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که با افزایش دور روتور شاخص اختلاط بهبود پیدا می‌کند و سطح بیشتری از مقطع عرضی سیال کاری توسط سیال ثانویه پوشیده می‌شود.

کلمات کلیدی: طراحی و ساخت، میکسر، سیالات لزج، جابجایی آشوبناک

۱- مقدمه

سیالات با لزجت بالا توسعه پیدا کرده است جابجایی آشوبناک می‌باشد. جابجایی آشوبناک به این معناست که ذرات سیال منطبق بر خط جریان نمی‌باشند [۱]. جریان آشوبناک از دو طریق می‌تواند ایجاد شود. یک راه این است که شرایط مرزی جریان را متغیر با زمان نمایش دهد و راه دوم این است که در جریان‌های سه بعدی به کمک هندسه خاص، جریان آشوبناک به وجود آورد. مثال‌هایی از اینکه چگونه می‌توان جریان آشوبناک ایجاد کرد، در ادبیات فن وجود دارد [۸-۲]. عارف^۱ [۲] در سال ۱۹۸۴ برای اولین بار یک میکسر را با دو همزن به صورت گردابه‌های نقطه‌ای در یک سیال بدون لزجت مدل نمود و نشان داد که با غیردائمی شدن جریان،

طرح ایده‌های جدید برای ساخت میکسرهایی که با صرف انرژی کم بتوانند در مدت کوتاهی اختلاط همگنی ایجاد نمایند، همواره مورد توجه محققین بوده است. برای سیالات با لزجت کم مانند آب، نفت، هوا و سیالاتی اینچنینی، مغشوش کردن جریان به عنوان یکی از گزینه‌های مؤثر اختلاط سال‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. مغشوش کردن جریان برای سیالات با لزجت بالا امکان‌پذیر نیست و یا نیاز به صرف انرژی بالایی دارد. از طرف دیگر بخش عمده‌ای از سیالاتی که در صنایع پتروشیمی کاربرد دارند دارای لزجت بالا می‌باشند. یکی از راهکارهایی که در دو دهه اخیر برای اختلاط

1. Aref

ضریب اطمینان ۶ بار در نظر گرفته شد. دور روتور میکسر نیز rpm (۳۵-۵) پیشنهاد گردید. به کمک الزامات طراحی نوع موتور میکسر، پمپ و نیروهای وارده بر تکیه‌گاه‌ها تعیین گردید. با بدست آوردن نیروهای وارده بر روتور میکسر و تکیه‌گاه‌ها، نوع یاتاقان‌ها مشخص گردید. اطلاعات بیشتر در مورد انتخاب اجزاء در مرجع [۱۱] آورده شده است. برای روتور میکسر، مارپیچی با گام mm ۱۲۰ و قطر mm ۵۰ (با طول کلی mm ۱۲۰۰) طراحی گردید که به کمک دستگاه کپی تراش ساخته شد. شماتیکی از این روتور در شکل (۱) نشان داده شده است. این روتور دارای mm ۱۰ خروج از مرکز نسبت به شفت مرکزی می‌باشد که امکان ایجاد جریان آشوبناک را به وجود می‌آورد. برای استاتور یا پوسته خارجی میکسر از لوله‌های با قطر داخلی mm ۸۰ استفاده شد. بنابراین فاصله هوایی بین روتور و استاتور mm (۱۵-۵) متغیر بود که با چرخش روتور فاصله هوایی هر مکان بین این دو عدد در نوسان می‌باشد. به منظور تمیز کردن دستگاه، استاتور دو تکه ساخته شد که بر روی هم مونتاژ می‌شدند. نحوه استقرار روتور در داخل استاتور و ثابت کردن آن‌ها توسط تکیه‌گاه‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. به منظور کنترل دور روتور میکسر، کدی با زبان برنامه‌نویسی دلفی نوشته شده است که سیگنال‌های دیجیتال را به کارت مبدل دیجیتال به آنالوگ می‌فرستد. سیگنال‌های آنالوگ خروجی از این کارت که V (۱۰-۰) می‌باشند به اینورتر (مبدل) ارسال می‌شوند. اینورتر متناظر با ولتاژ دریافتی، فرکانس معادل را به موتور ارسال می‌کند. این برنامه قابلیت ارسال پروتکل‌های سرعت ثابت و پله‌ای را به موتور را دارد.

۳- کالیبراسیون

عواملی که می‌توانند بر دبی میکسر تاثیر بگذارند سرعت مونوپمپ^۶ و سرعت روتور میکسر می‌باشند. ابتدا به منظور بررسی سرعت مونوپمپ بر دبی، در دورهای مختلف روتور، سرعت مونوپمپ تغییر داده شد و مشخص گردید که سرعت چرخش مونوپمپ تأثیر چندانی بر دبی خروجی از میکسر ندارد. این امر به دلیل مقاومت فشاری زیادی است که سیال بسیار لزج در میکسر با آن مواجه می‌شود. در این حالت عملاً مونوپمپ به عنوان یک تغذیه‌کننده

جریان آشوبناک ایجاد می‌گردد. تحقیق رودریگو^۱ و همکاران [۳] به جریان درون میکسر دو استوانه‌ای غیر هم مرکز می‌پردازد. هندسه آن‌ها شامل دو استوانه بود که خلاف جهت همدیگر می‌چرخیدند. استوانه بیرونی با سرعت ثابت می‌چرخید در حالی که سرعت چرخش استوانه درونی بطور سینوسی با زمان تغییر می‌کرد. آن‌ها پروفیل دمای خروجی از میکسر را مورد تحلیل قرار دادند و پراکندگی دمایی سیال را در خروجی میکسر برای مقادیر مختلف سرعت‌های چرخشی استوانه بیرونی و درونی محاسبه کردند. برومندزاده [۴] اختلاط آشوبناک را در یک اکسترودر تزریق پلاستیک مورد مطالعه قرار داد و نشان داد که اکسترودرها با هندسه نامتقارن، جریان آشوبناک به وجود می‌آورند و این امر سبب بهبود محصول نهایی در فرایند تزریق پلاستیک می‌شود. متکالف^۲ و لستر^۳ [۵] اختلاط و انتقال حرارت سیالات با لزجت بالا را در نوع جدیدی از میکسر پیوسته آشوبناک مورد مطالعه قرار دادند. آنها گزارش دادند که این نوع میکسر تأثیر خوبی در اختلاط همگن مواد بسیار لزج با افت فشاری برابر با مقدار موجود در لوله‌های معمولی ایجاد می‌کند. میکسر پیشنهادی آنها دارای پارامترهای کنترلی قابل توجهی برای تنظیم جابجایی آشوبناک بود.

در کار حاضر یک میکسر آشوبناک دور پایین، برای اختلاط سیالات با لزجت بالا در کاربردهای صنایع شیمیایی طراحی و ساخته شده است. آشوبناک بودن این میکسر توسط شکرپور و حسینعلی‌پور [۹ و ۱۰] به کمک شبیه سازی عددی اثبات شده است. برای انجام آزمون‌ها از محلول ۶٪ کربوکسی متیل سلولوز^۴ (CMC) به عنوان سیال کاری استفاده گردید که سیالی بسیار لزج و غیرنیوتنی محسوب می‌شود^۵. با توجه به نرخ برشی های متغیر لزجت آن بین Pa.s ۱۰ تا Pa.s ۱۰۰۰۰ متغیر می‌باشد که با توجه به شبیه سازی های انجام شده مقدار متوسط Pa.s ۱۰۰ برای محاسبه عدد رینولدز و طراحی لحاظ شده است.

۲- طراحی و ساخت

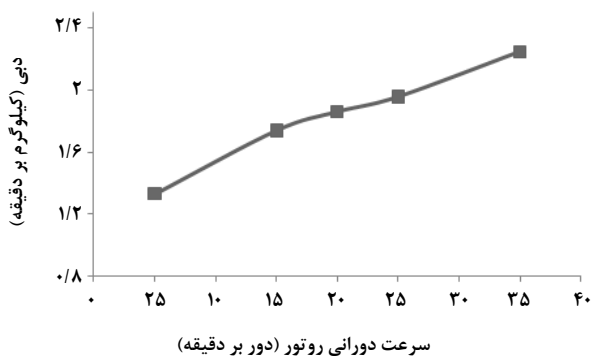
اولین گام در طراحی میکسر الزامات طراحی بود. برای این منظور دبی سیال (kg/min) (۲/۳-۰/۳) و افت فشار حداکثر نیز با اعمال

1. Rodrigo
2. Metcalfe
3. Lester
4. Carboxymethyl Cellulose

۵. لزجت آن به حدی است که می‌توان با شی برنده آن را برید.

6. Mono pump

تقریباً بر شدت جریان خروجی میکسر بی تأثیر است که ناشی از غلظت بسیار زیاد CMC مورد استفاده می‌باشد. این امر در مقاله به طور خلاصه و در مرجع [۱۰] به طور کامل توضیح داده شده است. دو عدد رینولدز براساس شدت جریان و سرعت چرخشی روتور تعریف می‌شود. محدوده عدد رینولدز براساس سرعت جریان $10^{-3} \times 1/8 - 0/9$ و بر اساس سرعت دورانی روتور $0/012 - 0/018$ می‌باشد. ملاحظه می‌شود که اعداد رینولدز بدست آمده بسیار کوچک می‌باشند. این امر بیانگر این حقیقت است که جریان استوکس (خزشی) است.



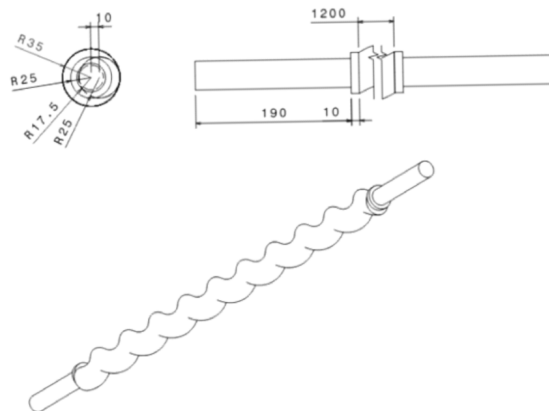
شکل ۳- تأثیر سرعت دورانی روتور بر شدت جریان میکسر

۴- مقدمات آزمایش و نحوه گرفتن آزمون‌ها

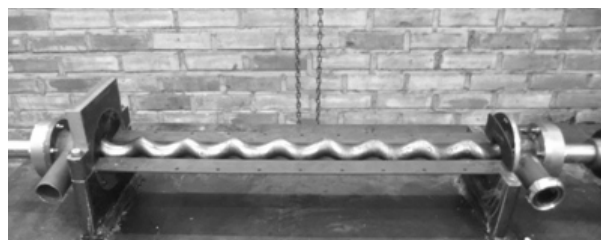
اولین قدم در انجام آزمون‌ها ساختن محلول CMC می‌باشد. ایجاد چنین محلولی در مقیاس کوچک کار زیاد مشکلی نیست، ولی تهیه ۲۰ کیلوگرم محلول CMC کار نسبتاً مشکلی خواهد بود. برای این منظور هر بار مقدار ۳۰۰ گرم آب در داخل میکسر اولیه اضافه می‌شود و متناظر با آن ۱۸ گرم پودر CMC در آن حل می‌گردد و این کار تا رسیدن وزن محلول به حدود ۲۰ کیلوگرم ادامه می‌یابد. بعد از تشکیل محلول، ذرات کلونیدی در آن کاملاً مشهود بود. برای از بین رفتن این ذرات نیاز به ۱۰-۸ ساعت زمان بود تا آب به آنها نفوذ نماید و نهایتاً در آب حل شوند. محلول CMC که به این روش تهیه می‌شد وارد تغذیه کننده مونوپمپ می‌گردید و با اعمال فشار بر روی آن شرایط برای ایجاد یک جریان تقریباً پیوسته در میکسر فراهم می‌گشت.

محل تزریق سیال ثانویه که دارای رنگ مشکلی بود در میانه میکسر بود. به منظور ایجاد سطوحی که بتوان پخش شدن ذرات رنگی را

میکسر عمل می‌کند که وظیفه آن دادن سرعت اولیه به سیال به منظور ورود به میکسر می‌باشد. مارپیچی بودن روتور این امکان را فراهم می‌سازد که سیال در حین چرخش به طرف جلو هل داده شود. به منظور تأثیر سرعت روتور بر سرعت جریان خروجی میکسر، برای دوره‌های مختلف چرخش روتور در دور ثابت مونوپمپ (۲۵rpm)، شدت جریان‌ها اندازه‌گیری شده‌اند که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۱- طرح اجمالی روتور استفاده شده در میکسر به منظور ایجاد جریان آشوبناک (اندازه‌ها به میلیمتر هستند)



شکل ۲- نحوه استقرار روتور در استاتور و ثابت نگه داشتن کل مجموعه

همانطور که در شکل (۳) دیده می‌شود با افزایش سرعت دورانی روتور شدت جریان خروجی از میکسر نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر این است که با چرخش بیشتر روتور، نیروی رانش افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با توجه به شبه‌پلاستیک بودن سیال، با افزایش سرعت دورانی روتور نرخ کرنش افزایش می‌یابد و سیال رقیق‌تر می‌شود. از این رو مقاومت فشاری برای حرکت سیال کمتر می‌گردد. با توجه به مشاهدات انجام شده، سرعت چرخش مونوپمپ



شکل ۵- نحوه استقرار دوربین و نورپرداز

۵- پردازش تصویر و معیار ارزیابی کمی اختلاط

در این مطالعه با استفاده از ترکیب کامپیوتر، دوربین دیجیتال و یک کد پردازشگر، رنگ سطوح بریده شده از سیال خروجی اندازه‌گیری و آنالیز شده است. عکس‌های گرفته شده با استفاده از نرم افزار Xara ویرایش شدند. عکسی که از این طریق ایجاد می‌شد به محیط نرم‌افزار مطلب انتقال داده می‌شد. اندازه هر عکس به طور متوسط 800×800 پیکسل بود. این بدان معنا است که هر پیکسل دارای سطح 0.049 mm^2 می‌باشد که با توجه به اندازه نمونه (دایره ای با قطر $5/6 \text{ cm}$) دقت خوبی محسوب می‌شود. به منظور پردازش تصویر، عکس‌های گرفته شده در محیط مطلب به محیط خاکستری انتقال داده شد. در این حالت عدد صفر به معنای رنگ سیاه مطلق و عدد یک به معنای رنگ سفید مطلق می‌باشد. بنابراین عدد $0/5$ رنگ خاکستری می‌باشد که 50% درصد آن سیاه و 50% درصد آن سفید است.

با مشخص شدن تعداد پیکسل‌های سیاه و سفید می‌توان معیاری را پیدا کرد که شاخص اختلاط و به نوعی نفوذ سیال تزریق شده به سیال زمینه را کمی نماید. برای این منظور چگالی سطح رنگی شده^۲ (DCS) به عنوان معیاری برای کمی کردن اختلاط مورد استفاده قرار گرفت که بصورت درصد تعداد پیکسل‌های سیاه به کل پیکسل‌ها تعریف می‌شود (رابطه (۱)).

$$DCS = \frac{\text{Number of Black Pixel}}{\text{Total Pixel}} \quad (1)$$

2. Density of Colored Surface

دید، لوله پولیکا به طول تقریبی ۴۵ سانتی متر در انتهای میکسر قرار داده شد (شکل (۴)).



شکل ۴- استقرار لوله پولیکا در انتهای میکسر جهت نمونه‌برداری

سیال کاری آماده شده در سیستم غیر پیوسته وارد مونوپمپ و سپس وارد میکسر می‌شد. بعد از اینکه سیال به انتهای میکسر رسید و از پیوسته بودن جریان اطمینان حاصل می‌شد تزریق صورت می‌گرفت. لازم بود تا در محل تزریق، بیشترین فاصله روتور و دیواره بالایی استاتور وجود داشته باشد. برای این منظور شاخصی بر روی روتور تعبیه شد تا موقعیت روتور مشخص گردد. در حالتی که شاخص تنظیم می‌شد میکسر متوقف می‌گشت؛ پیچ دهانه تزریق برداشته می‌شد و $2/8 \text{ cc}$ رنگ سیاه به داخل میکسر تزریق می‌شد. سپس بلافاصله پیچ دهانه تزریق بسته و دستگاه با دور مورد نظر شروع به کار می‌کرد. بعد از اینکه مقدار سیالی که در جلوی محل تزریق بود از لوله پولیکا خارج می‌گشت^۱ دستگاه متوقف می‌شد و لوله پولیکا برای نمونه برداری از انتهای میکسر جدا می‌گشت.

به ازای هر 2 cm حرکت سیال درون پولیکا به جلو به کمک یک پیستون مناسب، یک برش از سیال انجام و از سطح نمونه در شرایطی مناسب (شکل (۵)) عکس برداری می‌شد. شماتیک کلی میکسر و دستگاه آزمون در شکل (۶) نشان داده شده است.

۱. این مقدار سیال با توجه به شدت جریان‌های متفاوت، متناظر با زمان مشخصی می‌باشد که به راحتی با داشتن قطر لوله پولیکا، دبی سیال و حجم جلوی محل تزریق (حجم سیالی که در آن اختلاط صورت نگرفته است) برای هر شدت جریان قابل محاسبه است. جزئیات بیشتر در مرجع [۱۰] ذکر شده است.

که در رابطه فوق :

T^* ، زمان بی بعد برای نمونه برداری‌های انجام شده،

m ، شماره نمونه گرفته شده، ($m = 1, 2, \dots, 15$)،

Δt ، زمانی که جریان در شدت جریان مشخص 2cm در لوله پولیکا حرکت می‌کند،

T_0 ، زمانی که جریان با دبی مورد مشخص 30 cm در لوله پولیکا حرکت می‌نماید.

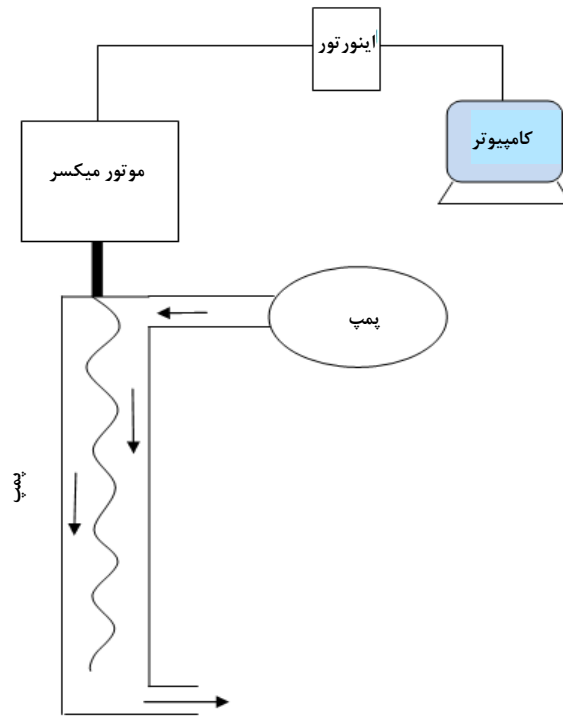
پارامترهای Δt و T_0 متناظر با هر شدت جریان با توجه به قطر لوله نمونه برداری (برای بدست آوردن مساحت سطح مقطع)، محاسبه شده و در جدول (۱) فهرست شده است.

جدول ۱- پارامترهای مربوط به محاسبه زمان بی بعد شده

دور (rpm)	Δt (s)	T_0 (s)
۵	۲/۴	۳۲/۱
۲۰	۱/۷	۲۵/۵
۳۵	۱/۴۳	۲۱/۴

شکل (۷) تصویر پردازش شده نمونه‌های مربوط به دور ۵ rpm را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیدا است برای دور ۵ rpm عملاً اختلاطی انجام نمی‌پذیرد و سیال رنگی بعد از ایجاد یک حلقه کمرنگ به گوشه‌ی می‌رود و هرگز نمی‌تواند خود را به مرکز جریان برساند. دلیل این امر را می‌توان در عدم نفوذ پذیری و نبود حرکت عرضی سیال ثانویه در CMC دانست. سیال تزریق شده بیشتر تمایل دارد به مسیر مستقیم خود ادامه دهد و چرخش لازم را انجام نمی‌دهد. شکل (۸) ادامه سیال خروجی از دستگاه را برای دور ۵ rpm نشان می‌دهد. همانطور که در شکل پیداست سیال تزریق شده حرکت عرضی محسوسی انجام نمی‌دهد و در نتیجه تاشدگی در المان‌های سیال تزریق شده به وجود نمی‌آید. نتیجه این امر دور نشدن ذرات نسبت به هم در عرض جریان می‌باشد. این مشاهدات بیانگر جریان غیر آشوبناک در دوره‌های پایین میکسر می‌باشد.

تصویر پردازش شده مربوط به دور ۲۰ rpm در شکل (۹) نشان داده شده است. برای دور ۲۰ rpm وضعیت اختلاط بهتر می‌شود به طوری که در نمونه چهارم تکه‌هایی از سیال تزریق شده مشاهده می‌شود و



شکل ۶- شرح اجمالی دستگاه آزمایشگاهی برای آزمون

۶- نتایج و بحث

به طور کلی عوامل مؤثر زیر می‌تواند بر اختلاط تاثیر داشته باشد:

۱- فاصله گام روتور

۲- فاصله هوایی روتور و استاتور

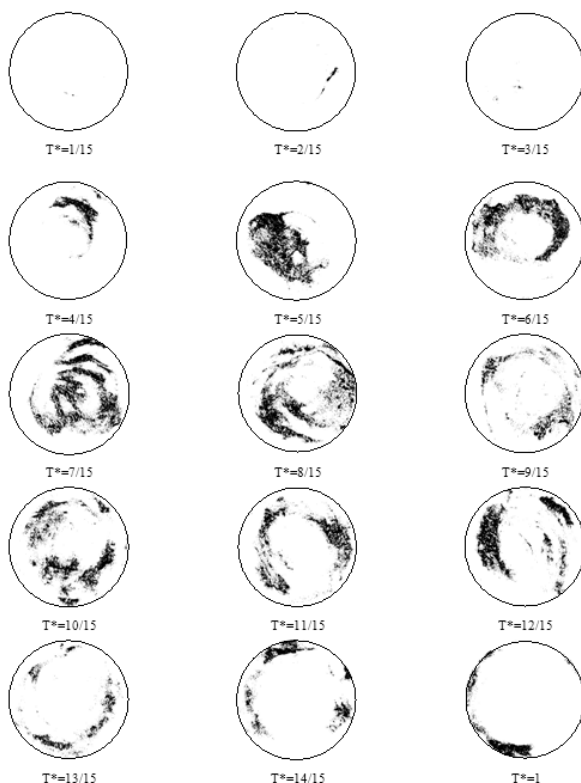
۳- پروتکل‌های مختلف حرکت روتور

۴- دور روتور (شدت جریان)

با توجه به هزینه و زمان بر بودن بررسی تمام موارد فوق الذکر، در تحقیق حاصل تنها به بررسی تاثیر شدت جریان پرداخته شده است. با توجه به اینکه شدت جریان حاصله توسط سرعت دورانی میکسر کنترل می‌شود، آزمون‌هایی در سه دور ۵، ۲۰ و ۳۵ دور بر دقیقه انجام و نتایج مربوطه ثبت و تحلیل شدند.

به منظور یکسان کردن کمیت زمانی مربوط به نمونه برداری‌های انجام شده در آزمون‌ها از زمان بی بعد شده استفاده گردید که به کمک رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

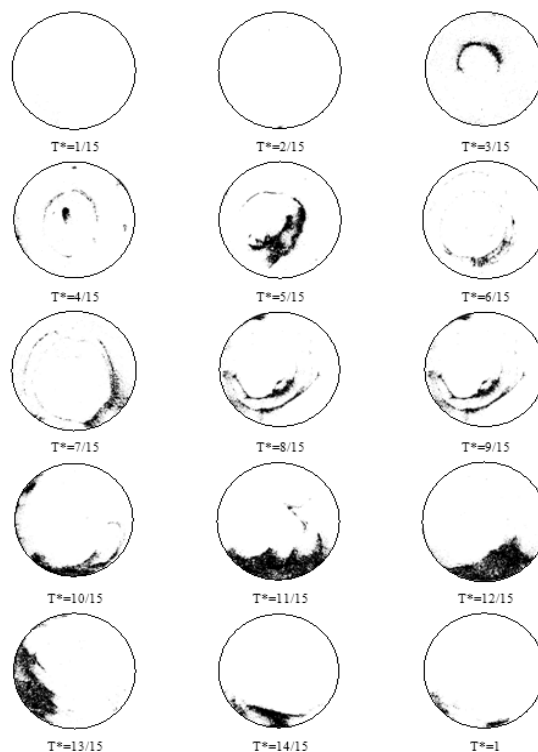
$$T^* = \frac{m\Delta t}{T_0} \quad (2)$$



شکل ۹- عکس‌های پردازش شده نمونه‌ها در دور ۲۰ rpm میکسر

تصویر پردازش شده مربوط به دور ۳۵ rpm در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که در دور ۳۵ rpm بهترین اختلاط رخ می‌دهد. در این دور سیال تزریق شده به سرعت به مرکز جریان می‌رسد و این پخش شدگی برای نمونه‌های بیشتری ادامه می‌یابد. این امر ناشی از کشیدگی و تاشدگی مداوم المان‌های سیال تزریق شده بوده و منجر به پخش شدگی عرضی المان‌های سیال می‌شود. همانطور که در شکل (۱۰) مشخص می‌باشد این پخش شدگی در نمونه نهم به حداکثر مقدار خود رسیده است. سپس به دلیل کاهش غلظت سیال تزریق شده از شدت لکه‌های سیاه کاسته می‌شود. آنچه در نمونه‌های آخر جلب توجه می‌کند ایجاد نواحی رنگی در تمام نقاط نزدیک دیواره است. این امر ناشی از تماس سیال تزریق شده در تمام پیرامون داخلی دیواره است (برخلاف دور پایین که تنها یک سمت سیاه رنگ می‌شود). در این دور ذرات سیال در راستای عرضی جریان از هم فاصله می‌گیرند که بیانگر حساسیت ذرات به شرایط اولیه است. این ویژگی شرط لازم و کافی برای آشوبناک بودن جریان می‌باشد.

بتدریج این پخش شدگی زیاد شده و در نمونه‌های بیشتری خود را نشان می‌دهد. در این حالت مقداری از سیال تزریق شده می‌تواند خود را به مرکز جریان برساند. همانطور که از نمونه‌ها پیداست در نمونه‌های آخر به دلیل کم شدن غلظت سیال تزریق شده، لکه‌های رنگی به سمت دیواره‌ها حرکت می‌کنند. این امر در مورد سایر دوره‌ها نیز دیده می‌شود. احتمالاً دلیل این امر سیاه شدن دیواره میکسر است که منجر به رنگی شدن ذرات کنار خود می‌شود.



شکل ۷- عکس‌های پردازش شده نمونه‌ها در دور ۵ rpm میکسر



شکل ۸- عدم اختلاط مناسب در دورهای پایین

همانطور که در شکل مشخص است بهترین شاخص اختلاط برای دور ۳۵rpm و بدترین شاخص اختلاط برای دور ۵ rpm می‌باشد. میانگین شاخص اختلاط برای دورهای ۵ rpm، ۲۰ و ۳۵ به ترتیب ۶/۸، ۸/۷ و ۳۵ می‌باشد. اختلاط در دور ۲۰rpm حدود ۵۰٪ از اختلاط در دور ۵rpm بهتر می‌باشد. در حالی که شاخص اختلاط در دور ۳۵rpm حدود ۴ برابر اختلاط در دور ۲۰rpm است. این امر بیانگر این است که افزایش دور به شدت باعث بهبود اختلاط می‌شود.

نکته قابل ملاحظه در شکل (۱۳) وجود شیب شدید در نمونه‌های ابتدایی برای دور ۳۵ rpm می‌باشد. این امر بیانگر این است که لکه سیال تزریق شده به سرعت خود را به تمام عرض جریان می‌رساند. یکی از نکاتی که در آزمون آزمایشگاهی مورد توجه می‌باشد تکرار پذیر بودن نتایج حاصله است. سوالی که در مورد مطالعه حاضر مطرح می‌شود این است که آیا آزمون‌ها باید قابلیت تکرار پذیر بودن را داشته باشند؟ اگر پاسخ منفی است چگونه می‌توان به نتایج استناد نمود؟

پاسخ این پرسش را باید در مفهوم پدیده آشوب جستجو کرد. حساسیت به شرایط اولیه یکی از نشانه‌های جریان آشوبناک می‌باشد [۱۲]. عوامل اجتناب ناپذیری که می‌تواند بر نتایج آزمون‌ها تأثیر بگذارد عبارتند از:

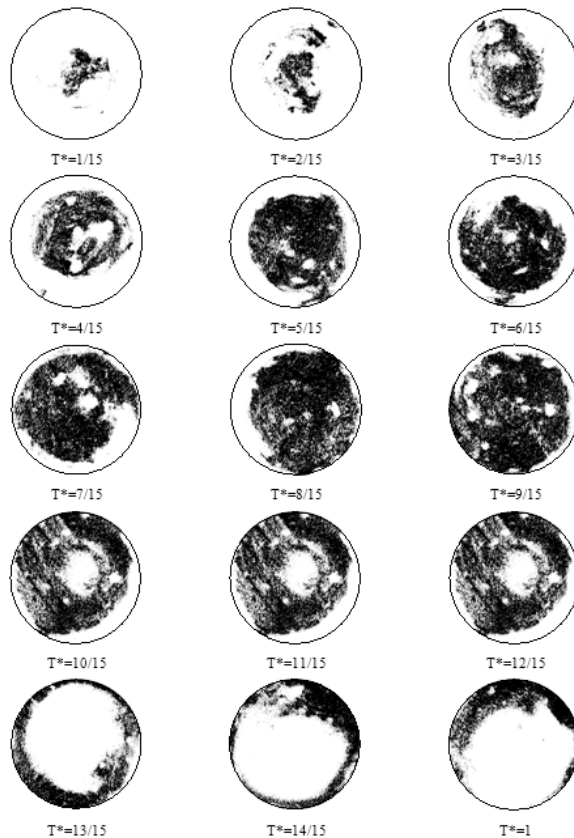
۱. متفاوت بودن محل قرار گیری شاخص در آزمون‌ها (حتی ۱ درجه).

۲. یکسان نبودن شدت جریان‌ها در آزمون‌ها (به دلیل عدم فشار یکسان بر تغذیه کننده مونوپمپ).

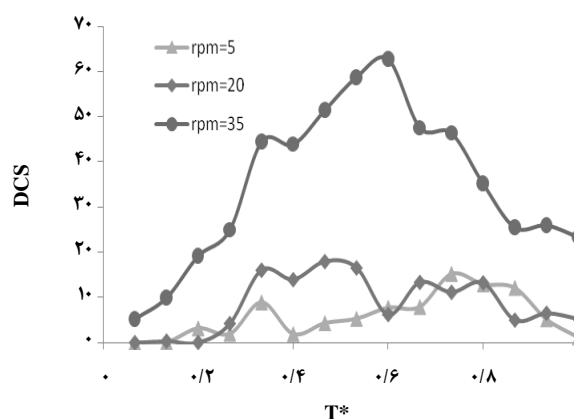
این خطاهای آزمایشگاهی را می‌توان کاهش داد ولی نمی‌توان به صفر رساند. لذا همواره نتایج بدست آمده تکرار پذیر نمی‌باشند. اما این انتظار وجود دارد که میانگین نتایج حاصل چندان فرقی با هم نداشته باشند و الگوی جریان نیز به طور محسوس عوض نشود. به بیان دیگر از نظر آماری با عوض شدن شرایط اولیه به مقدار کم، تغییر محسوسی در نتایج کلان حاصل نشود.

در این مطالعه سعی شد تا حتی الامکان آزمون‌ها در شرایط مشابه هم انجام شوند نتایج حاصل آزمون‌های تکرار برای دورهای ۲۰ rpm و ۳۵ در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

به منظور کمی کردن اختلاط از شاخص اختلاط DCS استفاده شده است. نمودار شاخص اختلاط برحسب زمان بی بعد شده در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- عکس‌های پردازش شده نمونه‌ها در دور ۳۵rpm میکسر

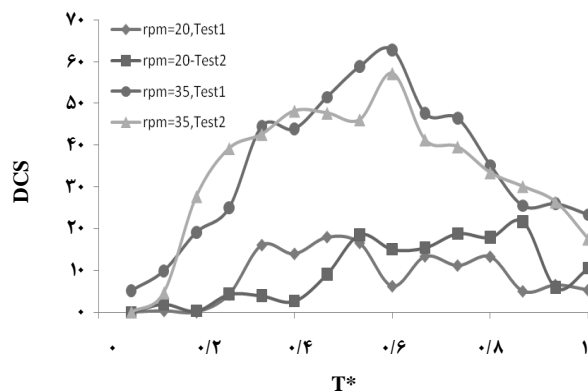


شکل ۱۱- شاخص اختلاط بر حسب زمان بی بعد شده

می باشد که از علائم جایجایی آشوبناک در میکسر است. بررسی عوامل مؤثر دیگر بر اختلاط مانند پارامترهای هندسی و پروتکل های مختلف حرکت روتور در حال مطالعه می باشد.

مراجع

- [1] Palomares, B. G., Guerrero, A. H., Romero-Méndez, F., Tolentino, F. O. "An experimental analysis of the flow pattern in heat exchangers with an egg carton configuration (parallel, convergent and divergent cases)", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30, 158–171 (2009).
- [2] Aref, H. "Stirring by Chaotic Advection", *Journal of Fluid Mechanics*, V. 143, 1-21(1984).
- [3] Lefevre, A., Mota, J. P. B., Rodrigo, A. J. S. Saadtjian, E. "Chaotic Advection and Heat Transfer Enhancement in Stokes Flows", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, V. 24, 310-321(2003).
- [4] برومندزاده، مجید. "تحلیل اختلاط سیال غیرنیوتنی درون اکسترودر تزریق پلاستیک با استفاده از تئوری آشوب"، پروژه کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸۳).
- [5] Metcalfe, G., Lester, D. "Mixing and Heat Transfer of Highly Viscous Food Products with a Continuous Chaotic Duct Flow", *Journal of Food Engineering*, V.95, 21–29(2009).
- [6] Hwu, T. "Chaotic Stirring in a New Type of Mixer With Rotating Rigid Blades", *European Journal of Mechanics*, V.27, 239–250(2008).
- [7] Mizuno, Y., Funakoshi, M. "Chaotic Mixing Due to a Spatially Periodic Three-Dimensional Flow", *Fluid Dynamics Research*, V.31, 129–149(2002).
- [8] Takahashi, K., Motoda M. "Chaotic Mixing Created by Object Inserted in a Vessel", *Chemical Engineering Research and Design*, V.87, 386–390(2009).
- [9] شکرپور مهناز، "ارائه و شبیه سازی یک میکسر جدید برای خمیر نان به عنوان یک سیال غیرنیوتنی به کمک تئوری آشوب"، پروژه کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸۹).
- [۱۰] رحیم مشائی پیام، "طراحی و ساخت میکسر آشوبناک برای سیال غیرنیوتنی"، پروژه کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۹۰).
- [11] Hosseinalipour, S. M., Tohidi, A., Shokrpour, M., Nori, N. M., "Introduction of a chaotic dough mixer, part A: mathematical modeling and numerical simulation", *Journal of Mechanical Science and Technology*, V.27(5),1329-1339(2013).
- [12] Hilborn, R., "Chaos and Nonlinear Dynamics ;an Introduction for Scientists and Engineers", Cambridge University Press, (2001).



شکل ۱۲- بررسی تکرار پذیری آزمون ها برای دورهای rpm ۲۰ و ۳۵

برای دور rpm ۲۰، آزمون ها دارای میانگین شاخص اختلاط ۸/۷ و ۹/۸ هستند که حدود ۱۲٪ تفاوت رانشان می دهد. در مورد دور rpm ۳۵ نیز آزمون ها دارای میانگین شاخص اختلاط ۳۵ و ۳۳/۴۴ می باشند که حدود ۴/۴٪ تفاوت دارند. عدم تکرار پذیری آزمون ها در شکل (۱۲) به وضوح قابل تشخیص است.

۷- نتیجه گیری و کارهای آینده

در مطالعه حاضر به طراحی و ساخت میکسر آشوبناک دور پایین برای اختلاط سیالات با لزج بالا پرداخته شده است که در صنایع شیمیایی کاربرد فراوانی دارند. مزیت میکسر ساخته شده نسبت به نمونه های مشابه کاهش قابل توجه مصرف انرژی می باشد. این امر به دلیل کارکرد دستگاه در دور های پایین تر نسبت به نمونه های مشابه می باشد. به عنوان مثال برای تولید خمیرهای لزج دستگاه های مشابه با دور بیش از rpm ۱۰۰ کار می کنند، در حالی که دستگاه حاضر با کارکرد در rpm ۳۵ اختلاط مناسب را فراهم می کند. آزمون های انجام شده نشان می دهد که افزایش دور تاثیر مثبتی بر عملکرد دستگاه دارد و در دورهای بالاتر از rpm ۳۰ می توان مطمئن شد که اختلاط خوبی در میکسر صورت می پذیرد. در دورهای پایین، اختلاط بسیار ضعیفی مشاهده می شود که ناشی از عدم حرکت عرضی جریان می باشد و در این حالت تنها المان های سیال کشیده می شود و تاشدگی اتفاق نمی افتد. مشاهدات در دورهای بالا نشان می دهد که ذرات سیال رنگی تزریق شده خود را بیشتر به مرکز جریان می رساند که نشانگر حرکت عرضی سیال می باشد. در این حالت کشیدگی المان های سیال با تاشدگی همراه