

# بررسی مؤلفه‌های عملیاتی مؤثر بر اختلاط واکنشی اسید-باز

## درون مخزن همزن دار به روش لیزری PIV/PLIF

محمدحسین احمدی<sup>۱</sup>، جعفر صادق مقدس<sup>۲\*</sup>، اوین عطایی<sup>۱</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

پیام نگار: jafar.moghaddas@sut.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق اختلاط واکنشی خنثی‌سازی اسید-باز با واکنش اسیداستیک و آمونیوم هیدروکسید درون مخزن همزن دار برای مطالعه رفتار متقابل اختلاط و واکنش شیمیایی با استفاده همزمان از روش های لیزری القای صفحه‌ای نور شارندگی (PLIF)<sup>۱</sup> و سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV)<sup>۲</sup> بررسی شده است. همچنین مواردی همچون سرعت چرخش پره، فاصله پره از کف مخزن، وجود بافل و خواص روانه شناختی سیال درون مخزن که با تغییر و بهینه‌سازی آنها می‌توان شرایط حاکم بر عملکرد مخازن اختلاط را بهبود بخشید زمینه این بررسی بوده است. نتایج به دست آمده نشان داد که پیشرفت واکنش خنثی‌سازی اسید-باز در شرایط بررسی شده، تحت کنترل شرایط اختلاط واکنش دهنده‌ها بوده است. برای بررسی اثر فاصله پره از کف مخزن، نسبت‌های  $C/T=0/25$ ،  $C/T=0/5$  و  $C/T=0/75$  انتخاب شدند که  $C$  فاصله پره از کف مخزن و  $T$  قطر مخزن است. همچنین این آزمایش‌ها در سه سرعت پره  $100rpm$ ،  $150rpm$  و  $200rpm$  تکرار شدند. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله پره از کف مخزن که معادل افزایش نسبت  $C/T$  است، زمان واکنش به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. علاوه بر این، در نسبت های ثابت  $C/T$ ، با افزایش سرعت چرخش پره، زمان واکنش به‌شدت کاهش می‌یابد. همچنین به‌منظور بررسی اثر تعداد بافل های درون مخزن، از یک مخزن بدون بافل، ۲ بافل و ۴ بافل در سرعت‌های  $100rpm$ ،  $150rpm$  و  $200rpm$  استفاده شد. بر اساس نتایج مشخص شد که با افزایش تعداد بافل درون مخزن، زمان واکنش کاهش می‌یابد. یکی دیگر از مؤلفه های مورد بررسی در این تحقیق، گرانیروی سیال بود که آزمایش‌ها در گرانیروی های  $\mu=35 mPa.s$ ،  $\mu=55 mPa.s$  و  $\mu=75 mPa.s$  انجام شدند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش گرانیروی سیال از  $\mu=35 mPa.s$ ، به  $\mu=55 mPa.s$ ، زمان واکنش افزایش چشمگیری می‌یابد؛ اما افزایش گرانیروی سیال به مقدار  $\mu=75 mPa.s$  تأثیر کمتری بر میزان افزایش زمان واکنش دارد.

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۵/۱۷

شماره صفحات: ۶ تا ۱۸

**کلیدواژه‌ها:** مخزن همزن دار،

واکنش اسید-باز، روش القای

صفحه‌ای نور شارندگی،

سرعت‌سنجی تصویری ذرات، پره

توربین تیغه‌خمیده

منجر به حد مطلوبی از یکنواختی فیزیکی یا شیمیایی در محصول

نهایی می‌شود [۱]. با توجه به توانایی اختلاط در انتقال سریع

گونه‌های واکنشی نسبت به نفوذ مولکولی و جریان آرام، جریان

آشفته پیامدهای مهمی در بسیاری از فرایندهای صنعتی دارد؛

### ۱. مقدمه

اختلاط، درهم آمیختگی دو یا چندبخش غیرمتشابه است که

\* تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی شیمی

1. Planar Laser Induced Fluorescence

2. Particle Image Velocimetry

اندازه‌گیری غلظت اسکالر در مخزن همزن‌دار دارای بافل استفاده کردند. در آن تحقیق از ۵ نوع پروانه مختلف استفاده شد و کمترین زمان اختلاط برای پروانه پیچشی بالارونده به دست آمد. گیلارد [۱۵] از فنّ PLIF برای تجزیه کمی اختلاط در مخزن همزن‌دار گاز- مایع مجهز به توربین سه‌گانه راشتون استفاده و سازوکار اختلاط را در نقاط مختلف تزریق ردیاب بررسی کرد. فال و همکاران [۱۶] ترکیب آب با یک ردیاب را در واکنشگاه همزن مداوم مطالعه کردند. آنها از فنّ PLIF برای بررسی غلظت لحظه‌ای، واریانس زمانی و شاخص‌های اختلاط استفاده کردند و چنین نتیجه گرفتند که فنّ PLIF قادر به بررسی الگوهای اختلاط و ترکیب جریان با دقت بالا است. هال و همکاران [۱۷] از هر دو فنّ PIV و PLIF در مخازن بافل‌دار، بدون بافل و گریز از مرکز (با قطر ۶۰ میلی‌متر و ۸۰ میلی‌متر) برای مطالعه اختلاط و رفتار آب‌پویایی مایعات با گرانروی بهره گرفتند و نتایج نشان داد که آشفتگی در توزیع انرژی جنبشی مخازن کوچکتر در مقایسه با مخازن بزرگتر، بیشتر است.

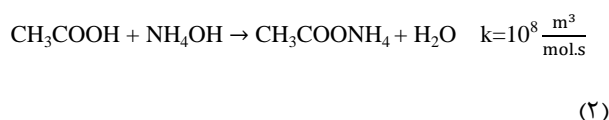
چونگ و همکاران [۱۸] از هر دو روش PIV و PLIF برای تجسم میدان جریان در یک مخزن کوچک همزن‌دار استفاده کردند؛ در این تحقیق، مشخص شد که به دلیل کمبود جریان مماس در مخازن بافل دار، محاسبه آشفتگی انرژی جنبشی در سه بعد، نتیجه مشابهی با محاسبه آن در دو بعد به دنبال خواهد داشت. مقدس [۱۹] از روش PLIF برای محاسبه میدان غلظت و مؤلفه‌های اختلاط در سامانه‌های مایع-گازی استفاده کرد. در کارهای بعدی، زادغفاری و همکاران [۲۰] شبیه‌سازی CFD خود را با داده‌های PIV/ PLIF مقایسه و تأیید و میدان‌های جریان، قدرت آنها و زمان اختلاط را بررسی کردند. کولیگنون و همکاران [۲۱] اختلاط در سه‌زیست‌واکنشگاه را با حجم‌های مختلف مورد استفاده در کشت سلولی جانوری، در شرایط تلاطم خفیف بررسی کردند. بوسکیگلو و همکاران [۲۲] با استفاده از فنّ PLIF پویایی پراکندگی یک‌ردیاب انفعالی در یک مخزن بدون بافل را بررسی و تعریفی از زمان اختلاط بر اساس انحراف پویایی‌شناسی استاندارد ردیاب پیشنهاد کردند.

همان‌طور که نشان داده شد، از روش PLIF برای اندازه‌گیری خصوصیات کلی و محلی جریان در فرایندهای اختلاط استفاده شده که این سبب به دست آوردن اطلاعات ارزشمند در مورد سازوکارها و

بنابراین در واکنشگاه‌های شیمیایی برای عملکرد بهتر از اختلاط آشفته استفاده می‌شود [۲]. آگاهی از سازوکار اختلاط و بهینه‌سازی آن باعث بهبود کیفیت محصول نهایی، میزان تبدیل و بهینه‌شدن مصرف انرژی می‌شود [۳]. پخش یکنواخت مواد واکنش‌دهنده در واکنش‌ها، از مهم‌ترین عوامل پیشرفت یک‌واکنش شیمیایی و انجام بهتر آن است، که به نوع اختلاط بستگی دارد [۴] با توجه به این که بیشتر واکنش‌های شیمیایی در فاز مایع رخ می‌دهد، اختلاط در مایعات یکی از فرایندهای مهم در مهندسی شیمی به‌شمار می‌ود. اختلاط در واکنش‌های مایع- مایع نقش مهمی در ایجاد و افزایش مساحت فصل مشترک و بهبود انتقال جرم و حرارت ایفا می‌کند. برای انجام اختلاط‌های واکنشی باید جنبش‌شناسی شیمیایی به‌اندازه کافی سریع باشد، نه این‌که عامل محدودکننده برای اختلاط‌های واکنشی باشد [۵]. در فرایندهای اختلاط واکنشی داشتن درک عمیق از اثر عملکرد اختلاط بر روی واکنش، ضروری است؛ تجسم لیزری همراه با پردازش تصویر یک‌ابزار قدرتمند و غیر تداخلی است که امکان مطالعه ساختار و سازوکار اختلاط برای جریان‌های واکنشی و غیر واکنشی را در واکنشگاه فراهم می‌سازد. فنّ القای صفحه‌ای نور شارندگی به دلیل برتری‌های اندازه‌گیری مستقیم غلظت، غیر تداخلی بودن و مصورسازی لحظه‌ای با وضوح زمانی و مکانی بالا برای تعیین الگوی غلظت لحظه‌ای و دما در جریان‌های مایع استفاده می‌شود [۶ و ۷]. فنّ القای صفحه‌ای نور شارندگی، امکان تجسم فرایند اختلاط همراه با واکنش شیمیایی در مخازن همزن‌دار را فراهم می‌آورد.

از روش‌های شارندگی برای جریان گاز و مایع در کانال‌های مختلف اختلاط استفاده شده است [۸ و ۹ و ۱۰]. گاسکی و همکاران [۱۱] و آندره و همکاران [۱۲] از طیف سنجی شارندگی برای اندازه‌گیری نوسانات غلظت مخازن همزن‌دار استفاده کردند. در آن زمان به دلیل نبودن کدهای کارآمد برای پردازش تصویر، از روش‌های ویژه ریاضی و آماری برای اندازه‌گیری میدان غلظت ردیاب استفاده می‌شد. هوجین و همکاران [۱۳] اولین کسانی بودند که از فنّ PLIF در مخازن همزن‌دار در مقیاس آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری میدان غلظت استفاده کردند؛ آنها یک رابطه خطی بین شدت نور شارندگی و غلظت ردیاب، برای غلظت‌های پایین ردیاب و منابع پر قدرت لیزر به دست آوردند. دیستهووف و همکاران [۱۴] از روش LIF برای

غلظت  $0.1 \text{ mol/L}$  به همراه سدیم فلورسین با غلظت  $1/6 \text{ g/Lit}$  که به رنگ نارنجی است به وسیله پمپ تزریق درون مخزن حاوی محلول بازی تزریق می شود؛ پس از اختلاط کامل و اتمام واکنش خنثی سازی، محلول درون مخزن به رنگ سبز تغییر می کند.



محصول این واکنش استات آمونیوم و آب است. واکنش خنثی سازی اسید استیک با آمونیوم هیدروکسید سریع، بازگشت ناپذیر و گرمایزا است. این واکنش جزء دسته واکنش های خنثی سازی اسید ضعیف با باز ضعیف است [۹].

ماده ردیاب فلورسین بیشترین کاربرد را برای محلول های واکنشی دارد؛ چون طیف جذبی فلورسین به شدت نسبت به pH حساس است، البته طیف جذب فلورسین در  $\text{pH}=4$  ناچیز است [۲۷].

## ۲-۲-۲ طر حواره مخزن همزن دار

سامانه آزمایشگاهی شامل یک مخزن استوانه ای با کف صاف با قطر داخلی  $80 \text{ mm}$  و ارتفاع  $140 \text{ mm}$  از جنس پلی متیل متاکریلات با نام تجاری پلکسی گلاس حاوی یک پره از نوع توربین تیغه خمیده است. مخزن استوانه ای درون یک مکعب از جنس پلکسی گلاس با اضلاع  $140 \text{ mm}$  که حاوی آب است قرار می گیرد تا از شکست نور و خطاهای ناشی از انحنای مخزن جلوگیری شود. سرعت پره توربین تیغه خمیده به وسیله یک موتور DC<sup>۱</sup> کنترل می شود، که برای این پژوهش، پره را با سرعت های  $100 \text{ rpm}$  و  $150 \text{ rpm}$  و  $200 \text{ rpm}$  می چرخاند. طر حواره مخزن همزن دار و اطلاعات مربوط به آن در شکل (۱) آمده است.

پره توربین تیغه خمیده<sup>۲</sup> (CBT) با الگوی جریان شعاعی و نیروی برشی کمتر برای شکستن جریان پلاگ، مصرف انرژی کمتری نسبت به پره های توربین راشتون دارد. این پره اغلب برای اختلاط جریان های نسبتاً گرانه و دوغابی استفاده می شود [۱۰]. شکل (۲) نمایی از پره توربین تیغه خمیده را نشان می دهد و مشخصات آن در جدول (۱) آورده شده است.

جزئیات فرایندهای در حال انجام در مخزن همزن دار شده است. اساس روش PLIF بر مبنای ارتباط بین غلظت ردیاب و شدت شارندگی استوار است. غلظت به عنوان یک کمیت اسکالر مهم ترین مشخصه در یک فرایند اختلاط است که دستیابی به آن، امکان به دست آوردن بسیاری از مؤلفه های دیگر را مانند زمان اختلاط و زمان واکنش فراهم می سازد.

زمان اختلاط، مدت زمان لازم برای رسیدن به یک درجه همگن شدن دلخواه است، درجه همگن شدن مطلوب را می توان در بازه  $90\%$  تا  $99\%$  در نظر گرفت [۲۳].

$$Y = |(C_i - C_0) / (C_\infty - C_0)| \quad (1)$$

رابطه (۱) نشان دهنده عبارتی برای تعیین زمان اختلاط است، که در آن Y درجه همگن شدن است.  $C_0$ ،  $C_\infty$  و  $C_i$  به ترتیب غلظت های اولیه، نهایی و لحظه ای توده اختلاط شونده است. در اختلاط جریان های واکنشی از ماده ردیاب استفاده می شود، که این ماده ردیاب در حین واکنش مصرف می شود و یا به برخی از خواص واکنش مثل تغییرات دما یا pH حساس است که باعث روشن شدن خاصیت شارندگی ماده ردیاب و تغییر رنگ جریان مایع واکنشی می شود. مدت زمان شروع تغییر رنگ تا یکنواخت شدن رنگ مایع درون مخزن که به واسطه تغییرات دمایی یا pH است، زمان اتمام واکنش را نشان می دهد.

در این تحقیق، اختلاط واکنشی خنثی سازی اسید-باز با واکنش اسید استیک و آمونیوم هیدروکسید بررسی شده است. غالباً فاضلاب های صنعتی، اسیدی یا بازی هستند و ممکن است قبل از پالایش یا ورود به سامانه فاضلاب بهداشت شهری نیاز به خنثی سازی داشته باشند. واکنش خنثی سازی اسید-باز در پالایش فاضلاب ها برای کاهش آسیب هایی است که فاضلاب ها پس از آزاد شدن به محیط زیست اعمال می کنند [۲۴].

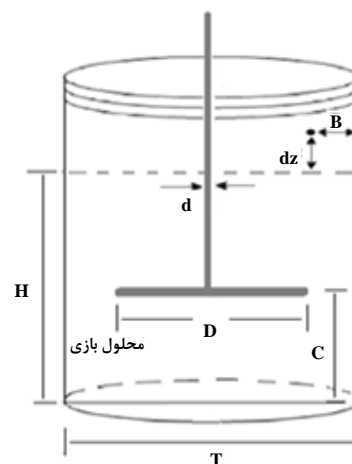
## ۲. مواد و روش ها

### ۲-۱-۱ آزمایش ها

ابتدا محلول آبی آمونیوم هیدروکسید با غلظت  $0.1 \text{ mol/L}$  و گلیسرین، با حجم  $V=600 \text{ mL}$  و گرانیروی  $\mu=35 \text{ mPa.s}$  درون مخزن قرار گرفت. سپس  $2 \text{ mL}$  محلول آبی اسیداستیک با

1. Direct Current  
2. Curved Blade Turbin

۴ cm	D
۶ cm, ۴ cm, ۲ Cm	C
۱/۶ Cm	D
۹ Cm	H
۸ Cm	T
۴ Cm	dz
۲ Cm	B

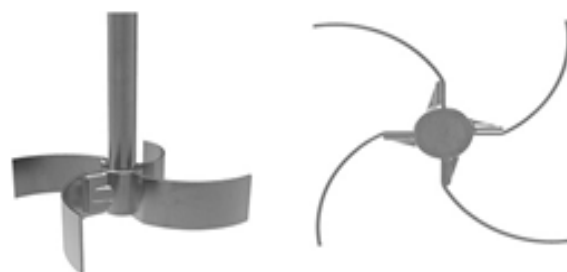


شکل ۱. طرحواره مخزن همزن‌دار بدون بافل.

روش PLIF به این صورت است که نور صفحه‌ای لیزر به مخزن حاوی سیال تابانده می‌شود، الکترون‌های ماده ردیاب با جذب انرژی به سطح بالاتری برانگیخته می‌شوند و فوتون‌هایی با طول موج بلندتر ساطع می‌کنند که باعث انتشار نور شارندگی می‌شود. نشر نور شارندگی در لحظات مختلف با دوربین<sup>۱</sup> CCD ثبت و سپس به وسیله نرم‌افزار تحلیل می‌شود و رخ‌نمای لحظه‌ای غلظت به دست می‌آید [۲۶ و ۲۵].

روش PIV سرعت لحظه‌ای را در یک میدان جریان فراهم می‌کند. مبانی فن<sup>۲</sup> PIV دوبعدی تاباندن نور به وسیله لیزر با دو پالس جدا از هم با یک تأخیر زمانی به یک میدان جریان و عکس‌برداری از ذرات با یک دوربین CCD است. تصاویر گرفته شده به آرایه‌هایی از پنجره‌های کوچک تقسیم می‌شود؛ در هر پنجره همه ذرات دارای سرعت یکسان فرض می‌شوند. سپس جابجایی ذرات داخل پنجره با یک الگوریتم عددی حساب می‌شوند، در نهایت بردار سرعت با تقسیم جابجایی ذره به تأخیر زمانی بین دو پالس صفحه‌ای لیزر به دست می‌آید [۲۷].

دیواره‌های مکعب که مقابل دوربین و لیزر قرار می‌گیرند باید به‌طور کامل به رنگ سیاه باشند تا اثرات بازتاب نور به حداقل برسد و کیفیت تصاویر گرفته شده بهتر شود، همچنین خطای ناشی از آزمایش‌ها به حداقل ممکن برسد؛ همه مراحل آزمایش‌ها می‌تواند در اتاق کاملاً تاریک انجام شود.



شکل ۲. پره توربین تیغه خمیده در دو نمای متفاوت.

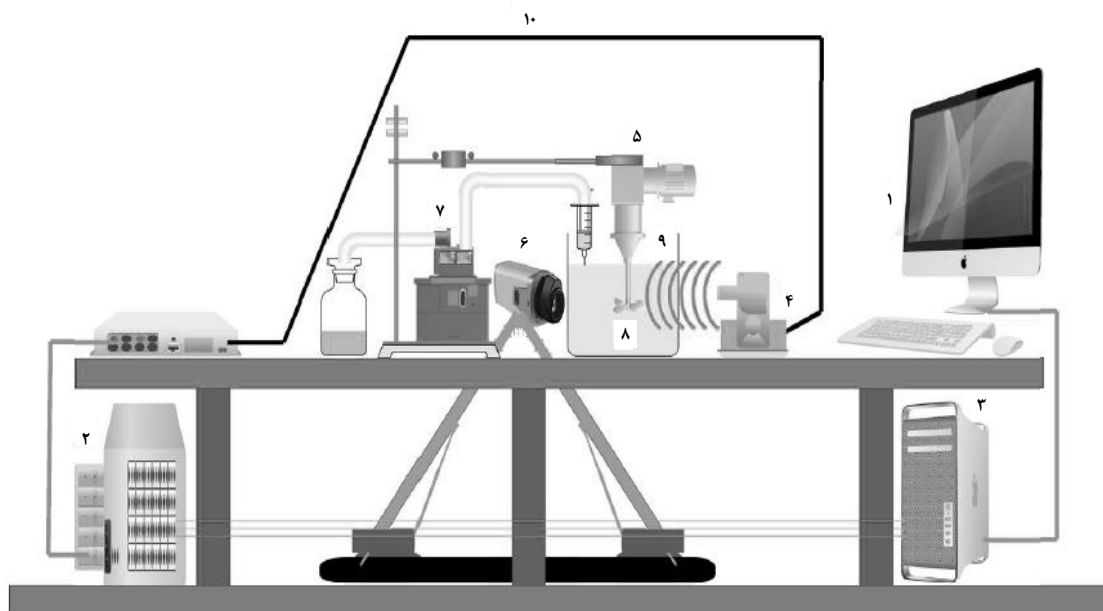
جدول ۱. مشخصات پره توربین تیغه خمیده.

تعداد پره	قطر پره (mm)	قطر پره به قطر مخزن (D/T)	عرض پره به قطر پره (W/D)
۴	۴۰	۰/۵	۰/۲۵

### ۳-۲ طرحواره سامانه آزمایشگاهی

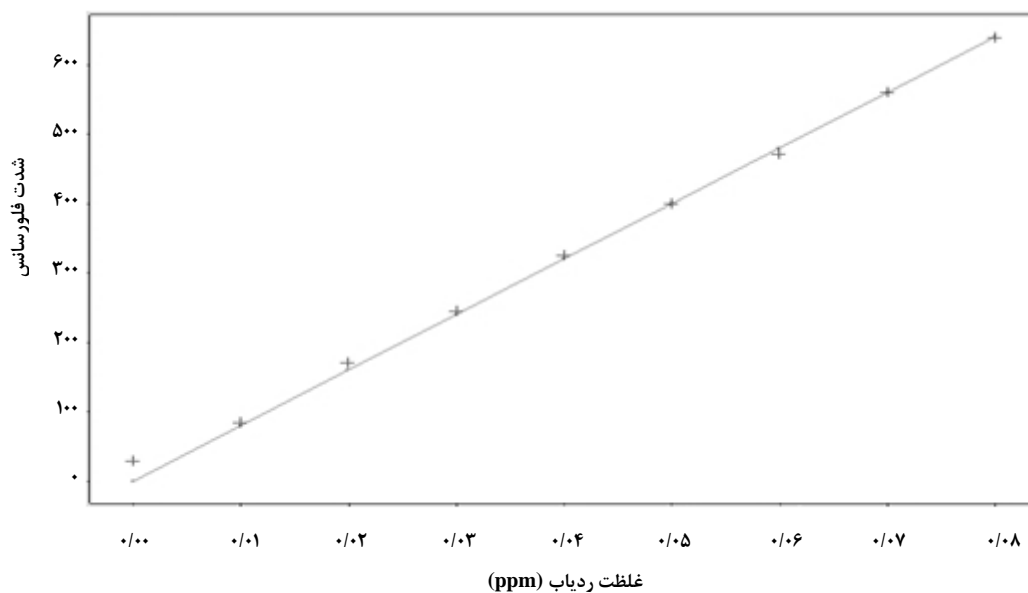
برای بررسی تأثیر مؤلفه‌های مختلف بروی زمان واکنش و الگوی جریان درون مخزن همزن‌دار از روش لیزری PIV/PLIF تحت نرم‌افزار داویس استفاده شد؛ روش القای صفحه‌ای نور شارندگی یک فن غیر مخرب، نوین و قدرتمند برای تعیین الگوی غلظت لحظه‌ای و دما در جریان مایع در جریان مایع است. این روش هم برای اختلاط‌های واکنشی و هم اختلاط‌های غیرواکنشی و رابطه بین آنها استفاده می‌شود. شکل (۳) طرحواره سامانه آزمایشگاهی فن<sup>۲</sup> PIV/PLIF را نشان می‌دهد.

1. Charge Coupled Device



شکل ۳. طرحواره سامانه آزمایشگاهی PIV/PLIF: (۱) نرم افزار (۲) هماهنگ کننده (۳) پردازشگر (۴) لیزر (۵) همزن (۶) دوربین (۷) پمپ تزریق (۸) پره (۹) مخزن (۱۰) بازوهای آینه دار.

۴-۲ واسنجی غلظتی  
بر اساس نمودار واسنجی غلظتی، غلظت سدیم فلورسین برای پاسخ نور ماده ردیاب با نه غلظت متفاوت در آب معمولی بررسی شد. واسنجی شیمیایی و آزمایش ها  $0/08 \text{ g/L}$  انتخاب شد. که نمودار این واسنجی مطابق شکل (۴) است.

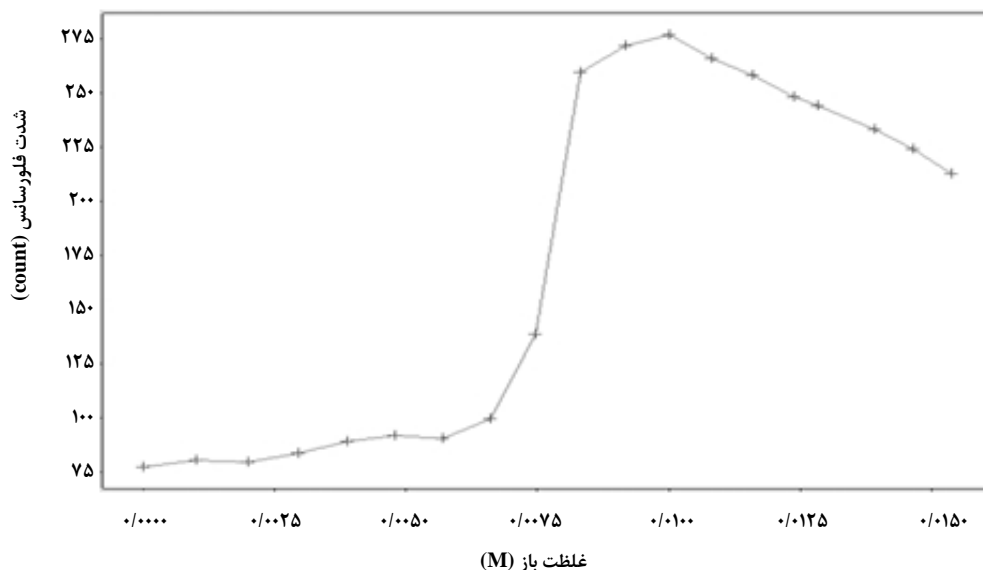


شکل ۴. نمودار واسنجی غلظتی سدیم فلورسین.

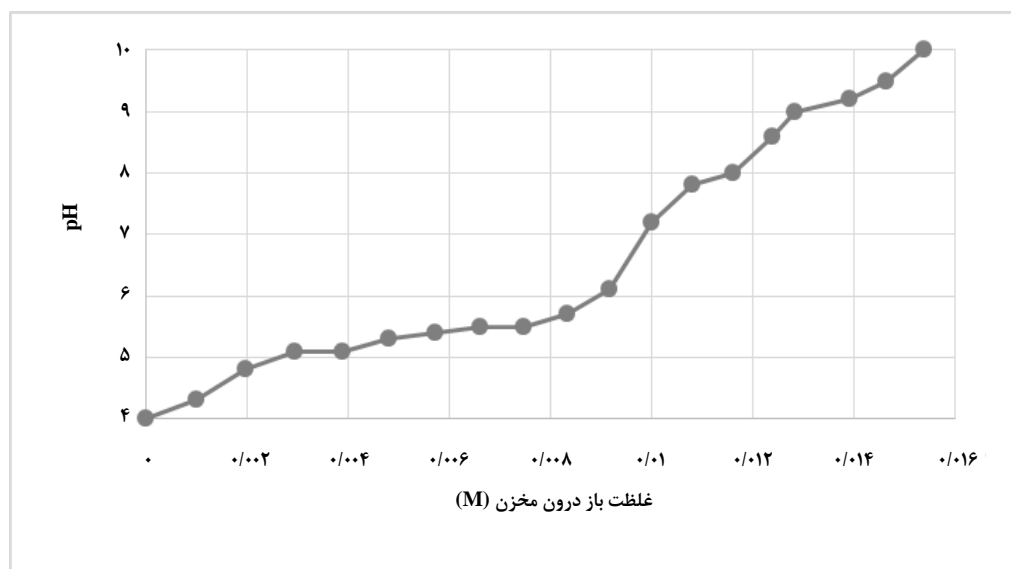
که باز اضافی در مخزن باشد ( $pH > 7$ ) نمودار خطی است. بیشترین شدت شارندگی فلورسین سدیم زمانی است که غلظت باز درون مخزن به  $0.01 \text{ M}$  می‌رسد ( $7 < pH < 8$ ) و محلول خنثی است. در غلظت‌های پایین باز، شدت شارندگی فلورسین سدیم به شدت کاهش می‌یابد و اندازه‌گیری‌ها را سخت و با خطا مواجه می‌کند.

## ۲-۵ واسنجی شیمیایی (تیتراسیون اسید- باز)

تیتراسیون با باز  $0.1 \text{ M}$  در یک محلول اسیدی  $0.01 \text{ M}$  و مادهٔ ردیاب  $0.08 \text{ g/Lit}$  انجام شد. نمودار تیتراسیون شیمیایی مطابق شکل (۵) است. همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود پاسخ شدت نور فلورسین سدیم در غلظت‌های مختلف باز متفاوت است و تنها زمانی



شکل ۵. نمودار واسنجی شیمیایی (تیتراسیون باز در محلول اسید+ فلورسین سدیم).



شکل ۶. pH محلول در طول انجام عمل تیتراسیون.

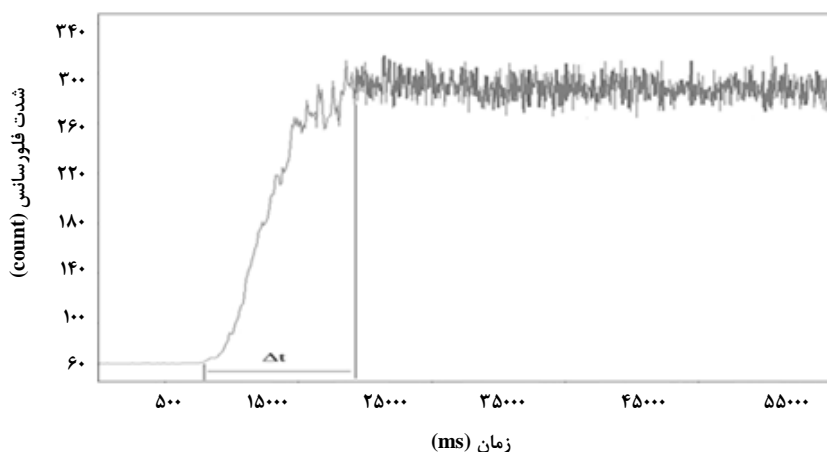
## ۲-۶ تعیین زمان واکنش

بر اساس تغییرات شدت نور شارندگی، باتوجه به دستورهایی که به نرم‌افزار داویس داده می‌شود، نمودار تغییرات شدت نور شارندگی برحسب زمان حاصل می‌شود. پایان واکنش زمانی است که تغییرات شدت شارندگی با زمان ثابت می‌شود. نوسان‌های همسان و یکنواخت نمودار که تا انتها ادامه دارد (به دلیل روشن شدن سیگنال‌های شارندگی ماده ردیاب) همگن شدن محلول را نشان می‌دهد.

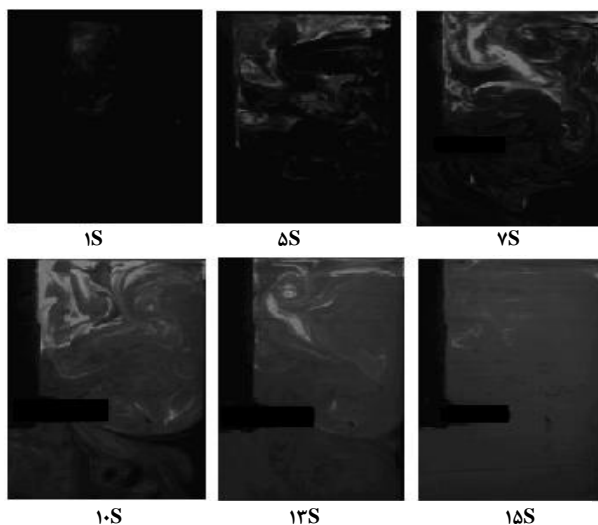
## ۳. نتایج و بحث

همان‌گونه که اشاره شد، در این پژوهش اختلاط واکنشی خنثی‌سازی اسید- باز با واکنش اسیداستیک و آمونیوم هیدروکسید درون مخزن

همزن‌دار با تأکید بیشتر بر زمان واکنش و الگوی جریان بررسی شد. تصاویر گرفته‌شده از یک نمونه آزمایش واکنش خنثی‌سازی اسید- باز با روش القای صفحه‌ای نور شارندگی از لحظه تزریق محلول اسیدی و فلورسین سدیم تا رسیدن به درجه همگنی ۹۵٪ در شکل (۸) نشان داده شده‌است. با انجام عمل تزریق ابتدا غلظت محلول اسیدی و فلورسین سدیم در نیمه بالایی مخزن بیشتر است و باعث افزایش شدت شارندگی می‌شود. با رسیدن محلول تزریقی به پره، اختلاط به صورت یکنواخت در تمام نواحی مخزن انجام می‌شود و باعث تسریع در انجام واکنش و همگن شدن محلول نهایی می‌شود. قابل ذکر است که محلول تزریقی نارنجی رنگ است و بعد از اتمام واکنش به رنگ سبز تغییر می‌کند.



شکل ۷. نمودار زمان واکنش خنثی‌سازی اسید- باز.



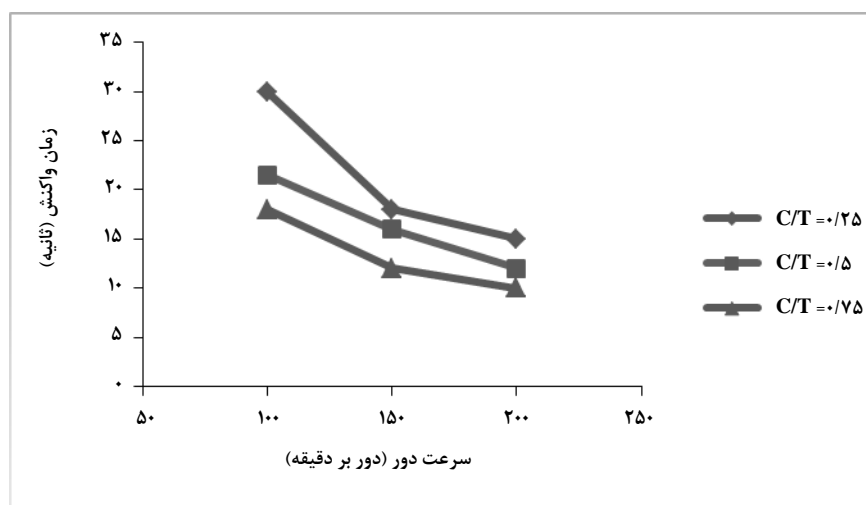
شکل ۸. پیشرفت فرایند اختلاط واکنشی به وسیله غلظت فلورسین سدیم ( $N=100\text{rpm}$ ,  $C/T=0/5$ ,  $\mu=35\text{mPa.s}$ ).

### ۱-۳ تأثیر فاصله پره از کف مخزن

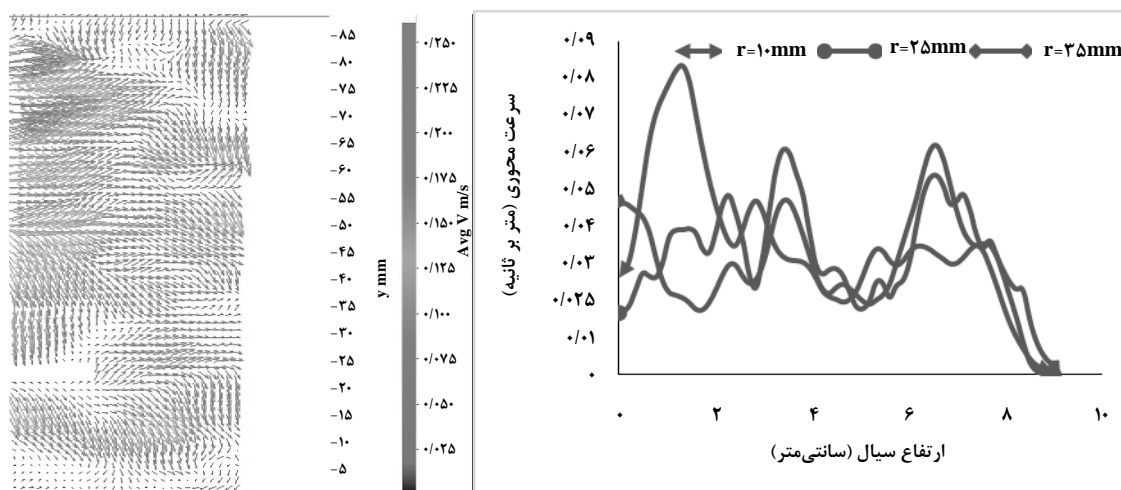
فاصله پره از کف مخزن یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر روی الگوی جریان داخل تانک است. برای این منظور، زمان واکنش برای سه حالت  $C/T=0/25$ ،  $C/T=0/5$  و  $C/T=0/75$  در سرعت چرخش‌های ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ دور بر دقیقه با سامانه PLIF اندازه‌گیری شد. نمودار (۹) نشان‌دهنده تأثیر فاصله پره از کف مخزن بر روی زمان اختلاط واکنشی خنثی‌سازی اسید- باز را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش ارتفاع پره از کف مخزن تأثیر مثبتی بر روی کاهش زمان واکنش دارد. الگوی جریان و سرعت‌های محوری برای هر سه فاصله پره از

کف مخزن در سرعت چرخش ۱۵۰ دور بر دقیقه با استفاده از فن PIV به دست آمده است.

برای  $C/T=0/25$  میزان آشفتگی و تلاطم سیال در قسمت فوقانی مخزن کم است، چون با توجه به شکل (۱۰) وقتی پره در ناحیه پایینی مخزن قرار می‌گیرد، جهت حرکت شعاعی سیال به طرف دیواره، بیشتر از جهت حرکت محوری سیال به طرف سطح آزاد سیال است. همچنین به دلیل فاصله زیاد محلول تزریقی تا پره کم‌ترین تأثیر اختلاط بر زمان واکنش شیمیایی در این فاصله از کف مخزن مشاهده می‌شود.



شکل ۹. زمان واکنش در موقعیت‌های مختلف پره ( $N=100-200\text{rpm}$ ,  $C/T=0/25-0/75$ ,  $\mu=35\text{mPa}\cdot\text{s}$ ).



شکل ۱۰. الگوی جریان و سرعت‌های محوری ( $N=150\text{rpm}$ ,  $C/T=0/25$ ,  $r=10-35\text{mm}$ ).



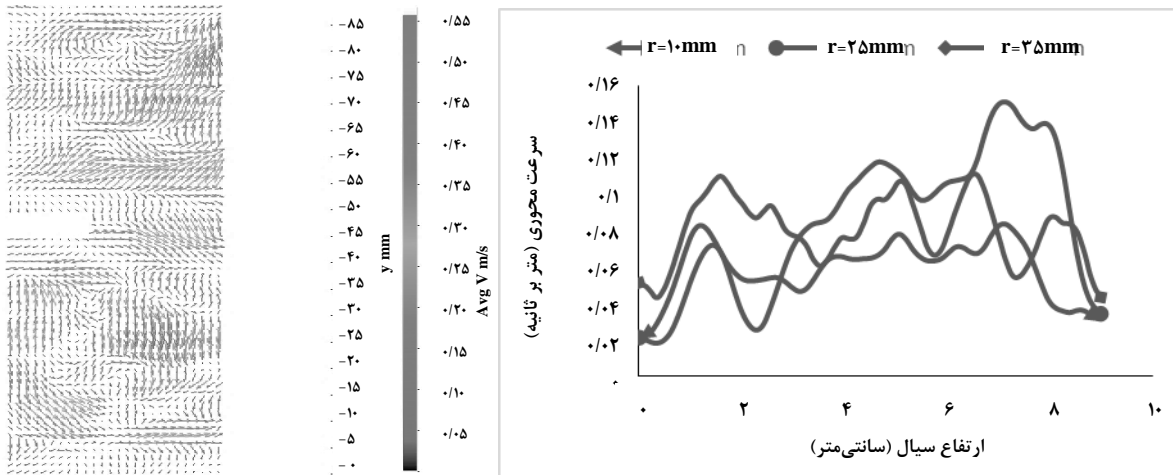
مؤلفه‌های محوری سرعت در نیمه بالایی مخزن بیشتر از نیمه پایینی است و با حرکت سیال به سمت کف مخزن، سرعت مؤلفه‌های محوری کاهش می‌یابد، بنابراین می‌توان گفت: کیفیت اختلاط در ناحیه بالایی مخزن نسبت به بقیه نقاط بیشتر است.

### ۳-۲ تأثیر سرعت چرخش پره

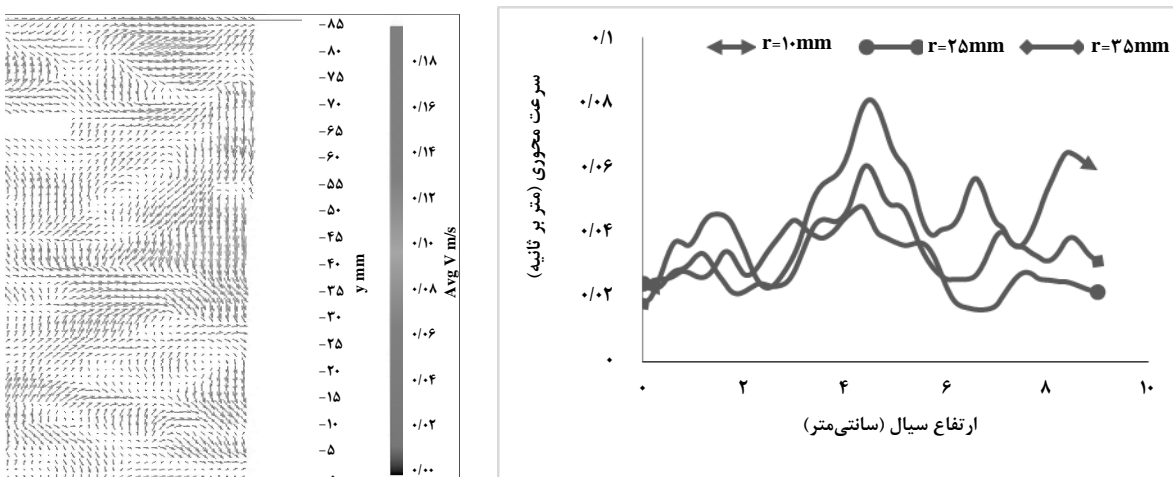
سرعت چرخش پره مهم‌ترین و تأثیرگذارترین مؤلفه بر زمان اختلاط است؛ به طوری که افزایش سرعت چرخش پره در هر شرایطی اعم از نقاط مختلف تزریق ماده ردیاب و نوع پره باعث کاهش زمان اختلاط می‌شود.

با توجه به شکل (۱۱) برای  $C/T=0/5$  به دلیل افزایش سرعت مؤلفه‌های محوری حرکت سیال، حلقه‌های اختلاط در قسمت فوقانی و تحتانی، شکل کامل‌تری گرفته‌اند که باعث افزایش آشفته‌گی و تلاطم سیال شده‌است، بنابراین کیفیت اختلاط بهبود می‌یابد.

در فاصله  $C/T=0/75$  بیشترین آشفته‌گی و ایجاد تلاطم در نیمه بالایی مخزن، در ناحیه اطراف پره است، به دلیل کاهش فاصله پره از نقطه تزریق به محض تزریق، محلول با بیشترین آشفته‌گی درون مخزن پخش می‌شود و اختلاط بیشترین تأثیر را بر روی زمان واکنش شیمیایی دارد، بنابراین واکنش در زمان کمتری پایان می‌پذیرد. در این حالت با توجه به نمودار شکل (۱۲) سرعت



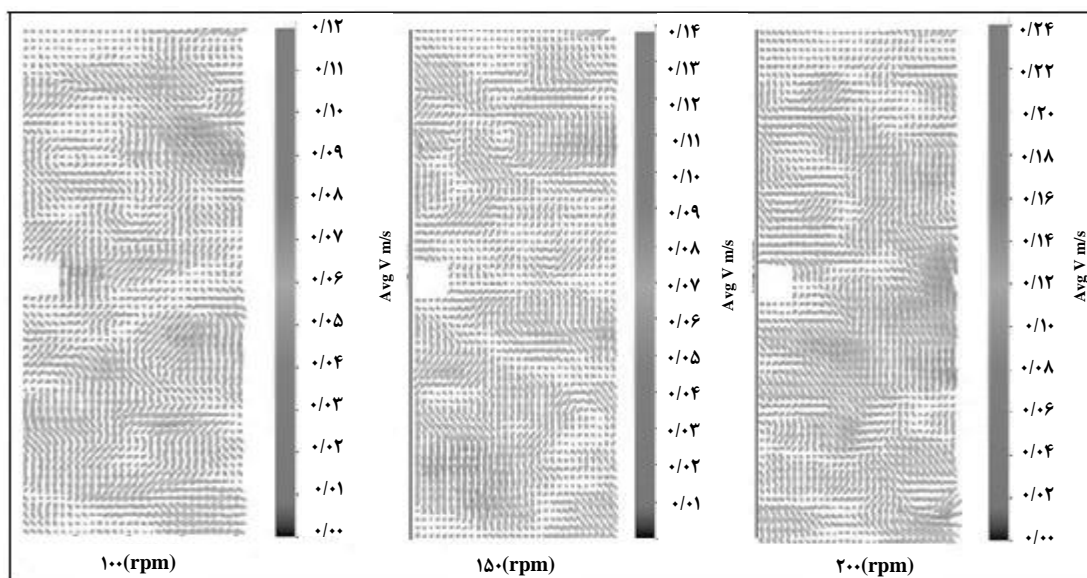
شکل ۱۱. الگوی جریان و سرعت‌های محوری ( $N=150 \text{ rpm}$ ,  $C/T=0/5$ ,  $r=10-35 \text{ mm}$ ).



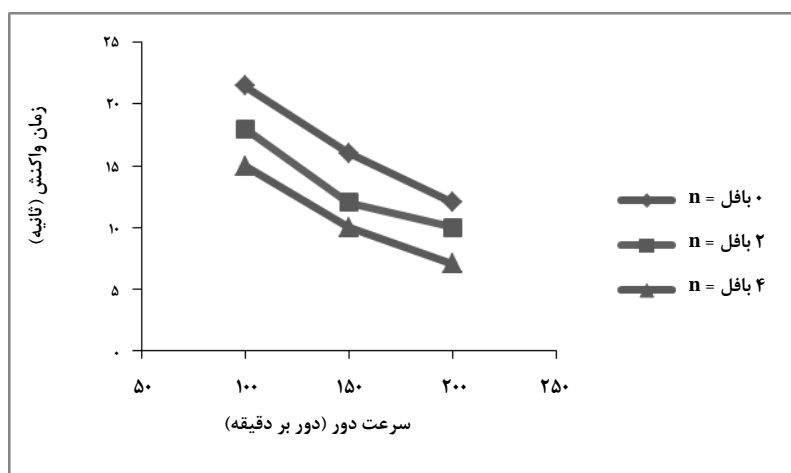
شکل ۱۲. الگوی جریان و سرعت‌های محوری ( $N=150 \text{ rpm}$ ,  $C/T=0/75$ ,  $r=10-35 \text{ mm}$ ).

با توجه به شکل (۱۳) می‌توان گفت با افزایش سرعت چرخش پره، سرعت مؤلفه‌های شعاعی و محوری سیال افزایش یافته، همچنین تمایل تبدیل مؤلفه‌های شعاعی به مؤلفه‌های محوری که مؤلفه‌های قوی‌تر برای ایجاد آشفتگی در سیال هستند بیشتر می‌شود، در نتیجه حلقه‌های بیشتر و کامل‌تری درون سیال به وجود می‌آید که باعث گردش بیشتر سیال و کاستن زمان اتمام واکنش می‌شود.

نمودار شکل (۹) تأثیر همزمان سرعت چرخش پره و فاصله پره از کف مخزن را بر زمان اتمام واکنش خنثی‌سازی اسید- باز نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودارها مشخص است با افزایش سرعت چرخش پره، زمان واکنش کاهش می‌یابد؛ اما با افزایش سرعت چرخش پره، اندازه حلقه‌ها کوچک‌تر و تأثیر نیروی گرانشی بیشتر می‌شود؛ در نتیجه اتلاف انرژی افزایش می‌یابد، به همین دلیل سرعت چرخش در دوره‌های پایین نسبت به دوره‌های بالا تأثیر بیشتری بر اختلاط دارد.



شکل ۱۳. الکوی جریان ( $N=100-200\text{ rpm}$ ,  $C/T=0.5$ ,  $\mu=35\text{mPa}\cdot\text{s}$ ).



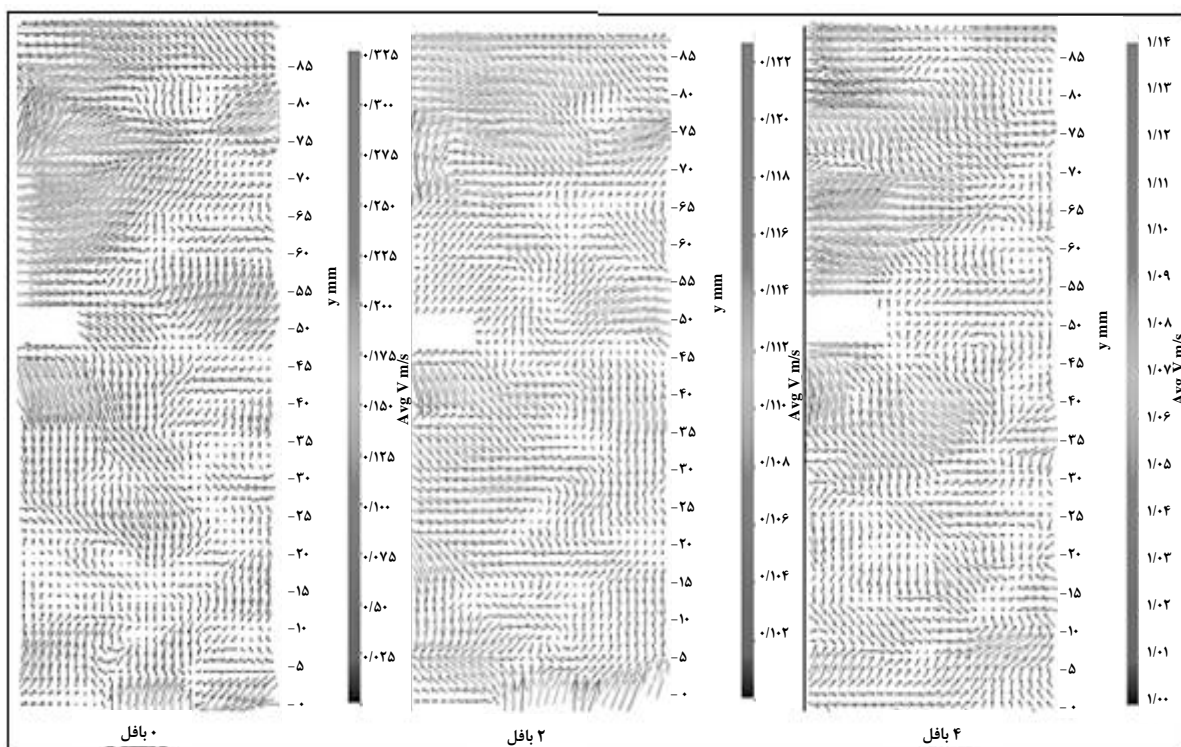
شکل ۱۴. نمودار زمان واکنش با افزایش بافل ( $N=100-200\text{ rpm}$ ,  $C/T=0.5$ ,  $n=0-4\text{ baffle}$ ).

## ۳-۳ تأثیر افزایش بافل

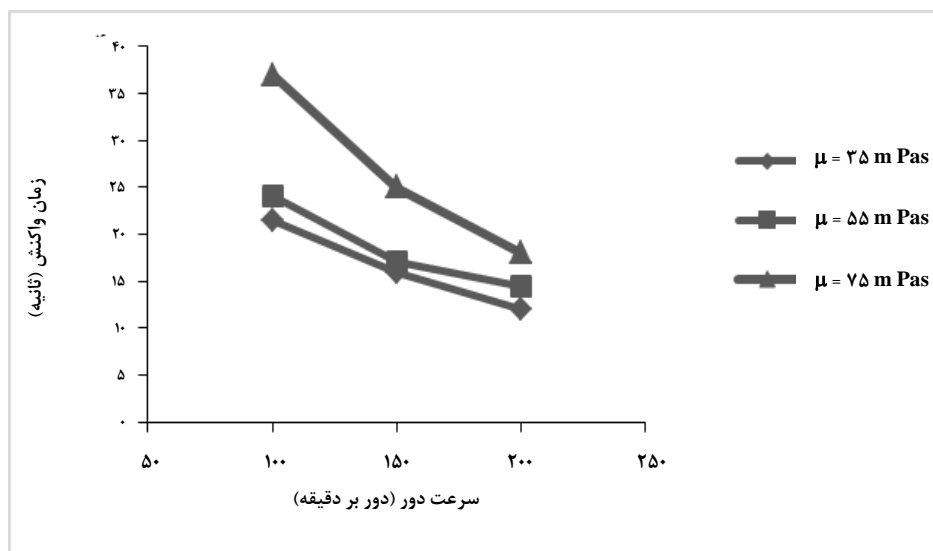
بافل‌ها با شکستن خطوط جریان مماسی که برای اختلاط نامطلوب هستند و تبدیل آن‌ها به جریان‌های محوری و شعاعی، آشفتگی سیال را افزایش می‌دهند و بازدهی اختلاط را بهبود می‌بخشند. شکل (۱۴) تأثیر افزایش بافل بر زمان واکنش در  $C/T=0/5$  را نشان می‌دهد. افزایش تعداد بافل باعث افزایش کیفیت اختلاط و در نتیجه کاهش زمان واکنش شیمیایی می‌شود. باتوجه به شکل (۱۵) با افزایش بافل درون مخزن، الگوی جریان در جهت محوری تغییرات چشمگیری می‌یابد به طوری که آشفتگی لازم برای اختلاط هرچه بیشتر واکنش‌دهنده‌ها تأمین می‌شود. تصاویر حاصل از PIV نشان می‌دهند که با افزایش تعداد بافل، میانگین سرعت کل کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که از  $0/325$  متر بر ثانیه برای مخزن بدون بافل به  $0/14$  متر بر ثانیه برای مخزن چهار بافل می‌رسد. اما این کاهش سرعت در جهت شعاعی انجام می‌شود و در جهات دیگر وجود بافل سبب تشدید سرعت سیال می‌شود و نواحی با سرعت بالا در سطح وسیع‌تری از مخزن پخش می‌شوند که باعث آشفتگی و درهم رفتن لایه‌های سیال و افزایش انتقال جرم می‌شود.

## ۳-۴ تأثیر افزایش گرانروی سیال

برای بررسی تأثیر گرانروی سیال بر روی اختلاط و واکنش شیمیایی همراه آن، گرانروی مایع با اضافه کردن گلیسیرین به محلول درون مخزن از  $35 \text{ mPa.s}$  تا  $75 \text{ mPa.s}$  افزایش پیدا کرده است. مطابق شکل (۱۶) افزایش گرانروی زمان واکنش را افزایش می‌دهد، به طوری که در گرانروی کمتر از  $55 \text{ mPa.s}$  تغییرات زمان اتمام واکنش با تغییرات گرانروی مایع سریع رخ می‌دهد و پس از آن با افزایش گرانروی زمان واکنش برای هردور پره افزایش چشمگیری داشته است. علت این افزایش زمان واکنش آن است که افزایش گرانروی باعث کاهش عدد رینولدز اختلاط می‌شود؛ به عبارت دیگر با افزایش گرانروی، انرژی جنبشی سیال کاهش می‌یابد، در نتیجه هم‌خوردگی و اختلاط مایع سخت‌تر می‌شود و محلول تزریقی اسید و ردیاب فلورسین سدیم دیرتر به همه نواحی درون مخزن می‌رسد.



شکل ۱۵. الگوی جریان با افزایش بافل (N=150 rpm, C/T=0/5, n=0-4baffle).



شکل ۱۶. نمودار زمان واکنش با افزایش گرانشی سیال ( $N=100-200 \text{ rpm}$ ,  $C/T=0/5$ ,  $\mu=35-75 \text{ mPa.s}$ )

#### ۴. نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق آزمایشگاهی اختلاط واکنشی خنثی‌سازی اسید- باز در یک سامانه اختلاط از نوع مخزن همزن‌دار برای بررسی اثر اختلاط بر واکنش شیمیایی سریع با استفاده از روش لیزری PLIF/PIV مطالعه شد؛ نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که کیفیت اختلاط بستگی به شرایط فیزیکی مخزن و پره، خاصیت روانه‌شناختی سیال و نوع الگوی جریان ایجاد شده در مخزن دارد. برای واکنش سریع مانند اسید- باز، اختلاط جنبش‌شناسی و بازده شیمیایی واکنش را تعیین می‌کند و هرچه کیفیت اختلاط بهبود یابد، واکنش در زمان کمتری به پایان می‌رسد. افزایش سرعت چرخش پره به‌عنوان مؤثرترین مؤلفه بر اختلاط در هر شرایطی اعم از نقاط تزریق، خاصیت روانه‌شناختی سیال و موقعیت قرارگیری پره در مخزن باعث کاهش زمان واکنش می‌شود. بهترین نوع اختلاط برای فاصله پره از کف مخزن در حالت  $C/T=0/5$  است، اما کمترین زمان واکنش در حالت  $C/T=0/75$  به دلیل فاصله کمتر پره از نقطه تزریق است. وجود بافل با شکستن خطوط جریان مماسی که مؤلفه‌های نامطلوب برای اختلاط هستند، زمان واکنش شیمیایی را کاهش می‌دهد. افزایش گرانشی، عدد رینولدز اختلاط را کاهش می‌دهد؛ به عبارتی انرژی جنبشی ذرات را کاهش می‌دهد و آشفتگی مایع کمتر می‌شود؛ در نتیجه زمان واکنش افزایش می‌یابد.

#### مراجع

- [1] Xiaoxia, X., Feng, Z. S., "Numerical simulation of reactive mixing process in a stirred reactor with the DQMOM-IEM model". *chemical engineering journal*, (2018).
- [2] Faes, M., Glasmacher, B., "Measurements Of Micro-And Macromixing In Liquid Mixtures Of Reacting Components Using Two-Colour Laser Induced Fluorescence". *Chemical Engineering Science*, (2008).
- [3] Cui, Y., Zhang, H., Li, X., Yang, M., "Computational and experimental investigation of laminar flow mixing system in a pitched – blade turbine stirred tank". *Int J Agric & boil eng*, (2018).
- [4] Aydin, O., Yapici, S., "A method for measurement of mixing time; A new application of electrochemical limiting diffusion current technique". *Experimental thermal and Fluid Science*, (2018).
- [5] Cheng, D., Feng, X., Cheng, J., Yang, C., "Experimental study on the dispersed phase macro-mixing in an immiscible Liquid-liquid stirred reactor". *Chemical Engineering Science*, (2015).
- [6] Thakur, S., Chauhan, M. S., "Removal of Malachite green dye from aqueous by Fenton Oxidation". *International Research Journal of Engineering and Technology*, (2016).
- [7] Chang, G., Peng, J., Yu, X., "Visualization study on vortex structure over an airfoil using planar laser induced fluorescence". *International Journal for rapid communication*, (2018).

- [8] Lozano, A., Yip, B., "Acetone: a tracer for concentration measurement in gaseous flows by planar laser induced fluorescence". *Experimental in Fluids*, (1992).
- [9] Cruyningen, I. V., Lozano, A., Hanson, R. K., "Quantitative imaging of concentration by planar laser induced fluorescence". *Experimental in Fluids*, (1990).
- [10] Cetegen, B. M., Mohamad, N., "Experiments on liquid mixing and reaction in a vortex". *Mechanical Engineering Department*, (1992).
- [11] Gaskey, S., Vacus, P., David, R., "A method for turbulent mixing using fluorescence spectroscopy". *Experimental in Fluids*, (1990).
- [12] Andre, C., David, R., Andre, J. C., Villermaux, J., "A New Fluorescence Method for measuring cross-fluctuations of two Non- reactive Component in a mixing Device". *Chem. Eng. Techhnol*, (1992).
- [13] Houcine, I., Vivier, H., Plasari, E., David, R., "Planar laser induced fluorescence technique for measurements of concentration fields in continuous stirred tank reactors". *Experiments in Fluids*, (1996).
- [14] Distelhoff, M. F. W., Marquis, A. J., "Scalar Mixing Measurement in batch operated stirred tank". *Chemical Engineering*, (1997).
- [15] Guillard, F., "Mixing patterns in rushton-tuorbine-agitated reactors". *Lund University Publication*, (2003).
- [16] Fall, A., Lecoq, O., David, R., "Chaaracterization of mixing in a stirred tank by planar laser induced fluorescence (PLIF) ". *Institution of chemical engineers*, (2001).
- [17] Hall, J. F., Barigou, M., Simmons, M. J. H., "Mixing in Unbaffled High-Throughput Experimentation Reactors". *Ind. Eng. Chem*, (2004).
- [18] Chung, K. H. K., Barigou, M., "Reconstruction of 3-D field inside miniature stirred vessels using A 2-D PIV Technique". *Departement of Chemical Engineering*, (2007).
- [19] Moghaddas, J.S., "An Experimental study of fluid dynamics and mixing in bubbly gas-liquid flow systems". *Lund University Publication*, (2004).
- [20] Zadghaffari, R., Moghaddas, J. S., Revstedt, J., "A mixing study in a double- rushton stirred tank". *Computers and Chemical Engineering*, (2009).
- [21] Collignon, M. L., Dossin, D., "Quality of mixing in a stirred bioreactor used for animal cells culture: heterogeneities in a lab scale bioreactor and evolution of mixing time with scale up". *Biotechnol. Agron. Soc . environ*, (2010).
- [22] Busciglio, A., Grisafi, F., Ippolito, F., "mixing time in unbaffled stirred tank". *European Conference on mixing Warszawa*, (2012).
- [23] Jordan, L. E., Amaro, A., "Introducing the planar laser- induced fluorescence techniqu (PLIF) to measure mixing time in gas- stirred ladles". *The minerals, Metal & Materials Society*, (2019).
- [24] Sancho, I., Varela, S., Vernet, A., Pallares, J., "Characterization Of The Reacting Laminar Flow In a Cylindrical Cavity With a Rotating Endwall Using Numerical Simulations And a Combined PIV/PLIF Technique". *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, (2016).
- [25] Ibarra, R., Zadrazil, I., "Dyanamics of Liquid-Liquid flows in a horizontal pipes using simultaneous two-line planar laser-induced fluorescence and particle velocimetry". *Multiphase Flow*, (2017).
- [26] Ascacanio, G., "mixing time in stirred vessel; A reviw of expermental techniques". *Chmical Engineering*, (2015).
- [27] Jordan, L. E., Rivera, C. G., Ramirez, M. A., "Effect of model size and water chemical composition on mixing time measurments using PLIF in a gas stirred ladle". *Sciences Technology Conference*, (2019).