

بررسی زمان اختلاط در یک مخزن اختلاط از نوع توربین راشتون

فیروز فاخری^۱، جعفر صادق مقدس^{۲*}

تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات پدیده‌های انتقال، صندوق پستی ۱۹۹۶ - ۵۱۳۳۵

چکیده: زمان اختلاط یک پارامتر قابل مقایسه برای بررسی بازده سامانه‌های اختلاط می‌باشد. در این پژوهش پارامترهای مهم تأثیرگذار (سرعت چرخش همزن و حضور فاز گاز) بر زمان اختلاط در یک مخزن اختلاط توربینی از نوع راشتون مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به نتیجه‌های به دست آمده، زمان اختلاط با افزایش سرعت چرخش همزن کاهش می‌یابد و تأثیر حضور فاز گاز بر زمان اختلاط وابسته به سرعت چرخش همزن می‌باشد. همچنین در این پژوهش نتیجه‌های به دست آمده با استفاده از روش هدایت‌سنجی با مقادیرهای به دست آمده از روش لیزری (PLIF) توسط مقدس مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتیجه‌ی این مطالعه نشان داد که نتیجه‌های به دست آمده از روش هدایت‌سنجی توافقی بسیار مناسبی با روش PLIF دارد. به همین دلیل روش هدایت‌سنجی می‌تواند به عنوان یک روش کم هزینه، دقیق و ساده جایگزین روش‌های گران شود. از طرفی چون در مقیاس بزرگ از سامانه‌های اختلاط، استفاده از معادله‌ها و فرمول‌ها نتیجه دقیقی را نخواهد داد و از طرفی تعداد روابط موجود برای مقیاس‌های بزرگ محدود می‌باشد، در نتیجه در این پژوهش برای پیش‌بینی زمان اختلاط از یک مدل کامپارتمان شش ناحیه‌ای استفاده شده است. نتیجه‌های به دست آمده از مدل کامپارتمان ارایه شده با اندازه‌گیری‌های تجربی صورت گرفته توافقی بسیار مناسبی در این پژوهش داشت.

واژه‌های کلیدی: زمان اختلاط، توربین راشتون، هدایت‌سنجی، مدل کامپارتمان

KEY WORDS: Mixing time, Rushton turbine, Conductivity, Compartment model.

مقدمه

مخلوط‌های امتزاج‌پذیر، واکنش‌های گاز - مایع، پراکندگی مایع در مایع و توزیع گاز در مایع کاربرد گسترده‌ای دارند [۳، ۲]. در طراحی سامانه‌های اختلاط، آگاهی از دینامیک جریان و مشخصه‌های هیدرودینامیکی (زمان اختلاط، توان مصرفی، الگوی جریان و ...) نقش به‌سزایی در افزایش بازده و سوددهی یک فرایند عملیاتی دارد. یکی از مشخصه‌های مهم هیدرودینامیکی در ارتباط با طراحی یک اختلاط بهینه، زمان اختلاط می‌باشد. زمان اختلاط

اختلاط یکی از فرایندهای بسیار مهم در واحدهای عملیاتی می‌باشد و در بسیاری از صنایع همچون نفت، پتروشیمی، غذایی، دارویی و غیره که فرایندهای فیزیکی و شیمیایی را شامل می‌شود، کاربرد وسیعی دارد [۲، ۱]. از بین سامانه‌های اختلاط، مخازن همزن‌دار به خاطر تنوع نیازهای فرایندی و همچنین تحقق اهداف مربوط به عملیات خاص به طور گسترده در فرایندهای شیمیایی و بیوشیمیایی برای انجام عملیات‌های گوناگونی از جمله همگن کردن

*E-mail: Jafar.Moghaddas@sut.ac.ir

*عهده دار مکاتبات

• نشانی دیگر: تهران، سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور

اندازه‌گیری ماده ردیاب در هر لحظه به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد [۳، ۱].

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (C_i' - 1)^2 \quad (2)$$

که C_i' ، غلظت نرمال شده در لحظه t و n تعداد نقطه‌های نصب سنسور هدایت‌سنج می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است می‌توان از لگاریتم تغییرهای غلظت واریانس بر حسب زمان به دلیل راحتی در استخراج زمان اختلاط و کاهش خطای انسانی برای اندازه‌گیری زمان اختلاط استفاده نمود. نقطه پایان آزمایش از تماس منحنی لگاریتم تغییرهای واریانس با خط $\log(\sigma^2) = -2.6$ به دست می‌آید. در واقع این خط، ۹۵ درصد تغییرهای غلظت نرمال شده می‌باشد که مقدار عددی آن برای درجه همگن شدن ۹۰ و ۹۹ درصد به ترتیب برابر با $\log(\sigma^2) = -2$ و $\log(\sigma^2) = -4$ می‌باشد. در شرایطی که سامانه در حالت تک فازی مایع - مایع مورد بررسی قرار گیرد، همان‌گونه که شکل ۱ نشان داده شده است زمان اختلاط ۹۵ درصد در حالتی که همزن با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه در حال چرخش باشد، برابر با ۱۰/۸ ثانیه خواهد بود. این مقدار برای ۹۰ و ۹۹ درصد همگن شدن به ترتیب ۸/۹ و ۱۱/۴ ثانیه می‌باشد.

در فناوری PLIF با نورانی کردن ذره‌های ماده ردیاب اضافه شده به جریان سیال توسط صفحه روشنی از نور لیزر، می‌توان مشخصه‌های سیال را مورد بررسی قرار داد. تصویرهای نورانی به دست آمده از جریان با استفاده از یک دوربین شارژ همزمان (CCD)^(۵) که دارای سلول‌های حساس به نور است و بسته به شدت نور دریافتی و تناژهای گوناگونی را تولید می‌کنند در جهت تعیین کیفی ساختار جریان و یا تجزیه کیفی توزیع غلظت می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. دو پالس پیاپی از نور لیزر، پرتوی به طول موج ۵۳۲ نانومتر ایجاد می‌کند، که پس از عبور از یک عدسی مقعر پرتو نور دو بعدی به ضخامت ۲ میکرومتر تشکیل می‌شود. برای کاهش تأثیرهای ضریب شکست نور در سطح مخزن استوانه‌ای، سامانه اختلاط در یک مخزن با سطح مقطع مربعی قرار داده می‌شود. مقدس [۹] از فناوری کالیبراسیون سلول برای کالیبره کردن جریان سامانه استفاده نمود. در این روش هر سلول به صورت جداگانه

مدت زمان لازم برای رسیدن به یک درجه از همگن شدن دلخواه می‌باشد. درجه همگن شدن دلخواه در بازه ۹۰٪ تا ۹۹٪ است، که در این پژوهش درجه همگن شدن دلخواه ۹۵٪ غلظت نهایی تعریف شده است.

با توجه به اینکه مقادیرهای به دست آمده برای زمان‌های اختلاط به شدت متأثر از روش اندازه‌گیری، هندسه سامانه، حضور فاز گاز، تعریف زمان اختلاط، موقعیت تزریق ماده ردیاب^(۱) و ... می‌باشد، مقایسه زمان‌های اختلاط به دست آمده بین پژوهشگران گوناگون دشوار خواهد بود [۴]. به همین دلیل طراحی سامانه‌های اختلاط به صورت استاندارد انجام می‌شود. مقایسه‌ی صورت گرفته بین فناوری‌های رنگ‌سنجی و هدایت‌سنجی، نشان‌دهنده آن است که زمان اختلاط به دست آمده از روش هدایت‌سنجی بیشتر از روش رنگ‌سنجی خواهد بود [۵، ۴]. در این پژوهش زمان‌های اختلاط اندازه‌گیری شده با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی (روش‌های هدایت‌سنجی و القای دو وجهی نور فلئوئورسانس PLIF)^(۲) و مقادیرهای نظری و مدل ارایه شده مورد مقایسه قرار گرفته است.

در روش هدایت‌سنجی، پالسی از یک ماده ردیاب در یک زمان مشخص به حجم توده سیال تزریق می‌شود، که می‌توان تغییرهای ضریب محلی را به وسیله سنسورهای هدایت‌سنج نصب شده در مخزن اندازه‌گیری نمود. زمان اختلاط، مدت زمان لازم برای رسیدن به یک درجه از همگن شدن مطلوب تعریف می‌شود. اندازه همگن شدن به وسیله جمله‌هایی از درجه اختلاط بیان می‌شود [۸-۶]:

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

که در آن Y درجه همگن شدن می‌باشد، C_0 ، C_{∞} و C_i به ترتیب غلظت‌های اولیه و نهایی توده اختلاط شونده و غلظت لحظه‌ای می‌باشند. در شرایطی که اختلاط نسبی مدنظر باشد زمان به دست آمده در مکان‌های گوناگون اندازه‌گیری ماده ردیاب تغییر خواهد نمود از این رو زمان به دست آمده در این حالت زمان اختلاط محلی^(۳) خواهد بود. در نتیجه میانگین زمان‌های اختلاط محلی در n نقطه از حجم توده سیال زمان اختلاط فضایی یا کلی^(۴) را می‌دهد. از این رو غلظت واریانس برای نقطه‌های گوناگون

(۱) Tracer

(۲) Planar Laser-Induced Fluorescence

(۳) Local mixing time

(۴) Overall mixing time

(۵) Charge-Coupled Device

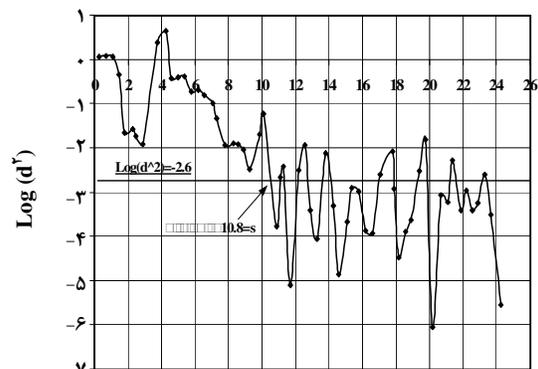
$$\theta_{\text{mix}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_{95}(i, j) \right] \quad (۴)$$

m و n به ترتیب نشان دهنده سطر و ستون‌های شبکه غلظت ماده ردیاب می‌باشد.

بخش تجربی و نظری سامانه آزمایشگاهی

شکل ۲ سامانه اختلاط آزمایشگاهی ساخته شده برای روش هدایت‌سنجی را نشان می‌دهد. هندسه سامانه اختلاط (اندازه‌های مخزن، تعداد و اندازه توربین، اندازه و تعداد سوراخ‌های پخش‌کننده گاز و ...) مورد استفاده در روش هدایت‌سنجی همانند مخزن به کار برده شده توسط مقدس در روش PLIF [۹] بود. مخزن ساخته شده به شکل استوانه بوده و بدنه مخزن اختلاط از جنس پلاستیک نورگذران^(۱) با قطر داخلی (T) ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد، و تا ارتفاع (H) ۵۴ سانتی‌متر از مایع پر شد. مخزن شامل دو پروانه توربینی از نوع راشتون به قطر ۱۰ سانتی‌متر ($D=T/3$) بوده که عرض و ارتفاع هر یک از تیغه‌های پروانه به ترتیب $L=D/4$ و $W=D/5$ می‌باشد. فاصله همزن پایینی از کف مخزن و از همزن بالایی به ترتیب $CI = 0.55T$ و $\Delta C = 0.7T$ بود. یک سامانه پخش‌کننده گاز به قطر ۷٫۵ سانتی‌متر با ۳۱ سوراخ در ۵ سانتی‌متری همزن پایینی نصب شده بود.

در این پژوهش ۵۰ میلی‌لیتر از یک الکترولیت (محلول سدیم کلرید) با غلظت ۱۰۰ گرم بر لیتر در سطح سیال به فاصله ۹٫۵ سانتی‌متری از دیواره به توده سیال داخل مخزن (آب شهر) تزریق می‌شد. برای اندازه‌گیری زمان اختلاط در شرایط دوفازی گاز - مایع هوا با شدت ۱۰۰ لیتر بر ساعت به سیال داخل مخزن اضافه می‌شد. همچنین از یک متناوب‌ساز^(۲) که خروجی آن به یک دستگاه کامپیوتر متصل بود برای کنترل سرعت چرخش پروانه استفاده شد. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، توسط یک نرم افزار که در محیط Lab view پردازش شده است دور همزن قابل تنظیم بوده و به واسطه آن پارامترهایی چون توان مصرفی همزن، آمپر، ولتاژ، فرکانس و فاکتور توان توسط نرم‌افزار محاسبه و مقدار آن در محیط Lab view نمایش داده می‌شد. مقادیرهای مربوطه به این پارامترها در هر لحظه نسبت به زمان در یک فایل به صورت اکسل^(۳) قابل ذخیره می‌باشند.



زمان اختلاط (ثانیه)

شکل ۱- زمان اختلاط با استفاده تجزیه واریانس.

با توجه با تغییرهای شدت نور لیزر در فاصله‌های گوناگون کالیبره می‌شود. یک معادله‌ی خطی بین شدت تشعشع تابیده شده و غلظت ماده ردیاب در غلظت‌های پایین وجود دارد. هر یک از داده‌های اطلاعاتی به طور میانگین از ۵۰۰ تصویر گرفته شده توسط دوربین CCD تشکیل شده است. رودامین^(۱) ۵۹۰ به علت اینکه به خوبی در آب حل می‌شود و خاصیت فلوروسانس کنندگی خوبی دارد به عنوان ماده ردیاب با غلظت ۰٫۲ گرم بر لیتر و شدت جریان ثابت ۱٫۶۷ میلی‌لیتر بر ثانیه در مدت زمان ۱٫۵ ثانیه به توده سیال داخل مخزن تزریق شده است. تغییرهای سیگنال ماده ردیاب با زمان برای اندازه‌گیری غلظت سلول در سطح مورد نظر داخل مخزن اختلاط مورد استفاده قرار می‌گیرد. اختلاط ۹۵٪ زمانی به دست خواهد آمد که غلظت ماده ردیاب در هر سلول ۹۵٪ غلظت نهایی سیال داخل مخزن باشد، در این حالت درجه همگن شدن را می‌توان به صورت معادله زیر تعریف نمود [۹، ۱۰]:

$$Y = \frac{C_{\infty} - C(i, j, t)}{C_{\infty} - C_0} \quad (۳)$$

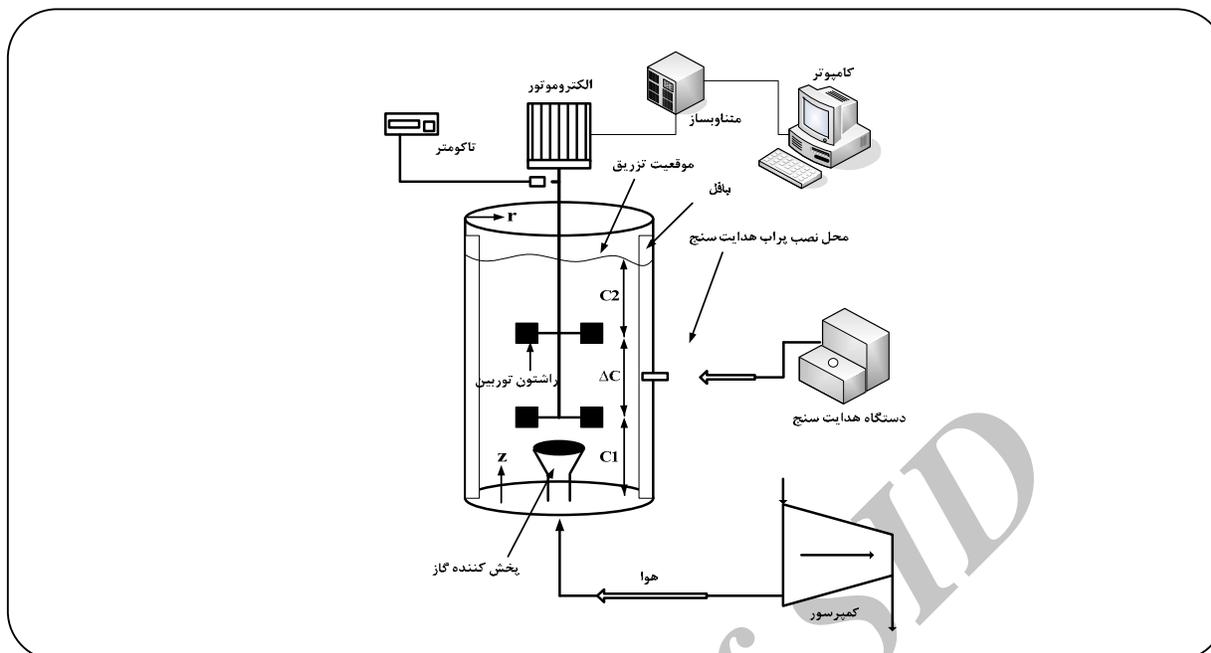
$C(i, j, t)$ نشان دهنده غلظت ماده ردیاب در موقعیت‌های شعاعی (i) و محوری (j) در هر لحظه از زمان می‌باشد. زمان‌های اختلاط به دست آمده برای هر سلول اندکی نسبت به سلول دیگر متفاوت خواهد بود، به همین علت مقدار UR_c برای همه سلول‌ها اندازه‌گیری می‌شود. میانگین زمان‌های اختلاط از معادله (۴) قابل محاسبه می‌باشد [۹]:

(۱) Rhodamine

(۲) Plexiglass

(۳) Inverter

(۴) Excel



شکل ۲- شمای سامانه آزمایشگاهی

برای انتقال ماده ردیاب در سراسر حجم مخزن دخالت دارند. این عمل‌ها عبارتند از جریان‌های چرخشی در بالا و پایین پروانه (اگر پروانه از نوع توربین راشتون باشد)، جریان تبدالی بین ناحیه‌های مجاور یک همزن با نواحی مجاور همزن بعدی در یک مسیر محوری که جریان بین منطقه‌ای یا تبادل محوری نام دارد و همچنین جریان ماریچ حباب‌های هوا که باعث به وجود آمدن یک الگوی جریان عمودی به نام جریان القایی شده که ناشی از حضور فاز گاز در مایع می‌باشد.

اندازه‌گیری پارامترهای مدل جریان چرخشی^(۶) (QCF)

جریان‌های چرخشی ایجاد شده در بالا و پایین پروانه توربین راشتون به وسیله جریان مایع پمپ شده توسط همزن اندازه‌گیری می‌شوند. با اندازه‌گیری تغییرهای سرعت شعاعی در جهت جت خروجی از توربین و انتگرال‌گیری از این تغییرهای نسبت به سطح متقابل، نرخ جریان حجمی (ظرفیت پمپاژ^(۷)) که توربین را ترک می‌کند قابل اندازه‌گیری خواهد بود [۱۵ - ۱۳].

مدل‌های تقریبی

برای بررسی رفتار هیدرودینامیکی یک سامانه اختلاط به غیر از روش‌های تجربی می‌توان از روش‌های دیگری نیز استفاده نمود که در اساس بر پایه مباحث نظری بوده و از روش‌های تجربی به همراه آن می‌توان برای اندازه‌گیری زمان اختلاط استفاده کرد. از بین مدل‌های ارائه شده می‌توان به مدل کامپارتمان^(۱)، مدل چرخشی^(۲)، مدل نفوذ گردابه‌ای^(۳)، مدل شبکه‌ای مناطق^(۴)، مدل دینامیک سیال‌های محاسباتی^(۵) اشاره نمود. این مدل‌ها بر اساس سه مکانیزم نفوذ ملکولی، نفوذ ادی‌ها و جابه‌جایی توده سیال تعریف می‌شوند [۱۲، ۱۱].

مدل کامپارتمان

زمانی که یک ماده ردیاب با غلظت و حجم مشخصی به توده سیال اضافه می‌شود عملیات صورت گرفته برای انتقال ماده ردیاب در سراسر حجم مخزن از نوع جابه‌جایی توده سیال خواهد بود. یعنی به عبارتی اختلاط در مقیاس ماکروسکوپی انجام خواهد شد. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، عامل‌های گوناگونی

(۱) The Compartment Model

(۲) The Circulation Model

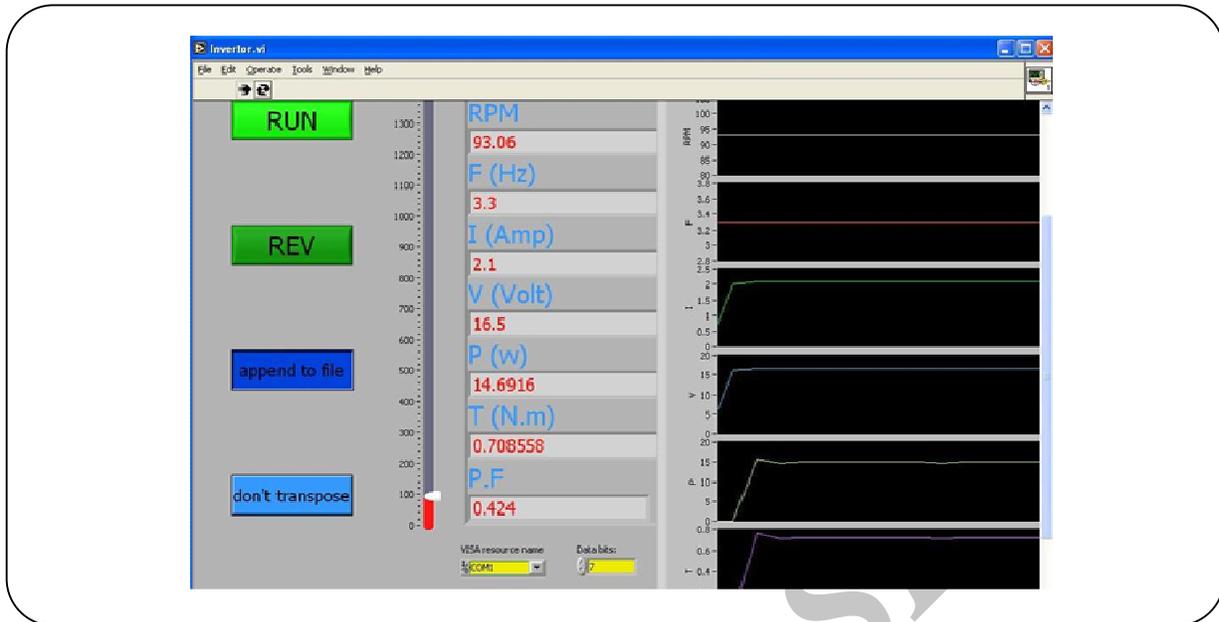
(۳) The Eddy Diffusion Model

(۴) The Zone Network Model

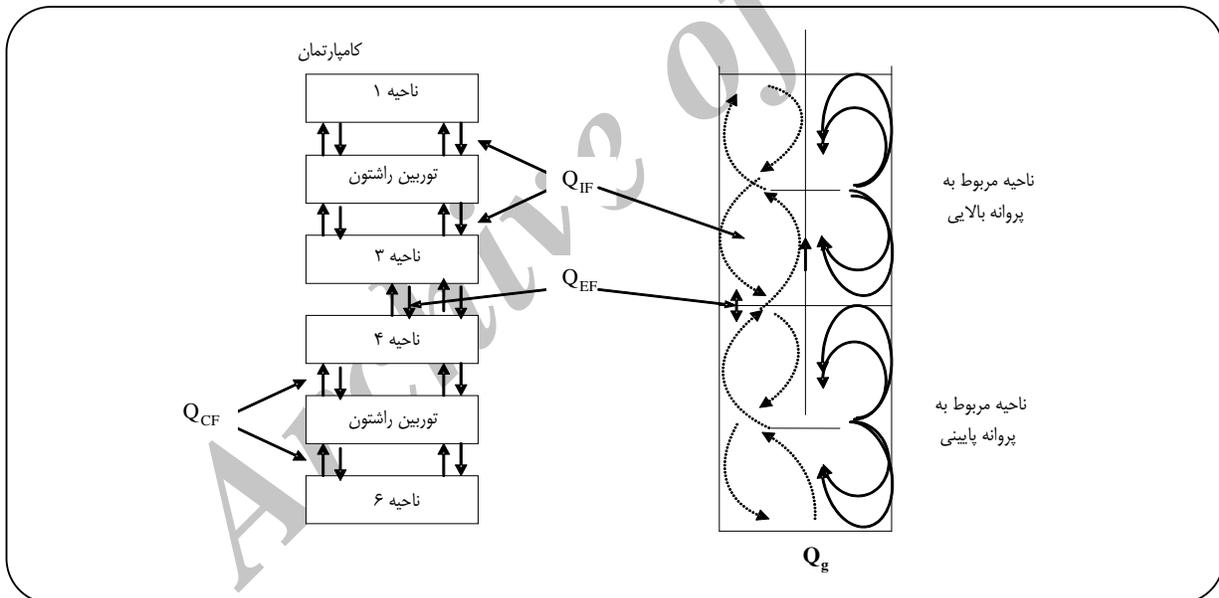
(۵) The CFD Model

(۶) Circulation flow

(۷) Pumping capacity



شکل ۳- تصویری از نرم افزار مورد استفاده در محیط Lab view.



شکل ۴- شمایی از چگونگی تقسیم‌های مربوط به مدل کامپارتمان و پارامترهای جریان تأثیر گذار بر این نواحی.

$$K_p = 6,2(W/D)(D/T)^2 \quad (۶)$$

در معادله بالا، W ارتفاع همزن می‌باشد. در بررسی‌های آزمایشگاهی صورت گرفته توسط مقلس [۹] ظرفیت پمپاژ در حالت تک‌فازی مایع و دوفازی گاز-مایع با استفاده از فناوری PLIF در جدول ۱ نشان داده شده است.

$$Q_p = K_p N D^3 \quad (۵)$$

که در معادله بالا Q_p ظرفیت پمپاژ مایع، N سرعت چرخش همزن، D قطر همزن و K_p عدد جریان مایع می‌باشد. معادله‌های بسیاری برای اندازه‌گیری عدد جریان مایع وجود دارد [۱۳، ۱۴]:

$$\bar{u}' = \bar{u}'_z = K'_z N_p \sqrt{ND^3} (T^* H_i)^{-1/2} \quad (10)$$

در نتیجه برای شدت جریان بین منطقه‌ای خواهیم داشت:

$$\left\{ \begin{aligned} Q_{EF} = \bar{u}'_z \pi \left(\frac{T}{\rho}\right)^{1/2} = K'_z ND^3 \left[\left(\frac{T}{D}\right)^{1/2} \left(\frac{H_i}{D}\right)^{-1/2}\right] \\ K'_z = \pi K'_z N_p \sqrt{ND^3} / 4 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (11)$$

$$Q_{EF} = K_{EF} ND^3$$

بر پایه نتیجه‌های به‌دست آمده برای سامانه‌های همانند مقدار K'_z برابر ۰/۵۹ گزارش شده است. برای مخزن‌هایی به قطر ۰/۳-۰/۵ متر این مقدار توسط پژوهشگران دیگر در بازه‌ی ۰/۶-۰/۷ می‌باشد [۱۴، ۱۵]. همچنین برای محاسبه عدد بدون بعد جریان تبادل محوری (K_{EF}) می‌توان از معادله ارایه شده برای سامانه دو پروانه‌ای توربین راشتون استفاده نمود:

$$K_{EF} = b \frac{T}{D} \quad (12)$$

که برای مخزن‌های با اندازه کوچک و بزرگ مقدار ثابت b برابر ۰/۱۹۴ و ۰/۲۳۶ خواهد بود [۱۳، ۱۵].

جریان القایی^(۳) (QIF)

در نتیجه تغییرهای دانسیته محلی در طول هوادهی، یک جریان مایع اضافی در نواحی دور از پروانه ایجاد می‌شود. حرکت مارپیچ حباب‌های هوا باعث به وجود آمدن یک الگوی جریان عمودی شده که تقویت مکانیکی پارامترهای جریان را در پی دارد. این جریان مایع ایجاد شده وابسته به شدت جریان گاز (Q_G) بوده و در شدت‌های ثابت گازدهی تحت تأثیر شدت پمپاژ دوفازی گاز-مایع (Q_{PG}) قرار دارد [۱۴، ۱۵].

$$Q_{IF} = k \left(\frac{Q_G}{Q_{PG}} \right) \quad (13)$$

برای محاسبه زمان اختلاط نیاز به آگاهی از پارامترهای جریان می‌باشد. زمانی که سامانه در شرایط تک‌فازی مایع مورد بررسی قرار گیرد می‌توان از جمله جریان القایی در معادله‌های به‌دست آمده صرف نظر نمود. در این پژوهش به‌دلیل فراهم نبودن تجهیزات لیزری، قسمتی از اطلاعات از داده‌های مقدس [۹] و قسمت دیگری با استفاده از روابط ارایه شده توسط پژوهشگرانی چون ورابل^(۴) و واسکنسلوس^(۵) به‌دست آمده است [۱۳ - ۱۵].

جدول ۱- ظرفیت بی بعد پمپاژ در شرایط تک‌فازی و دوفازی برای سرعت‌های گوناگون چرخش همزن [۹].

دوفازی	تک‌فازی	سرعت چرخش همزن (دور بر دقیقه)
۰/۹۰	۰/۸۹	۲۲۵
۰/۸۶	۰/۸۷	۳۰۰
۰/۸۶	۰/۹۲	۴۰۰

به‌طور معمول شدت جریان چرخشی دو برابر ظرفیت پمپ کردن در جلوی پروانه در نظر گرفته می‌شود، که برای هر ناحیه میانگین شدت جریان‌های چرخشی برابر ۸۰٪ شدت جریان چرخشی در هر مسیر می‌باشد [۱۴، ۱۱].

$$Q_{CF} = K_{CF} ND^3 \quad (7)$$

$$K_{CF} = 2 \times 0.8 \times K_p = 1.2 K_p$$

جریان تبادل محوری^(۱) (QEF)

جریان تبدالی بین نواحی مجاور یک همزن با نواحی مجاور همزن بعدی در یک مسیر محوری، جریان بین منطقه‌ای یا تبادل محوری نام دارد. که این جریان توسط ریشه دوم میانگین حسابی سرعت‌های نوسانی در یک رژیم جریان آشفته به دست آمده از گردابه‌های کوچک، اندازه‌گیری می‌شود [۱۶، ۱۴، ۱۱].

$$\bar{u}' = (L_c \varepsilon)^{1/2}, \quad L_c = 0.8 AD \quad (8)$$

در این معادله، ε شدت اتلاف انرژی جنبشی توربولنسی و L_c مشخصه طول گردابه‌های کوچک می‌باشد. اتلاف توان از معادله زیر قابل اندازه‌گیری می‌باشد [۱۴]:

$$\varepsilon = \frac{\rho N_p N^3 D^5}{\pi \left(\frac{T}{\rho}\right)^{1/2} H_i \rho} \quad (9)$$

برای یک سامانه همانند، گویلارد^(۲) در سال ۱۹۹۹ میلادی با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقدار عدد توان را $N_p = 0.5$ محاسبه نمود، که در این پژوهش نیز از آن استفاده شده است [۱۷]. در معادله بالا ρ دانسیته مایع، H_i ارتفاع مایع مربوط به هر کامپارتمان و T قطر مخزن می‌باشد. با فرض جریان آشفته ایزوتروپیک، ریشه دوم میانگین حسابی سرعت نوسانی در امتداد محور برابر خواهد بود با [۱۴، ۱۱]:

(۱) Exchange flow

(۲) Guillard

(۳) Induced flow

(۵) Vrabel

(۶) Vasconcelos

جدول ۲- اطلاعاتی مربوط به پارامترهای مدل.

پارامترهای مدل (مترمکعب بر ثانیه)	۳۰۰ دور بر دقیقه	۴۰۰ دور بر دقیقه
Q_{CF} با استفاده از تکنیک PLIF مقدس [۹]	$۵,۲۲ \times 10^{-۳}$	$۷,۳۶ \times 10^{-۳}$
Q_{CF} با استفاده از رابطه (۵)	$۵,۳۴ \times 10^{-۳}$	$۷,۱۲ \times 10^{-۳}$
Q_{EF} با استفاده از رابطه (۱۱)	$۳,۱۵ \times 10^{-۳}$	$۴,۲ \times 10^{-۳}$
Q_{EF} با استفاده از رابطه (۱۲)	$۳,۵۴ \times 10^{-۳}$	$۴,۷۲ \times 10^{-۳}$

فرض اختلاط ایده آل

اختلاط واقعی

برای فرض اختلاط ایده آل در لحظه $t=0$ ثانیه اگر تزریق از سطح سیال انجام شود ناحیه ۱ سرشار از غلظت ماده ردیاب تزریق شده خواهد بود و غلظت نواحی دیگر صفر فرض می شود. با داشتن دانسیته و حجم ماده ردیاب تزریق شده می توان غلظت این ناحیه را محاسبه نمود. در اثر اعمال پارامترهای جریان، ماده ردیاب با گذشت زمان در ناحیه های دیگر توزیع می شود به طوری که از غلظت ناحیه ۱ کاسته شده و به ناحیه های دیگر اضافه می شود. تبادل جرم بین ناحیه های مجاور تا رسیدن به غلظت در حال تعادل ادامه خواهد داشت. برای فرض اختلاط واقعی از لحظه ای که ماده ردیاب به توده سیال درون مخزن تزریق می شود تحت تأثیر پارامترهای جریان قرار گرفته و توزیع می شود، یعنی در لحظه $t=0$ ثانیه غلظت در تمام نواحی برابر صفر خواهد بود که در واقع این حالت از اختلاط همان شرایط اختلاط آزمایشگاهی می باشد. پس از تزریق ماده ردیاب با دبی ۳×10^{-۵} متر مکعب بر ثانیه به ناحیه ۱ با فرض اینکه عمق تزریق به اندازه ای باشد که تأثیری بر ناحیه های دیگر نداشته باشد غلظت در این ناحیه با گذشت زمان افزایش یافته و به سبب جابه جایی حجم توده سیال در نواحی دیگر نیز افزایش غلظت دیده خواهد شد. افزایش غلظت در ناحیه های ۱ تا ۶ تا جایی که به مقدار پیک نهایی خود برسد ادامه خواهد داشت. مدت زمان لازم برای رسیدن به حد نهایی غلظت (C_{∞}) در ناحیه مورد نظر بستگی به شدت جریان پمپ کردن، موقعیت تزریق ماده ردیاب و محل نصب سنسور هدایت سنج دارد.

نتیجه ها و بحث

مدل کامپارتمان

با استفاده از مقادیر پارامترهای جریان موجود در جدول ۲

پارامترهای جریان به دست آمده با استفاده از اطلاعاتی جدول ۱ و همچنین معادله های گوناگون ارایه شده در این زمینه، در جدول ۲ نشان داده شده است.

معادله های حاکم برای هر منطقه از بالانس جرمی بین ناحیه های مجاور به دست آمده است. غلظت های جابه جا شده بین مناطق توسط حل عددی همزمان معادله های دیفرانسیلی معمولی با استفاده از رانگ کوتای مرتبه چهارم برای به دست آوردن زمان های اختلاط در هر موقعیت و درجه همگن شدن قابل محاسبه خواهد بود.

(۱۴) -جرم خروجی از کامپارتمان + تولید - مصرف = تجمع مقدار جرم ورودی به هر کامپارتمان

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = Q_{in} C_{in} + Q_{IF} C_r - Q_{IF} C_1 + Q_{CF} C_r - Q_{CF} C_1 \quad (15)$$

$$V_r \frac{dC_r}{dt} = Q_{CF} C_r + Q_{CF} C_1 - 2Q_{CF} C_r + Q_{IF} C_r + Q_{IF} C_1 - 2Q_{IF} C_r$$

$$V_r \frac{dC_r}{dt} = Q_{IF} C_f + Q_{IF} C_r - 2Q_{IF} C_r + Q_{EF} C_f - Q_{EF} C_r +$$

$$Q_{CF} C_r - Q_{CF} C_f$$

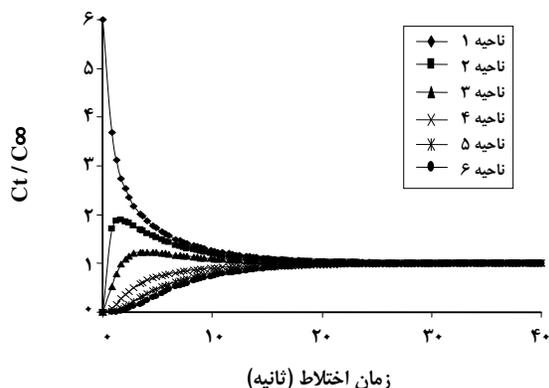
$$V_f \frac{dC_f}{dt} = Q_{IF} C_0 + Q_{IF} C_r - 2Q_{IF} C_f + Q_{EF} C_r - Q_{EF} C_f +$$

$$Q_{CF} C_0 - Q_{CF} C_f$$

$$V_0 \frac{dC_0}{dt} = Q_{CF} C_f + Q_{CF} C_0 - 2Q_{CF} C_0 + Q_{IF} C_f + Q_{IF} C_0 - 2Q_{IF} C_0$$

$$V_f \frac{dC_f}{dt} = Q_{IF} C_0 - Q_{IF} C_f + Q_{CF} C_0 - Q_{CF} C_f$$

در معادله های بالا V_i حجم مربوط به هر کامپارتمان C_i غلظت ماده ردیاب مربوط به هر کامپارتمان، C_{in} غلظت ماده ردیاب تزریق شده و Q_{in} دبی حجمی ماده ردیاب تزریق شده می باشد. اگر ماده ردیاب در یک نقطه خاص از سطح مایع تزریق شود دو حالت برای فرض اختلاط ماده ردیاب در سراسر حجم مخزن به وجود خواهد آمد.

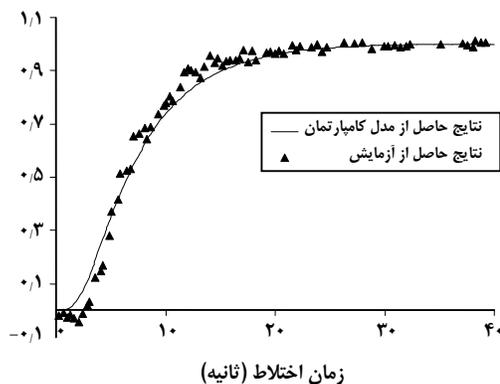


شکل ۶- تأثیر نقطه‌های گوناگون اندازه‌گیری غلظت بر زمان اختلاط.

منتقل شده و پس از توزیع غلظت در این ناحیه (توسط حلقه‌های جریان چرخشی مربوط به پروانه پایینی) دوباره توسط جریان تبادل محوری به ناحیه اندازه‌گیری غلظت برگشت داده می‌شود. از طرفی همین نتیجه برای سنسور ۳ و ۴ نیز درست می‌باشد با این تفاوت که به دلیل دور بودن محل تزریق ماده ردیاب از سنسور هدایت‌سنج مطابق شکل ۵، تغییرهای هدایت ماده ردیاب ملایم‌تر بوده و بدون ایجاد پیک تند خواهد بود. در شکل ۶ تغییرهای هدایت‌پذیری ماده ردیاب بر حسب زمان اختلاط در سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه با استفاده از مدل کامپارتمان به‌خوبی نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است در صورتی که درجه‌ی به نسبت بالایی از همگن شدن (۹۵٪ به بالا) مورد نظر باشد زمان اختلاط به‌دست آمده به تقریب مستقل از محل‌های اندازه‌گیری غلظت ماده ردیاب خواهد بود.

در جدول ۳ زمان‌های اختلاط به‌دست آمده در شرایط تک‌فازی با استفاده از مدل کامپارتمان با مقادیرهای تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌گونه که مشخص است استفاده از مدل کامپارتمان نتیجه‌های قابل قبولی را برای محاسبه زمان‌های اختلاط در مقایسه با مقادیرهای آزمایشگاهی می‌دهد. به گونه‌ای که میانگین انحراف از داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از مدل کامپارتمان در صورتی که اطلاعات‌های مربوط به پارامترهای جریان برای حل مدل در دسترس و دقیق باشند و همچنین نوع فرض اختلاط به گونه‌ای باشد که شرایط واقعی سامانه در مدل لحاظ شود، بسیار ناچیز خواهد بود.



شکل ۵- مقایسه منحنی تغییرهای غلظت ماده ردیاب بر حسب زمان با استفاده از نتیجه‌های آزمایشگاهی و مدل کامپارتمان.

محاسبه زمان اختلاط در دو سرعت ۳۰۰ و ۴۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. نتیجه به‌دست آمده توافق قابل قبولی با نتیجه‌های آزمایشگاهی داشت، به طوری که زمان‌های اختلاط کامپارتمانی به‌دست آمده از داده‌های مربوط به مقدس [۱] و معادله (۱۲) به نتیجه‌های آزمایشگاهی نزدیک‌تر بودند. همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، در سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه توافق بسیار مناسبی بین منحنی آزمایشگاهی به‌دست آمده به روش هدایت‌سنجی و مدل کامپارتمان وجود دارد، به طوری که این منحنی‌ها به طور کامل بر یکدیگر منطبق می‌باشند.

زمانی که ماده ردیاب از سطح مایع تزریق شود اگر سنسور هدایت‌سنج در منطقه یک قرار گرفته باشد بی‌درنگ بعد از تزریق ماده ردیاب مقدار بالایی از غلظت این ماده در منطقه یک تجمع خواهد کرد. بسته به سرعت چرخش همزن و محل قرار گرفتن سنسور هدایت‌سنج، حدود ۳ الی ۶ ثانیه بعد از تزریق ماده ردیاب پیک‌های بسیار بلندی برای مقادیرهای هدایت اندازه‌گیری شده ایجاد می‌شود. رفته رفته در اثر توزیع پیوسته غلظت ماده ردیاب در تمام مسیرهای چرخشی و شکستن توده بزرگ سیال به توده‌های کوچکتر، از شدت این پیک‌ها کاسته شده و سرانجام بعد از گذشت مدت زمانی دور یک غلظت خاص و یا به عبارتی هدایت یونی همگرا می‌شوند. برای وقتی که سنسور هدایت‌سنج در ناحیه ۱ جاگذاری شود اندازه‌گیری غلظت ابتدا از ناحیه مربوط به پروانه بالایی خواهد بود. در ادامه به تدریج غلظت‌های جابه‌جا شده توسط حلقه‌های جریان چرخشی مربوط به پروانه بالایی توسط جریان تبادل محوری به ناحیه مربوط به پروانه پایینی

جدول ۳- زمان‌های اختلاط با استفاده از روش‌های گوناگون اندازه‌گیری.

سرعت چرخش همزن (RPM)	تکنیک‌های اندازه‌گیری زمان اختلاط		
	مدل کامپارتمان	هدایت سنجی	PLIF [۹]
۲۰۰	-	۱۶٫۳	-
۳۰۰	۱۳٫۴	۱۰٫۸	۱۰٫۵
۴۰۰	۹٫۹	۹٫۳	۸٫۸
۵۰۰	-	۸٫۸	-
۶۰۰	-	۶٫۸	-

مقایسه زمان اختلاط

روش PLIF یک روش بسیار دقیق برای تهیه حجم زیادی از داده‌های غلظت در فضای کل سامانه نسبت به روش‌های نقطه‌ای همچون روش هدایت سنجی می‌باشد. اما یکی از محدودیت‌های روش PLIF این است که محتویات داخل مخزن باید شفاف بوده و قابلیت عبور دهی نور را داشته باشد. همچنین در شدت‌های بالای هوادهی این فناوری دقت و کارایی خود را از دست می‌دهد. در نتیجه در این پژوهش جایگزینی روش هدایت سنجی با روش PLIF به‌عنوان یک روش ساده و ارزان در اندازه‌گیری زمان اختلاط مورد بررسی قرار گرفته است. چنانچه که جدول ۳ نشان داده شده است، بررسی نتیجه‌های به دست آمده از روش هدایت سنجی و PLIF از مطابقت بسیار مناسب زمان‌های اختلاط به‌دست آمده با استفاده از این دو روش را نشان می‌دهد. به‌طوری که می‌توان روش هدایت سنجی را به‌عنوان یک روش ساده، کم هزینه و به نسبت دقیق، جایگزین روش PLIF نمود. با این حال، در ارتباط با تأثیر فاز گاز بر زمان اختلاط، استفاده از روش هدایت سنجی برای اندازه‌گیری زمان اختلاط نتیجه دقیق و قابل قبولی را نسبت به روش لیزری نخواهد داد. زیرا در این شرایط به علت حضور حباب‌های هوا در اطراف الکتروود هدایت‌سنج نقطه پایان آزمایش به علت نوسان‌های غلظت نهایی نامشخص بوده و زمان‌های اختلاط به‌دست آمده در شرایط یکسان آزمایش از تکرار پذیری مناسبی برخوردار نخواهند بود. در این پژوهش تا حد امکان برای کاستن از اثرهای نامطلوب حباب‌های هوا از یک غلاف مشبک در اطراف الکتروود هدایت‌سنج استفاده شده است. همان‌گونه که در جدول ۴ نشان داده شده است، نتیجه‌های به‌دست آمده برای شرایط تک‌فازی از تکرار پذیری مناسبی نسبت به شرایط دوفازی

برخوردار است. به‌طوری که میانگین زمان‌های اختلاط به‌دست آمده در این شرایط با مقدارهای به‌دست آمده از روش PLIF مطابقت بسیار مناسبی دارند.

یکی از هدف‌های اصلی در طراحی سامانه‌های اختلاط کمینه کردن رساندن زمان اختلاط مواد و یا فازهای اختلاط شونده می‌باشد. با توجه به طولانی بودن شفت، با افزایش سرعت چرخش همزن سامانه نوسان شدیدی خواهد کرد. از طرفی در سرعت‌های بالا، پدیده مکش هوا به داخل مخزن اتفاق خواهد افتاد، که در این صورت سامانه در شرایط دوفازی قرار گرفته و از تأثیر حباب‌های هوا بر زمان اختلاط نمی‌توان چشم‌پوشی نمود. در نتیجه اندازه‌گیری زمان اختلاط در سرعت‌های بالای ۶۰۰ دور بر دقیقه دقت کافی نخواهد داشت. همان‌گونه که قابل پیش‌بینی بود با افزایش سرعت چرخش همزن زمان اختلاط کاهش می‌یابد ولی از طرفی افزایش توان مصرفی سامانه را نیز در پی خواهد داشت. به دلیل اینکه در سرعت‌های پایین به طور کامل حلقه‌ی جریان ایجاد شده توسط پروانه‌ها شکل اصلی خود را پیدا نکرده‌اند (یعنی حلقه‌هایی که پس از برخورد به دیواره مخازن در یک مسیر محوری تا کف مخزن و یا اگر پروانه بالایی باشد تا نقطه برخورد با حلقه‌ی بالایی ایجاد شده توسط پروانه زیرین پایین آمده و دوباره به صورت شعاعی به همزن برگردد) به همین دلیل قسمتی از ناحیه‌های داخل مخزن تحت پوشش حلقه‌های جریان نبوده و به تدریج توسط گردابه‌های کوچکتر وارد حلقه‌های چرخشی شده و رسیدن به یکنواختی مطلوب را کندتر می‌کنند. مطابق جدول ۴ با افزایش سرعت چرخش همزن به تدریج این ناحیه‌ها از بین رفته و در مسیر حلقه‌های جریان چرخشی قرار می‌گیرند و رسیدن به زمان اختلاط را کوتاهتر نموده و باعث افزایش کیفیت اختلاط می‌شود.

جدول ۴- زمان‌های اختلاط حاصل از تکرار آزمایش‌ها.

الف) شرایط تک‌فازی						
میانگین	تکرار آزمایش پنجم	تکرار آزمایش چهارم	تکرار آزمایش سوم	تکرار آزمایش دوم	تکرار آزمایش اول	سرعت چرخش همزن (RPM)
۱۶۳	۱۶/۴	۱۶/۴	۱۶/۶	۱۵/۹	۱۶/۲	۲۰۰
۱۰/۸	۱۱	۱۰/۵	۱۱	۱۰/۵	۱۰/۸	۳۰۰
۹/۳	۹/۴	۹	۹/۵	۹/۵	۹	۴۰۰
۸/۸	۹	۸/۸	۹	۸/۶	۸/۵	۵۰۰
۶/۸	۷/۲	۶/۶	۷	۶/۸	۶/۳	۶۰۰
ب) شرایط دوفازی						
۱۳/۹	۱۵	۱۴/۴	۱۰/۵	۱۱/۲	۱۸/۳	۲۲۵
۱۲/۵	۱۶/۲	۹/۴	۱۰/۲	۱۱	۱۵/۵	۳۰۰
۱۰/۸	۱۳	۹/۵	۱۱/۵	۹/۲	۱۱	۴۰۰

با شروع هوادهی، اختلاط نئوماتیکی نیز افزایش پیدا می‌کند ولی در حدی نیست که باعث کاهش زمان اختلاط شود.

نتیجه‌گیری

استفاده از مدل کامپارتمان نتیجه‌های قابل قبولی را برای محاسبه زمان‌های اختلاط دوفازی و یا تک‌فازی در شرایط گوناگون تریق و اندازه‌گیری غلظت ماده ردیاب در مقایسه با مقدارهای آزمایشگاهی می‌دهد. عامل‌هایی مانند محدودیت روابط و فرمول‌ها و همچنین عدم دستیابی به نتیجه دقیق با استفاده از این رابطه‌ها برای مقیاس بزرگ از سامانه‌های اختلاط، با خطا همراه بودن بزرگنمایی سامانه‌های اختلاط، مشکل‌ها و محدودیت‌های آزمایشگاهی باعث شده است که در این پژوهش زمان‌های اختلاط به‌دست آمده از مدل کامپارتمان با مقدارهای تجربی مورد بررسی و مقایسه قرار گیرند. نتیجه به‌دست آمده نشان می‌دهد که زمان‌های به دست آمده از مدل کامپارتمان با مقدارهای آزمایشگاهی به‌دست آمده از روش هدایت‌سنجی و PLIF مطابقت بسیار مناسبی دارد. البته به شرط اینکه اطلاعات ورودی برای حل مدل در دسترس و دقیق باشند و دوم اینکه نوع فرض اختلاط به گونه‌ای باشد که شرایط واقعی سامانه در مدل لحاظ شود. در مقایسه صورت گرفته میان روش هدایت‌سنجی و PLIF می‌توان با توجه به نتیجه‌های به‌دست آمده، از روش هدایت‌سنجی به‌عنوان جایگزین روش PLIF

تأثیر جریان هوا بر زمان اختلاط می‌تواند یک تأثیر مثبت، منفی و یا خنثی باشد که شرایط عملیاتی و رژیم جریان حاکم تعیین‌کننده رفتار اختلاط در این نوع از سامانه‌ها خواهد بود. به عبارت بهتر تأثیر حضور فاز گاز از یک سو باعث افزایش توان اختلاط نئوماتیکی^(۱) (ناشی از جریان القایی) سامانه شده که کاهش زمان اختلاط را در پی دارد و از سوی دیگر باعث افزایش زمان اختلاط به علت کاهش توان اختلاط مکانیکی^(۲) (ناشی از جریان چرخشی و جریان تبادل محوری) می‌شود. به عبارت دیگر، آشفتگی لازم برای اختلاط ترکیب‌های داخل مخزن، توسط چرخش همزن و همچنین از روش هوادهی فراهم می‌شود. فهم اینکه تأثیر این دو عامل بر زمان اختلاط در توافق با یکدیگر بوده یا در تضاد باهم، می‌تواند در اندازه‌گیری زمان اختلاط دارای اهمیت باشد. همان‌گونه که در جدول ۴ نشان داده شده است در سرعت‌های پایین چرخش همزن با تریق هوا به داخل سامانه، به‌علت افزایش توان اختلاط نئوماتیکی، کاهش زمان اختلاط دیده خواهد شد. از این رو تأثیر متقابل چرخش همزن و شدت هوادهی در توافق با یکدیگر بوده و فرایند اختلاط را با سرعت بیشتری به سوی یکنواختی دلخواه سوق می‌دهند. در سرعت‌های به‌نسبت بالا با شروع هوادهی به دلیل افت توان مکانیکی ناشی از کاهش ظرفیت پمپ کردن [۹] اختلاط بدتر می‌شود. به‌گونه‌ای که جریان القایی قادر به جبران افت توان مکانیکی نخواهد بود. هر چند

(۱) Pneumatical mixing power

(۲) Mechanical mixing power

ΔC	فاصله بین دو همزن، m	استفاده نمود. البته به شرط آنکه سامانه در شرایط تک‌فازی مایع
C_1	فاصله همزن پایینی از کف مخزن، m	مورد بررسی قرار گیرد، زیرا در غیر این صورت به علت تأثیر
N	سرعت چرخش همزن، rpm	ناخواسته حباب‌های هوا بر الکتروود هدایت سنج، آزمایش‌ها
Q_P	ظرفیت پمپ کردن مایع، m^3/s	از تکرار پذیری مناسبی برخوردار نخواهند بود. تأثیر سرعت چرخش
Q_{PG}	ظرفیت پمپ کردن مایع در حالت دوفازی، m^3/s	همزن بر زمان اختلاط یک تأثیر مستقیم خواهد بود، به طوری که
θ_{mix}	زمان اختلاط فضایی، s	با افزایش سرعت چرخش همزن ناحیه‌های راکد در تأثیر حلقه‌های
Q_G	شدت جریان گاز ورودی، L/min	چرخش از بین رفته و زمان اختلاط با افزایش شدت آشفستگی
Q_{CF}	شدت جریان چرخشی مایع، m^3/s	کاهش پیدا می‌کند. با توجه به نتیجه‌های به‌دست آمده برای تأثیر
Q_{EF}	شدت جریان تبادل محوری، m^3/s	حضور فاز گاز بر زمان اختلاط، نتیجه‌گیری کلی در این مورد
Q_{IF}	شدت جریان القایی، m^3/s	وابسته به سرعت چرخش همزن خواهد بود. به طور کلی نتیجه
C_i	غلظت در هر لحظه، g/L	به‌دست آمده از این پژوهش نشان دهنده‌ی آن است که میانگین
C_0	غلظت در لحظه صفر، g/L	زمان‌های اختلاط به‌دست آمده در شرایط تک‌فازی به نسبت کمتر
C_∞	غلظت در لحظه بی‌نهایت، g/L	از شرایط حضور فاز گاز خواهد بود. البته در سرعت‌های پایین
\dot{C}_i	غلظت نرمال شده	چرخش همزن این قضیه صادق نمی‌باشد چنانچه که در این بازه
ε	شدت اتلاف انرژی جنبشی توربولنسی، m^2/s^3	از سرعت چرخش همزن زمان اختلاط دوفازی به طور
u_c	مشخصه سرعت گردابه‌های کوچک، m/s	چشمگیری کمتر از شرایط تک‌فازی خواهد بود.
L_c	مشخصه طول گردابه‌های کوچک، m	
Q_{in}	شدت جریان حجمی ماده ردیاب تزریق شده، m^3/s	
C_{in}	غلظت ماده ردیاب تزریق شده، g/L	
H_i	ارتفاع مایع مربوط به هر کامپارتمان، m	
N_P	عدد بدون بعد توان	
V_i	حجم مربوط به هر کامپارتمان، m^3	
		فهرست نمادها
		زمان اختلاط ۹۵ درصد، s
		ارتفاع کل مایع در مخازن همزن‌دار، m
		قطر مخزن اختلاط، m
		قطر همزن، m
		ارتفاع همزن، m
		عرض همزن، m
		فاصله همزن بالایی از سطح مایع، m
		t_{95}
		H
		T
		D
		W
		L
		C_2

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸، ۱۲، ۲۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹، ۹، ۲۲

مراجع

- [1] Nienow A.W., Harnby N., Edwards M.F., "Mixing in the Process Industries", 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, (1997).
- [2] Houcine I., Plasari E., David R., Effects of the Stirred Tank's Design on Ppower Consumption and Mixing Time in Liquid Phase, *Chemical Engineering & Technology*, **23**, p. 605 (2000).
- [3] Edward P.L., Atiemo-Obeng V.A., Kresta S.M., "Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice", John Wiley & Sons, Hoboken, (2004).
- [4] Manna, L., Comparison Between Physical and Chemical Methods for the Measurement of Mixing Times, *Chemical Engineering Journal*, **67**(3), p. 167 (1997).
- [5] Paglianti A., Pintus S., An impedance Probe for the Measurements of Liquid Hold-up and Mixing Time in Two/Three-Phase Stirred Tank Reactors, *Experiments in Fluids*, **31**, p. 417 (2001).

- [6] Bujalski J.M., Jaworski Z., Bujalski W., Nienow A.W., The Influence of the Addition Position of a Tracer on CFD Simulated Mixing Times in a Vessel Agitated by a Rushton Turbine, *Chemical Engineering Research and Design*, **80**, p. 824 (2002).
- [7] Ng D.J.W., Assirelli M., Mixing Study in Batch Stirred Vessels Using a Fibre-Optic UV-VIS Monitoring Technique: A Novel Method, *Chemical Engineering Research and Design*, **85**, p. 1348 (2007).
- [8] Ruszkowski S., A Rational Method for Measuring Blending Performance, and Comparison of Different Impeller Types, "Proceedings of 8th European Mixing conference, I.Chem.E.", p. 283 (1994).
- [9] Moghaddas J.S., "An Experimental Study of Fluid Dynamics and Mixing in Bubbly Gas-Liquid Flow Systems", *PhD Theses*, Lund University, Sweden, (2004).
- [10] Moghaddas J. S., Trägårdh C., Östergren K., Use of a Simultaneous PLIF-PLIF Technique to Overcome Optical Problems in Concentration Measurements in Two-Phase Bubbly System, *Advances in Fluid Mechanics*, **IV**, p. 427 (2002).
- [11] Vrabel P., Van Der Lans R., Cui Y.Q., Luyben K., Ch A.M., Compartment Model Approach: Mixing in Large Scale Aerated Reactors with Multiple Impellers, *Chemical Engineering Research and Design*, **77**, p. 291 (1999).
- [12] Hiraoka S., Tada Y., Kato Y., Matsuura A., Yamaguchi T., Lee Y.S., Model Analysis of Mixing Time Correlation in an Agitated Vessel with Paddle Impeller, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **34**, p. 1499 (2001).
- [13] Vasconcelos J.M.T., Alves S.S., Barata J.M., Mixing in Gas-Liquid Contactors Agitated by Multiple Turbines, *Chemical Engineering Science*, **50**, p. 2343 (1995).
- [14] Cui Y.Q., Lans R., Noorman H.J., Luyben K., Compartment Mixing Model for Stirred Reactors with Multiple Impellers, *Chemical Engineering Research and Design*, **74**, p. 261 (1996).
- [15] Vasconcelos J.M.T., Alves S.S., Nienow A.W., Bujalski W., Scale-up of Mixing in Gassed Multi-Turbine Agitated Vessels, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **76**, p. 398 (2009).
- [16] Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N., "Transport Phenomena", 2nd ed., Wiley, New York, (1960).
- [17] Guillard F., Trägårdh C., Fuchs L., A Study of Turbulent Mixing in a Turbine-Agitated Tank Using a Fluorescence Technique. *Experiments in Fluids*, **28**, p. 225 (2000).