

## تأثیر نوع پروانه بر زمان اختلاط در مخازن همزن دار

مریم چوپانی، سارا غیبی، مهسا تقوی، جعفر صادق مقدس\*

تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، دانشکده مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات پدیده های انتقال

پیام نگار: jafar.moghaddas@sut.ac.ir

### چکیده

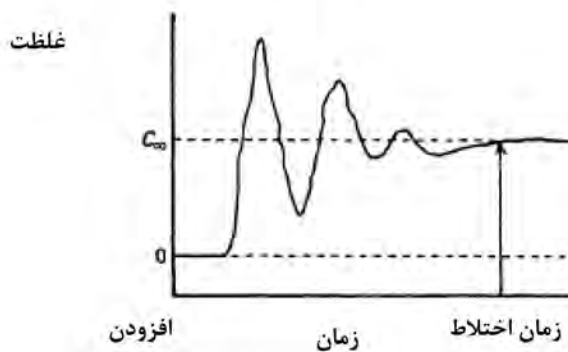
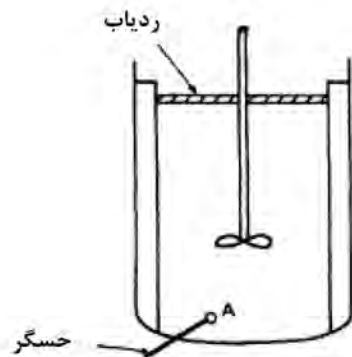
زمان اختلاط، الگوی جریان و عدد توان یک مخزن به طراحی و نوع پروانه ی آن بستگی دارد. به عبارت دیگر، کارایی پروانه غالباً از طریق زمان اختلاط ارزیابی می گردد. برای بررسی تأثیر نوع پروانه بر زمان اختلاط، آزمایش هایی برای انواع مختلفی از پروانه ها در یک مخزن همزن دار به قطر  $175 \text{ mm}$  انجام شد. اندازه گیری های زمان اختلاط توسط تکنیک تغییرات هدایت الکتریکی در پنج سرعت چرخشی مختلف (در محدوده  $2000-4000 \text{ rpm}$ ) برای همزن های: ملخی دو پره، ملخی سه پره، توربینی چهار پره و توربینی شش پره صورت گرفت. سیال اصلی مورد استفاده آب بود؛ بعلاوه  $7 \text{ CC}$  محلول کلرید سدیم به عنوان ردیاب با غلظت  $20000 \text{ ppm}$  در یک محل مشخص به دفعات تزریق شد. زمان اختلاط به عنوان زمانی که از تزریق ردیاب سپری می شود تا غلظت آن در یک نقطه ی مشخص به  $95\%$  غلظت نهایی برسد تعریف شد. با تغییر نوع پروانه ها، زمان اختلاط پروانه های مختلف ارزیابی شد. در واقع پروانه ی ارایه دهنده ی کمترین زمان اختلاط به عنوان بهترین پروانه جهت اختلاط در شرایط مورد نظر آزمایش معرفی شد. نشان داده شد که افزایش سرعت چرخشی همزن منجر به کاهش قابل توجه زمان اختلاط و نیز افزایش اغتشاش می گردد. در نهایت با نصب تیغه هایی در مخزن، کاهش گرداب ها و در نتیجه کاهش زمان اختلاط مشاهده گردید. کلمات کلیدی: مخزن همزن دار، زمان اختلاط، نوع پروانه، تیغه، سرعت چرخشی.

### ۱- مقدمه

برای بالا بردن کارایی، همانند طراحی یک سیستم اختلاطی جدید، نیاز به دقت و مطالعه فراوان دارد. این نیاز باعث شده است تا محققین مطالعات تجربی زیادی با روش های مختلف در این مورد انجام دهند. برای مثال می توان به زمان اختلاط اندازه گیری شده توسط هلمز<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۱۹۶۴، آشکارسازی جریان به وسیله ونت ریت<sup>۲</sup> و

در طول سال ها، محققین در مورد بهینه کردن فرآیندهای اختلاط در مخازن همزن دار با توجه به توان مصرفی، کیفیت مخلوط، زمان اختلاط و هزینه های اولیه و جاری، تلاش های زیادی انجام داده اند. برای یک فرآیند اختلاطی، مخازن با اشکال هندسی مختلف و پروانه های متفاوت به کار گرفته شده است. با توجه به پیچیدگی فرآیند اختلاط، هنوز هم تحقیق در این موضوع از اهمیت خاصی برخوردار بوده و تأکید زیادی روی مطالعات تجربی می شود. تغییر طرح یک مخزن همزن دار موجود

1. Holms  
2. Vent Riet



شکل ۱- اندازه گیری و تعریف زمان اختلاط از پاسخ گذرای سیستم به تزریق پالسی ردیاب [۲،۳]

باید در مقدار مناسبی از  $Y$  (به عنوان مثال،  $0/95$  یا  $0/9$ ) تعریف گردد [۵]. توسط یک آشکارساز مناسب، غلظت ردیاب در یک نقطه مشخص در مخزن به عنوان تابعی از زمان اندازه گیری می شود. در شکل (۱) چگونگی اندازه گیری زمان اختلاط هنگام تزریق پالسی ردیاب نشان داده شده است. در هر تکنیک مورد استفاده، مشخص سازی معیار بکار گرفته شده برای تعیین نقطه ی توقف<sup>۵</sup> انتهای آزمایش ضروری است. در این آزمایش ها طبق معیاری، زمان اختلاط به عنوان زمانی که از تزریق ردیاب سپری می شود تا غلظت آن در یک نقطه ی مشخص به  $95\%$  غلظت نهایی برسد [۶]، یا به عبارت دیگر به عنوان زمان کاهش تغییرات غلظت ردیاب به  $\pm 5\%$  غلظت اختلاط کامل منظور شد [۷].

الگوی جریان در یک مخزن همزن دار، به نوع پروانه به کار رفته، مشخصات فیزیکی سیال مصرفی، مشخصات هندسی مخزن، پروانه و تیغه ها بستگی دارد. توربین ها، پروانه های چند پره ای با تیغه های کوچک هستند که در سرعت های بالا استفاده می شوند و بوسیله آنها

اسمیت<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۵ و توان اندازه گیری شده توسط بوجالسکی<sup>۲</sup> و همکارانش در سال ۱۹۸۶، اشاره کرد [۱].

از نکات مهمی که در فرآیند اختلاط باید در نظر گرفته شود، انتخاب پروانه مناسب جهت حصول توان مصرفی کمتر و زمان اختلاط کوتاه تر و همچنین از بین بردن یا کاهش اثر گرداب های ایجاد شده در اختلاط است که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. معمولاً پروانه ها در یک طرح هندسی مشابه و طیف یکسانی استفاده می شوند تا از مقایسه بین تحقیقات مختلف، نتایج مطلوبی حاصل گردد.

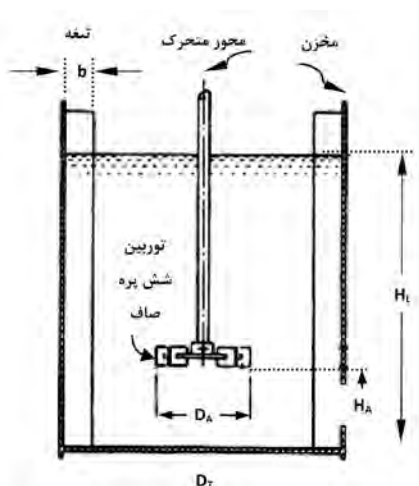
به مدت زیادی، علاقه مندی در زمینه ی انتخاب نوع پروانه برای بدست آوردن کارآمدترین عملکرد در اختلاط سیالات وجود داشته است. برای کمی ساختن و ساختاری نمودن بیشتر این خواسته، ویژگی های اختلاطی پروانه ها معمولاً توسط افزودن ردیابی<sup>۳</sup> از جنس سیال داخل مخزن اندازه گیری می شود [۲]. زمان اختلاط به تکنیک آزمایشگاهی به کار گرفته شده برای اندازه گیری آن بستگی دارد. از جمله ی این روش ها می توان تکنیک های واکنش های شناساگر اسید-باز، تغییرات هدایت الکتریکی، تغییرات دما، تغییرات ضریب شکست و تکنیک های جذب نور را نام برد [۳]. معمول ترین روش برای اندازه گیری زمان اختلاط، استفاده از یک حسگر<sup>۴</sup> اندازه گیر هدایتی یا ترموکوپل برای تعیین تغییرات هدایت الکتریکی یا تغییرات دما در درون مخزن می باشد [۴] که در این تحقیق، روش هدایت سنجی به کار گرفته شده است. زمان اختلاط زمانی است که از لحظه ی افزودن ردیاب اندازه گیری می شود تا جایی که محتویات داخل مخزن به درجه ای از یکنواختی برسد که سیستم "مخلوط شده" نامیده شود [۳]. حد مطلوب یکنواختی می تواند بر حسب درجه ی اختلاط،  $Y$ ، که میزان دامنه ی اختلاط در یک مخزن است، بیان گردد.

$$Y = \left| \frac{C_{(t)} - C_0}{C_{\infty} - C_0} \right| \quad (1)$$

که  $C_{\infty}$  و  $C_0$  به ترتیب غلظت یکنواختی متوسط اولیه و نهایی ردیاب هستند.  $C_{(t)}$  غلظت یکنواختی هر بسته ی کوچک ردیاب پیرامون حسگر در زمان  $t$  می باشد. به علت اینکه رسیدن به اختلاط کامل (یعنی  $Y=1$ ) در زمان های عملاً محدود ممکن نیست، درجه ی مطلوب یکنواختی

1. Smith
2. Bujalski
3. Tracer
4. Probe

5. Cut-off Point



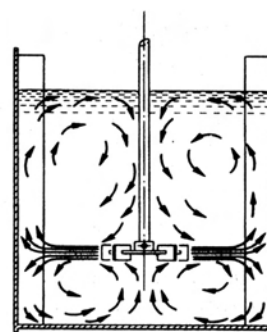
$$D_A = D_T / 3$$

$$H_A = D_T / 3$$

$$H_L = D_T$$

$$b = D_T / 10$$

شکل ۴- یک مخزن همزن دار با ابعاد استاندارد [۸]



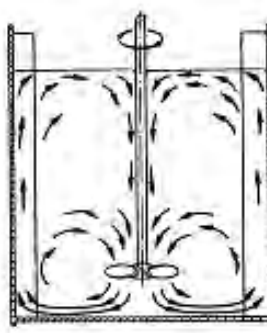
شکل ۲- پروانه توربینی شش پره و الگوی جریان ایجاد شده توسط آن [۸،۹]

می‌توان از بروز این پدیده جلوگیری کرد [۱۰]. در تحقیق حاضر، تأثیر این پروانه‌ها در زمان اختلاط در سرعت‌های مختلف همزن و در شرایط یکسان آزمایشگاهی در حضور و عدم حضور تیغه مورد بررسی قرار گرفت و نقش جریان‌های شعاعی و محوری در تغییر زمان اختلاط، مشاهده گردید.

## ۲- روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها در دمای محیط در یک مخزن استاندارد و شفاف شیشه‌ای به قطر داخلی و ارتفاع ۱۷۵ mm انجام شد. در این آزمایش‌ها مطابق شکل (۴)، استانداردهای زیر مرجع تصمیم‌گیری بوده‌اند: برای آزمایش هدایت سنجی و تعیین زمان اختلاط، از آب به عنوان سیال مورد نظر و محلول کلرید سدیم با غلظت ۲۰۰۰۰۰ ppm به عنوان ردیاب استفاده شده و ۷ cc از این محلول بطور پالسی به دفعات در یک محل مشخص تزریق گردید. پس از صورت گرفتن اختلاط کامل، زمان اختلاط طبق تعریف و معیار مذکور، برای هر یک از پروانه‌های مورد آزمایش محاسبه گردید.

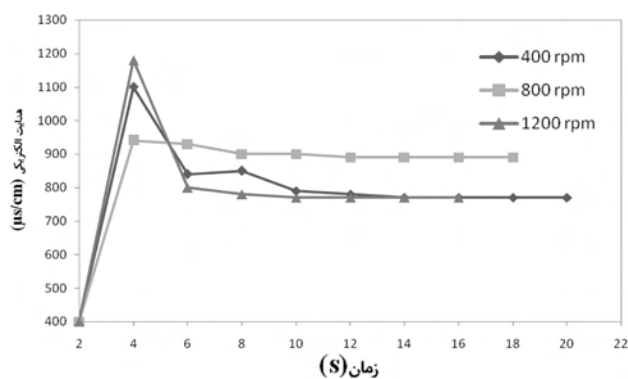
در ادامه‌ی آزمایش‌ها، تأثیر تیغه در کاهش گرداب‌ها و در نتیجه در کاهش زمان اختلاط در پروانه شش پره توربینی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از چهار تیغه عمودی با ابعاد استاندارد، به طول ۲۴۵ mm، به عرض ۱۵ mm و به ضخامت ناچیز، استفاده شد که با زاویه نود درجه از یکدیگر درون مخزن قرار داشتند.



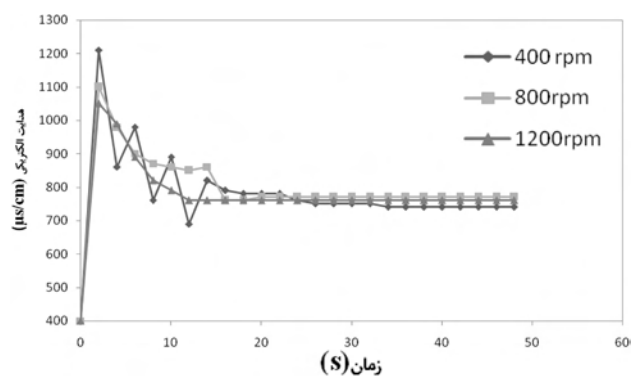
شکل ۳- پروانه ملخی سه پره و الگوی جریان ایجاد شده توسط آن [۸،۹]

جریان‌های شعاعی در سیال ایجاد می‌شود. پروانه‌های ملخی از دسته‌ی پروانه‌های جریان محوری هستند که جریان‌هایی موازی با محور پروانه در سیال ایجاد می‌کنند. این پروانه‌ها برای به وجود آوردن جریان‌های عمودی قوی مناسب می‌باشند و در اختلاط جامد در مایع و معلق‌سازی ذرات جامد در مایع می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. شمای کلی این پروانه‌ها و الگوی جریان ایجاد شده توسط آنها در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده‌اند.

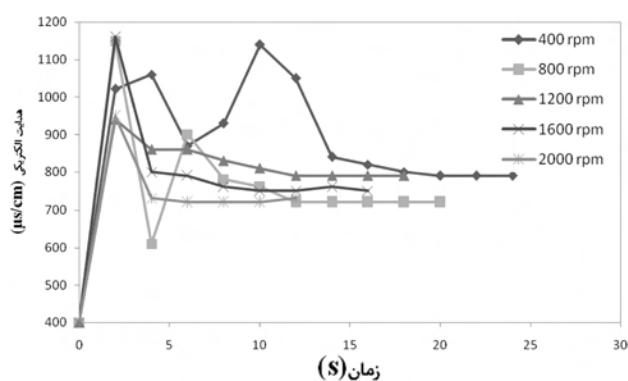
حرکت مماسی سیال اغلب نامطلوب است، چرا که باعث تشکیل گرداب خواهد شد. با افزایش سرعت همزن برای ایجاد تلاطم، توان لازم برای به حرکت درآوردن آن افزایش یافته و در اطراف محور همزن گرداب تشکیل می‌شود. وجود گرداب سبب بروز مشکلاتی در تغییر مقیاس آزمایشگاهی و نیمه صنعتی به مقیاس صنعتی می‌گردد، لذا سعی در پیشگیری از ایجاد آن می‌شود. با به کارگیری تیغه‌ها درون مخزن



شکل ۶- هدایت الکتریکی بر حسب زمان برای پروانه توربینی چهار پره



شکل ۵- هدایت الکتریکی بر حسب زمان برای پروانه توربینی شش پره



شکل ۷- هدایت الکتریکی بر حسب زمان برای پروانه ملخی سه پره

توربینی به علت ایجاد هر دو مؤلفه محوری و شعاعی جریان، اختلاط بهتری نسبت به پروانه های ملخی که فقط مؤلفه عمودی را تولید می کنند، ایجاد می کنند. پروانه ملخی سه پره نیز در مقایسه با نوع دو پره ای آن به دلیل دارا بودن تعداد پره بیشتر، اختلاط بهتر و زمان اختلاط کوتاه تری را حاصل می کند. نمودار هدایت الکتریکی حاصل از این پروانه در شکل (۷) ارائه شده است.

آخرین پروانه مورد آزمایش، پروانه ملخی دو پره بود که نسبت به سه پروانه دیگر نتایج ضعیف تری ارائه داده و بیشترین زمان اختلاط بدست آمد. نمودار حاصل از آزمایش این پروانه در شکل (۸) نمایش داده شده است. همانطور که از نمودارها بر می آید، در تمامی پروانه ها در سرعت های مختلف حالت یکنواختی حاصل گردیده است که نشان دهنده خطای اندک آزمایش ها می باشد. همینطور با افزایش سرعت همزن، زمان رسیدن به حالت پایدار کاهش می یابد و نوسان های سرعت های ابتدایی از میان می رود. اندازه گیری هدایت الکتریکی در سرعت های ۲۰۰۰ rpm و

### ۳- نمودارها و نتایج حاصل از آزمایش

در ابتدا تأثیر سرعت همزن بر روی زمان اختلاط برای هر یک از چهار پروانه ی مورد آزمایش، بررسی گردید. پروانه های مورد آزمایش عبارتند از: توربینی شش پره، توربینی چهار پره، ملخی سه پره و ملخی دو پره. برای هر پروانه پنج سرعت چرخشی تنظیم شد؛ آزمایش ها از سرعت ۴۰۰ rpm شروع شده و در بازه های ۴۰۰ تا جایی که شرایط آزمایش اجازه می داد (حداکثر ۲۰۰۰ rpm) ادامه یافت. برای تعیین زمان اختلاط، برای هر پروانه تغییرات هدایت الکتریکی در برابر زمان رسم گردید و سپس زمان رسیدن به ۹۵٪ غلظت نهایی به عنوان زمان اختلاط محاسبه شد.

اولین پروانه مورد آزمایش، پروانه توربینی شش پره بود که بهترین نتایج را از نظر مدت زمان اختلاط نسبت به سایر پره ها تا دور ۱۲۰۰ rpm به دست داد. در شکل (۵) نمودار هدایت الکتریکی بر حسب زمان این پروانه در سرعت های مختلف همزن نشان داده شده است.

همانطور که از نمودار نمایان است، در تمامی سرعت های همزن حالت یکنواخت حاصل شده است که نمایانگر اختلاط مناسب می باشد. در این پروانه انجام آزمایش در سرعت های بالای ۱۲۰۰ rpm، به علت پدید آمدن گرداب ها و سرازیر شدن سیال از مخزن، امکان پذیر نشد.

دومین پروانه مورد آزمایش، پروانه توربینی چهار پره بود که پس از پروانه توربینی شش پره، مؤثر ترین پروانه بوده و بهترین نتایج را بدست داد. نمودار هدایت الکتریکی حاصل از این پروانه در شکل (۶) نمایش داده شده است.

سومین پروانه مورد آزمایش، پروانه ملخی سه پره بود که پس از پروانه های توربینی، مؤثر ترین پروانه شناخته شد. بطور کلی، پروانه های

بالاتر از آن نیز به علت پدید آمدن گرداب ها و سرازیر شدن سیال، عملاً غیرممکن می نمود.

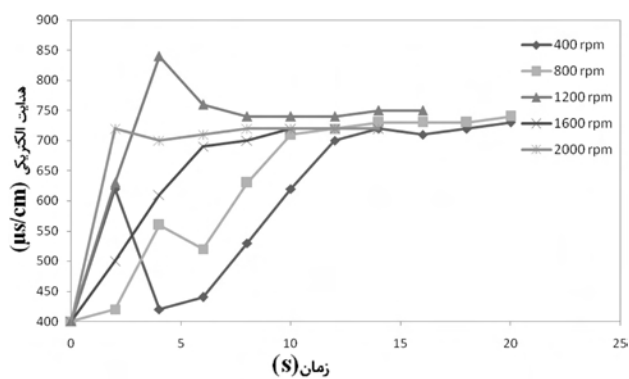
در شکل (۹) زمان های اختلاط بدست آمده از این چهار پروانه در سرعت های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است.

سری دوم آزمایش ها با قرار دادن چهار تیغه در مخزن پروانه توربینی شش پره ای، پی گیری شد. حضور تیغه، گرداب ها را تا حد بسیار زیادی از بین برد؛ کاهش نوسانات اولیه مؤید این مطلب می باشد. کاهش زمان اختلاط، اثر مثبت حضور تیغه را نشان می دهد و رسیدن به یک حالت پایا، خطای اندک آزمایش ها را می نمایاند. نمودار هدایت الکتریکی حاصل از حضور تیغه در مخزن حاوی پروانه توربینی شش پره ای در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.

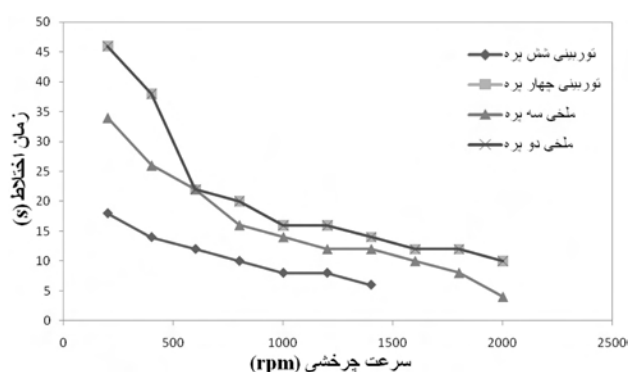
همانطور که نمودار بالا نشان می دهد، با حضور تیغه، زمان اختلاط نسبت به حالت عدم وجود تیغه در مخزن، کاهش یافته است و کوتاه ترین زمان اختلاط و موثرترین سیستم اختلاطی در میان آزمایش های صورت گرفته حاصل گشته است.

#### ۴- نتیجه گیری

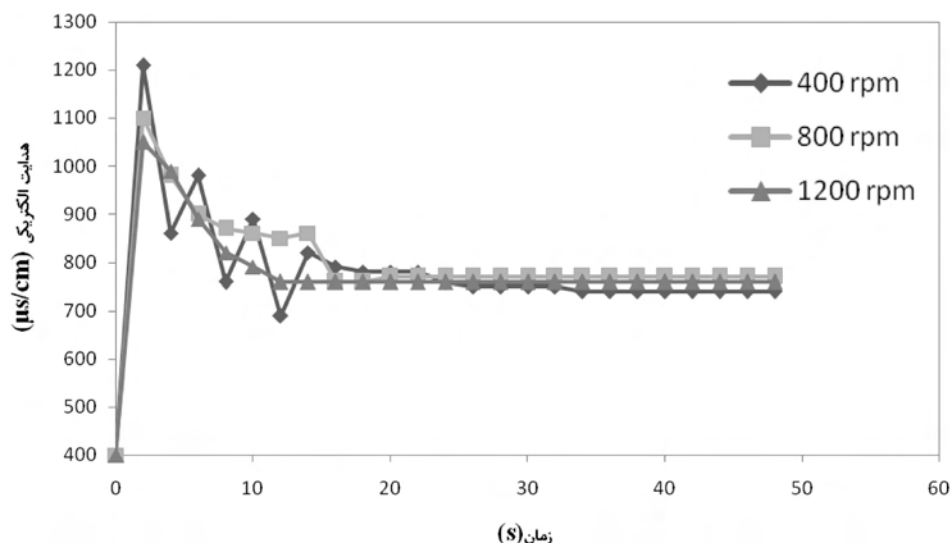
با توجه به آزمایش های صورت گرفته و نمودارهای ارائه شده می توان



شکل ۸- هدایت الکتریکی بر حسب زمان برای پروانه ملخی دو پره



شکل ۹- زمان اختلاط بر حسب سرعت همزن برای چهار پروانه مورد آزمایش



شکل ۱۰- هدایت الکتریکی بر حسب زمان برای پروانه توربینی شش پره همراه تیغه

## مراجع

- [1] Oldshue, J. Y., "Fluid mixing technology", Mc. Graw-hill, New York (1983).
- [2] Nienow, A. W., "On impeller circulation and mixing effectiveness in the turbulent flow regime", Chemical Engineering Science 52, 2557-2565 (1997).
- [3] Nienow, A. W., N. Harnby, M. F. Edwards, "Mixing in the Process Industries", Butterworth- Heinemann Publisher (1997).
- [4] Mahmoudi, S. M., Ph.D. Thesis, University of London (1994).
- [5] Jafari, M., J. S. Soltan mohammadzadeh, "Homogenization energy and residence time distribution in a gas-induced contactor", Chem. Eng. Research and design 83(A5), 452-459 (2005).
- [6] Zadghaffari, R., J.S. Moghaddas, M. Ahmadydarab, J. Revstedt, "A mixing Study in a Double- Rushton Stirred Tank", in Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference on Advanced Computational Methods in Engineering (2008).
- [7] Zadghaffari, R., J.S. Moghaddas, M. Ahmadydarab, J. Revstedt, " CFD Simulation of Power and Mixing Time for a Rushton Turbine in a Baffled- Tank Reactor", in Proceedings of 5<sup>th</sup> International Chemical Engineering Congress & Exhibition (ICHEC), Kish Island, Iran (2008).
- [8] Holland, F. A., R. Bragg, "Fluid Flow for Chemical Engineers", Arnold Publishing, London (1995).
- [9] Ludwig, E. E., "Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants", Gulf Professional Publishing (2001).
- [۱۰] تری بال، ر.، "انتقال جرم"، مترجمین: مرتضی سهرابی، طاهره کاغذچی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۸۲).

نتیجه گرفت که بهترین پروانه، پروانه ای است که هر دو مؤلفه جریان شعاعی و جریان محوری را ایجاد کند که پروانه های توربینی از این نظر بر پروانه های ملخی برتری دارند. بطور کلی، پروانه های توربینی از بهترین پروانه ها برای اختلاط محلول های آبی هستند و نوع شش پره آن مناسب ترین نوع برای استفاده در صنعت می باشد. با افزایش تعداد پره های یک پروانه نیز کارایی آن برای اختلاط تا سرعت مشخصی افزایش می یابد؛ بطوری که پروانه توربینی شش پره نسبت به نوع چهار پره آن و همچنین پروانه ملخی سه پره نسبت به نوع دو پره آن کارا تر بوده و زمان اختلاط کمتری را بدست می دهند. در این آزمایش ها مشاهده شد که در تمامی پروانه ها، افزایش سرعت همزن سبب کاهش زمان اختلاط می شود. افزایش سرعت همزن، افزایش اغتشاش و ایجاد گرداب ها را نیز در پی دارد که حضور تیغه در مخزن اختلاط این گرداب ها را تا حد زیادی از بین برده و موجب کاهش زمان اختلاط و بهبود کارایی همزن می گردد.