

# مقایسه الگوی جریان و زمان اختلاط همزن لنگری و یک همزن جدید با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

مجتبی سمنانی رهبر\*<sup>+</sup>

تهران، دانشگاه امام حسین (ع)، دانشکده علوم مهندسی، گروه مهندسی شیمی

اصغر علیزاده داخل

رشت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت، دانشکده فنی، گروه مهندسی شیمی

**چکیده:** همزن لنگری برای اختلاط مایعات با لزجت بالا کاربرد فراوان دارد. در این پژوهش، همزن دیگری برای اختلاط مایعات لزج معرفی شده و عملکرد آن در اختلاط با همزن لنگری مورد مقایسه گرفت. در این مقایسه، از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شد. کاتور و بردارهای سرعت، توزیع سرعت و تنش برشی در ظرف اختلاط مجهز به این دو همزن مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. همچنین زمان اختلاط با استفاده از تزریق یک ماده بی اثر و بررسی غلظت آن در سه نقطه دلخواه از ظرف، برای دو همزن مورد مقایسه قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که همزن جدید، توزیع مناسب تری برای سرعت سیال در هر دو جهت شعاعی و محوری ایجاد می‌کند و بالا بودن تنش برشی که به وسیله آن ایجاد می‌شود سبب اغتشاش بیشتر شده و زمان اختلاط را حدود ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. همچنین با استفاده از هر دو همزن، همگن شدن در قسمت پایین ظرف سریع‌تر از قسمت بالای آن صورت می‌گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** همزن لنگری، زمان اختلاط، دینامیک سیالات محاسباتی، اغتشاش، مش لغزنده.

**KEY WORDS:** Anchor agitator, Mixing time, Computation fluid dynamic (CFD), Turbulence, Sliding mesh.

## مقدمه

از همزن لنگری در این فرایند استفاده می‌شود. روش‌های CFD شامل حل عددی معادله‌های بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی به همراه معادله‌های دیگر مسأله (مانند معادله‌های مربوط به واکنش شیمیایی) در مناطق سیال است. حل یک مسأله به روش CFD شامل دو مرحله اصلی است.

ابتدا کل فضای سیال به اجزای کوچک (مش) تقسیم می‌شود، آنگاه معادله‌های مشتقات جزئی بیان‌گر جریان (که صورت مناسبی از معادله‌های ناویر-استوک هستند) بر تمام این مش‌ها

همزن لنگری به‌ویژه در اختلاط مایعاتی که دارای لزجت (ویسکوزیته) بالا هستند کاربرد فراوان دارد. اطلاعات مربوط به این همزن به‌طور مفصل توسط پژوهشگران متفاوت ارائه شده است [۱-۳]. در تهیه سدیم پربورات چهار آبه، سدیم متابورات با آب اکسیژنه ترکیب می‌شود. این عملیات با کاهش دما همراه است که سبب رسوب پربورات تشکیل شده می‌شود. وجود ذره‌های جامد سدیم پربورات، ویسکوزیته محلول را به شدت افزایش می‌دهد و به همین دلیل و همچنین برای توزیع یکنواخت ذره‌های پربورات،

\*عهدہ دار مکاتبات

+E-mail: msmnani@mail.ihu.ac.ir

منجر خواهد شد. ویژگی‌های برجسته این روش وجود یک منطقه مشترک<sup>(۷)</sup> بین مناطق داخلی و خارجی است که انطباق دو راه حل را به صورت محاسبه‌های تکراری میسر می‌سازد. اندازه و موقعیت مکانی این منطقه به طور کامل اختیاری است. در مقابل، در روش ظرف مرجع مرکب<sup>(۸)</sup> پاسخ‌های حالت پایایی جریان برای منطقه داخلی و خارجی به صورت ضمنی روی یک مرز صفحه‌ای میانگین‌گیری می‌شود و محاسبه‌های تکراری خارجی<sup>(۹)</sup> نیاز نیست [۱۰].

در روش مش لغزنده، دامنه حل به دو دامنه استوانه‌ای بدون فضای مشترک<sup>(۱۰)</sup> تقسیم می‌شود که هر کدام به‌عنوان یک قسمت جداگانه مش‌بندی می‌شوند. قسمت خارجی ثابت است و قسمت داخلی به همراه همزن می‌چرخد. در این روش، برخلاف روش‌های قبلی، محاسبه‌ها به صورت وابسته به زمان به همراه حرکت مش‌ها نسبت به هم انجام می‌گیرد. دو منطقه به‌صورت ضمنی در مرز بین دو ناحیه به وسیله‌ی الگوریتم مش لغزنده که لغزش بین دو منطقه را مد نظر قرار می‌دهد، با هم آمیخته<sup>(۱۱)</sup> می‌شوند [۱۱].

از بین مدل‌های بالا، دو مدل MFR و مش لغزنده برای شبیه‌سازی مخازن قابل استفاده‌تر هستند. /وبین، فلچر و زرب با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی یک مخزن همزن‌دار را که دارای رژیم جریان مغشوش بود، مدل کردند و اثر مدل انتخابی مدل رژیم جریان و نتیجه‌های عددی را بررسی کردند. آنها از مدل آشفتگی RNG تصحیح شده با  $k-\epsilon$  استفاده کرده و نشان دادند که این مدل می‌تواند رژیم جریان مغشوش تک فازی را به خوبی توجیه کند [۱۲].

ساهو، کومار، پات واردهان و جوشی، تأثیر پنج پروانه ایجادکننده جریان محوری را در یک مخزن همزن دار با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مدل کردند. آنها از روش و مفاهیم رایج شده توسط ساهو استفاده کرده و انرژی جنبشی جریان مغشوش را محاسبه کردند. آنها همچنین مدلی با استفاده از شدت انتقال انرژی توربولانس ارائه کردند که می‌تواند تخمین عددی مناسبی به دست دهد [۱۳].

(حجم‌های کنترل) اعمال می‌شود. در نتیجه تعداد زیادی معادله‌های غیرخطی به دست می‌آید که باید به‌طور هم‌زمان حل شوند. حل این معادله‌ها با استفاده از الگوریتم‌های عددی انجام می‌شود. مدل‌های بسیاری برای مدل کردن آشفتگی در جریان‌های آشفتنه ارائه شده است. مدل  $k-\epsilon$  [۴] یکی از معتبرترین مدل‌های ارائه شده است که کارایی آن در مدل‌سازی جریان‌های ایجاد شده در فرایندهای اختلاط به اثبات رسیده است [۷ - ۵].

مدل RNG- $k-\epsilon$  یک نمونه اصلاح شده این مدل می‌باشد. در این مدل تأثیر آشفتگی در مقیاس‌های کوچک<sup>(۱)</sup> به وسیله‌ی یک تابع وزنی تصادفی در معادله‌های ناویر-استوکس مد نظر قرار می‌گیرد. الگوریتم RNG، با بیان اثرات حرکت در ابعاد کوچک بر حسب حرکت در ابعاد بزرگ‌تر و یک لزجت اصلاح شده، آنها را از معادلات حاکم حذف می‌کند [۸ و ۹].

مهم‌ترین بخش مدل‌سازی مخازن شامل همزن، مدل کردن همزن است. سه روش معروف برای مدل کردن همزن وجود دارد: شرط مرزی همزن<sup>(۲)</sup>، ورودی - خروجی متناوب<sup>(۳)</sup> و روش‌های مش لغزنده<sup>(۴)</sup>. این مدل‌ها برای مدل‌سازی همزن در داخل ظروف اختلاط که پروانه به صورت عمودی در وسط تانک قرار می‌گیرد بیان شده‌اند، ولی برخی از آنها برای ظروف اختلاط با شکل هندسی و شرایط دیگر نیز قابل استفاده هستند.

در روش شرط مرزی همزن که قدیمی‌ترین روش است، شرایط پایا در نظر گرفته می‌شود و شبیه‌سازی روی ظرف مرجع مرکب<sup>(۵)</sup> انجام می‌شود.

در روش ورودی - خروجی، کل حجم تانک به دو منطقه که به طور جزئی همدیگر را می‌پوشانند<sup>(۶)</sup> تقسیم می‌شود. دامنه داخلی شامل همزن و دامنه‌ی خارجی شامل بقیه حجم تانک است. در این روش، یک مرز فرضی استوانه‌ای در حد فاصل بین لبه بافل و پروانه تعریف می‌شود. آنگاه حل جریان روی این مرز متوسط‌گیری می‌شود. مقدارهای حاصل به عنوان یک شرط مرزی خارجی برای محاسبه‌های مرحله بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد. تکرار این محاسبه‌ها، به یک جواب هم‌گرا برای جریان حالت پایا

(۱) Small scale turbulence

(۲) Impeller boundary condition

(۳) Inner-outer iterative procedure

(۴) Sliding mesh methods

(۵) Multiple reference frame

(۶) Partly overlapping

(۷) Overlap

(۸) Multiple frame of reference

(۹) External

(۱۰) Non-overlapping

(۱۱) Coupled

معادله‌های رینولدز:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + \quad (2)$$

$$\left[ -\frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right] + S_{Mx}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + \quad (3)$$

$$\left[ -\frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right] + S_{My}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + \quad (4)$$

$$\left[ -\frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w'w'})}{\partial z} \right] + S_{Mz}$$

مدل k-ε معادله‌های زیر را برای پارامترهای آشفتگی در نظر می‌گیرد:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_T, \mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[ \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + G - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div} \left[ \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon \right] + \quad (7)$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} - \gamma \mu_{\text{eff}} E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

در این پژوهش، از مدل RNG-k-ε با ضرایب‌های  $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ،  $C_{2\varepsilon} = 1.68$  و  $C_\mu = 0.0845$  برای شبیه‌سازی چرخش پروانه از مدل MRF استفاده شد. با توجه به وجود بافل‌ها و قابل صرف‌نظر بودن گردابه<sup>(۱)</sup>، برای سقف همزن مشابه دیواره‌های آن شرط مرزی دیواره در نظر گرفته شد. جدول ۱ ابعاد مخزن و شکل ۱ ابعاد همزن‌های مورد استفاده را ارائه می‌کند. مایع مورد استفاده دارای چگالی برابر با آب و ویسکوزیته ۱۰۰۰ سانتی‌پواز است.

شکل ۲ نمایی از مش‌بندی مثلثی ایجاد شده را در صفحه‌ی عمودی گذرنده از وسط همزن‌ها نشان می‌دهد. فضای MRF با استفاده از مش‌بندی چهار وجهی<sup>(۲)</sup> به ۳۲۹۴۵ حجم کنترل برای همزن لنگری و ۳۳۲۳۹ حجم کنترل برای همزن جدید تقسیم شد. بقیه حجم مخزن با استفاده از یک مش‌بندی مشابه به

آکیتتی، بیوا، بای و آرمنانت، تأثیر هیدرودینامیک سیال را بر اختلاط و بازده عمل واکنش در یک راکتور آزمایشگاهی و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. آنها روی اثر نوع همزن، سرعت همزن، تعداد بافل‌ها، محل خوراک و سطح مایع مطالعه کردند و تأثیر آشفتگی جریان بر بازده واکنش را ارائه کردند. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که تعداد بافل‌ها در دورهای بالای همزن (حدود ۵۰۰ rpm) تأثیر زیادی بر بازده واکنش ندارد، ولی در سرعت‌های همزدن پایین (حدود ۱۰۰ rpm) افزایش بافل کاهش بازده را در پی خواهد داشت. اثر وجود بافل در صورت استفاده از همزن توربینی با زاویه ۴۵ درجه نیز تأثیر زیادی بر بازده واکنش ندارد، ولی در صورت استفاده از همزن لنگری، وجود بافل کاهش بازده را به دنبال خواهد داشت. همچنین در صورت استفاده از همزن لنگری در تمامی گستره تغییرهای شدت انتقال انرژی متوسط (ε)، بازده واکنش بیش از زمانی است که همزن توربینی به کار می‌رود، اگرچه هر نوع همزنی به کار رود افزایش ε به کاهش بازده واکنش منجر خواهد شد [۱۴].

برای تهیه سدیم پرپورات در یک واحد نیمه صنعتی، از مخزن موجود در واحد که دارای همزن توربینی دو پره ای بود استفاده شد. برای جلوگیری از تعویض همزن، تصمیم گرفته شد که با افزایش قطر پره‌های موجود و جوش دادن صفحه‌ای به آنها، همزنی ساخته شود که بتواند نقش همزن لنگری به ویژه در پوشش‌دهی به اختلاط در کلیه قسمت‌های مخزن را ایفا کند [۲۰ - ۱۵]. در تحقیق حاضر، به‌منظور بررسی چگونگی عملکرد این همزن از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شد. الگوی جریان و زمان اختلاط این همزن با همزن لنگری که به طور معمول برای اختلاط سیالات لزج به کار می‌رود مورد مقایسه قرار گرفت.

## مدل‌سازی

برای ایجاد شکل هندسی، مش‌بندی و نمایش نتیجه‌ها، از نرم‌افزارهای تجاری موجود استفاده شده است. معادله‌های بقا برای جریان تراکم‌پذیر تحت تأثیر آشفتگی به صورت زیر در می‌آید:

معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (1)$$

(۱) Vortex

(۲) Tetrahedral

جدول ۱- ویژگی‌های مخزن و همزن اختلاط مورد استفاده در واکنش سدیم متابورات و آب اکسیژنه.

دور همزن (rpm)	ضخامت بافل (mm)	عرض بافل (cm)	قطر همزن (cm)	ارتفاع همزن (cm)	قطر مخزن (cm)	فاصله همزن از کف مخزن (cm)
۶۰	۳	۲	۴۳	۵۰	۵۰	۴٫۵

جریان حلقوی متقارن در دو طرف این صفحه تشکیل شده است که مناطق با سرعت بالاتر، مناطقی هستند که قسمت صفحه‌ای همزن از آنجا عبور کرده است. در هر طرف، دو حلقه یکی در پایین و دیگری در بالای صفحه توربینی همزن جدید تشکیل شده است. همچنین سیال از بالا و پایین مخزن در امتداد محور به سمت مرکز همزن جدید حرکت کرده و از آنجا با سرعت قابل ملاحظه‌ای به سمت دیواره‌های مخزن حرکت می‌کند. شکل‌های ۷ و ۸، بردار و کانتور سرعت روی صفحه عمودی گذرنده از تیغه‌های همزن‌ها ( $z=0$ ) را نشان می‌دهند.

با توجه به این که مناطق بین همزن و خط اول کانتور در شکل (۷- الف و ۷- ب) مناطقی هستند که در آنها سرعت سیال از نیم متر بر ثانیه بیشتر است، مشاهده می‌شود که فقط در منطقه بسیار کوچکی در نزدیک همزن لنگری مقدار سرعت کل از ۰٫۵ بیشتر است. همچنین می‌توان دریافت که برای این همزن شیب خطوط کانتور در این صفحه زاویه به تقریب ۴۵ درجه تشکیل می‌دهد.

همچنین برای همزن لنگری، جهت حرکت سیال از ارتفاع ۱۰ تا ۲۵ سانتی‌متر (وسط مخزن) افقی و به سمت مرکز مخزن و بعد از آن با سرعت خیلی کم به سمت مرکز مخزن و بالاست، درحالی که در مورد همزن جدید از روی کانتور سرعت دیده می‌شود که نسبت به همزن لنگری مناطق بیشتری سرعت بالاتر از ۰٫۵ دارند. همچنین در کانتور سرعت این همزن به هم خوردگی دیده می‌شود که نشان می‌دهد سیال‌های با سرعت بالا و سرعت پایین به نحو مطلوب تری با هم مخلوط می‌شوند. از روی بردار سرعت همزن جدید نیز می‌توان دید که سیال از مناطق متفاوت به پشت همزن رسیده و با سرعت قابل ملاحظه‌ای به سمت طرفین پرتاب می‌شود. در شکل ۹ تغییرهای سرعت کل در جهت شعاعی برای دو همزن مورد مقایسه قرار گرفته است. برای ترسیم این نمودار از مقدار سرعت روی سطح استوانه‌هایی به شعاع‌های متفاوت در داخل ظروف همزن متوسط‌گیری شده و روی نمودار ترسیم شده است.

این شکل نشان می‌دهد که سرعت کل در هر دو همزن با فاصله گرفتن از محور همزن زیاد شده در فاصله حدود ۲۰ سانتی‌متر به

۶۲۱۱۷ حجم کنترل تقسیم شد. از روش مجزاسازی درجه اول در محاسبه‌ها استفاده شد.

برای حصول نتیجه‌های نهایی، محاسبه‌ها تکرار<sup>(۱)</sup> شد تا این که مقدارهای باقی‌مانده معادله‌های پیوستگی، مؤلفه‌های سرعت،  $k$  و  $\varepsilon$  به کم‌تر از  $10^{-4}$  رسید، و هم‌گرایی لازم ایجاد شد.

### نتیجه‌ها و بحث

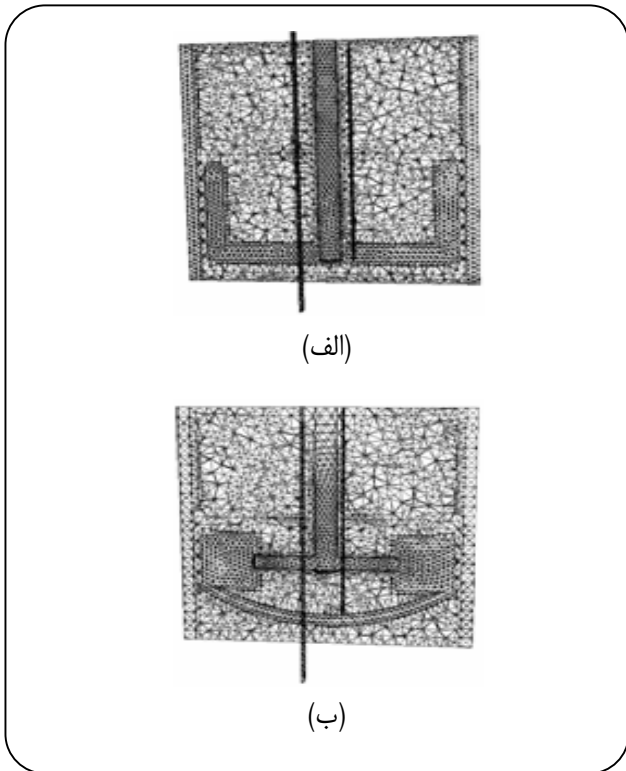
به منظور بررسی نقش هر یک از همزن‌ها کانتور و بردار سرعت در صفحه افقی گذرنده از مرکز پروانه رسم شده است (شکل‌های ۳ و ۴). با توجه به این دو شکل می‌توان دید که همزن لنگری در صفحه‌ای افقی یک جریان متقارن بدون گردابه ایجاد می‌نماید. همچنین کانتور ایجاد شده دارای خطوطی متقارن در دو طرف پروانه همزن است به نحوی که دو الگوی مشابه در نزدیک پروانه و دو الگوی مشابه هم در فضای دورتر از پروانه تشکیل می‌شود. حداکثر سرعت در نزدیک پره‌های پروانه بوده و در آن محدوده ایجاد دنباله می‌کند. در حالی که برای همزن جدید نسبت به همزن لنگری منطقه با سرعت بالا وسیع‌تر شده است و دنباله‌های تشکیل شده در پشت پروانه بزرگتر شده‌اند.

شکل‌های ۵ و ۶، بردار و کانتور سرعت روی صفحه عمودی گذرنده از وسط پروانه ( $x=0$ ) را نشان می‌دهند. با توجه به کانتور سرعت می‌توان دریافت که به جز منطقه پایین مخزن و نزدیک انتهای قسمت افقی پروانه همزن لنگری، سرعت مقدارهای بسیار کمی دارد.

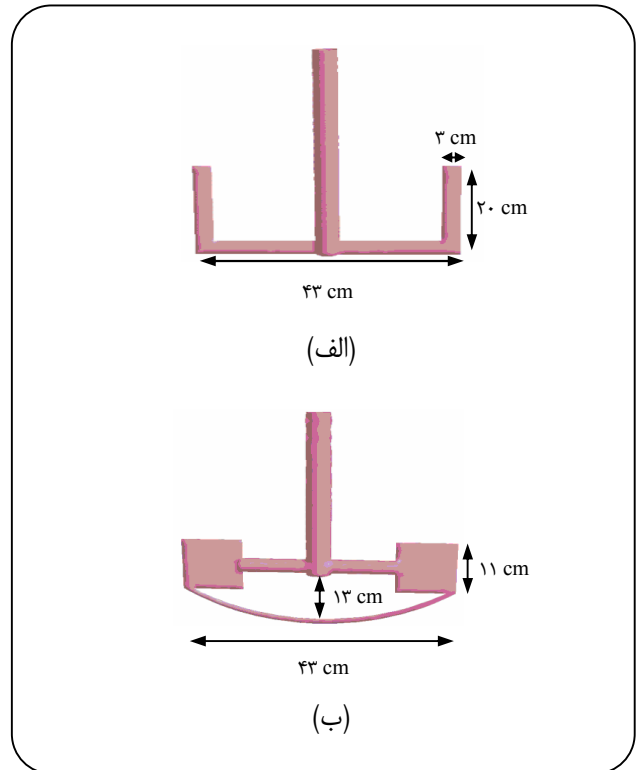
همچنین می‌توان دید که خطوط کانتور از زاویه صفر درجه نسبت به افق در پایین مخزن به زاویه ۴۵ درجه در بالای مخزن رسیده است. در جهت محور همزن با افزایش ارتفاع از سرعت سیال کاسته می‌شود.

اندازه‌ی بردارهای سرعت رسم شده به نسبت مقدارهای اندازه سرعت‌هاست. با توجه به بردارهای سرعت شکل (۶ - الف) می‌توان گفت که سیال در این صفحه از مرکز به سمت دیواره‌ها حرکت می‌کند. در حالی که برای همزن جدید (شکل ۶ - ب) دو

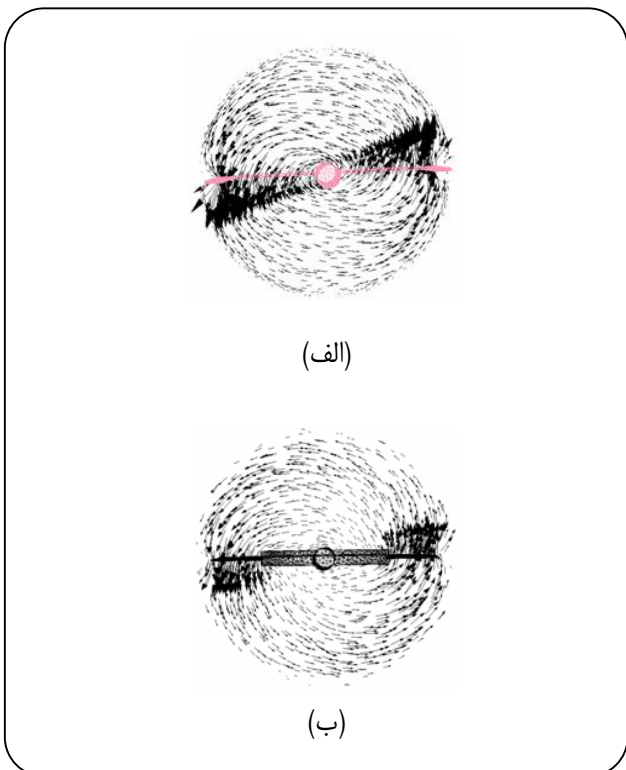
(1) Iteration



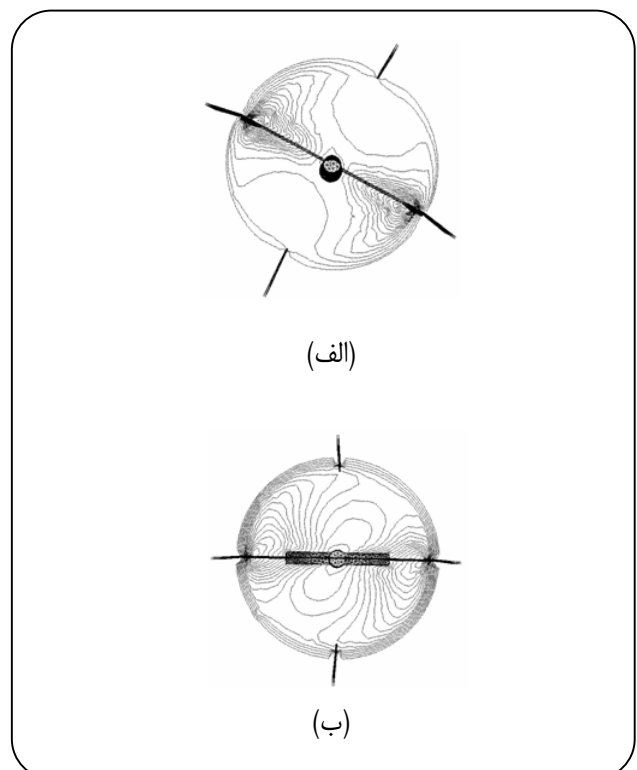
شکل ۲- مش بندی انجام شده برای دو همزن.



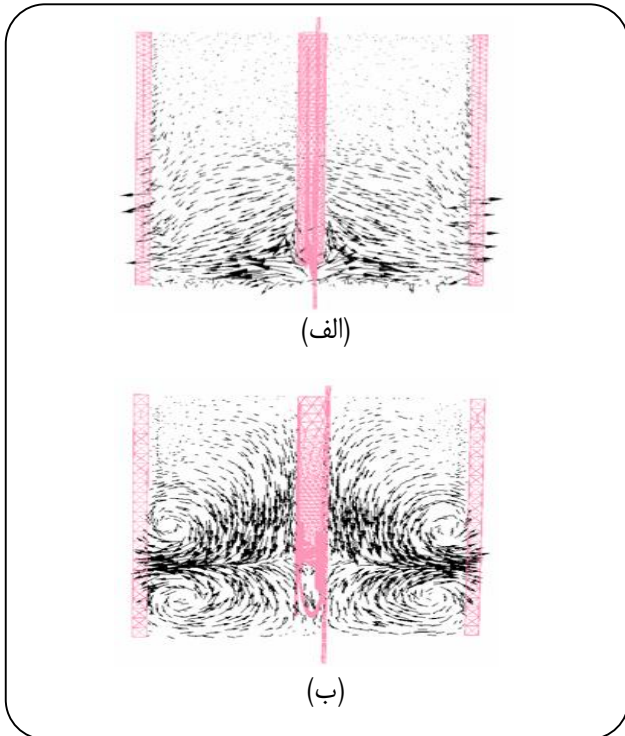
شکل ۱- ابعاد هندسی: الف) همزن لنگری، ب) همزن جدید.



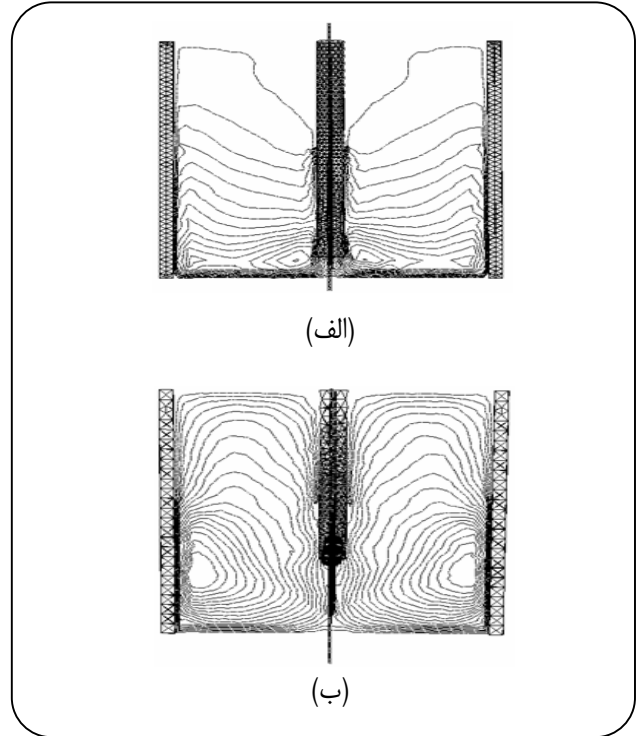
شکل ۴- بردارهای سرعت در صفحه‌ی افقی گذرنده از وسط همزن: الف) همزن لنگری، ب) همزن جدید.



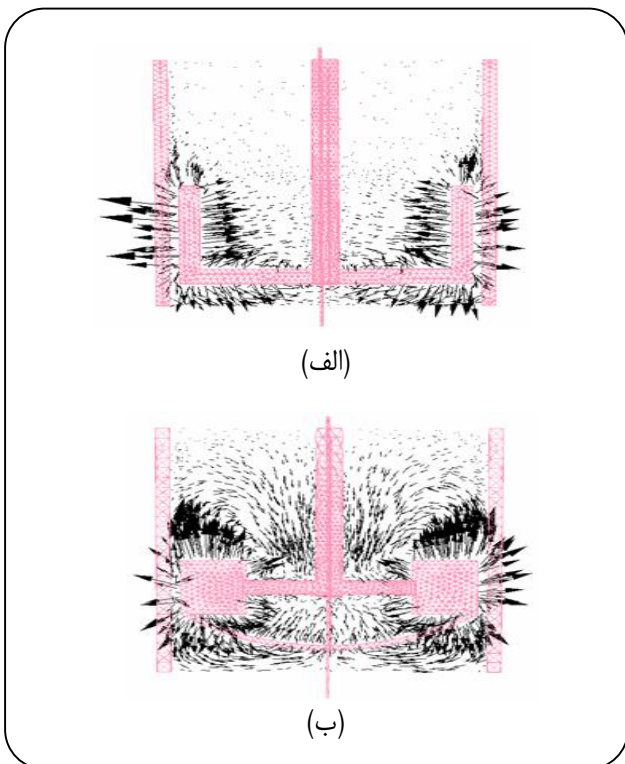
شکل ۳- کانتور سرعت در صفحه‌ی افقی گذرنده از وسط همزن: الف) همزن لنگری، ب) همزن جدید.



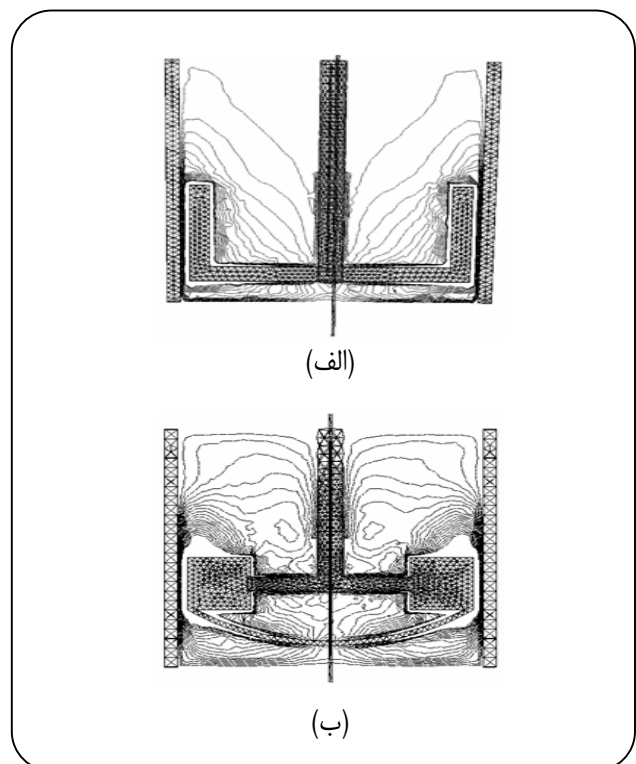
شکل ۶ - بردارهای سرعت کل روی صفحه  $x=0$ : الف همزن لنگری،  
(ب) همزن جدید.



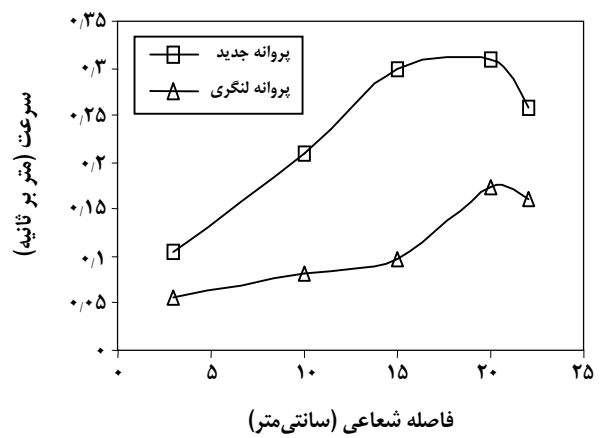
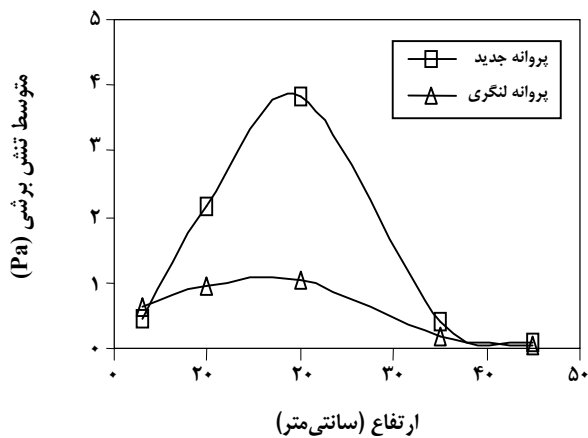
شکل ۵ - کانتور سرعت کل روی صفحه  $x=0$ : الف همزن لنگری،  
(ب) همزن جدید.



شکل ۸ - بردارهای سرعت روی صفحه  $z=0$ : الف همزن لنگری،  
(ب) همزن جدید.

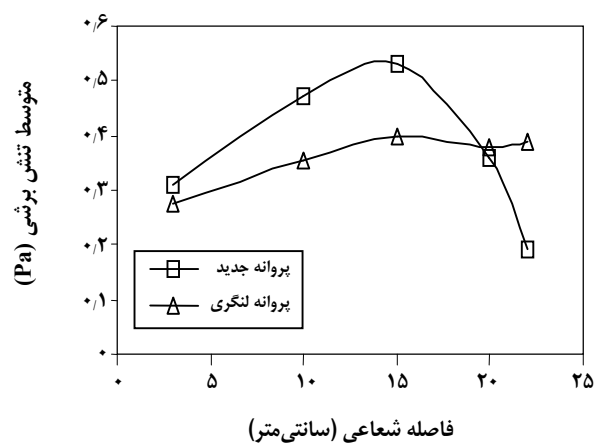
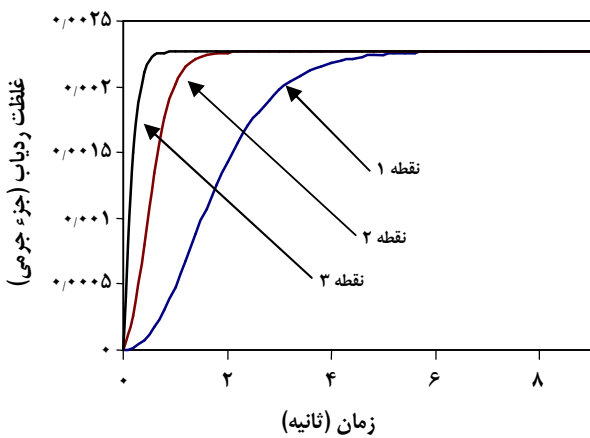


شکل ۷ - کانتور سرعت روی صفحه  $z=0$ : الف همزن لنگری،  
(ب) همزن جدید.



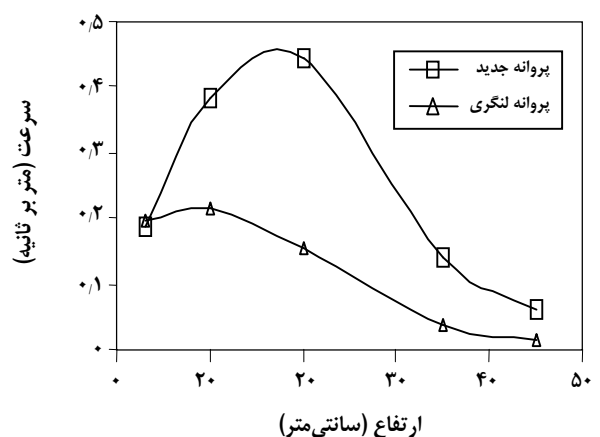
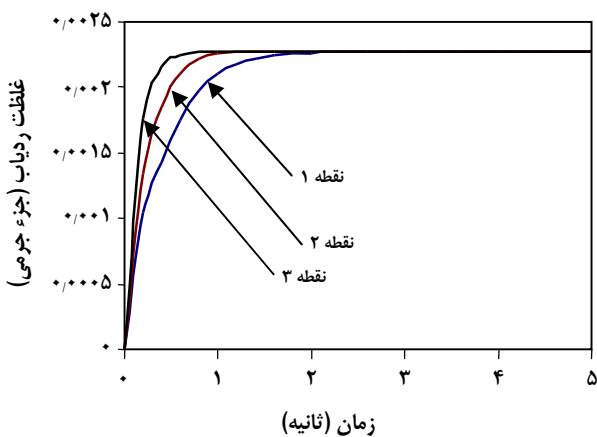
شکل ۸- مقایسه تغییرهای تنش برشی متوسط نسبت به ارتفاع از کف مخزن.

شکل ۹- مقایسه تغییرهای سرعت متوسط در جهت شعاعی.



شکل ۱۲- تغییرهای غلظت ردیاب در طول زمان در ظرف مجهز به همزن لنگری.

شکل ۱۰- مقایسه تغییرهای تنش برشی متوسط در جهت شعاعی.



شکل ۱۴- تغییرهای غلظت ردیاب در طول زمان در ظرف مجهز به همزن جدید.

شکل ۱۱- مقایسه تغییرهای سرعت متوسط نسبت به ارتفاع از کف مخزن.

شکل ۱۳ نتیجه‌های به دست آمده برای همزن لنگری و شکل ۱۴ نتیجه‌های مربوط به همزن جدید را نشان می‌دهد. همچنان که از نمودارهای سرعت و تنش برشی قابل انتظار است، همگن شدن در مناطق نزدیک به کف ظرف که مقادیر سرعت و تنش برشی بیشتری دارند سریع تر اتفاق می‌افتد. همچنین با مقایسه نمودارهای شکل‌های ۱۳ و ۱۴ می‌توان نتیجه گرفت که زمان اختلاط کامل در ظرف مجهز به همزن جدید کم‌تر از نصف زمان اختلاط در همزن لنگری است.

### نتیجه‌گیری نهایی

با توجه به نتیجه‌های ارایه شده می‌توان دریافت که اختلاط و همگن شدن در قسمت پایین ظرف سریع‌تر از قسمت بالای آن صورت می‌گیرد. همچنین همزن جدید در اختلاط مایعات در شرایط مشابه کارایی بیشتری نسبت به همزن لنگری متداول نشان می‌دهد. به عبارت دیگر همزن جدید توزیع مناسب تری از اندازه‌ی سرعت در ظرف ایجاد کرده و باعث می‌شود که زمان اختلاط به حدود نصف این زمان در ظرف مجهز به همزن لنگری برسد. می‌توان گفت که دلیل این امر شکل هندسی آن است، بدین معنی که در همزن جدید وجود توام پره‌های عمودی و نوار قوسی شکل سبب چرخش مناسب‌تر سیال و انتقال راحت‌تر آن در فضای مخزن و نیز ایجاد گردابه و دنباله‌های زیادتر می‌شود.

### تشکر و قدردانی

از دکتر مسعود رحیمی مدیر مرکز تحقیقات کاربردی CFD در مهندسی شیمی دانشگاه رازی به خاطر راهنمایی‌های ایشان در زمینه شبیه‌سازی و برنامه‌نویسی تشکر و قدردانی می‌گردد.

تاریخ دریافت: ۱۵/۳/۲۰۰۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۶/۴/۱۸

ماکسیمم رسیده و از آنجا به بعد با نزدیک شدن به دیواره مخزن کاهش می‌یابد. دیده می‌شود که مقادیرهای متوسط سرعت در جهت شعاعی در همزن جدید به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. در شکل ۱۰ تغییرهای تنش برشی در جهت شعاعی برای دو همزن مقایسه شده است که جز در نزدیکی دیواره مخزن در بقیه نقاط تنش برشی همزن جدید بیشتر از همزن لنگری است. در شکل ۱۱ تغییرهای سرعت متوسط نسبت به ارتفاع از کف مخزن برای دو همزن ارایه شده است. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان گفت که برای همزن جدید ماکسیمم سرعت در ارتفاع حدود ۲۰ سانتی‌متر حاصل می‌شود، درحالی که ماکسیمم سرعت متوسط برای پروانه لنگری با فاصله حدود ۱۰ سانتی‌متر از کف مخزن است. در این‌جا نیز به جز نزدیک کف مخزن، در بقیه مناطق سرعت ایجاد شده به وسیله‌ی همزن جدید بیشتر است. در شکل ۱۲ تغییرهای تنش برشی نسبت به ارتفاع مخزن برای دو همزن مقایسه شده است. می‌توان ملاحظه کرد که مقادیرهای تنش برشی به‌ویژه در ارتفاع ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر از کف برای همزن جدید به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. همچنین دیده می‌شود که ماکسیمم تنش برشی برای هر دو در ارتفاع حدود ۲۰ سانتی‌متر حاصل می‌شود. در کل این دو پروانه در مناطق تحتانی مخزن اختلاط به تقریب مشابهی ایجاد می‌کنند، ولی در بقیه مناطق مقادیرهای سرعت و تنش برشی ایجاد شده به‌وسیله‌ی همزن جدید به مراتب بیشتر بوده و اختلاط مناسب‌تری ایجاد می‌نماید. برای اطمینان بیشتر از نتیجه‌گیری به عمل آمده از بررسی کانتورها نمودارهای سرعت و تنش برشی، روند همگن شدن در دو همزن، با تزریق یک ردیاب و بررسی تغییرهای غلظت آن در چند نقطه دلخواه انجام شد. تزریق در نزدیک سطح فوقانی ظرف همزن انجام شد و تغییرهای غلظت ردیاب در سه نقطه در وجه مقابل مکان تزریق (نقطه ۱ در نزدیک سطح و نقاط ۲ و ۳ به ترتیب به فاصله‌های ۳۵ و ۱۵ سانتی‌متر از کف ظرف) در طول محاسبه شد.

### مراجع

- [1] Zlokarnik, M., *Stirring*, Chap. 1, Wiley-VCH, New York, (2001).
- [2] Walas, M. S. et al., *Chemical Process Equipment*, Chap. 10, 2<sup>nd</sup> ed., Gulf. Pub., UK, (2005).
- [3] Ullman's *Processes and Process Engineering*, Vol. 2, Wiley-VCH, New York, (2004).
- [4] Launder, B. E., Spalding, D. B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, p. 269, (1974).



- [5] Dakhel, A. A., Rahimi, M., "CFD Simulation of Homogenization in Large-Scale Crude Oil Storage Tanks", *J. of Petrol. Sci. and Eng.*, **43** (3-4), p. 151 (2004).
- [6] Rahimi, M. and Parvareh, A., Experimental and CFD Investigation on Mixing by a Jet in a Semi-Industrial Stirred Tank, *Chemical Engineering Science, Elsevier*, p. 85 (2005).
- [7] Rahimi, M. and Parvareh, A., CFD Study on Mixing by Coupled Jet-Impeller Mixers in a Large Crude Oil Storage Tank, *Computers and Chemical Engineering, Elsevier*, p. 737 (2004).
- [8] Versteeg, H. K., Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Addison Wesley Longman Limited, New York, (1996).
- [9] Yakhot V., Orszag S. A., Renormalization Group Analysis of Turbulence: I. Basic Theory, *Journal of Scientific Computing*, **1**, p. 1 (1986).
- [10] Luo, J. Y., Gosman, A. D., "Prediction of Impeller-Induced Flows in Mixing Vessels Using Multiple Frame of Reference", *Chem. Eng. Symp.*, Vol. 136, p. 549, (1994).
- [11] Luo, J. Y., Gosman, A. D., Issa, R.I., Middleton, J.C. and Fitzgerald, M.K., Full Flow Field Computation of Mixing in Baffled Stirred Vessels, *Trans. Ind. Chem. Eng.*, **71A**, p.342 (1993).
- [12] Aubin, J., Fletcher, F.D., Xuereb, C., Modeling Turbulent Flow in Stirred Tanks with CFD: The Influence of the Modeling Approach, Turbulence Model and Numerical Scheme, *Exp. Therm. and Fluid Science*, **28**, p. 431(2004).
- [13] Sahu, K. A., Kumar, P., Patwardhan, W.A., Joshi, B.J., CFD Modeling and Mixing in Stirred Tanks, *Chem. Eng. Sci.*, **54**, p. 2285 (1999).
- [14] Akiti, Q., Yeboah, A., Armenante, M.P., Hydrodynamic Effects on Mixing and Competitive Reactions in Laboratory Reactors, *Chem. Eng. Sci.*, **60**, p. 2341 (2005).
- [15] Yuksel, Y. G., Sayan, P., Titiz, S., Bulutcu, A. N., Solubility of Sodium Perborate Tetrahydrate in Water & Sodium Metaborate Solution, *J. of Cryst. Growth*, **41**, p. 586 (1996).
- [16] Frances, C., Biscans, B. and Laguerie, C., Some Physicochemical Data on Tetrahydrate Sodium Perborate in Aqueous Solutions, *J. Chem. Eng. Data*, **35**, p. 423 (1990).
- [17] Vrhunec, A., et al., Crystal Size Distribution in Batch Sodium Perborat Precipitation, *Acta Chim. Slov.*, **46**(4), p. 543 (1999).
- [18] Livk, I., Pohar, C., Industrial Crystallization from Solution, The Peciption of Sodium Perborate, *Acta Chim. Slov.*, **48**, p. 505 (2001).
- [19] Sohnel, O., et al., Growth Kinetics of Sodium Perborate from Crystallization, *Journal of Crystal. Growth*, **160**(3-4), p. 355 (1996).
- [20] Mandare, N. P., Pangarkor, G. V., Semi-Batch Reactive Crystallization of Sodem Perborat Tetrahydrate: Effect of Mixing Parameters on Crystal Size, *Chem. Eng. Sci.*, **58**, p. 1125 (2003).