

# مدل سازی CFD و بررسی اثر بافل در کیفیت اختلاط فرآیند تولید پرپورات سدیم

اصغر علیزاده داخل<sup>۲</sup>مجتبی سمنانی رهبر<sup>۱</sup>

دانشکده علوم

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رشت

(تاریخ دریافت: ۸۸/۱۰/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۲/۱۲)

دانشگاه جامع امام حسین (ع)

## چکیده

شناخت الگوی جریان می تواند نقش مهمی در بهینه سازی فرآیند اختلاط ایفا کند. برای تهیه پرپورات سدیم چهار آبه، متابورات سدیم و آب اکسیژنه در یک مخزن با هم مخلوط شده واکنش می دهند و برای اختلاط از همزن توربینی دو پره ای استفاده می شود. در این تحقیق، اختلاط در راکتور تهیه پرپورات سدیم با استفاده از دینامیک سیالات عددی مدل سازی شده و اثر افزودن بافل بر کیفیت اختلاط مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا جریان داخل راکتور بدون بافل و بافل دار به صورت پایا مدل سازی شده است. بررسی الگوی جریان ایجاد شده نشان می دهد که گرچه افزایش بافل ها سبب کاهش سرعت متوسط داخل ظرف می شود، اما این کاهش سرعت فقط برای حرکت سیال در جهت چرخش پروانه های همزن است. بررسی مؤلفه های سرعت و تنش برشی نشان می دهد که افزودن بافل ها باعث افزایش سرعت در جهت های شعاعی و محوری می شود. نتیجه های به دست آمده در حالت پایا برای مدل سازی همگن شدن داخل راکتورها استفاده شده است. مدل سازی اختلاط در حالت ناپایا نشان می دهد که افزودن بافل ها سبب بهبود اختلاط داخل ظرف و کاهش زمان اختلاط به میزان بیش از ۶۰٪ می شود.

**واژه های کلیدی:** اختلاط، بافل، پرپورات سدیم، دینامیک سیالات عددی (CFD)

## Computation Fluid Dynamics Modeling for Determination of Baffle Effect on Mixing Efficiency in Sodium Perborate Production Process

M. Semnani-Rahbar

A. Alizadeh-Dakhel

Sci. Dep't.

Rasht Branch

Islamic Azad Univ.

Imam Hossein Univ.

(Received: 11 Jan., 2010; Accepted: 2 May, 2011)

### ABSTRACT

Knowledge of fluid flow can play a basic role in optimizing mixing processes. In preparation of sodium perborate, sodium metaborate and hydrogen peroxide, as raw materials, mix and react in the presence of a turbine mixer. In this investigation, the effect of the presence of baffle in a mixing tank equipped with a two-impeller turbine agitator was studied. At first, steady state flow in the tank with and without baffles was modeled. The results show that application of baffles causes reduction of mean velocity in the tank. In contrary, radial and axial velocities increase. Secondly, the results were used for unsteady modeling, which showed that addition of baffles in the tank causes increase of mixing quality and reduction of the required mixing time of more than 60%.

**Keywords:** Mixing, Baffle, Sodium Perborate, Computational Fluid Dynamics (CFD)

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): msmnani@ihu.ac.ir

۲- استادیار: alizadeh@iaurasht.ac.ir

## ۱- مقدمه

پربورات سدیم با فرمول شیمیایی  $\text{NaBO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ، در انواع چهار آبه، سه آبه، یک آبه و بدون آب یافت می‌شود که نوع‌های چهار آبه و یک آبه آن کاربردهای صنعتی بیشتر و مهم‌تری دارند. برای تهیه پربورات سدیم چهار آبه، متابورات سدیم با آب اکسیژنه در یک مخزن همزن‌دار واکنش می‌دهند.

در واکنش تولید پربورات سدیم چهار آبه، زمان ریزش محلول متابورات سدیم، شدت جریان و نوع ماده پایدارکننده مورد استفاده و چگونگی ریزش آن به درون محلول واکنش، سرعت و نوع همزن و فوق اشباعیت محلول پربورات حاصل در محیط واکنش، از پارامترهای تأثیرگذار بر روی ابعاد کریستال‌ها و میزان تخلخل آنهاست [۶-۱].

با توجه به اهمیت نقش نوع همزن و الگوی جریان در اختلاط مواد اولیه در واکنش تولید پربورات سدیم چهار آبه، چگونگی عمل اختلاط می‌تواند نقش مهمی در افزایش محصول، دانه‌بندی و تخلخل آن داشته باشد. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) روشی است که نتیجه‌های حاصل از آن شامل جزئیات مشخصه‌های جریان (سرعت، تنش برشی، آشفتگی، فشار و ...) در دامنه حل است. مطالعات زیادی برای استفاده از این روش در شناخت الگوهای جریان، به ویژه در سیستم‌های پیچیده مثل اختلاط صورت گرفته است. اوبین<sup>۱</sup> و همکارانش با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی یک مخزن همزن‌دار دارای رژیم جریان آشفته را مدل کردند و اثر مدل آشفتگی انتخابی را در رژیم جریان به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌های تحقیق آنها نشان داد که مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  RNG می‌تواند رژیم جریان آشفته تک فازی را به خوبی پیش‌بینی کند [۷]. ساهو<sup>۲</sup> و همکارانش تأثیر پنج پروانه با جریان محوری را در یک مخزن همزن‌دار با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مدل کردند. آنها از روش و مفاهیم ارائه شده توسط ساهو استفاده کرده و انرژی جنبشی جریان آشفته را محاسبه نمودند. آنها همچنین مدلی با استفاده از شدت انتقال انرژی آشفتگی ارائه کردند که می‌تواند تخمین عددی مناسبی به دست دهد [۸]. آکیتی<sup>۳</sup> و

همکارانش تأثیر هیدرودینامیک سیال را بر اختلاط و راندمان عمل واکنش در یک راکتور آزمایشگاهی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. آنها بر روی تأثیر نوع همزن، سرعت همزن، تعداد بافل‌ها، محل خوراک و سطح مایع مطالعه نموده و تأثیر آشفتگی جریان بر بازده واکنش را ارائه کردند. نتیجه‌ها نشان داد که تعداد بافل‌ها در دوره‌های بالای همزن (حدود ۵۰۰ rpm) تأثیر زیادی بر بازده واکنش ندارد ولی در سرعت‌های همزدن پائین (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 تغییرات شدت انتقال انرژی متوسط ( $\epsilon$ )، بازده واکنش بیش از زمانی است که همزن توربینی به کار می‌رود. اگرچه هر نوع همزنی به کار رود، افزایش  $\epsilon$  به کاهش بازده واکنش منجر خواهد شد [۹].

در مدل‌سازی به روش CFD، ابتدا فضای حرکت سیال به اجزاء کوچک تقسیم می‌شود. آنگاه معادلات مشتقات جزئی بیانگر جریان (که صورت مناسبی از معادلات ناویر-استوکس است) بر تمام این مش‌ها (حجم‌های کنترل) اعمال می‌شود. در نتیجه تعداد زیادی معادلات غیرخطی به دست می‌آید که باید به طور هم‌زمان حل شوند. حل این معادلات با استفاده از الگوریتم‌های عددی انجام می‌گیرد. برای حل معادلات، نیاز به استفاده از مدل آشفتگی مناسب وجود دارد که مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG یکی از معتبرترین مدل‌های ارائه شده است. در این مدل تأثیر آشفتگی در مقیاس‌های کوچک به وسیله یک تابع وزنی تصادفی در معادلات 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 [۱۰-۱۱]. مهم‌ترین بخش مدل‌سازی مخازن همزن‌دار، مدل کردن چرخش همزن است. سه روش معروف برای مدل کردن همزن وجود دارد: شرط مرزی همزن، ورودی-خروجی متناوب و روش‌های مش لغزنده. این مدل‌ها برای مدل‌سازی همزن در داخل ظروف اختلاط که پروانه به صورت عمودی در وسط

1- Aubin

2- Sahu

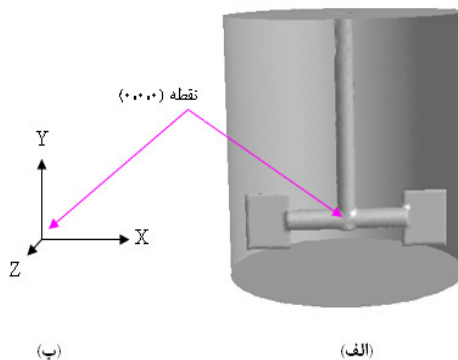
3- Akiti

این است که زمان محاسباتی مورد نیاز در روش MFR بسیار کوتاه‌تر است [۱۴].

در این تحقیق اثر افزودن بافل به راکتور تولید پربورات سدیم جهت افزایش کیفیت اختلاط مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا ظرف همزن‌دار با ابعاد و شکل هندسی موجود با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی مدل‌سازی شد. سپس چهار بافل به ظرف همزن‌دار اولیه افزوده شد و محاسبات CFD برای این ظرف مجهز به بافل انجام شد. با مقایسه مقادیر سرعت کل، مؤلفه‌های سرعت و تنش برشی در دو حالت فوق، اثر افزایش بافل به ظرف همزن‌دار بر الگوی جریان مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌های محاسبات حالت پایا برای مدل‌سازی همگن شدن یک ماده ردیاب در داخل ظرف‌های اختلاط استفاده شد. برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل  $k-\epsilon$  RNG و برای مدل‌سازی چرخش پروانه از مدل MFR که صحت و دقت آنها برای مدل - سازی فرآیندهای اختلاط در مطالعات قبلی به اثبات رسیده است [۱۴-۱۳]، استفاده شد.

## ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی

از یک مخزن استوانه‌ای با کف مسطح به عنوان ظرف اختلاط استفاده شد. همزن استفاده شده متشکل از یک همزن توربینی دو پره‌ای است. شکل ۱ ظرف اختلاط و همزن استفاده شده را نشان می‌دهد. همچنین مبدأ و محورهای مختصات که در قسمت تجزیه و تحلیل نتیجه‌های به دست آمده از محاسبات CFD مورد استفاده قرار می‌گیرد، در این شکل نشان داده شده است.



شکل (۱): ظرف همزن مورد استفاده در فرآیند تهیه پربورات سدیم، الف) مبدأ، ب) محورهای مختصات.

تانک قرار می‌گیرد، بیان شده‌اند ولی بعضی از آنها برای ظروف اختلاط با شکل هندسی و شرایط دیگر نیز قابل استفاده هستند.

در روش شرط مرزی همزن که قدیمی‌ترین روش است و در مطالعات زیادی صحت آن در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی تأیید شده است، شرایط پایا در نظر گرفته می‌شود و شبیه‌سازی بر روی ظرف مرجع مرکب انجام می‌شود. در روش ورودی-خروجی، کل حجم تانک به دو منطقه که به طور جزئی همدیگر را می‌پوشانند، تقسیم می‌شود. دامنه داخلی شامل همزن و دامنه خارجی شامل بقیه حجم تانک است. در این روش یک فرضی استوانه‌ای در حد فاصل بین لبه بافل و پروانه تعریف می‌شود. آنگاه پاسخ جریان بر روی این مرز متوسط‌گیری می‌شود. مقادیر حاصل به عنوان یک شرط مرزی خارجی برای محاسبات مرحله بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد. تکرار این محاسبات، به یک جواب همگرا برای جریان حالت پایا منجر خواهد شد. خصوصیت برجسته این روش وجود یک منطقه مشترک بین مناطق داخلی و خارجی است که انطباق دو پاسخ را به صورت محاسبات تکرار می‌سازد. اندازه و موقعیت مکانی این منطقه کاملاً اختیاری است. در مقابل، در روش ظرف مرجع مرکب (MRF) جواب‌های حالت پایای جریان برای منطقه داخلی و خارجی به صورت ضمنی روی یک مرز صفحه‌ای میانگین‌گیری می‌شود و محاسبات تکرار خارجی نیاز نیست [۱۲].

در روش مش لغزنده، دامنه حل به دو دامنه استوانه‌ای بدون فضای مشترک تقسیم می‌شود که هر کدام به عنوان یک قسمت جداگانه مش‌بندی می‌شوند. قسمت خارجی ثابت است و قسمت داخلی به همراه همزن می‌چرخد. در این روش برخلاف روش‌های قبلی، محاسبات به صورت وابسته به زمان به همراه حرکت مش‌ها نسبت به هم انجام می‌گیرد. دو منطقه به صورت ضمنی در مرز بین دو ناحیه از طریق الگوریتم مش لغزنده که لغزش بین دو منطقه را مد نظر قرار می‌دهد، با هم آمیخته می‌شوند [۱۳]. از بین مدل‌های فوق، دو مدل MFR و مش لغزنده برای شبیه‌سازی مخازن قابل استفاده‌تر است. مزیت اصلی روش MFR که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، نسبت به روش مش لغزنده،

شرط مرزی دیواره بدون لغزش<sup>۱</sup> و برای سقف ظرف از شرط دیواره با تنش برشی صفر استفاده شد. در تمام مدل‌سازی‌های انجام شده، محاسبات تکرار تا رسیدن مقادیر خطای معادلات پیوستگی، مؤلفه‌های سرعت،  $k$  و  $\epsilon$  به کمتر از  $10^{-4}$  و همگرا شدن پاسخ انجام شد. مدل‌سازی در دو حالت پایا و ناپایا انجام شد. نتیجه‌های به دست آمده از حالت پایا (سرعت در نقاط مختلف) برای بررسی زمان اختلاط در مدل‌سازی ناپایا مورد استفاده قرار گرفت.

### ۳-۱- ایجاد شکل هندسی و گریدبندی

شکل هندسی ظرف اختلاط و همزن با استفاده از نرم‌افزار GAMBIT ترسیم شد. کل حجم سیال داخل ظرف به دو قسمت، مرجع مرکب (MFR) که شامل پروانه است و بقیه ظرف، تقسیم شد. از مش‌های چهار وجهی برای تقسیم هر کدام از حجم‌ها به حجم‌های کنترلی کوچک به وسیله نرم‌افزار GAMBIT استفاده شد. جهت بررسی استقلال محاسبات از تعداد حجم‌های کنترلی، مش‌بندی برای مخزن بدون بافل با سه اندازه مختلف انجام شد و مقادیر سرعت به دست آمده در شرایط یکسان سرعت همزن برای این سه نوع مش‌بندی مورد مقایسه قرار گرفت. تعداد سل‌های (حجم‌های کنترلی) ایجاد شده برای این سه حالت در جدول ۲ آورده شده است.

**جدول (۲):** تعداد سل‌ها در قسمت‌های مختلف ظرف بدون بافل.

حالت سوم	حالت دوم		حالت اول		تعداد سل‌ها
	MFR	بقیه ظرف	MFR	بقیه ظرف	
۶۸۰،۵۷۵	۷۱۳،۷۰۱	۱۰۱،۶۸۷	۲۰۳،۵۲۷	۱۶،۵۸۷	۳۰،۷۰۷
۱،۳۹۴،۲۷۶	۳۰۵،۲۰۵	۴۷،۲۹۴			

شکل ۲ نمودار مقادیر سرعت بر روی یک خط عمودی به فاصله ۱۰cm از مرکز ظرف را برای این سه حالت مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر سرعت

محور  $y$  در راستای عمودی،  $x$  در جهت پره‌ها و محور  $z$  عمود بر آن تعریف شده است. ابعاد و مشخصات همزن، ظرف اختلاط آزمایشگاهی استفاده شده و نیز بافل‌هایی که برای بهبود اختلاط در مدل‌سازی به آن اضافه شد در جدول ۱ آورده شده است. مایع مورد استفاده، محلول پربورات سدیم با لزجت ۲ سانتی پواز و دانسیته  $1150 \text{ kg/m}^3$  بوده است.

**جدول (۱):** مشخصات مخزن و همزن اختلاط مورد استفاده

در واکنش متابورات سدیم و آب اکسیژنه.

فاصله همزن از کف ظرف	قطر ظرف	ارتفاع ظرف	قطر همزن	تعداد بافل	عرض بافل	ضخامت بافل	دور همزن
۵/۴ cm	۵۰ cm	۵۰ cm	۴۳ cm	۴	۲ cm	۳ mm	۶۰ rpm

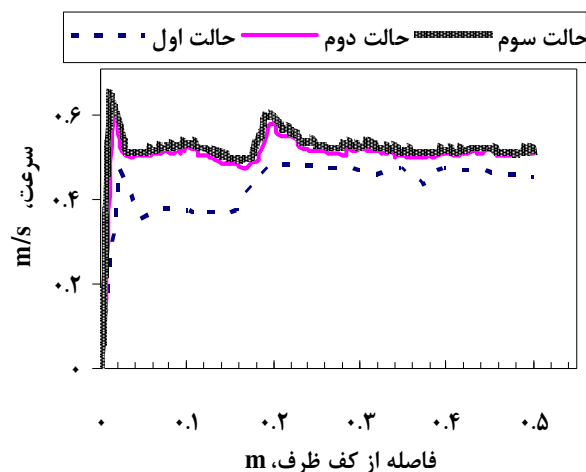
### ۳-۲ مدل‌سازی CFD

مخزن اختلاط بافل‌دار و بدون بافل با ابعاد مخازن آزمایشگاهی که در جدول ۱ آورده شده است، به روش دینامیک سیالات محاسباتی در سه بعد با استفاده از نرم‌افزار FLUENT 6.2 مدل‌سازی شد. برای شبیه‌سازی چرخش پروانه از مدل MFR استفاده شد. هم‌چنان که ذکر گردید در این مدل محاسبات به صورت پایا انجام می‌شود و مقادیر به دست آمده برای سرعت و سایر کمیت‌ها در واقع مقادیر متوسط زمانی هستند. عدد رینولدز برای همزن از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۵]:

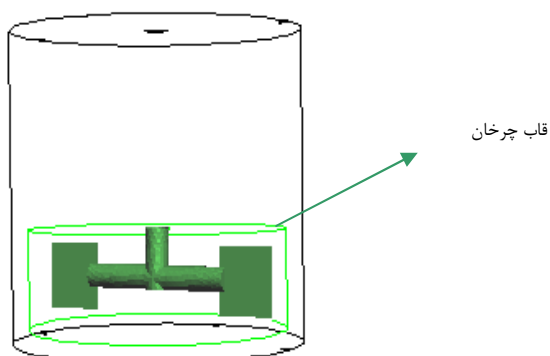
$$Re = \frac{ND^2}{\nu} \quad (1)$$

که در آن،  $N$  تعداد دور همزن در یک ثانیه،  $D$  قطر همزن و  $\nu$  لزجت سینماتیکی بر حسب  $\text{m}^2/\text{s}$  است. با توجه به اطلاعات داده شده، عدد رینولدز در داخل ظرف حدود  $83,000$  خواهد بود. از آنجایی که اعداد رینولدز بزرگ‌تر از  $4,000$  نشان‌دهنده جریان آشفتنه هستند، بنابراین، رژیم جریان در داخل ظرف کاملاً آشفتنه بوده و استفاده از مدل آشفتگی ضروری است.

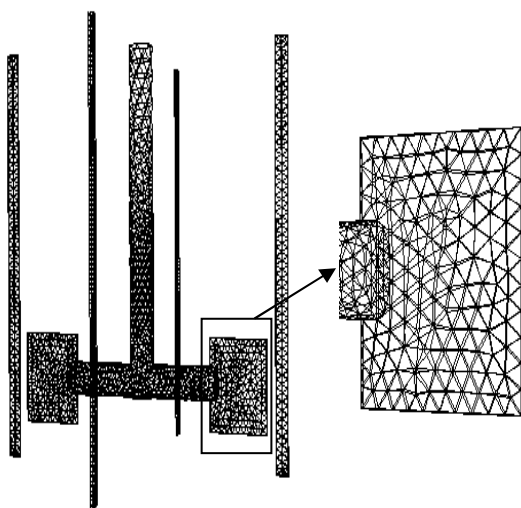
در این تحقیق اثرات آشفتگی با استفاده از مدل  $k - \epsilon$  RNG مد نظر قرار گرفت. برای کف و دیواره ظرف از



شکل (۲): مقادیر سرعت برای سه اندازه مختلف مش بندی.



شکل (۳): محدوده قاب چرخان (MRF) داخل ظرف اختلاط.



شکل (۴): نمایش مش بندی ایجاد شده روی سطوح.

محاسبه شده با استفاده از مش بندی درشت (حالت اول) تفاوت قابل ملاحظه‌ای با مقادیر محاسبه شده با استفاده از مش خیلی ریز (حالت سوم) دارد. همچنین مقادیر به دست آمده از حالت‌های دو و سه، نزدیک به هم هستند که با توجه به اهمیت سرعت انجام محاسبات، مش بندی حالت دوم به عنوان حالت بهینه انتخاب شد.

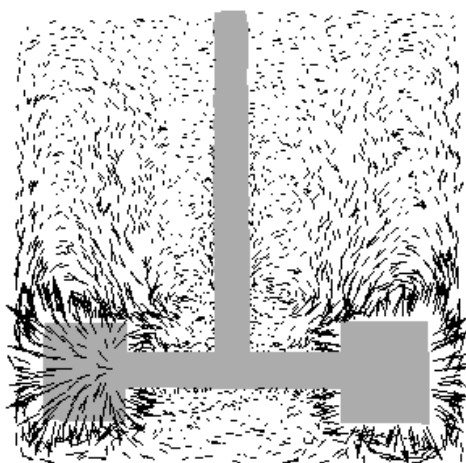
برای ظرف بافل دار نیز استقلال نتیجه‌ها از شبکه به روش مشابهی انجام شد. به طوری که شبکه نهایی شامل ۲۰۳,۳۲۸ سل برای قسمت MRF و ۱۰۲,۶۸۹ سل برای بقیه ظرف شد. ناحیه اطراف پروانه همزن با استفاده از استوانه‌ای به قطر ۲۳/۳ cm و ارتفاع ۱۵ cm از مخزن جدا شده و به عنوان قاب چرخان (MRF) مورد استفاده قرار گرفت. محدوده MRF در شکل ۳ نشان داده شده است.

در شکل ۴ نمایی از مخزن به همراه همزن، بافل‌ها و مش بندی مثلثی ایجاد شده بر روی سطوح نشان داده شده است.

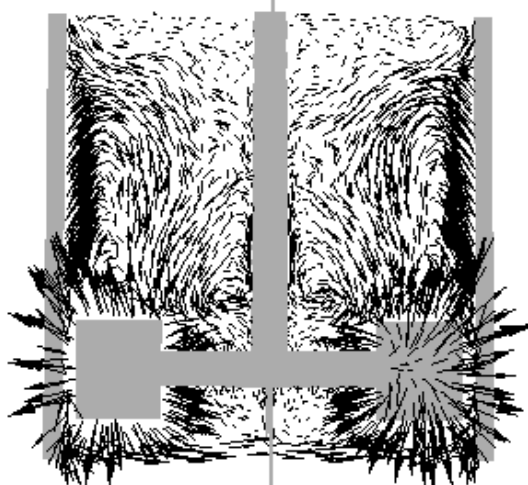
### ۲-۳- بررسی نتیجه‌های حالت پایا

همچنان که ذکر شد، برای به دست آوردن الگوهای جریان در حالت پایا، محاسبات تکرار تا رسیدن مقادیر خطای معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و آشفتگی به کمتر از  $10^{-4}$  انجام شد. تصویر بردارهای سرعت بر روی صفحه افقی گذرنده از همزن در شکل ۵ آورده شده است. در این شکل و شکل‌های بعدی اندازه نسبی بردارها نمادی از مقادیر سرعت است.

همچنان که مشاهده می‌شود، در مخزن بدون بافل مایع در لایه‌های دایره‌ای جریان پیدا می‌کند و سرعت این لایه‌ها با دور شدن از مرکز افزایش می‌یابد. افزودن بافل‌ها (شکل ۵-ب) باعث انحراف لایه‌های سیال از مسیرهای دایره‌ای و اختلاط با هم گردیده است. همچنین با مقایسه اندازه بردارهای سرعت در این دو شکل می‌توان گفت افزودن بافل باعث کاهش مقادیر مؤلفه‌های چرخشی سرعت (تصویر سرعت بر روی صفحه افقی) می‌شود.



(الف)

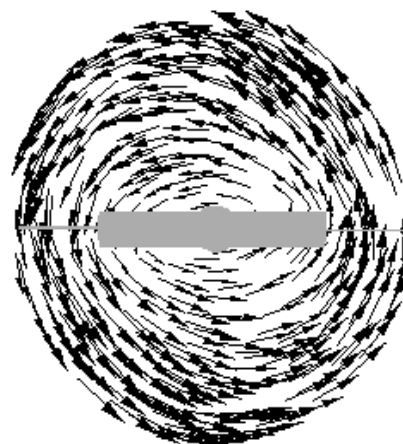


(ب)

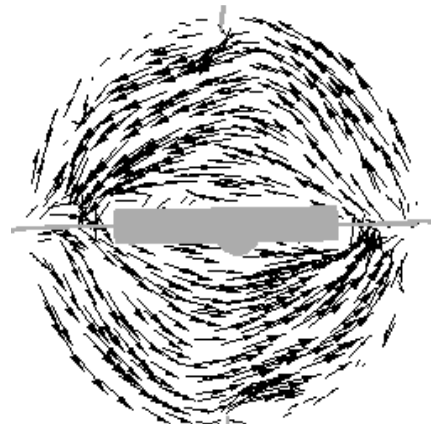
شکل (۶): تصویر بردارهای سرعت بر صفحه  $z=0$

(الف) ظرف بدون بافل، (ب) ظرف بافل دار.

نمودار تغییرات مؤلفه عمودی سرعت در امتداد خطی به ارتفاع ۱۰ سانتی متر از کف مخزن، گذرنده از نقطه (۰،۰،۰) و در امتداد محور  $z$ ، در شکل ۸ ترسیم شده است. دو نقطه بیشینه برای مؤلفه عمودی سرعت در مخزن بافل دار مشاهده می شود که با توجه به شکل ۷ می توان گفت بیشینه نزدیک دیواره مربوط به حرکت سیال پرتاب شده توسط پروانه به سمت بالا و بیشینه دیگر بیانگر برگشت سیال به پشت پروانه همزن است. روند تغییرات مؤلفه عمودی سرعت در مخزن بدون بافل مشابه مخزن بافل دار است. با این تفاوت که مقادیر مؤلفه عمودی سرعت برای مخزن بدون بافل خیلی کمتر از مخزن بافل دار است.



(الف)



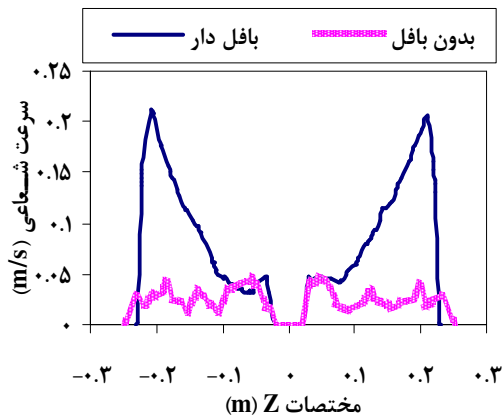
(ب)

شکل (۵): تصویر بردارهای سرعت بر روی صفحه افقی گذرانده از همزن، (الف) ظرف بدون بافل، (ب) ظرف بافل دار.

در شکل های ۷-۶ الگوهای سرعت ایجاد شده در راستای عمودی در داخل ظرف بافل دار با ظرف بدون بافل مقایسه شده است. تصویر بردار سرعت بر صفحه عمودی در حقیقت بیانگر مؤلفه های شعاعی و عمودی سرعت است. شکل ۶-الف نشان می دهد که برای مخزن بدون بافل، مقادیر مؤلفه سرعت در جهت های شعاعی و عمودی سیال فقط در نواحی نزدیک به پروانه همزن قابل ملاحظه است.

از آن جایی که در ظرف بافل دار قسمت زیادی از فضای مخزن دارای سرعت قابل ملاحظه در راستای عمودی و شعاعی است، سیال ضمن برخورد به بافل ها، در دو طرف پروانه همزن به سمت بالا و پایین حرکت می کند و از قسمت مرکزی ظرف به پشت پروانه ها برمی گردد. این الگو سبب ایجاد گردابه های کاملاً مشخصی در داخل ظرف شده است.

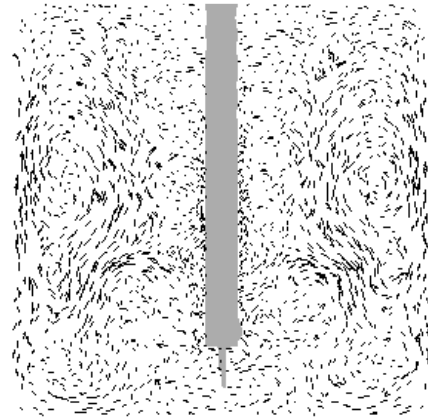
در شکل ۹ نمودار تغییرات مقدار مؤلفه  $z$  سرعت (مؤلفه شعاعی سرعت) در امتداد ذکر شده ترسیم شده است. می‌توان دید که در مخزن بافل‌دار سرعت شعاعی با افزایش شعاع افزایش می‌یابد. در حالی که این سرعت در مخزن بدون بافل در تمام شعاع‌ها مقدار تقریباً یکسانی دارد. هم‌چنین سرعت شعاعی در ظرف بافل‌دار به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از ظرف بدون بافل است. به‌عبارت دیگر وجود بافل باعث زیاد شدن سرعت شعاعی و برش لایه‌های مختلف سیال می‌شود.



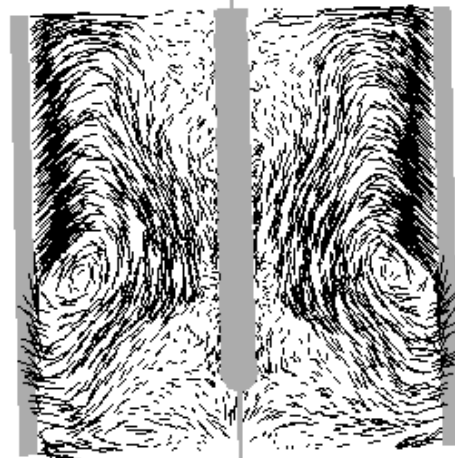
شکل (۹): تغییرات مؤلفه شعاعی سرعت در امتداد محور  $z$ .

تغییرات مقدار مؤلفه  $x$  سرعت (مؤلفه سرعت در جهت چرخش پروانه) به همراه مقادیر سرعت کل در امتداد ذکر شده، در شکل ۱۰ رسم شده است. از روی این شکل می‌توان مشاهده کرد که مقادیر سرعت کل و مؤلفه  $x$  سرعت در مخزن بدون بافل تقریباً بر روی هم منطبق شده است. به‌عبارت دیگر، الگوی غالب در این مخزن، چرخش در جهت حرکت پروانه است ولی در مخزن بافل‌دار نمودار سرعت کل و مؤلفه  $x$  سرعت برهم منطبق نیستند، یعنی سیال در جهت مختلف پخش می‌شود.

در نمودار شکل‌های ۱۰-۸ مقادیر سرعت در یک امتداد خاص مد نظر قرار گرفته است. برای بررسی مقادیر متوسط پارامترهای مختلف حرکت سیال، مقادیر متوسط سرعت و نیز مؤلفه  $y$  تنش برشی بر روی سطوح استوانه‌ای با شعاع‌های مختلف به روش سطح-وزنی محاسبه شده و در شکل ۱۱ ارائه شده است.

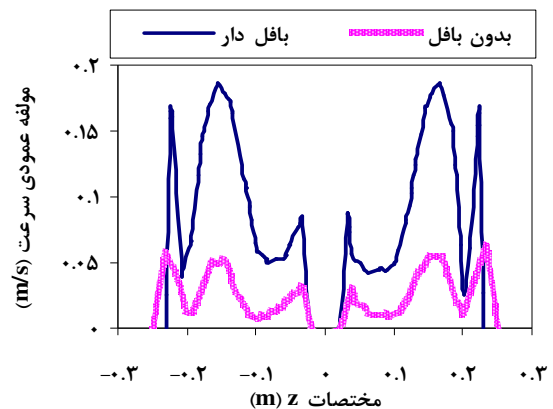


(الف)

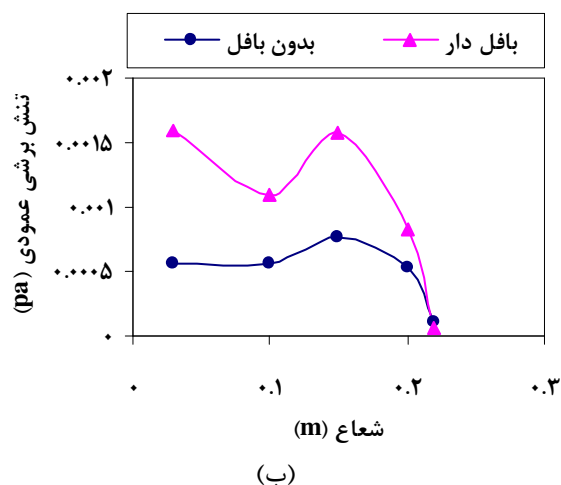
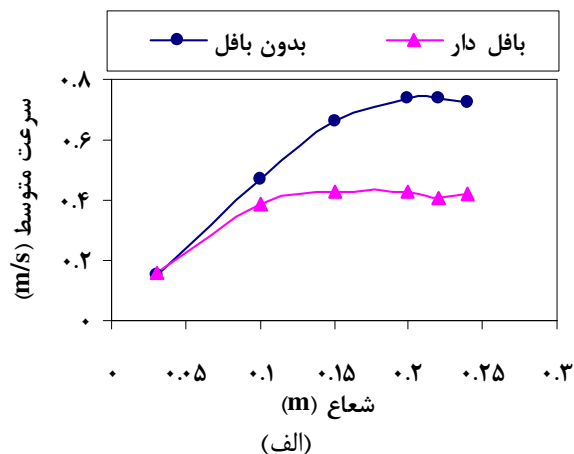


(ب)

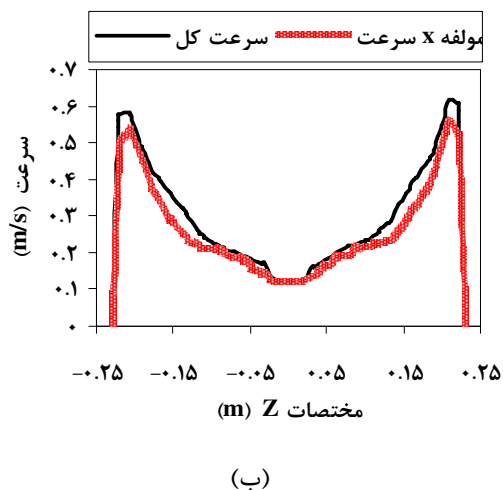
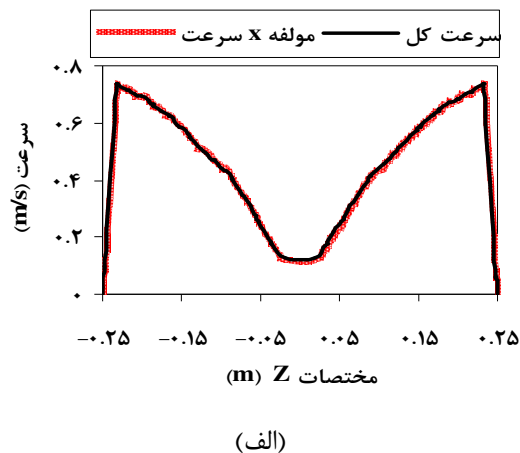
شکل (۷): تصویر بردارهای سرعت بر صفحه  $X=0$ :  
الف) ظرف بدون بافل، ب) ظرف بافل‌دار.



شکل (۸): تغییرات مؤلفه عمودی سرعت در امتداد محور  $z$ .



شکل (۱۱): تغییرات متوسط سرعت کل (الف) تنش برشی، (ب) در جهت شعاعی.



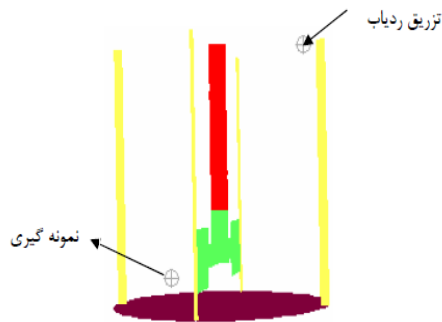
شکل (۱۰): تغییرات مقدار سرعت کل و مؤلفه x سرعت در امتداد محور z، (الف) بدون بافل، (ب) با بافل.

تنش برشی بر روی سطوح افقی در چندین ارتفاع مختلف محاسبه شده و نتیجه‌ها در شکل ۱۲ درج شده است. همان‌گونه که از این شکل می‌توان دریافت، سرعت و نیز تنش برشی در نزدیک پروانه (ارتفاع ۰/۱ m) برای هر دو طرف بیشترین مقدار را داشته است و با دور شدن از پروانه کاهش می‌یابد. هم‌چنین در راستای عمودی نیز همانند راستای شعاعی مقادیر متوسط سرعت‌ها در مخزن بدون بافل بیشتر است. در حالی‌که مقادیر مؤلفه y تنش برشی با افزودن بافل به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

حرکت سیال در جهت چرخش پروانه می‌تواند سبب ایجاد تنش برشی در جهت x و z شود، در حالی‌که مؤلفه y تنش برشی نشان‌دهنده برش لایه‌های مختلف و اختلاط مناسب‌تر است. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان مشاهده کرد که وجود بافل، کاهش مقادیر متوسط سرعت و افزایش تنش برشی را در پی خواهد داشت. این نکته مؤید آن است که با قرار دادن بافل در مخزن از حرکت سریع و دورانی سیال جلوگیری شده و در عوض میزان اختلاط آن افزایش می‌یابد. برای مقایسه تغییرات سرعت و تنش برشی متوسط در جهت محوری، متوسط سطح - وزنی مقادیر سرعت و مؤلفه y

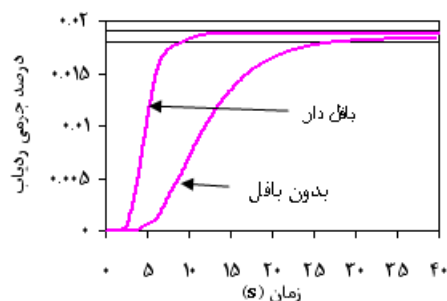


زمانی است که از لحظه تزریق ردیاب به راکتور طول می‌کشد تا محتویات ظرف به یک درجه مشخص از همگن شدن برسد [۱۶]. در این تحقیق، زمانی را که غلظت ردیاب در محدوده غلظت نهایی ( $\pm 2/5\%$ ) قرار می‌گیرد، به عنوان زمان اختلاط در نظر گرفته شد.



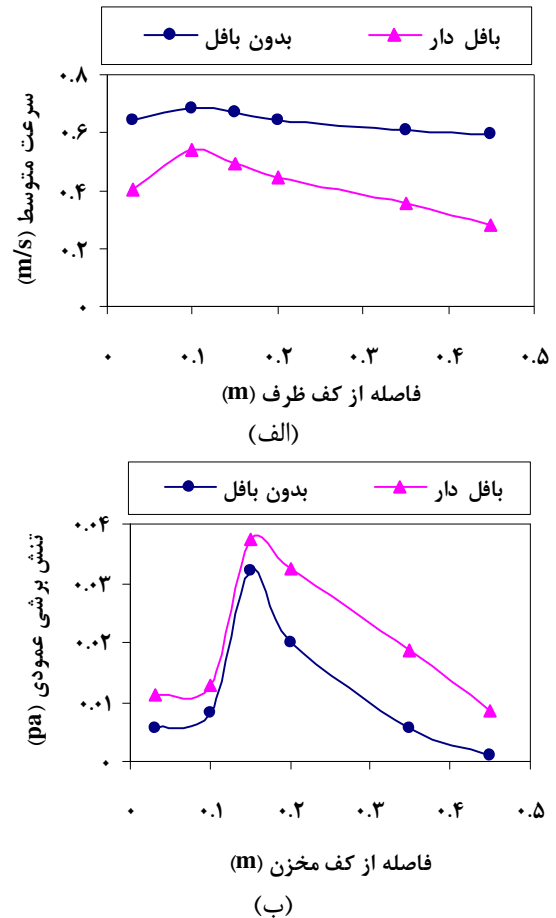
شکل (۱۳): تزریق ردیاب و نمونه‌گیری برای مدل‌سازی اختلاط در داخل ظرف همزن‌دار.

تغییرات غلظت ردیاب در طول زمان به همراه خطوط مشخص‌کننده غلظت نهایی ( $\pm 2/5\%$ ) برای ظرف بافل‌دار و بدون بافل در شکل ۱۴ آورده شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت که زمان اختلاط برای مخزن بدون بافل حدود ۲۶ ثانیه است، در حالی که در ظرف بافل‌دار این زمان فقط ۱۰ ثانیه می‌باشد. به عبارت دیگر افزودن بافل باعث شده است که زمان اختلاط بیش از ۶۰٪ کاهش یابد.



شکل (۱۴): تغییرات کسر جرمی ردیاب در نقطه نمونه‌گیری.

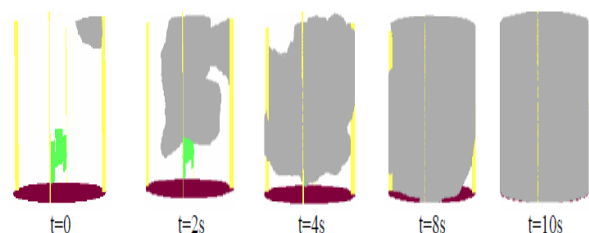
جهت شناخت بهتر فرآیند اختلاط در داخل ظروف همزن دار، چگونگی پخش ردیاب در داخل آنها به صورت تصویری مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۱۵ مناطقی از ظرف بدون بافل



شکل (۱۲): تغییرات (الف) سرعت کل متوسط، (ب) تنش برشی در جهت محور همزن.

### ۳-۳- بررسی نتیجه‌های مدل‌سازی حالت ناپایا

برای مطالعه اثر تغییر الگوی جریان (با افزودن بافل‌ها) بر کیفیت اختلاط، چگونگی پخش ردیاب در داخل ظرف با استفاده از CFD مدل‌سازی شد. بدین منظور در زمان  $t=0$  مقدار مشخصی (حدود ۲۱ گرم) از ردیاب که خصوصیات فیزیکی آن مانند محلول پربورات داخل ظرف است، به داخل ظرف تزریق شده و تغییرات غلظت این ردیاب در یک نقطه نمونه‌گیری در طول زمان مورد بررسی قرار گرفت. از الگوی جریان به دست آمده حالت پایا در ظرف استفاده شده و پخش ردیاب در داخل ظرف با حل معادلات مربوط به بقای جرم ردیاب در حالت ناپایا با مرحله زمانی  $0.2/s$  مدل‌سازی شد. برای حل شرایط ناپایا از فرمولاسیون ضمنی درجه یک استفاده شد. مکان تزریق ردیاب و مکان نمونه‌گیری در شکل ۱۳ نشان داده شده است. طبق تعریف، زمان اختلاط مدت

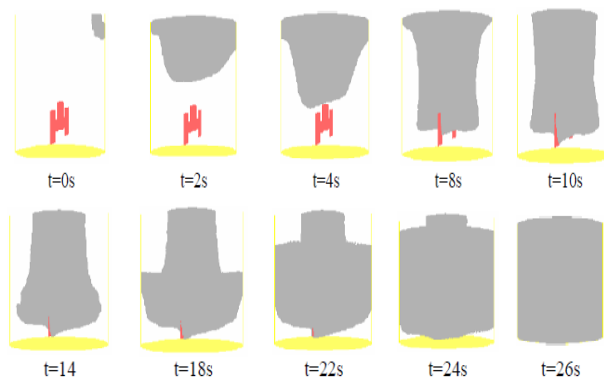


شکل (۱۶): مناطقی از ظرف بافل‌دار که غلظت ردیاب در آنها بزرگ‌تر یا مساوی غلظت نهایی است.

به‌طور کلی می‌توان گفت که اگر چه مقادیر متوسط سرعت در ظرف بدون بافل نسبت به ظرف بافل‌دار بیشتر است، ولی در این ظرف سیال فقط در جهت چرخش پروانه می‌چرخد و سرعت سیال در جهت شعاعی و عمودی بسیار کم است. افزایش بافل‌ها سبب کاهش مقدار سرعت متوسط می‌شود. این کاهش عمدتاً در جهت چرخش پروانه است و در عوض وجود بافل باعث درهم رفتن و مخلوط شدن لایه‌های مختلف سیال شده و زمان اختلاط را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند در بررسی اختلاط و عوامل مؤثر بر آن (نظیر وجود بافل) مورد استفاده قرار گرفته و نتیجه‌های به‌دست آمده از این روش به‌خوبی قابل تجزیه و تحلیل خواهند بود. در این تحقیق ابتدا جریان در داخل ظرف واکنش پرپورات سدیم بدون بافل و بافل‌دار مدل‌سازی شد. الگوهای جریان در داخل دو ظرف با استفاده از بردارهای سرعت و نمودار تغییرات اندازه مؤلفه‌های سرعت و تنش برشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. داده‌های به‌دست آمده از حل جریان در حالت پایا برای مدل‌سازی اختلاط یک ماده ردیاب در داخل ظرف‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتیجه‌های به‌دست آمده از مدل‌سازی اختلاط، ضمن تأیید تفسیرهای ارائه شده برای الگوهای جریان در داخل مخازن، نشان داد که افزایش بافل‌ها با ایجاد جریان‌های شعاعی و محوری سبب بهبود کیفیت اختلاط و کاهش زمان اختلاط به میزان بیش از ۶۰٪ می‌شود.



شکل (۱۵): مناطقی از ظرف بدون بافل که غلظت ردیاب در آنها بزرگ‌تر یا مساوی غلظت نهایی است.

را که غلظت ردیاب در آنها بزرگ‌تر یا مساوی غلظت نهایی (غلظت ردیاب در داخل مخزن پس از اختلاط کامل) است، در چند مرحله زمانی مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که چرخش سیال در جهت پروانه سبب پخش ردیاب در سطح می‌شود و پس از ۲ ثانیه کل سطح بالایی مخزن رنگی می‌شود. حرکت محوری کند در این مخزن سبب می‌شود که حدود ۸ ثانیه طول بکشد تا ماده ردیاب به پروانه هم‌زن برسد. نکته دیگر قابل توجه در این تصاویر این است که با توجه به اینکه حرکت شعاعی سیال در قسمت بالای مخزن، از دیواره به سمت مرکز است، این حرکت سبب می‌شود که از زمان ۱۰ ثانیه به بعد، در فضای بالای مخزن غلظت ردیاب در نزدیک دیواره کاهش یابد. به‌عبارت دیگر سیال فاقد ردیاب از قسمت‌های پایین‌تر مخزن جایگزین ردیاب در نواحی نزدیک دیواره در قسمت بالای مخزن می‌شود. این روند تا همگن شدن کامل سیال در داخل مخزن ادامه پیدا می‌کند.

مراحل همگن شدن سیال در مخزن بافل‌دار در شکل ۱۶ نشان داده شده است. هم‌چنان که مشاهده می‌شود، پس از مدت زمان بسیار کوتاهی از تزریق (۲ ثانیه)، ردیاب به نزدیک پروانه هم‌زن می‌رسد. دلیل این رفتار را می‌توان با وجود جریان‌های چرخشی که سیال را از دیواره‌های ظرف به سمت داخل و پشت پروانه هدایت می‌کنند (شکل‌های ۵-۶) توضیح داد. در این ظرف، ردیاب پس از رسیدن به پروانه، به سرعت پخش می‌شود، به‌گونه‌ای که پس از حدود ۸ ثانیه از رسیدن ردیاب به پروانه، توزیع آن در کل فضای ظرف همگن می‌شود.

- مراجع**
9. Akiti, Q., Yeboah, A., and Armenante, M.P., "Hydrodynamic Effects on Mixing and Competitive Reactions in Laboratory Reactors", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 60, No's. 8-9, pp. 2341-2354, 2005.
  10. Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics", Addison Wesley Longman Limited, New York, 1996.
  11. Yakhot, V. and Orszag, S.A., "Renormalization Group Analysis of Turbulence, I. Basic Theory", *J. Sci. Comp.*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-51, 1986.
  12. Voncken, R.M. and Holmes, D.B., "Fluid Flow in Turbine Stirred, Baffled Tanks-III: Dispersion During Circulation", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 19, No. 3, pp. 209-213, 1964.
  13. Jahoda, M., Machon, V., Pinelli, D., Nocentini, M., Fjner, D., and Magelli, F., "Homogenization of Liquids and Fluid Dynamic Behavior of Vessels Stirred with Multiple Axial Impellers", The 8<sup>th</sup> European Conf. on Mixing, Univ. of Cambridge, Cambridge, U.K., p. 113, 1994.
  14. Alizadeh-Dakhel, A. and Rahimi, M., "CFD Simulation of Homogenization in Large-Scale Crude Oil Storage Tanks", *J. Petrol. Sci. and Eng.*, Vol. 43, No's. 3-4, pp. 151-161, 2004.
  15. Yoon, S.H., Hill, F.D., Balachandar, S., Adriane, R.J., and Ha, M.Y., "Reynolds Number Scaling of Flow in a Rushton Turbine Stirred Tank, Part I-Mean Flow, Circular Jet and Tip Vortex Scaling", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 60, No. 12, pp. 3169-3183, 2005
  16. Kasat, G.R., Khopkar, A.R., Ranade, V.V., and Pandit, A.B., "CFD Simulation of Liquid-Phase Mixing in Solid-Liquid Stirred Reactor", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 63, No. 15, pp. 3877-3885, 2008.
  1. Semnani Rahbar, M. and Anousheh, S., "Sodium Perborate Synthesis in Bench Scale", The 14<sup>th</sup> Iranian Chemistry & Chemical Eng. Cong., 17-19 Feb, 2004.
  2. Yuksel, Y.G., Sayan, P., Titiz, S., and Bulutcu, A.N., "Solubility of Sodium Perborate Tetrahydrate in Water & Sodium Metaborate Solution", *J. Crys. Growth*, Vol. 41, No. 3, pp. 586-588, 1996.
  3. Frances, C., Biscans, B., and Laguerie, C., "Some Physicochemical Data on Tetrahydrate Sodium Perborate in Aqueous Solutions", *J. Chem. Eng. Data*, Vol. 35, No. 4, pp. 423-426, 1990.
  4. Comyns, A.E., "Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology", John Wiley & Sons, 5<sup>th</sup> Ed., Vol. 18, pp. 251-383, New York, 2004.
  5. Söhnel, O., Bravi, M., Chianese, A., and Mazzarotta, B., "Growth Kinetics of Sodium Perborate from Batch Crystallization", *J. Crystal. Growth*, Vol. 160, No's. 3-4, pp. 355-360, 1996.
  6. Mandare, N.P. and Pangarkor, G.V., "Semi-Batch Reactive Crystallization of Sodium Perborate Tetrahydrate: Effect of Mixing Parameters on Crystal Size", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 58, No. 7, pp. 1125-1133, 2003.
  7. Aubin, J., Fletcher, F.D., and 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 Sci.*, Vol. 28, No. 5, pp. 431-445, 2004.
  8. Sahu, K.A., Kumar, P., Patwardhan, W.A., and Joshi, B.J., "CFD Modeling and Mixing in Stirred Tanks", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 54, No's. 13-14, pp. 2285-2293, 1999.

