



## بهینه‌سازی فرآیند اختلاط درهمی در مخلوط‌کننده‌های مایع - مایع

محسن استاد شعبانی - پژوهشکده مواد - پژوهشگاه مواد و انرژی E-mail: [vahid\\_ostadshabany@yahoo.com](mailto:vahid_ostadshabany@yahoo.com)

مهدی علی‌زاده - پژوهشکده مواد - پژوهشگاه مواد و انرژی

کمال عباسپورثانی - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان

**چکیده:** در این تحقیق شرایط بهینه اختلاط و مصرف انرژی در یک مخلوط‌کننده ستلر با ابعاد مشخص با استفاده از حل عددی معادلات ناویر-استوکس به روش حجم محدود با رویکرد  $k-\varepsilon$  تعیین می‌شود. براساس تعریف، جریان دو فازی وقتی ایجاد می‌شود که حرکت متوسط یک فاز کاملاً با دیگری متفاوت باشد و یا بدلیل کشش سطحی میان دو سیال سرعت حرکت دو سیال یکسان ولی مسیر حرکت آنها متفاوت و یا از هم متمایز باشند. هدف، پیش‌بینی رفتار متوسط یک میدان جریان دو فازی براساس حل عددی معادلات ناویر-استوکس و رویکرد  $k-\varepsilon$  در جریان‌های درهمی در یک مخلوط‌کننده ستلر می‌باشد و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** اختلاط، ستلر، شبیه‌سازی و جریان دو فازی

## Optimization of Turbulence Mixing Process in Liquid to Liquid Mixers

M. Ostad-Shabani, Division of Materials Eng., Materials and Energy Research Center

M. Alizadeh, Division of Materials Eng., Materials and Energy Research Center

K. Abbaspoursani, the Faculty of Mech. Eng., Islamic Azad University, Branch of Takestan

**Abstract:** In this study, the optimum condition in mixing and energy consumption for a Setler mixer have been defined. This is done by numerical solution of the Navier-Stocks equations by finite volumes technique using the  $k-\varepsilon$  scheme. By the definition, 2-phase flow can be established, when the average flow of a phase is completely differ from other or because of the surface tension between two fluid the velocity of the each flow is similar but the trajectory of each flow are different. The aim of this study is the prediction of the average behavior of a 2 phase field on the basis of the Navier-Stocks equations by finite volumes technique using the  $k-\varepsilon$  scheme in the turbulence flow in a Setler mixer. At the end of this paper the results of simulation is compared with the results obtained by experiments.

**Keywords:** Mixture, Setler mixer, simulation, and two phase flow.

## ۱- مقدمه

یا مستقل از آن و جریان تراکم پذیر یا تراکم ناپذیر باشد که سیال رفتار مختلفی را از خود نشان می‌دهد. این رفتار علاوه بر نیاز به تعداد شرایط مرزی لازم جهت حل، روش‌های عددی متفاوتی را می‌طلبد. در این پژوهش شرایط بهینه اختلاط و مصرف انرژی در یک مخلوط‌کننده ستلر با ابعاد مشخص با استفاده از حل عددی معادلات ناویراستوکس و روش حل k-ε به روش حجم محدود تعیین می‌شود [۲۰-۱۵].

## ۲- روش تحقیق

طراحی و شبکه‌بندی مدل با نرم‌افزار Gambit انجام شد. ابتدا هندسه مخلوط‌کننده در مقیاس مدل ترسیم شده و پس از آن ورودی و خروجی مشخص شدند. در مرحله بعد دیواره‌های ساکن و متحرک مشخص شد. به منظور پرهیز از پیچیدگی هندسه پروانه به صورت استوانه متحرک در نظر گرفته شد. شکل (۱) مدل پروانه و اندازه ابعاد آنرا نشان می‌دهد. در نقاطی که پیچیدگی هندسی وجود داشت با توجه به شکل (۲) راست، چهار لایه مرزی تعریف شده و سپس سطوح به روش Quad.Pave شبکه‌بندی شدند و در پایان حجم مدل به روش Hex.Stairstep با تعداد شبکه در حدود ۲۰۰۰۰۰، شبکه‌بندی شد. شکل (۲) چپ، چگونگی شبکه‌بندی در مدل را نشان می‌دهد.

جریان سیال به روش Second order discreteization

scheme حل شده و برای حل میدان فشار از روش Semi-

implicit استفاده شد. 3D ضمنی، روش جدا شده پایدار برای حل معادلات ناویر استوکس در نظر گرفته شد، در قسمت ورودی شرط سرعت ورودی و در قسمت خروجی شرط فشار خروجی تعریف شده و به منظور در نظر گرفتن شرایط آشفته‌گی مدل k-ε تعریف شد. فاز اول را آب و فاز دوم را ماده آلی، به ترتیب با چگالی ۱ و ۰/۷۹ با توجه به شرایط کاربردی آن در حل معادلات در نظر گرفته شد.

سامانه‌های چندفازی، نقش مهمی را در بسیاری از فرآیندهای صنعتی و طبیعی مانند تصفیه فلزات، رئاكتورهای شیمیایی و هسته‌ای در نیروگاه، موتورهای احتراق داخلی و پاک‌کننده‌ها ایفا می‌کنند. مکانیزم انتقال حرارت و جرم در این سامانه‌ها توسط جریان سیال کنترل می‌شود، بنابراین مطالعه پدیده جریان در این سامانه‌ها به منظور طراحی بسیار مهم است. جریان دوفازی به عنوان حالت خاصی از سامانه‌های چندفازی، حرکت متقابل دو نوع مختبف از مواد را توضیح می‌دهد. تفاوت بین مواد می‌تواند ناشی از حالت ترمودینامیکی فاز (مثل گاز، مایع یا جامد) و یا اجزاء شیمیایی آن باشد. در هر صورت الگوسازی و تحلیل جریان دوفازی یکی از مسائل پیچیده در علوم کلاسیک است [۸-۱].

معادلات حاکم بر دینامیک یک سیال از سه قانون بقای دینامیکی استخراج می‌شود. این قوانین بقای جرم، بقای اندازه حرکت خطی و بقای انرژی را شامل می‌شود. قانون بقای اندازه حرکت خطی در واقع نظیر قانون دوم نیوتن در حرکت و قانون بقای انرژی نیز نظیر قانون اول ترمودینامیک می‌باشند [۸-۱۲]. معادلات ناویراستوکس کامل شامل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی و یک رابطه کمکی برای خواص ترموفیزیکی سیال (معادله حالت) می‌باشند. این معادلات در شکل دیفرانسیل به صورت برداری زیر نشان می‌شوند [۱۳-۱۵].

(۱)

$$(۲) \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0$$

$$\nabla \cdot \rho \vec{v} \vec{v} = -\nabla P + (\nabla \cdot \vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

(۳)

$$\vec{\tau} = \mu [((\nabla \vec{v}) + (\nabla \vec{v})^T) - \frac{2}{3} \nabla \vec{v}]$$

که در آن  $\rho$ ،  $\vec{v}$ ،  $P$ ،  $\vec{\tau}$ ،  $\vec{F}$ ،  $\vec{g}$  و  $\mu$  به ترتیب چگالی، سرعت، فشار، تنش، نیروی خارجی، جاذبه و لزجت دینامیکی می‌باشند.

معادلات ناویراستوکس در حالات خاص وابسته به زمان

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- راندمان میکسرستلر:

به منظور تعیین شرایط بهینه اختلاط و نیز مصرف انرژی در یک مخلوط‌کننده ستلر با ابعاد مشخص، نقطه A در شکل (۱) تعریف شد. مخلوط‌کننده ستلر مورد آزمایش با تغییر شرایط (سرعت ورودی و سرعت چرخشی پروانه) زمانی که در نقطه A بیشترین اختلاط در کمینه مصرف انرژی حاصل شد، شرایط مورد نظر حاصل شده است.

## ۳-۲- بررسی تاثیر سرعت ورودی بر مقدار مخلوط شدن:

شکل (۳) تاثیر سرعت ورودی سیال بر نرخ اختلاط را در زمانیکه سرعت چرخشی پروانه ۱۰۰ rpm می‌باشد را نشان می‌دهد. به تدریج که سرعت ورودی افزایش می‌یابد، شرایط برای اختلاط بهتر می‌شود ولی باید توجه داشت که با ازدیاد سرعت ورودی مشکل جدا نشدن کامل در قسمت ستلر وجود دارد و می‌باید ستلر بزرگتری را انتخاب نمود.

## ۳-۳- بررسی تاثیر سرعت چرخش پروانه بر نرخ اختلاط:

شکل (۴) تاثیر سرعت ورودی سیال بر نرخ اختلاط را در زمانیکه سرعت ورودی برابر با ۰/۱ m/s می‌باشد را نشان می‌دهد. به تدریج که سرعت پروانه افزایش می‌یابد، سرعت در مخلوط‌کننده ازدیاد می‌یابد و شرایط برای اختلاط بهتر می‌شود ولی باید توجه داشت که سرعت بیشتر پروانه، مصرف بیشتر انرژی را به همراه دارد. شکل (۵) کسر حجمی و شکل (۶) مسیر حرکت فاز یک را در مدل مرد آزمایش در مقطع طولی از ورودی فاز یک در شرایط بهینه را نشان می‌دهد.

## ۴- معتبرسازی نتایج شبیه‌سازی:

به منظور تأیید نتایج شبیه‌سازی، نتایج برای سرعت سیال با نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی برای این کمیت در دبی‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شد. نتایج این مقایسه در شکل (۷) در دبی‌های مختلف نشان داده شده است. با بررسی دقیق

منحنی‌های این شکل مشخص می‌شود که نتایج شبیه‌سازی اختلاف بسیار اندکی با نتایج تجربی دارد.

## ۵- نتیجه گیری

در این مطالعه بدلیل پیچیدگی‌های هندسی زیاد حجم مورد مطالعه، مدل آن به صورت منظم شبکه‌بندی شد تا از هر گونه واگرایی در هنگام اجرا پرهیز شود. علیهذا مدل به صورت Quad. Pave شبکه‌بندی شد که این کار باعث افزایش تعداد گره‌ها شده ولی دقت و همگرایی حل بالاتر می‌رود. بهمین ترتیب به منظور پرهیز از پیچیدگی‌های هندسی، پروانه به صورت استوانه‌ای متحرک در نظر گرفته شد. نتایج حاصل، قابل قبول بودن فرضیه را به خوبی نشان می‌دهد.

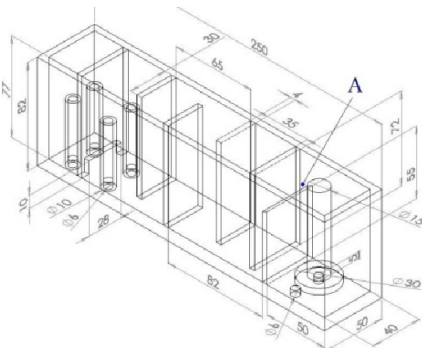
در این مطالعه شرایط ورودی رابا سرعت ورودی و شرایط خروجی را با فشار خروجی، مطابق آنچه در بند (۲) اشاره رفت در نظر گرفته شد که صحت آن در این روش نیز تأیید می‌شود. به منظور حصول نتایج بهتر حل معادلات گسسته تا مقدار باقیمانده  $10^{-6}$  تکرار شد.

نتایج نشان می‌دهد که شرایط هندسی بهینه در مخلوط‌کننده ستلر بیشترین نرخ اختلاط در کمترین مصرف انرژی محاسبه شد. با توجه به نتایج حاصل و با ۲۲ مرتبه اجرای مدل در شرایط مختلف، سرعت ورودی بهینه برابر با ۰/۱ m/s و سرعت بهینه چرخش پروانه ۱۰۰ rpm تعیین گردید.

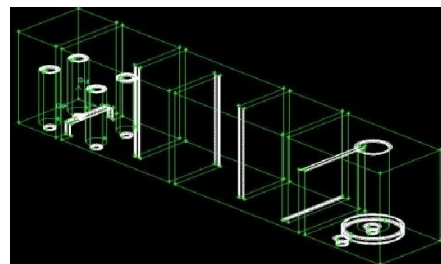
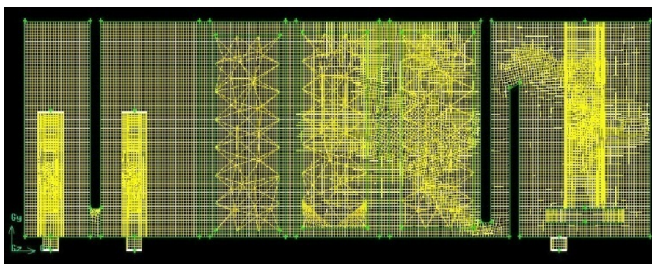
## ۶- مراجع

- [1] Shabani, M.O., Alizadeh, M. and Mazahery, A., (2011), "Engineering with Computers", Vol. 27, pp 373-379.
- [2] Shabani, M.O. and Mazahery, A., Scientific Bulletin, 2011, xxx.
- [3] Gomes, E.F., Guimaraes, M.M.L. and Ribeiro, L.M., (2007), AES, Vol. 38, pp 810.
- [4] Bakker, A., LaRoche, R. D. and Marshall, E. M., (1998), "The Online CFM Book" at <http://www.bakker.org/cfm>, © André Bakker.

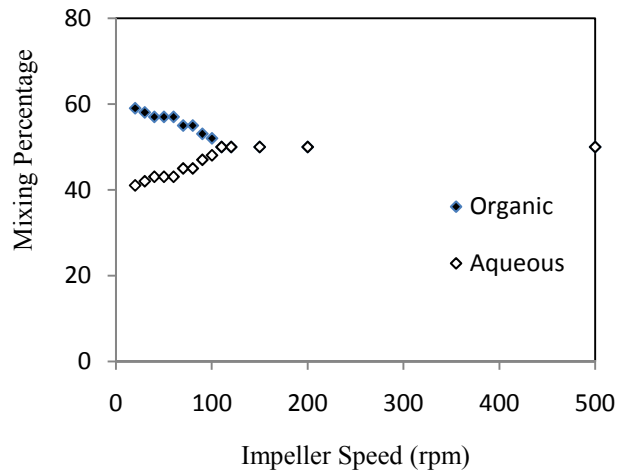
- [14] Bakker, A. and LaRoche, R.D., (1998), "The Online CFM Book" at [www.bakker.org/cfm](http://www.bakker.org/cfm), © 1998, André Bakker.
- [15] Wu, B., (2009), water research, Vol. 1.
- [16] Bakker A. and Fasano, J.B., (1998), "The Online CFM Book" at [www.bakker.org/cfm](http://www.bakker.org/cfm), © 1998, André Bakker.
- [17] Murthy, B.N. and Joshi, J.B., (2008), CES, Vol. 63, p 5468.
- [18] Singh, K.K., Mahajani, S.M., Shenoy K.T., Patwardhan, A.W. and Ghosh, S.K., (2007), CES, Vol. 62, p 1308.
- [19] Singh, K.K., Shenoy, K.T., Mahendra, A.K. and Ghosh, S.K., (2004), CES, Vol. 59, p2937.
- [5] Mostaedi, M.T., Safdari, J. Moosavian, M.A., Maragheh, M.G., (2009), CEP,; 1249.
- [6] Vakili, M.H. Esfahany, M., (2009), CES,; 64, 351.
- [7] Reeve, R.N. and Godfry, J.C., (2002), Trans IChemE, Vol. 80, Part A, November, 2002.
- [8] Zughbi, H.D., and Rakib, M.A., (2004), CES, Vol. 59, p 829.
- [9] Srilatha, C., Mundada, T.P., Patwardhan, A.W., (2010), EERD, Vol. 88, p 10.
- [10] Meroney, R.N. and Colorado, P.E., (2009), Water Research, Vol. 43, p 1040 .
- [11] Pianthong, K., Seehanam, W., Behnia, M. and Sriveerakul, T., (2007), ECM, Vol. 48, p 2556.
- [12] Marshall E.M. and Bakker, A., Fluent Inc. Lebanon, New Hampshire, USA, [www.fluent.com](http://www.fluent.com).
- [13] Bakker, A., Fasano, J.B. and Myers, K.J., "The Online CFM Book", (1998), at <http://www.bakker.org/cfm>, © 1998, André Bakker.



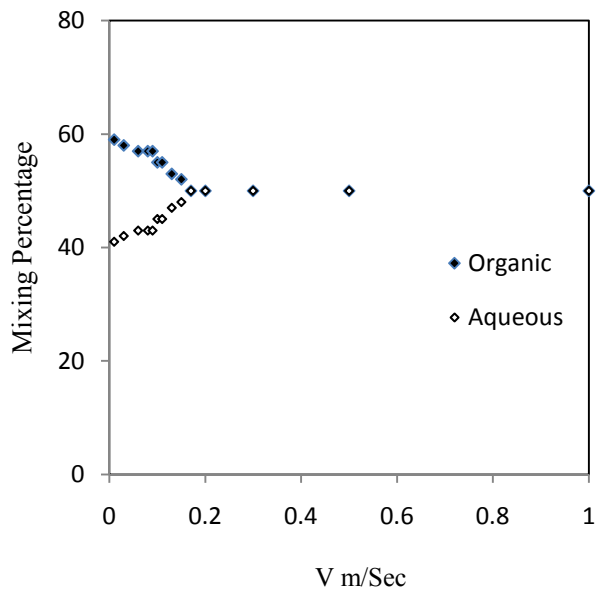
شکل (۱): مدل هندسه مخلوط کننده مورد آزمایش



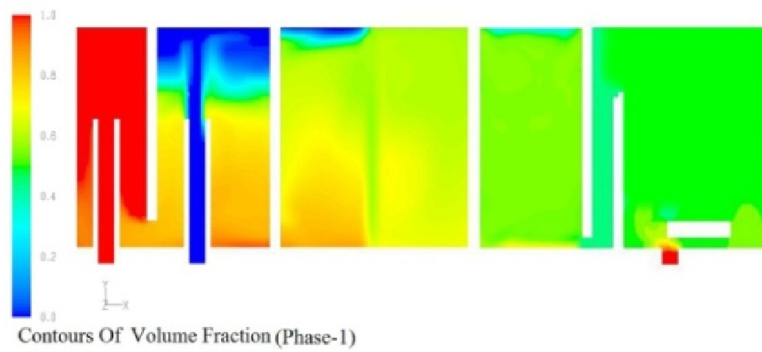
شکل (۲): لایه مرزی (راست) و شبکه بندی هندسه مدل (چپ)



شکل (۳): تاثیر سرعت ورودی بر درصد اختلاط فازها



شکل (۴): تاثیر سرعت پروانه بر درصد اختلاط فازها

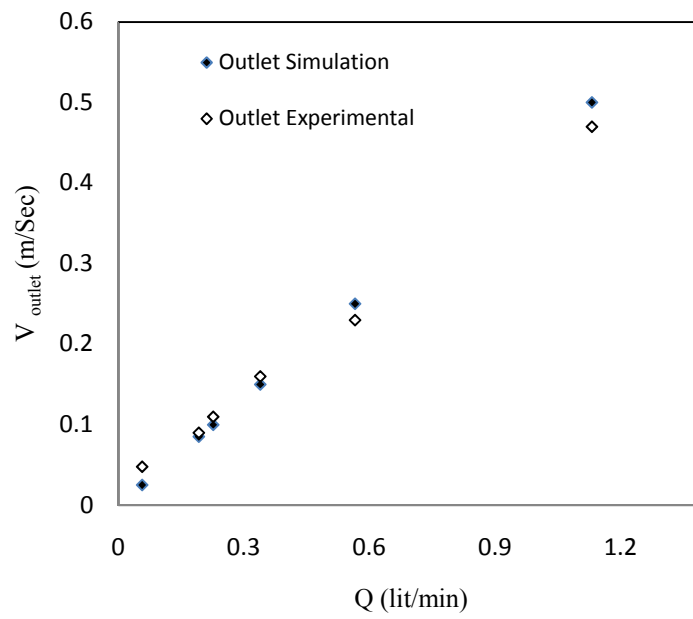


شکل (۵): کسر حجمی فاز یک در مدل مورد آزمایش در مقطع طولی از ورودی فاز یک



Pathlines Colored By Volume Fraction (Phase-1)

شکل (۶): مسیر جریان فاز ۱ در مدل مورد آزمایش در مقطع طولی از ورودی فاز ۱



شکل (۷): تغییرات سرعت خروجی در دبی‌های مختلف ورودی