

# مطالعه اختلاط فازها در سینی غربالی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

محمودرضا رحیمی\*

یاسوج، دانشگاه یاسوج، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

**چکیده:** در این پژوهش، یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) سه بعدی دو سیالی در چارچوب اولری-اولری برای شبیه سازی هیدرودینامیک جریان‌ها روی سینی غربالی در مقیاس صنعتی به منظور مطالعه اختلاط فازها توسعه داده شده است. فاز گاز گسسته و فاز مایع پیوسته به عنوان دو فاز با اثرهای متقابل در نظر گرفته شده اند. برای بررسی وضعیت اختلاط فازها، سه پارامتر توزیع جزء حجمی، توزیع دانسیته مخلوط و سطح تماس فازهای گاز - مایع در مکان‌های گوناگون سینی بررسی شده اند. در چهار ناحیه شامل پشت بند خروجی، در نزدیکی ورودی مایع به سینی، کنار دیواره برج و در فاصله بین سوراخ‌های مجاور وضعیت اختلاط نامناسب دیده شد. در ناحیه مرکزی سینی جریان به تقریب قالبی با توزیع به نسبت یکنواخت اختلاط فازها دیده شد. میزان اختلاط بستگی به شدت جریان گاز و مایع دارد و پاسخ ناحیه مرکزی و چهار ناحیه مشخص شده با اختلاط غیر یکنواخت به تغییر شدت جریان مایع و گاز متفاوت است. این مدل امکان دیدن جزئیاتی را فراهم نموده است که تاکنون مطالعه‌های موجود قادر به ارائه آنها نبوده اند.

**واژه‌های کلیدی:** دینامیک سیالات محاسباتی، سینی غربالی، هیدرودینامیک، اختلاط فازها.

**KEY WORDS:** CFD, Sieve tray, Hydrodynamics, Phase mixing.

## مقدمه

راندمان جداسازی و راندمان کلی برج مورد نیاز است. کمبود اطلاعات در زمینه ضریب انتقال جرم و سطح تماس ویژه و ویژگی‌های اختلاط فازها، پژوهش‌های گسترده در این موارد را ضروری می‌سازد. دلیل اصلی این کمبود اطلاعات، پیچیدگی بیش از حد موضوع است که از یک طرف ناشی از دو فازی و چند جزئی بودن آن و از طرف دیگر ناشی از پیچیدگی‌های رفتار هیدرولیکی محیط‌های پخش شده دوفازی است. همچنین نبود ابزارهای اندازه‌گیری مناسب برای جریان‌های چند فازی، دیدن جزئیات اتفاقاتی که در زمان تماس گاز و مایع روی سینی غربالی رخ می‌دهد را دشوار کرده است.

سینی‌های غربالی به‌طور گسترده‌ای در برج‌های تقطیر، جذب و دفع، استخراج و راکتورهای دوغابی استفاده می‌شوند. آگاهی از جزئیات هیدرودینامیک این سینی‌ها در طراحی درست و به‌ویژه در راهبری و رفع مشکل‌های عملیاتی این سینی‌ها نقش غیر قابل انکاری دارد. در روش‌های تعادلی و غیر تعادلی طراحی برج‌ها اطلاعات ضریب انتقال جرم و سطح تماس ویژه فازها مورد نیاز است و سطح تماس ویژه و چگونگی اختلاط فازها عامل تعیین کننده در عمل انتقال جرم است [۱]. همچنین در روش تعادلی، پیش بینی راندمان سینی غربالی برای پیش بینی

\*E-mail: mrrahimi@yu.ac.ir

\*عهده دار مکاتبات

توسعه داده شده است. در این پژوهش توزیع جزء حجمی فازها، توزیع دانسیته مخلوط و توزیع سطح تماس فازها ارایه شده است. نتیجه‌های به دست آمده جنبه‌های گوناگونی از جزئیات رفتار جریان هر دو فاز مایع و گاز روی سینی را به خوبی تشریح می‌کنند.

### بخش نظری

معادله‌های لازم برای مدل‌سازی شامل معادله‌های بقای جرم و اندازه حرکت، و مدل‌های تکمیلی مانند مدل آشفتگی و معادله‌های ضریب‌های انتقال اندازه حرکت بین فازها (ضریب‌های دراگ) می‌باشد. در اینجا مدل کامل سه بعدی در چار چوب اولری (دوفازی) برای سینی غربالی ارایه شده است. جزئیات ریاضی مدل‌ها در مرجع [۱۱] آورده شده است.

### معادله‌های پیوستگی

فاز مایع:

$$\nabla \cdot (r_L \rho_L V_L) = 0 \quad (1)$$

فاز گاز:

$$\nabla \cdot (r_G \rho_G V_G) = 0 \quad (2)$$

### معادله‌های اندازه حرکت

فاز مایع:

$$\nabla \cdot (r_L (\rho_L V_L V_L)) = -r_L \nabla P_L + \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (r_L \mu_{eff,L} (\nabla V_L + (\nabla V_L)^T)) + r_L \rho_L g + M_{GL}$$

فاز گاز:

$$\nabla \cdot (r_G (\rho_G V_G V_G)) = -r_G \nabla P_G + \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (r_G \mu_{eff,G} (\nabla V_G + (\nabla V_G)^T)) + r_G \rho_G g - M_{GL}$$

هر دو فاز دارای میدان فشار یکسان هستند  $P_L = P_G = P$  و  $(\mu_{eff,L}, r_L, V_L, \rho_L)$  و  $(\mu_{eff,G}, r_G, V_G, \rho_G)$  مؤثر ماکروسکوپی، بردار سرعت، جزء حجمی و گرانروی فازهای گاز و مایع است،  $P$  فشار،  $M_{GL}$  بردار تبادل اندازه حرکت بین فازهای گاز و مایع و  $g$  بردار شتاب گرانشی زمین است. در معادله‌های بالا جمله تبادل اندازه حرکت بین فازها عبارتست از

$$M_{GL} = \frac{3}{4} \rho_L \frac{r_G}{d_G} C_D (V_G - V_L) |V_G - V_L| \quad (5)$$

تاکنون پژوهشگران زیادی مکانیسم تشکیل فصل مشترک فازها را از رابطه‌های حرکت و رشد حباب‌ها، با لحاظ کردن ویژگی‌های مواد و شرایط عملیاتی بررسی کرده‌اند ولی تعداد اندکی به پیش‌بینی سطح تماس ویژه فازها پرداخته‌اند. روش‌های گوناگونی برای تعیین سطح تماس ویژه فازها در یک سینی به کار رفته است، از جمله برای تعیین مقدار موضعی سطح تماس ویژه فازها در سینی حسگرهای موضعی [۲]، عکس‌برداری [۳] و دستگاه‌های اولتراسونیک [۴] و برای تعیین مقدار کلی سطح تماس ویژه فازها در سینی روش‌های شیمیایی [۵]، روش دفع اکسیژن [۶] و روش جذب فیزیکی [۷] گزارش شده‌اند. اگر چه مقایسه این روش‌ها هدف این مقاله نیست ولی نکته مهم در مورد هر دو دسته، محدودیت اندازه‌گیری در حالت دو فازی و همچنین هزینه‌بری و نیاز به صرف وقت زیاد برای انجام آزمایش‌ها است.

به تازگی مطالعه‌های هیدرودینامیک سینی غربالی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) مورد توجه قرار گرفته است و توانایی این روش در مطالعه هیدرودینامیک انواع سینی‌ها تأیید شده است [۱۸-۸]. در این مطالعه‌ها نشان داده شده است که با صرف زمان و هزینه بسیار کم و با دقت بالا، جزئیات هیدرودینامیک سینی‌ها قابل تعیین است. مطالعه‌های کاربرد CFD در شناخت رفتار هیدرودینامیکی انواع سینی در برج تقطیر روند تکمیلی را طی کرده است. نخست مطالعه امکان‌پذیری کاربرد CFD در مطالعه هیدرودینامیک سینی غربالی گزارش شد [۱۲-۸]. سپس توزیع درجه حرارت، غلظت و راندمان سینی غربالی گزارش شد [۲۱، ۱۹، ۱۳]. در مطالعه‌های بعدی اثر توزیع غیر یکنواخت گاز بر هیدرودینامیک سینی بررسی شد [۱۵] و در پژوهش‌های بعدی سایر سینی‌های متداول مطالعه شدند [۱۸-۱۶]. بیشتر این مطالعه‌ها در چارچوب اولری - اولری بوده‌اند گرچه کاربرد روش VOF برای مطالعه اثر وزن دریچه‌ها در سینی‌های دریچه‌ای نیز مطالعه شده است [۱۶]. با وجود روند تکمیلی و پیشرفت‌های انجام شده، هنوز هم به مطالعه‌های گوناگونی برای شناخت کامل هیدرودینامیک سینی‌ها نیاز است. از جمله مواردی که تاکنون در مطالعه‌های CFD گزارش نشده است، مطالعه چگونگی اختلاط فازها و سطح تماس ویژه فازها در سینی غربالی است.

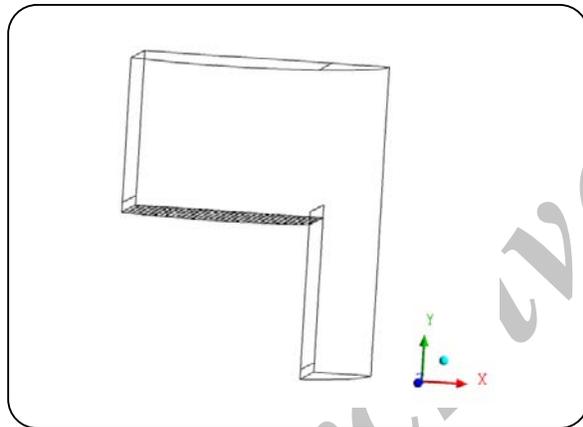
در این پژوهش یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی سه بعدی دو سیالی در چارچوب اولری - اولری برای پیش‌بینی هیدرودینامیک سینی‌های غربالی و مطالعه اختلاط فازها

جدول ۱- ثابت‌های مدل آشفتگی k-ε استاندارد.

$C_\mu$	$C_{\epsilon_1}$	$C_{\epsilon_2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
۰٫۰۹	۱٫۴۳	۱٫۹۲	۱	۱٫۳

جدول ۲- ویژگی‌های سینی سولاری و بل [۲۲].

۱٫۲۲	قطر (متر)
۰٫۶۱	فاصله سینی‌ها (متر)
۰٫۰۵	قطر سوراخ‌ها (متر)
۰٫۱۲۷	فاصله سوراخ‌ها (متر)
۰٫۰۵	ارتفاع بند خروجی (متر)
۰٫۹۴	طول بند خروجی (متر)
۰٫۰۳۸	ارتفاع روزنه زیر ناودان (متر)
٪۱۳	درصد سطح سوراخ‌ها



شکل ۱- شمای سینی.

## ویژگی‌های هندسی

برای مقایسه نتیجه‌های شبیه‌سازی با مقدرهای تجربی، ویژگی‌های هندسی سینی و شرایط عملیاتی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها مطابق با سینی و شرایط عملیاتی استفاده شده توسط سولاری و بل [۲۲] می‌باشد که ویژگی‌های آن در جدول ۲ آمده است. شکل ۱ شمای سینی استفاده شده را نشان می‌دهد، به دلیل تقارن [۲۲] نصف سینی در نظر گرفته شده است. دامنه محاسباتی کل فضای نشان داده شده در این شکل می‌باشد که شامل فاصله سینی مورد نظر تا زیر سینی بالایی و ناودان خروجی سینی مورد نظر می‌باشد.

که در آن  $C_D$  ضریب تبادل اندازه حرکت بین فازهاست. با استفاده از معادله  $C_D$  ارایه شده توسط کریشنا و همکاران [۲۰] معادله زیر برای جمله تبادل اندازه حرکت بین فازها ارایه شده است:

$$M_{GL} = \frac{(\bar{v}_G)^2}{(v_{*G} - \bar{v}_G) v_{*G}} g (\rho_L - \rho_G) \quad (6)$$

$$[r_{GL} | v_G - v_L | (v_G - v_L)]$$

موجودی متوسط مایع در روی سینی از معادله بنت و همکاران [۲۱] محاسبه شده است.

در معادله‌های بالا گرانی مؤثر فازهای مایع و گاز عبارتند از

$$\mu_{eff,G} = \mu_{i,G} + \mu_{T,G} \quad (7)$$

$$\mu_{eff,L} = \mu_{i,L} + \mu_{T,L} \quad (8)$$

برای ارتباط دادن گرانی مؤثر آشفته به پارامترهای میانگین جریان از مدل آشفتگی k-ε استاندارد استفاده شده است، جزئیات مدل آشفتگی در مرجع [۱۱] ذکر شده است.

$$\frac{\partial(uk)}{\partial x} + \frac{\partial(vk)}{\partial y} + \frac{\partial(wk)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + S_k$$

$$\frac{\partial(u\epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(v\epsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(w\epsilon)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + S_\epsilon$$

$$S_k = (P - D) \quad (11)$$

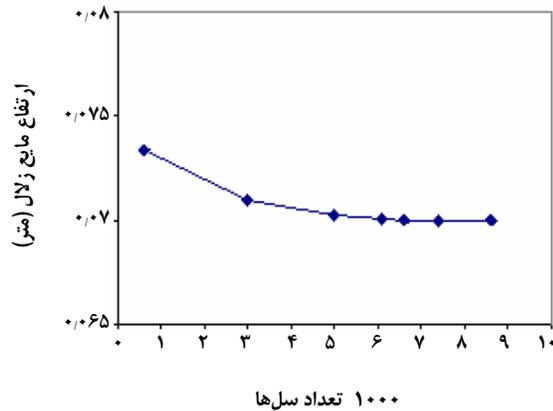
$$S_\epsilon = \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon_1} P - C_{\epsilon_2} D) \quad (12)$$

$$P = \rho v_T \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \quad (13)$$

$$v_T \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]$$

$$D = \epsilon \quad (14)$$

ثابت‌های مدل آشفتگی k-ε استاندارد مطابق جدول ۱ استفاده شده‌اند.



شکل ۲- بررسی تغییرهای ارتفاع مایع زلال با اندازه شبکه برای سینی سولاری و بل [۲۲].

نظریه‌های مربوطه در اینجا بیان نشده‌اند. علاقه‌مندان مرجع [۱۱] را مطالعه نمایند. آب و هوا در دمای معمولی و فشار اتمسفری در تمامی شبیه‌سازی به کار رفته‌اند. توانایی این مدل در شبیه‌سازی هیدرودینامیک سینی غربالی پیش‌تر بررسی و گزارش شده است [۱۱، ۱۰].

### نتیجه‌ها و بحث

برای داشتن حل مناسب، باید حساسیت نتیجه‌های شبیه‌سازی به اندازه‌گره‌ها، کنترل شود. برای همگرایی شبکه لازم است که بعد از یک اندازه معین از گره‌ها، نتیجه‌های عددی با کاهش بیشتر اندازه شبکه تغییر چندانی نداشته باشد. ارتفاع مایع زلال به عنوان شاخص همگرایی حل انتخاب شده است و تغییر آن با اندازه شبکه در شکل ۲ نشان داده شده است. بنابراین اندازه شبکه در مدل‌سازی چنان انتخاب شده است که جواب‌ها مستقل از اندازه شبکه بوده و زمان محاسبه‌ها بهینه شود.

چگونگی اختلاط فازها نشان دهنده میزان کارایی موضعی سینی است و در نتیجه با مطالعه آن می‌توان نقاطی از سینی را که دارای عملکرد نامناسب هستند مشخص نمود. در این مطالعه سه پارامتر مرتبط و تأثیرگذار بر اختلاط فازها مورد بررسی قرار گرفته است که عبارتند از توزیع فازها در نقاط گوناگون (توزیع حجمی فازها)، توزیع سطح تماس مخصوص فازها و توزیع دانسیته مخلوط.

نمونه کانتور جزء حجمی آب در جهت عمود بر کف سینی در امتداد جریان مایع (صفحه X-Y) و در جهت موازی کف سینی

### شرایط مرزی و مقدار دهی اولیه

در شبیه‌سازی حاضر شرایط مرزی زیر استفاده شده است. در ورودی مایع و گاز سرعت‌ها و جزء حجمی مشخص شده‌اند، در دیواره‌ها شرط عدم لغزش برای مایع و لغزش آزاد برای گاز استفاده شده‌اند، از آنجا که ریزش مایع از سینی و حمل قطره‌های مایع توسط گاز در سینی سولاری و بل [۲۲] ناچیز گزارش شده است در اینجا نیز از آنها صرف‌نظر شده‌اند، در ناودان نیز گاز به طور کامل از مایع جدا می‌شود بنابراین در مرزهای ورودی و خروجی، فازهای گاز و مایع تک فازی هستند. سرعت بخار و مایع ورودی یکنواخت فرض شده است.

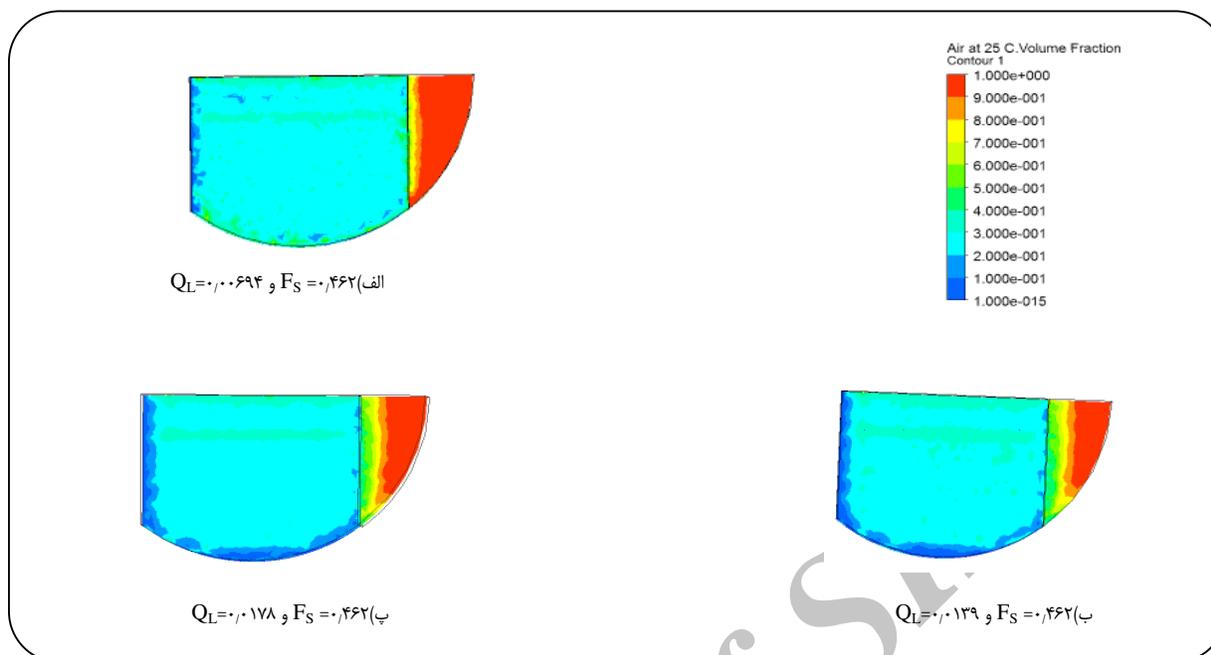
حدس اولیه شرایط جریان در رسیدن به همگرایی حل و سرعت آن تأثیر مهمی دارد. مجموعه مناسب این شرایط با حدس و خطا در طی محاسبه‌ها به دست آمده‌اند که به شرح زیر می‌باشند. آب و هوا در دمای معمولی و فشار اتمسفری در شبیه‌سازی به کار رفته‌اند. نخست فرض شده است که سینی از آب پر شده و جزء حجمی هوا در آن یکنواخت و کمی کمتر از مقدار متوسط پیش بینی شده از معادله بنت و همکاران [۲۱] می‌باشد، و بسته به شدت جریان گاز و مایع بین ۰/۱ تا ۰/۲ در نظر گرفته شده است. حدس اولیه مؤلفه عمودی سرعت گاز برابر با سرعت سطحی گاز بر اساس سطح حباب‌ساز و سایر مؤلفه‌های آن صفر در نظر گرفته شده‌اند. در سراسر منطقه سرکف برای مایع توزیع سرعت یکنواخت افقی در نظر گرفته شده که مقدار آن برابر با

$$V_{L, \text{in}} = \frac{Q_L}{L_w h_{\text{ap}}}$$

می‌باشد، مؤلفه عمودی سرعت مایع کمی کوچکتر از صفر منظور شده است.

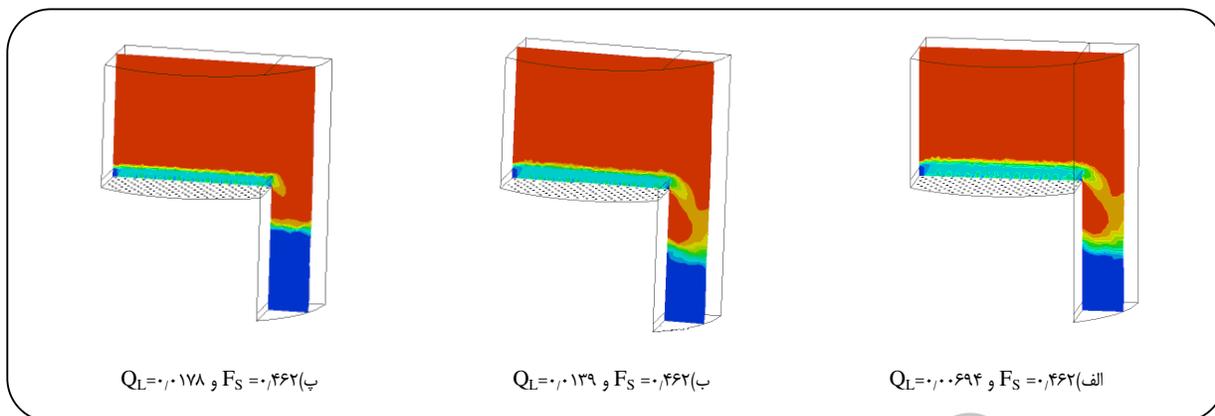
### روش حل مجموعه معادله‌ها

برای ایجاد هندسه و شبکه بندی مدل هندسی از نرم افزار Ansys WorkBench 11 استفاده شده است. برای شبکه بندی از شبکه ترکیبی استفاده شده که ترکیبی از مش‌های چهار وجهی، گوه‌ای و منشوری می‌باشد. برای حل مجموعه معادله‌های انتقال، نرم افزار CFX 11، که بر مبنای حجم محدود می‌باشد به کار برده شده‌است. گسسته‌سازی تمام معادله‌ها به روش Hybrid differencing انجام شده است، به استثنای معادله‌های حجم جزیی که برای آن از روش Min-Mod scheme استفاده شده است. برای ارتباط فشار - سرعت از الگوریتم سیمپلک استفاده شده است،

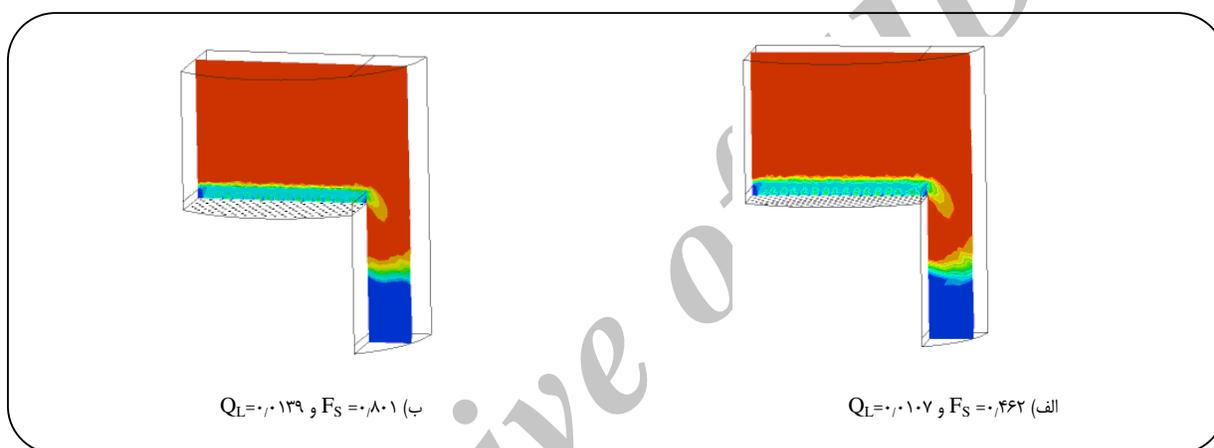
شکل ۳- کانتورهای جزء حجمی هوا در صفحه (Z-X) در ارتفاع  $+0.38$  متر از کف سینی.شکل ۴- کانتورهای جزء حجمی هوا در صفحه (Z-X) در ارتفاع  $+0.38$  متر از کف سینی.

شکل‌های ۳ تا ۶ نمایش جزء حجمی هوا در شدت جریان‌های گوناگون هوا و آب است. تغییر وسعت مناطق دارای جزء حجمی زیاد از یک فاز در این شکل‌ها قابل دیدن است. با افزایش شدت جریان آب به ازای شدت جریان ثابت هوا وسعت این مناطق بیشتر می‌شود، زیرا مومنتوم هوای خروجی از سوراخ‌ها برای هم زدن و اختلاط با آب کافی نمی‌باشد و در نتیجه مناطق با موجودی زیاد مایع بیشتر می‌شود. همچنین در یک شدت جریان ثابت آب با افزایش شدت جریان هوا همزدگی بیشتر و وسعت مناطق با موجودی بالای مایع کمتر می‌شود. تأثیر سرعت گاز در کیفیت اختلاط در نواحی کنار دیواره و پشت بند خروجی واضح‌تر است.

(صفحه X-Z) در شکل‌های ۳ تا ۶ نشان داده شده است. توزیع جزء حجمی در پلان‌هایی که موازی کف سینی هستند به روشنی ناحیه‌های با میزان اختلاط کم و نامناسب را نشان می‌دهد، در این ناحیه‌ها مقدار یکی از فازها خیلی زیاد و دیگری خیلی کم است. در منطقه‌های نزدیک دیواره برج، فاصله بین سوراخ‌های مجاور و پشت بندهای ورودی و خروجی جزء حجمی مایع زیاد است و چرخش مایع در کنار دیواره برج به طور کامل پیداست در صورتی که در بخش میانی سینی به تقریب جریان قالبی برقرار است. نمایش مسیر جریان مایع از چند نقطه از محل ورود مایع، در شکل ۷ به خوبی این موضوع را تأیید می‌کند.

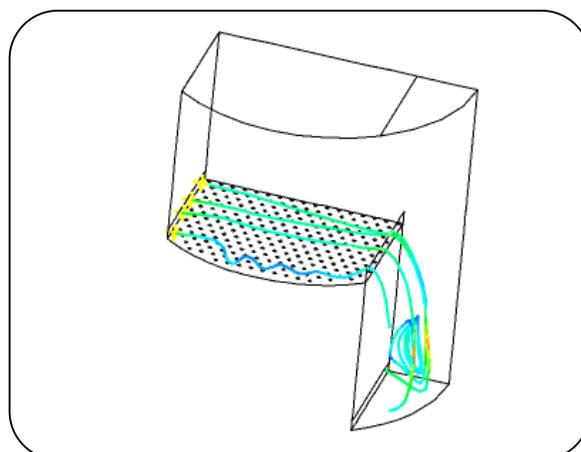


شکل ۵- کانتورهای جزء حجمی هوا در صفحه (Y-X) در فاصله ۰/۲ متر از مرکز سینی.



شکل ۶- کانتورهای جزء حجمی هوا در صفحه (Y-X) در فاصله ۰/۲ متر از مرکز سینی.

وضعیت اختلاط در ناحیه‌های بین سوراخ‌های مجاور در شکل‌های ۵ و ۶ قابل مشاهده است. ناحیه‌های با جزء حجمی مایع بالای ۹۰ درصد در فاصله بین سوراخ‌های سینی وجود دارد، این وضعیت نشانه اختلاط نیافتن فازها در این ناحیه است. اندازه این نواحی بستگی به شدت جریان مایع و گاز دارد و با روش انتگرال‌گیری محاسبه می‌شود. با تغییر شدت جریان آب در یک شدت جریان ثابت هوا ارتفاع و حجم این نواحی (با اختلاط کم و جزء حجمی زیاد آب) بیشتر می‌شود که نشان‌دهنده بدتر شدن وضعیت اختلاط موضعی در فضای بین سوراخ‌هاست. همچنین با زیاد شدن شدت جریان هوا در یک شدت جریان ثابت آب اندازه و حجم این ناحیه‌ها کمتر شده و در نتیجه وضعیت اختلاط موضعی در فضای بین سوراخ‌ها بهتر می‌شود. در مناطق میانی سینی وضعیت اختلاط



شکل ۷- نمایش مسیر جریان مایع  $Q_L=0.178$  و  $F_S=0.462$ .

ثابت آب، دانسیته مخلوط زیاد می‌شود. این تغییرها نشان می‌دهد که در یک شدت جریان ثابت مایع با افزایش شدت جریان هوا دانسیته مخلوط به تدریج بهتر می‌شود ولی اگر شدت جریان هوا خیلی زیاد شود وضعیت معکوس می‌شود. مقایسه نتیجه‌ها برای دو مقدار متفاوت شدت جریان هوا به ازای شدت جریان آب نشان می‌دهد که دانسیته مخلوط وابسته به شدت جریان مایع و گاز بوده و به ازای یک شدت جریان مشخص از یک فاز مقدار بهینه‌ای از فاز دیگر وجود خواهد داشت که بستگی به هندسه سینی، ویژگی‌های فازها و شرایط عملیاتی دارد.

شرایط بهینه عملکرد یک برج تقطیر آن است که بیشترین مقدار ممکن انتقال جرم به دست می‌آید، سطح تماس ویژه فازها معیاری از کیفیت پخش فازها در همدیگر و شاخصی برای بررسی میزان انتقال جرم در سینی است. همان‌گونه که اشاره شد تاکنون مطالعه‌های انجام شده در زمینه سطح تماس ویژه به طور عمده بر پایه گزارش مقدار متوسط بوده است و توزیع موضعی سطح تماس ویژه به دلیل پیچیدگی جریان چند فاز در موارد اندکی گزارش شده است، به دلیل محدودیت‌های حاکم، هیچ کدام از روش‌های موجود قادر به ارائه‌ی تصویر کاملی از جزئیات درون سینی نیستند. از این‌رو در این پژوهش به منظور نمایش این جزئیات توزیع سطح تماس در ناحیه‌های گوناگون سینی در نماها و پلان‌های بسیار بررسی شده است، و نتیجه‌های ارائه شده دارای جزئیاتی است که تاکنون گزارش نشده است. نتیجه‌های به دست آمده در شرایط گوناگون در شکل‌های ۱۲ تا ۱۶ آمده است.

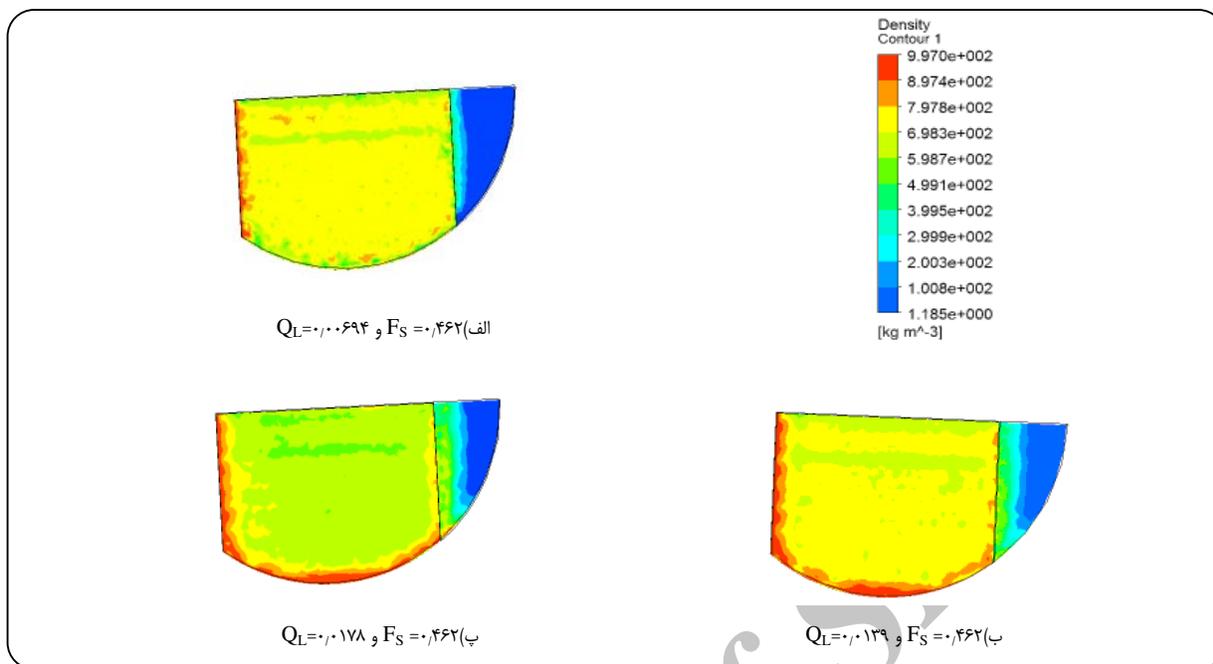
با توجه به این شکل‌ها می‌توان وضعیت اختلاط فازها در بخش‌های گوناگون یک سینی را بررسی نمود. چهار ناحیه با سطح تماس ویژه نامتناسب با بقیه نقاط دیده می‌شود، در این ناحیه‌ها با تغییر شدت جریان آب در یک شدت جریان ثابت هوا وسعت این مناطق بیشتر و سطح تماس ویژه فازها کمتر می‌شود که نشان دهنده بدتر شدن وضعیت اختلاط در این نواحی است. همچنین با زیاد شدن شدت جریان هوا در یک شدت جریان ثابت آب اندازه و حجم این ناحیه‌ها کمتر شده و سطح تماس ویژه فازها زیادتر می‌شود در نتیجه وضعیت اختلاط موضعی در این ناحیه‌ها بهتر می‌شود.

در ناحیه میانی سینی توزیع سطح تماس ویژه موضعی فازها به تقریب یکسان است. با افزایش شدت جریان گاز در یک شدت جریان ثابت مایع جزء حجمی گاز بیشتر و کیفیت اختلاط بهتر می‌شود ولی با افزایش بیش از حد شدت جریان هوا در یک شدت جریان

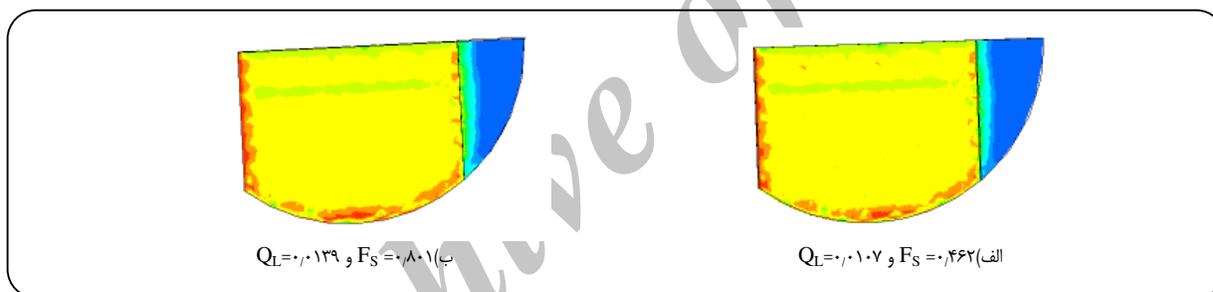
مناسب‌تر است و با افزایش شدت جریان گاز در یک شدت جریان ثابت مایع جزء حجمی گاز بیشتر و کیفیت اختلاط بهتر می‌شود و با افزایش شدت جریان مایع در یک شدت جریان ثابت گاز ابتدا بهبود نسبی در کیفیت اختلاط در مناطق میانی سینی دیده می‌شود ولی با افزایش شدت جریان آب اختلاط بهتر نمی‌شود. در نتیجه عکس‌العمل به تغییر شدت جریان مایع و گاز و چگونگی تغییرها در منطقه میانی سینی و چهار منطقه گفته شده در بالا با هم تفاوت دارد.

گرچه تعدادی از پژوهشگران گزارش‌هایی از وجود جریان غیر آرمانی مایع در برج تقطیر ارائه داده‌اند و در آنها بیان داشته‌اند که جریان‌های غیر آرمانی می‌تواند اثر معکوس بر بازده سینی داشته باشد لیکن به طور کمی نتیجه‌های قابل اطمینان ارائه نشده است. برخی از این مطالعه‌ها نشان داده‌اند که شدت جریان گاز تأثیر مهمی بر توزیع زمان اقامت دارد و الگوی جریان و اختلاط در سینی به شدت به طراحی سینی و شرایط جریان‌ها وابسته است [۲۲]. مرور کامل بر مطالعه‌های گذشته در مراجع یافت می‌شود [۲۵ - ۲۲] لیکن در مطالعه‌هایی که تاکنون منتشر شده‌اند، مشخص نشده است که غیر یکنواختی‌ها چه سهمی از کل فضای سینی را به خود اختصاص می‌دهند.

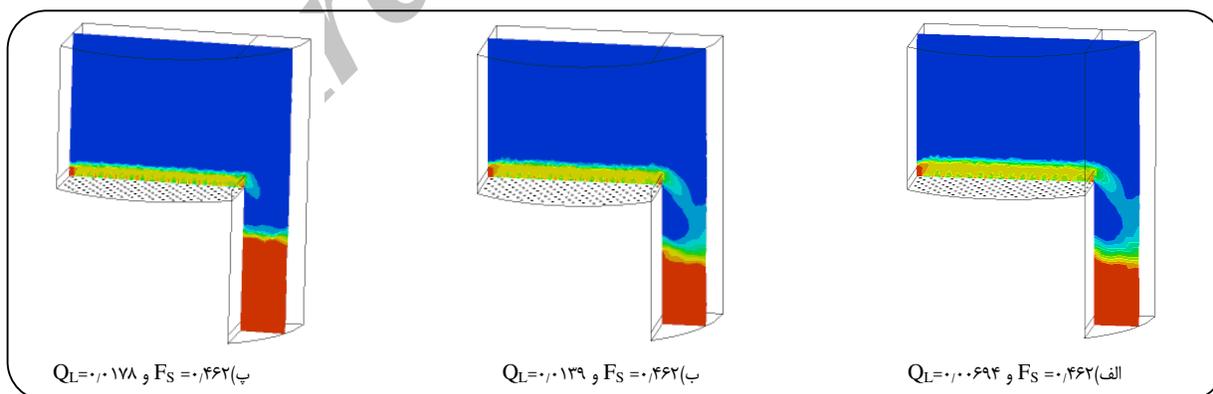
دانسیته مخلوط نیز کمیت مناسبی برای بررسی وضعیت اختلاط فازهاست. تغییر دانسیته مخلوط با شدت جریان هوا و آب در نماهای گوناگون به ازای شدت جریان‌های گوناگون آب و هوا در شکل‌های ۸ تا ۱۱ آمده است. تغییر دانسیته مخلوط با تغییر شدت جریان آب و هوا در نواحی گوناگون سینی قابل پی‌گیری است. این شکل‌ها نیز به خوبی چهار ناحیه با دانسیته متفاوت از بقیه مناطق را نشان می‌دهند، در این ناحیه‌ها با زیاد شدن شدت جریان آب در یک شدت جریان ثابت هوا دانسیته مخلوط کمتر می‌شود که نشان دهنده بدتر شدن وضعیت اختلاط در این ناحیه‌ها است. همچنین با زیاد شدن شدت جریان هوا در یک شدت جریان ثابت آب اندازه و حجم این نواحی کمتر شده و همچنین دانسیته مخلوط زیادتر می‌شود در نتیجه وضعیت اختلاط موضعی در این ناحیه‌ها بهتر می‌شود. در ناحیه میانی سینی توزیع دانسیته موضعی مخلوط به تقریب یکسان است. با افزایش شدت جریان گاز در یک شدت جریان ثابت مایع جزء حجمی گاز بیشتر و کیفیت اختلاط بهتر می‌شود و با افزایش شدت جریان مایع در یک شدت جریان ثابت گاز ابتدا بهبود نسبی در کیفیت اختلاط در مناطق میانی سینی دیده می‌شود ولی با افزایش شدت جریان آب اختلاط بهتر نمی‌شود. همان‌گونه که از این شکل‌ها پیداست با افزایش شدت جریان هوا در یک شدت جریان



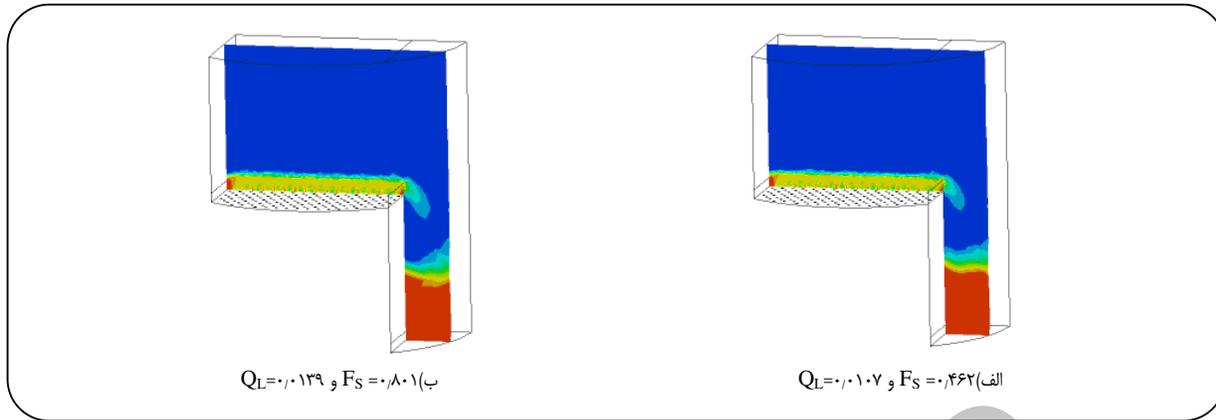
شکل ۸ - کانتورهای دانسیته مخلوط در صفحه (Z-X) در ارتفاع ۰/۳۸ متر از کف سینی.



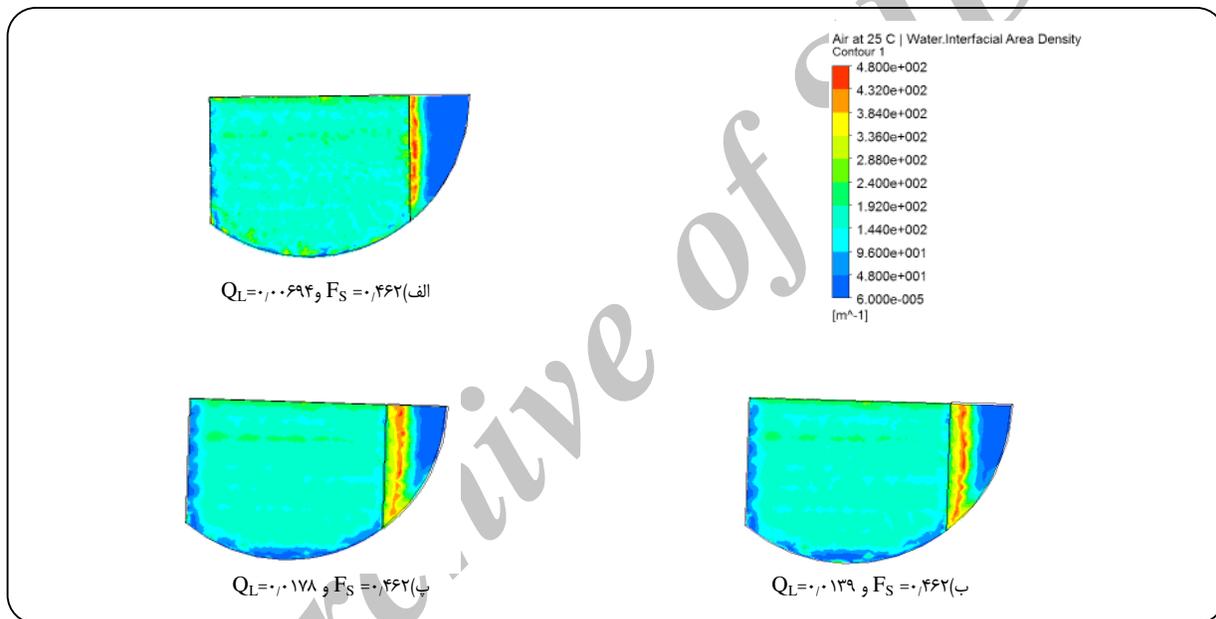
شکل ۹ - کانتورهای دانسیته مخلوط در صفحه (Z-X) در ارتفاع ۰/۳۸ متر از کف سینی.



شکل ۱۰ - کانتورهای دانسیته مخلوط در صفحه (Y-X) در فاصله ۰/۲ متر از مرکز سینی.



شکل ۱۱- کانتورهای دانسیته مخلوط در صفحه (Y-X) در فاصله ۰/۲ متر از مرکز سینی.



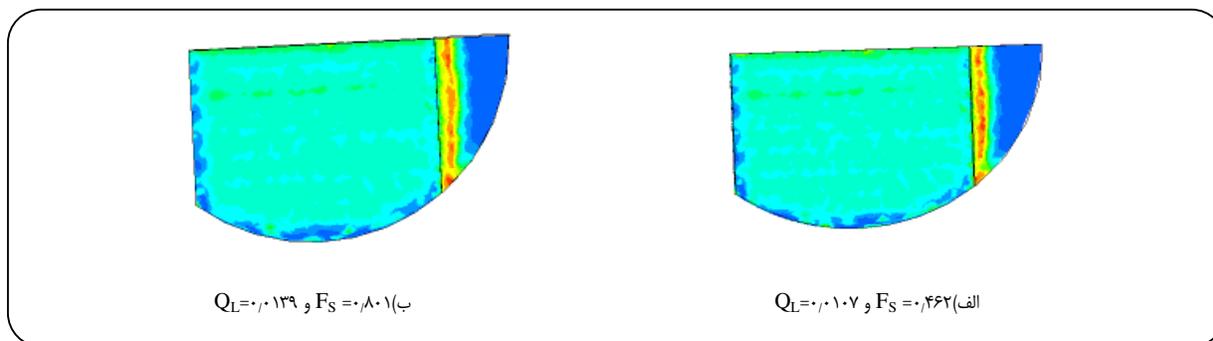
شکل ۱۲- کانتورهای سطح تماس مخصوص فازها در صفحه (Z-X) در ارتفاع ۰/۳۸ متر از کف سینی.

معکوس می‌شود. مقایسه نتیجه‌ها برای دو مقدار متفاوت شدت جریان هوا به ازای شدت جریان آب نشان می‌دهد که سطح ویژه تماس فازها وابسته به شدت جریان مایع و گاز بوده و به ازای یک شدت جریان مشخص از یک فاز مقدار بهینه‌ای از فاز دیگر وجود خواهد داشت.

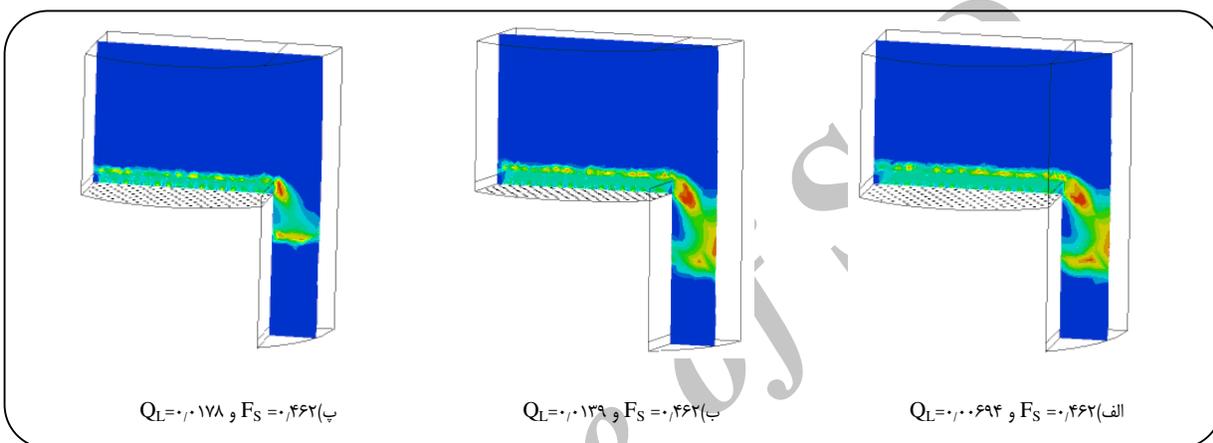
علاوه بر سینی می‌توان وضعیت اختلاط در ناودان‌ها را نیز بررسی کرد. شکل‌های ۱۲ تا ۱۶ نشان می‌دهند که در ورودی مایع به ناودان سطح تماس فازها بسیار زیاد است و این به خاطر ریز شدن

وضعیت اختلاط نامناسب می‌شود. با افزایش شدت جریان آب در یک شدت جریان ثابت هوا ابتدا بهبود نسبی در کیفیت اختلاط در مناطق میانی سینی دیده می‌شود ولی با افزایش بیشتر شدت جریان آب اختلاط بهتر نمی‌شود.

با افزایش شدت جریان هوا در یک شدت جریان ثابت آب، سطح تماس ویژه زیاد می‌شود. در یک شدت جریان ثابت مایع با افزایش شدت جریان هوا سطح تماس ویژه فازها به تدریج بهتر می‌شود ولی اگر شدت جریان هوا خیلی زیاد شود وضعیت



شکل ۱۳- کانتورهای سطح تماس مخصوص فازها در صفحه (Z-X) در ارتفاع  $+0.38$  متر از کف سینی.



شکل ۱۴- کانتورهای سطح تماس مخصوص فازها در صفحه (Y-X) در فاصله  $+0.2$  متر از مرکز سینی.

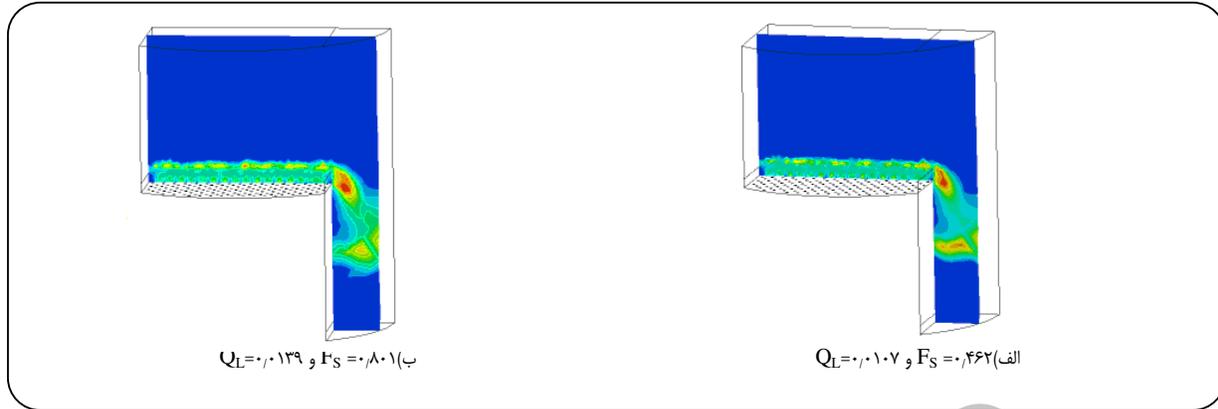
مجاور، و ناحیه نزدیک دیواره برج بیشترین مکان‌های اختلاط نامناسب هستند، این موضوع با استفاده از شکل‌های مربوط به نمای موازی کف و نمای عمود بر مسیر مایع به خوبی دیده می‌شود. در این مطالعه با بررسی پروفایل‌های توزیع جزء حجمی، سطح ویژه تماس و دانسیته مخلوط و با روش انتگرال‌گیری حجمی مشخص شد که نواحی با جریان غیر یکنواخت، شامل نواحی با جریان برگشتی و نواحی ساکن و نواحی با اختلاط نامناسب بسته به شدت جریان فازها، بین ۱۰ تا ۵۵ درصد از سطح حباب ساز است.

### نتیجه‌گیری

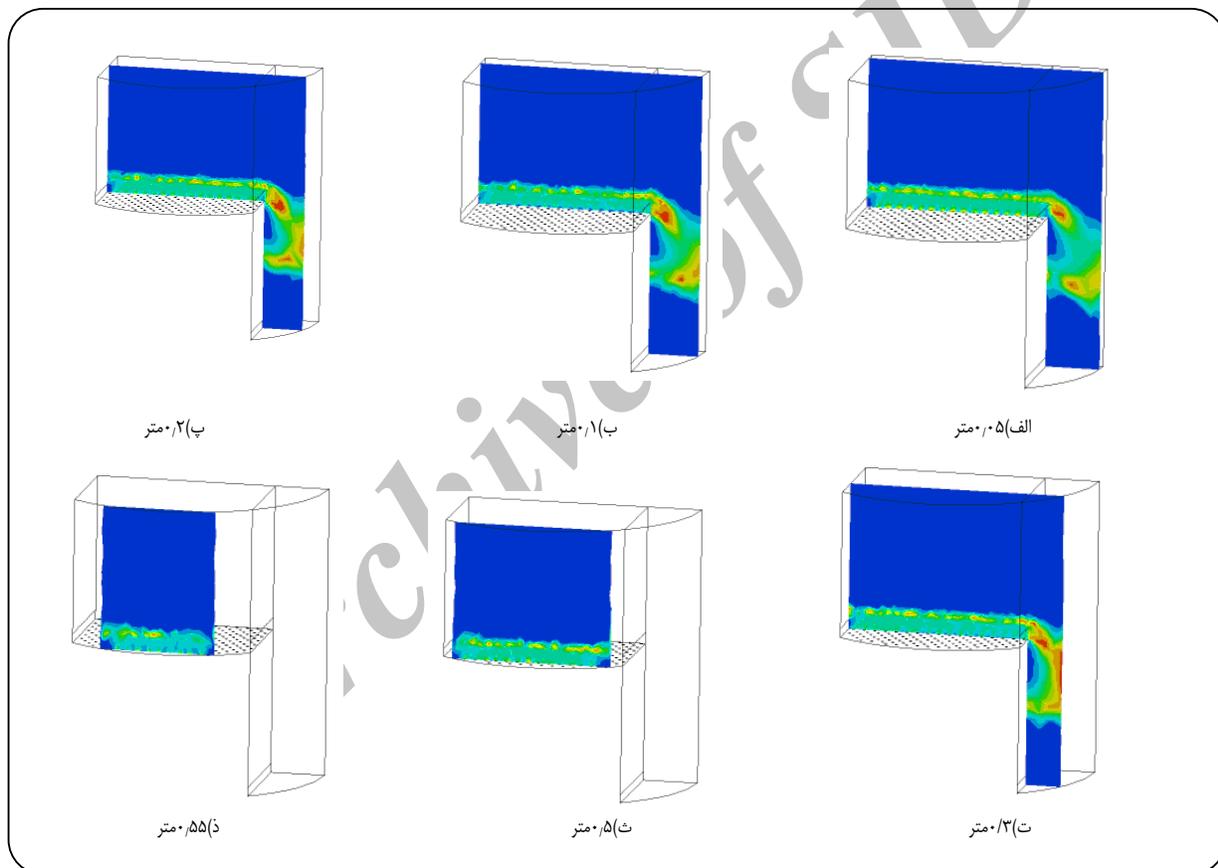
در این پژوهش ابتدا یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) سه بعدی دو سیالی در چارچوب اولری - اولری برای پیش‌بینی هیدرودینامیک سینی‌های غربالی در مقیاس صنعتی به منظور تعیین ویژگی‌های اختلاط فازها در سینی غربالی

مایع در این ناحیه است و از طرفی نشان‌دهنده اهمیت ناودان در جداسازی گازهای همراه مایع در ناودان می‌باشد بنابراین میزان انتقال جرم در ناودان زیاد بوده و از این لحاظ دارای اهمیت خاصی است. علاوه بر این دو منطقه دیگر نیز با سطح تماس زیاد در محل برخورد سرکف با دیواره و بالاتر از سطح مایع درون ناودان وجود دارد که وسعت این مناطق بستگی به شدت جریان گاز و مایع دارد. کانتورهای جزء حجمی و سطح تماس ویژه فازها جزئیات تازه‌ای از اتفاقات موضعی که با تغییر شدت جریان رخ می‌دهد را نشان می‌دهد. کیفیت اختلاط موضعی در سینی به ازای تغییر شدت جریان مایع و گاز از این کانتورها قابل درک است.

برای مقایسه، همه کانتورها در یک پلان با موقعیت ثابت با همدیگر مقایسه شده‌اند و در نتیجه مشخص می‌شود که در پلان خاص در یک شدت جریان ثابت مایع، وضعیت اختلاط موضعی نقطه‌های گوناگون سینی با شدت جریان گاز تغییر می‌کند. فضای پشت بند خروجی و محل ورودی مایع، و فضای بین سوراخ‌های



شکل ۱۵- کانتورهای سطح تماس مخصوص فازها در صفحه (Y-X) در فاصله ۰٫۲ متر از مرکز سینی.



شکل ۱۶- کانتورهای سطح تماس مخصوص فازها در صفحه (Y-X) بر حسب فاصله از مرکز سینی  $F_S = 0.462$  و  $Q_L = 0.0694$ .

اختلاط مطالعه شده‌اند. شدت جریان مایع و گاز نقش مهمی در کیفیت اختلاط فازها دارند. نتیجه‌ها نشان داد که اختلاط نامناسب در نزدیکی دیواره برج، پشت بندهای ورودی و خروجی و

گسترش داده شده است. برای بررسی وضعیت اختلاط فازها سه پارامتر توزیع دانسیته مخلوط، توزیع جزء حجمی و سطح تماس فازهای گاز - مایع بررسی شده‌اند و ناحیه‌های گوناگون سینی از نظر کیفیت

مطالعه را برای سایر سینی‌ها نیز گسترش داد. از برتری‌های چشمگیر این مطالعه امکان بررسی سایر سینی‌ها با هندسه و اندازه‌های گوناگون و انواع مواد با هزینه اندک و صرف وقت بسیار کم در مقایسه با ساخت دستگاه‌های واقعی و انجام مطالعه‌های آزمایشگاهی است. همچنین اطلاعاتی که در این مطالعه به دست آمده‌اند شامل جزییاتی است که بسیاری از آنها را نمی‌توان با هیچ وسیله و ابزاری دید. در نتیجه این مطالعه را می‌توان "نگاه به درون فرایند" یا "آزمایشگاه مجازی" نامید.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱/۳۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۰/۱۹

فاصله بین سوراخ‌ها در مجاورت کف سینی دیده می‌شود و چرخش نامنظم مایع در کنار دیواره برج به طور کامل قابل دیدن است. در صورتی که در بخش میانی سینی به تقریب جریان قالبی برقرار است. ناحیه‌های با جریان غیر یکنواخت، بسته به شدت جریان فازها، بین ۱۰ تا ۵۵ درصد از سطح حباب ساز سینی را پوشش می‌دهد. بررسی سطح ویژه تماس گاز - مایع نشان دهنده ارتباط بین میزان اختلاط و سرعت فازها و توزیع جزء حجمی سیال‌ها است و جزییات نشان داده شده در این مطالعه درک بهتری از عملکرد ناحیه‌های گوناگون سینی را مهیا می‌کند.

به دلیل امکان توسعه مدل به سایر انواع سینی می‌توان این

## مراجع

- [1] Taylor R., Krishna R., "Multicomponent Mass Transfer", Wiley-Interscience, (1993).
- [2] Zhao D., Guo L., Lin C., Zhang X., An Experimental Study on Local Interfacial Area Concentration Using a Double-Sensor Probe. *Int J Heat Mass Transf.*, **48**, p. 1926 (2005).
- [3] Pohorecki R., Moniuk W., Bielski P., Sobieszuk P., Da. Browiecki G., Bubble Diameter Correlation via Numerical Experiment. *Chem Eng J.*, **113**, p. 35 (2005).
- [4] Delhaye J.M., Brichard P., Interfacial Area in Bubbly Flow: Experimental Data and Correlation. *Nucl Eng Des.*, **151**, p. 65 (1994).
- [5] Tomida T., Yusa F., Akazaki T., Effective Interfacial are and Liquid Side Mass Transfer Coefficient in Upward Two-Phase Flow of Gas-Liquid Mixtures. *Chem Eng J.*, **16**, p. 81 (1978).
- [6] Martin R., Wagner H., Po'pel J., Kalte P., Pure Oxygen Desorption Method- a New and Cost-Effective Method for the Determination of Oxygen Transfer Rates in Clean Water. *Wat Sci Tech.*, **38**, p. 103 (1998).
- [7] Puskeiler R., Weuster-Botz D., Combined Sulfite Method for the Measurement of the Oxygen Transfer Coefficient kLa in Bioreactors. *J Biotechnol.*, **120**, 430-438 (2005).
- [8] Van Baten J.M., Krishna R., Modeling Sieve Tray Hydraulics Using Computational Fluid Dynamics, *Chem. Eng. J.*, **77**, p. 143 (2000).
- [9] Krishna R., van Baten J.M., Ellenberger J., Higler A.P., Taylor R., CFD Simulations of Sieve Tray Hydrodynamics, *Chem. Eng. Res. Des., Trans. Inst. Chem. Eng.*, **77**, p. 639 (1999).

[۱۰] رهبر رحیمی، محمودرضا رحیمی، فرهاد شهرکی، بررسی توانمندی دینامیک سیالات محاسباتی در طراحی

سینی های غربالی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، ۲۴ و ۱۹ (۱۳۸۴).

[۱۱] محمودرضا رحیمی، "شبه سازی هیدرودینامیک، انتقال حرارت و انتقال جرم در سینی های غربالی برج تقطیر با

استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی"، پایان نامه دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان (۱۳۸۵).

- [12] Gesit G.K., Nandakumar K., Chuang K.T., CFD Modeling of Flow Patterns and Hydraulics of Commercial-Scale Sieve Trays, *AIChE. J.*, **49**, p. 910 (2003).
- [13] Rahimi R., Rahimi M.R., Shahraki F., Zivdar M., Efficiencies of Sieve Tray Distillation Columns by CFD Simulations, *Chem. Eng. Technol. J.*, **29**(3), p. 326 (2006).
- [14] Rahimi M.R., Karimi H., A 3-D Two-Fluid CFD Model for Hydrodynamics of Industrial Scale Sieve Trays with Nonuniform Gas Distribution, "11<sup>th</sup> International Conference on Multiphase Flow in Industrial Plants", Palermo, Italy, 7-10 sept. (2008).
- [15] Rahimi M.R., Karimi H., CFD Simulation of Hydraulics of Sieve Trays with Gas Mal-Distribution, *Chemical Product and Process Modeling*, **5**(1), Article 2 (2010).
- [16] Alizadehdakhel A., Rahimi M., Abdulaziz Alsairafi A., Numerical and Experimental Investigation on a New Modified Valve in a Valve Tray Column, *Korean Journal of Chemical Engineering*, **26**(2), p. 475 (2009).
- [17] Zarei T., Rahimi R., Zivdar M., Computational Fluid Dynamic Simulation of MVG Tray Hydraulics, *Korean Journal of Chemical Engineering*, **26**(5), p. 1213 (2009).
- [18] Li X.G., Liu D.X., Xu S.M. Li H., CFD Simulation of Hydrodynamics of Valve Tray, *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, **48**(1), p. 145 (2009).
- [19] Rahimi M.R., Rahimi R., Shahraki F., Zivdar M., Prediction of Temperature and Concentration Distributions of Distillation Sieve Trays by CFD, *Tamkang Journal of Science and Engineering*, **9**(3), p. 265 (2006).
- [20] Krishna R., Urseanu M.I., van Baten J.M., Ellenberger J., Rise Velocity of a Swarm of Large Gas Bubbles in Liquids, *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 171 (1999).
- [21] Bennett D.L., Agrawal B., Cook P.J., New Pressure Drop Correlation for Sieve Tray Distillation Column, *AIChE J.*, **29**, p. 434 (1983).
- [22] Solari R.B., Bell R.L., Fluid Flow Patterns and Velocity Distribution on Commercial-Scale Sieve Trays, *AIChE J.*, **32**, p. 640 (1986).
- [23] Olujić Z., Jodecke M., Shilkin A., Schuch G., Kaibel B., Equipment Improvement Trends in Distillation, *Chem. Eng. Process.*, **48**, p. 1089 (2009).
- [24] Brambilla A., The Effect of Vapor Mixing on Efficiency of Large-Diameter Distillation Plates, *Chem. Eng. Sci.*, **31**, p. 571 (1976).
- [25] Zuiderweg F.J., Sieve Trays: A View on the State of the Art, *Chem. Eng. Sci.*, **37**, p. 1441 (1982).