

# بررسی هیدرولیک سینی های غربالی با استفاده از دیدگاه حجم سیال

شاهین محمدی زرغان<sup>۱</sup>، سپیده رشدی<sup>۱</sup>، نورالله کثیری<sup>۱\*</sup> و جواد ایوک پور<sup>۲</sup>

۱- مرکز تحقیقاتی CAPE، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۲- بخش پالایش نفت، پژوهشگاه صنعت نفت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۱

## چکیده

در این تحقیق به مدل سازی حجم سیال سینی غربالی با استفاده از مدل اغتشاش  $k-\epsilon$  در بازه فاکتور ظاهری گاز  $0.462/0.464$  تا  $1/464$  و دبی مایع  $6/94 \times 10^{-3}$  تا  $17/8 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  پرداخته شده است. مقایسه نتایج شبیه سازی VOF و Eulerian (نتایج تحقیق پیشین مولفان) با داده های تجربی (Bell و Solari) نشان داد که خطای شبیه سازی از  $1.6\%$  اولرین به  $2\%$  VOF برای ارتفاع زلال مایع کاهش می یابد، هنگامی که ارتفاع زلال مایع در فاکتورهای ظاهری مختلف گاز بررسی شود. با تغییرات دبی مایع، خطای ارتفاع زلال مایع در دیدگاه اولرین از  $3.5\%$  به  $7\%$  در دیدگاه VOF در مقایسه با داده های تجربی (Bell و Solari) کاهش یافت. ارتفاع سرکف هم خوانی بهتری را با رابطه Colwell نسبت به اولرین نشان داد. همچنین سطح تماس مایع و گاز از نقاط قوت دیدگاه حجم سیال است. نتایج تحقیق نشان داد که مقدار سطح تماس از  $0.18 \text{ m}^2$  به  $1 \text{ m}^2$  در برابر افزایش فاکتور ظاهری گاز از  $0.462/0.464$  تا  $1/464$ ، افزایش می یابد. همچنین نیم رخ فشار در روی سینی که یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد سینی غربالی است، یکی از موارد مورد بررسی در این تحقیق بوده است.

کلمات کلیدی: سینی غربالی، VOF، ارتفاع زلال مایع، پروفایل فشار، سطح تماس

## مقدمه

برای مدل کردن سینی غربالی با CFD صورت گرفته است. متا و همکاران مسیر جریان فاز مایع را با حل معادله های متوسط زمانی پیوستگی جرم و مومنت فقط برای فاز مایع، تحلیل و از مدل کردن فاز گاز صرف نظر کردند. مدل آنها نمی توانست جهت بررسی الگوهای جریان مایع و گاز مورد استفاده واقع شود [۱]. فیشر و کوارینی، مدل سه بعدی گذرا برای هیدرودینامیک مایع و گاز با ضریب درگ ثابت  $0.44$  را ارائه کردند، این ضریب درگ برای سینی هایی که در رژیم سرکف و یا اسپری هستند مقدار مناسبی نمی باشد. زیرا برهم کنش حاصله بر حسب سرعت گاز و مایع و ماندگی مایع و گاز در قسمت های اولیه سینی متفاوت خواهد بود [۲].

تقطیر یکی از مهم ترین فرآیندهای جداسازی می باشد. اگرچه هزینه انرژی آن بسیار زیاد است، به دلیل اینکه در مقیاس های بزرگ، امکان جداسازی را مهیا می کند، هنوز هم یکی از اولویت های اول در فرآیندهای جداسازی است. اجزای داخلی برج تقطیر از اجزای پرهزینه سیستم های فرآیندی محسوب می شوند. ارتباط مستقیم این تجهیزات در خلوص و مقدار محصول تولیدی واحدهای پالایشگاهی و پتروشیمی، سبب توجه بسیار زیاد پژوهشگران و محققان به آنها در طول سالیان شده است. تلاش های متعددی

می‌تواند تأثیر بهتری داشته باشد [۹]. رشدی و همکاران شبیه‌سازی سینی غربالی همراه با آکنه را با استفاده از دیدگاه اولرین-اولرین انجام دادند. برای به دست آوردن ترم برهم‌کنش بین دوفازی از ضرایب درگ متفاوت در ناحیه متخلخل سینی و نواحی غیر متخلخل سینی استفاده کردند. به منظور تخمین این ضرایب از روابط تجربی موجود برای ماندگی متوسط مایع در ناحیه سرکف و در ناحیه متخلخل استفاده شد [۱۰].

در تحقیق حاضر به مدل‌سازی سینی غربالی با استفاده از دیدگاه VOF پرداخته شده است. با توجه به خطای مشاهده شده در دیدگاه اولرین در تحقیقات پیشین [۳، ۴، ۶، ۹-۱۱] نیاز به مدلی احساس می‌شد که بتواند خطاهای موجود را بهبود بخشد که در این تحقیق به این موضوع پرداخته شده است. علاوه بر این پرداختن به پروفایل‌های فشاری نیز از موارد مهم می‌باشد که به عنوان خلا در تحقیقات پیشین مطرح بوده است. زیرا هر تغییری در هندسه سینی نیازمند کنکاش عمیق از دیدگاه پارامترهای فشاری می‌باشد که سبب افت فشار مازاد نگردد. علاوه بر این سطح تماس بین فازها به عنوان عامل مهم تأثیرگذار در راندمان انتقال جرمی است که در این دیدگاه مدل‌سازی به آن پرداخته شد که برآورد آن در دیدگاه اولرین میسر نبود.

#### مدل‌سازی CFD و معادلات حاکم بر آن

مدل حجم سیال، تکنیک ردگیری سطح مشترک فازها برای مش اولری ثابت است. این مدل برای دو یا چند سیال غیر قابل امتزاج، که مکان فصل مشترک آن‌ها مورد نظر است، طراحی شده است [۱۳ و ۱۲].

ردیابی فصل مشترک‌های میان فازها با حل معادله پیوستگی برای کسر حجمی یک (یا بیشتر) از فازها انجام می‌گیرد. برای فاز  $q$  ام، این معادله به شکل زیر است [۱۳]:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

در مطالعه حاضر از پارامترهای انتقال جرم بین فاز  $(\dot{m}_{pq}, \dot{m}_{qp})$  و همچنین پارامتر چشمه  $S_{\alpha_q}$  صرف نظر شده است.

کریشنا و همکاران، مدل ۳ بعدی دو فاز برای سینی غربالی به قطر ۰/۳ متر استفاده کردند. مدل آن‌ها ارتفاع مایع زلال و موجودی فاز مایع را پیش بینی و شامل ناودان نمی‌شد. در نظر گرفتن ناودان در شبیه‌سازی‌ها ضروری است، زیرا ممکن است در ناودان هم انتقال جرم صورت پذیرد [۳ و ۴].

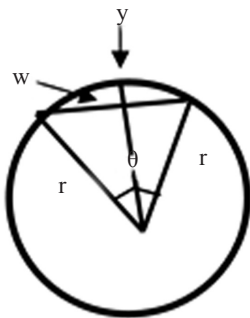
گسیت و همکاران رابطه بنت و رابطه کولول را برای تخمین متوسط کسر حجمی مایع به کار بردند [۵]. مقدار پیش‌بینی شده ارتفاع زلال مایع بیشتر از مقدار برآورد شده نتایج و روابط تجربی بود که این از عدم قطعیت رابطه تجربی به‌کاربرده شده در نیروی درگ بود که در هیدرودینامیک جریان دوفازی تأثیرگذار بود [۶]. با تعویض پارامتر برهم‌کنش بین فاز گاز و مایع در سینی غربالی، معادله‌ای جهت پیش‌بینی پارامتر برهم‌کنش بین فاز گاز در مورد سینی‌های دریچه‌ای به دست آمد. با توجه به عدم دسترسی به رابطه‌ای که بتواند پیش‌بینی مناسبی از دانسیته سرکف در مورد این نوع از سینی‌ها داشته باشد، از فرم رابطه بنت برای تخمین این کمیت استفاده شد و مقدار ثوابت این معادله به طریق آزمایشگاهی برای سینی دریچه‌ای به دست آمد [۷]. بعد از آن تلاش‌هایی جهت تأثیر وزن دریچه (شیر) در چگونگی توزیع مایع و گاز در سینی‌های دریچه‌ای<sup>۱</sup> صورت گرفت و از ۳ نوع دریچه با شکل و اندازه یکسان اما با وزن متفاوت (۵، ۱۳/۱۰ و ۲۰ gr) استفاده شد. برای حل معادلات از دیدگاه VOF استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که با سنگین‌تر شدن وزن شیر، برهم‌کنش بین فاز گاز و بازده انتقال جرمی بیشتر می‌شود اما افت فشار هم متناسب با آن بیشتر می‌شود که باید بهینه‌سازی‌هایی در این راستا انجام بگیرد [۸]. زارعی و همکاران پیش‌بینی رفتار سینی غربالی حاوی ورودی‌های خاص منافذ بخار را انجام دادند و آن را با نتایج سینی غربالی آزمایشگاهی سولاری و بل مقایسه کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد که در این نوع از سینی‌ها افت فشار و ارتفاع زلال کمتر از سینی‌های غربالی معمولی است و به دلیل مسیر مماسی حرکت گاز برخلاف سینی غربالی که به حالت قائم می‌باشد، زمان ماند بیشتری برای فاز گاز بر روی سینی مهیاست، بنابراین در بهبود راندمان انتقال جرمی

می‌دهد. برای این منظور با به دست آوردن مساحت قطاع دایره‌ای با شعاع  $r$  و قطاع مثلثی در شکل ۱، و کسر مساحت قطاع مثلثی از مساحت قطاع دایره‌ای، مساحت تخصیص یافته به ناودان به دست آمد و با ۱۳٪ از مساحت کل سینی برابر قرار داده شد. در این صورت با معلوم شدن زاویه  $\theta$ ، درازای بند ( $W$ ) از معادله ۵ به دست آمد. با توجه به این که هندسه متقارن است، نصف مقدار بالا در محاسبات دخالت داده شده است [۶].

$$W = 2r \sin \frac{\theta}{2} \quad (5)$$

جدول ۱- ابعاد هندسی سینی سولاری و بل [۱۵]

قطر سینی (m)	۱/۲۱
فاصله بین دو سینی (m)	۰/۶۱
ارتفاع بند خروجی (m)	۰/۰۵
قطر سوراخ‌ها و فاصله بین سوراخ‌ها (m)	۰/۰۱۲۷ و ۰/۰۵
درصد کسر مساحت سوراخ‌ها، بر مبنای ناحیه حبابی	۵٪
درصد ناحیه تخصیص یافته به ناودان بر مبنای مساحت کل	۱۳٪
ارتفاع ناحیه ورود مایع در زیر ناودان (m)	۰/۰۳۸



شکل ۱ - شمای دید از بالای سینی با درازای بند  $W$

درصد ناحیه حبابی<sup>۲</sup>، از تفریق مساحت اختصاص داده شده به دو ناودان از ناحیه کل به دست آمد که ۷۴٪ مساحت کل سینی می‌باشد. مقدار مساحت اختصاص داده شده به ناحیه حفره‌ای، ۵٪ از سطح حبابی را شامل می‌شد. در این جا تعداد سوراخ‌های واقعی سینی، ۱۷۵ سوراخ (برای نصف سینی [۱۵]) و آرایش سوراخ‌ها به صورت مثلثی در نظر گرفته شد.

معادله کسر حجمی برای فاز اصلی حل نمی‌شود. این معادله برای فاز اصلی از معادله ۲ به دست می‌آید.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

معادله اندازه حرکت پارامتر در سرتاسر دامنه، حل می‌شود و میدان سرعت حاصل به صورت مشترک در اختیار همه فازها قرار می‌گیرد. معادله مومنتم نشان داده شده در زیر، وابسته به کسرهای حجمی همه فازها و خواص سیال شامل دانسیته و ویسکوزیته می‌باشد [۱۳]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \left[ \mu \left( \nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T \right) \right] + \rho \bar{g} + \bar{F} \quad (3)$$

کشش سطحی در نتیجه نیروهای جاذبه میان مولکول‌ها در سیال به وجود می‌آید. مدل کشش سطحی در نرم‌افزار، مدل نیروی سطحی پیوسته پیشنهاد شده توسط براکبیل و همکارانش است. با این مدل، اضافه شدن کشش سطحی به محاسبات حجم سیال منجر به یک پارامتر چشمه در معادلات اندازه حرکت می‌شود (معادله ۳) [۱۴].

به منظور مدل‌سازی نیروی کشش سطحی، از مدل نیروی سطحی پیوسته<sup>۱</sup> (CSF)، (معادله ۴) استفاده گردید.

$$F = \sigma \frac{\rho k_p \nabla \alpha_q}{0.5(\rho_p + \rho_q)} \quad (4)$$

در معادله بالا  $k$ ، انحنای  $\sigma$  کشش سطحی بر حسب  $N/m$  و میزان اعتبار مطلوب این مدل در جریان‌های دوفازی گاز و مایع در مبحث جریان سینی در تحقیقات پیشین نیز مشاهده شده است [۸]. برای مدل‌سازی اغتشاش از معادله  $k-\epsilon$  استاندارد استفاده شد که شامل معادله انتقال انرژی جنبشی در جریان مغشوش ( $k$ ) و معادلات تلفات انرژی در جریان درهم ( $\epsilon$ ) می‌باشد. بدون شک این مدل یکی از رایج‌ترین مدل‌ها در بررسی اغتشاش در سینی‌های غربالی می‌باشد که به دفعات به کاررفته است [۱۲ و ۱۳].

### تشریح هندسه حاکم بر حل مساله و شرایط مرزی

مشخصات هندسی سینی غربالی مورد استفاده قرار گرفته توسط سولاری و بل، در جدول ۱ خلاصه شده است [۱۴]. برخی از مشخصات سینی مانند درازای بند خروجی و قطر حفرات و ناحیه فعال مجهول بودند که از روابط ریاضی برای یافتن این کمیت‌ها استفاده شد. مساحت اختصاص داده شده به ناودان ۱۳٪ از کل مساحت را به خود اختصاص

1. Continuum Surface Force  
2. Bubbling Area

مایع و فشار و دانسیته و  $k-\epsilon$  در اکثر شبیه‌سازی‌ها کمتر از ۵٪ در نظر گرفته شد. اندازه گام زمانی تاثیر زیادی در همگرایی مساله دارد. گام‌های زمانی بزرگتر سبب واگرایی مساله می‌شود. با تغییر تعداد سلول‌های محاسباتی، اندازه گام زمانی نیز تغییر می‌کند. در تعداد سلول محاسباتی ۷۱۲۵۶۹، مقدار گام زمانی به کار برده شده برابر ۰/۰۰۰۰۱ می‌باشد. شرایط پایا برای حل مساله زمانی مطرح می‌شود که کسر حجمی متوسط مایع بر روی سینی به مقدار پایا برسد و برای این منظور از گزارش ارتفاع زلال مایع برای همگرایی استفاده شد. برای گسسته سازی معادلات، از روش آپویند<sup>۲</sup> درجه اول استفاده شد. همچنین از طرح بازسازی هندسه برای تخمین سطح تماس بین فازی استفاده شده است. انتخاب شرایط اولیه مناسب علاوه بر اینکه در زمان همگرایی تاثیرگذار است؛ مانع از عدم همگرایی می‌شود. همچنین از همگرایی به جواب‌های غیرواقعی هم ممانعت می‌کند. برای این منظور از روش پیشنهادی مشابه تحقیق قبلی نویسندگان این مقاله استفاده شده است [۱۰].

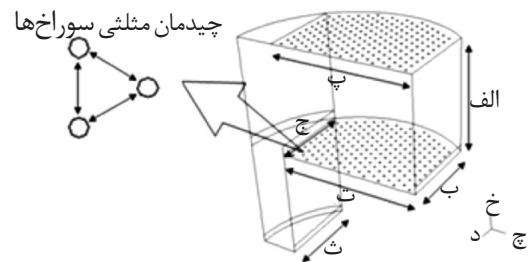
### نتایج و بحث

در این بخش در ابتدا به عدم وابستگی نتایج از تعداد سلول‌های پرداخته شده است و سپس به ارائه نتایج دیدگاه حجم محدود سینی غربالی پرداخته شده است.

#### استقلال از سلول‌های محاسباتی

به طور ایده‌آل اندازه شبکه باید به قدر کافی ریز باشد که با افزایش بیشتر تعداد آن نتایج تغییر نکنند. به منظور اطمینان از استقلال نتایج از اندازه شبکه، هندسه سینی با استفاده از سه اندازه شبکه مختلف مش‌بندی شده است و سطح بین فازی گاز-مایع حاصل از نتایج شبیه‌سازی در فاکتور ظاهری گاز و مایع به ترتیب ۰/۴۶۲  $\text{kg/m}^{0.5} \text{s}^{-1}$  و  $10^{-3} \times 17/8$  متر مکعب بر ثانیه مقایسه شده است. بر طبق جدول ۳، به علت شبکه ریزتر در مرحله دوم، مساحت سطح بین فازی محاسبه شده تقریباً ۱۵٪ بیشتر از شبکه اول می‌باشد.

با این فرضیات هندسه حاکم بر مدل به صورت شکل ۲ به دست آمد. در جدول ۲ به شرایط مرزی به کار برده شده پرداخته شده است که مشابه تحقیق پیشین مولفان (مرجع [۱۰] با شماره صفحه ۵۶۶) می‌باشد که به منظور اجتناب از تکرار در اینجا به توضیح آن پرداخته نشده است.



شکل ۲- هندسه سینی غربالی با شرایط مرزی

الف: موقعیت ناودان با شرط مرزی دیواره

ب: موقعیت ورود مایع به سینی با شرط مرزی سرعت ورودی

پ: موقعیت سوراخ‌های خروج گاز از سینی با شرط مرزی معادل سرعت ورودی گاز به سینی

ت: موقعیت سوراخ‌های ورود گاز به سینی با شرط مرزی سرعت ورودی

ث: موقعیت خروج مایع از سینی با شرط مرزی معادل با شرط مرزی سرعت ورودی و با علامت مخالف

ج: موقعیت بند خروجی با شرط مرزی دیواره

جدول ۲- معادلات شرایط مرزی [۱۰]

$u_{i,intet} = \frac{Q}{h_p W}$ $u_{i,intet} = \frac{Q_w}{h_c W} \left( 1 - \left( \frac{z}{W} \right)^2 \right)$	شرایط مرزی برای ورودی و خروجی مایع وابسته به پارامتر جریان [۶ و ۱۰]
$F_s = v_s \sqrt{\rho_G}$ $v_{hole,i} = \frac{v_s A_b}{n A_{hole}}$	شرایط مرزی برای ورودی و خروجی سوراخ‌های گاز

### الگوریتم حل

برای حل مساله از الگوریتم کوپل شده سرعت - فشاری سیمپل<sup>۱</sup> استفاده شد. مقدار ضرایب پسماند<sup>۲</sup> تاثیر زیادی در روند حل مساله دارند. ضرایب پسماند بسته به ساختار هندسی سینی و مش‌بندی و شرایط عملیاتی مساله تغییر می‌کنند. برای این منظور این مقادیر برای سرعت گاز و

1. Simple  
2. Under Relaxation Factors  
3. First Order Upwind

جدول ۳- اثر اندازه شبکه روی مساحت سطح بین فازی پیش‌بینی شده

ارتفاع زلال مایع	مساحت بین فازی (m <sup>2</sup> )	تعداد سلول‌ها	نوع شبکه
۰/۰۵۸۱۰	۰/۱۶۴۲	۲۰۵۱۴۴	شبکه ۱
۰/۰۶۲۳۱	۰/۱۸۹۳	۷۱۲۵۶۹	شبکه ۲
۰/۰۶۲۴۱	۰/۱۹۴۲	۱۳۷۵۴۷۲	شبکه ۳

دارای پراکندگی مناسب و یکنواخت‌تری بر روی سینی می‌باشد.

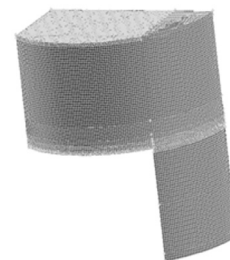
تأثیر شرایط عملیاتی بر روی پارامترهای هیدرولیکی سینی غربالی بر طبق تئوری لاکت<sup>۱</sup>، ارتفاع مایع زلال از انتگرال‌گیری عمودی کسر حجمی مایع بر روی سینی به دست می‌آید در نتیجه ارتفاع مایع زلال از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود [۱۶]:

$$h_{cl} = \int \alpha_{ave} dy = \int \left( \frac{\int \alpha_i dA}{A} \right) dy = \frac{1}{A} \int \left( \int \alpha_i dA \right) dy = \frac{\int \alpha_i dv}{A} = \frac{\sum \alpha_i v_i}{A} \quad (6)$$

نحوه محاسبه ارتفاع زلال مایع نظیر رویکردی است که در تحقیق قبلی مولفان به آن پرداخته شده است که به منظور اجتناب از تکرار در این جا به آن پرداخته نشده است [۱۰].

در معادله بالا  $v_i$  حجم مربوط به سلول محاسباتی  $i$  و  $A$  برابر مساحت ناحیه حبابی می‌باشد. نمودار تغییرات ارتفاع مایع زلال بر حسب سرعت گاز و مایع در شکل‌های زیر نشان داده شده است. تغییرات ارتفاع زلال مایع با تغییرات دبی مایع در شکل ۵ نشان داده شده است. چنانچه در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت گاز، ارتفاع مایع زلال کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت گاز، بر هم کنش بین فاز مایع و گاز بیشتر خواهد شد و مقدار بیشتری از مایع به سمت ناودان سرازیر و یا به صورت ماندگی از سینی بالایی خارج می‌شود، بنابراین ارتفاع مایع زلال کاهش می‌یابد [۱۰]. مقایسه نتایج تحقیق پیشین مولفان با نتایج کار حاضر (VOF) بیان‌گر نزدیک‌تر شدن نتایج به داده‌های تجربی سولاری<sup>۲</sup> می‌باشد. دلیل این امر این می‌باشد که در روش اولرین-اولرین [۱۰ و ۱۴]، برای هر فاز، معادلات اندازه حرکت حل می‌شود و برای پیش‌بینی برهم‌کنش‌های بین فازی از روابط تجربی (مانند روابطی که برای ضریب درگ استفاده می‌شود) استفاده می‌شود که باعث به وجود آمدن خطا در محاسبات می‌شود.

اما اختلاف چشم‌گیری بین مقادیر سطح تماس محاسبه شده با استفاده از شبکه ۲ و ۳ مشاهده نمی‌شود. به منظور اطمینان از صحت تعداد سلول‌های محاسباتی، تأثیرات تعداد سلول‌های محاسباتی بر روی ارتفاع زلال مایع و افت فشار نیز بررسی گردید. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تفاوتی که بین شبکه ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، می‌تواند قابل صرف نظر باشد. نظیر مراحل ذکر شده برای افت فشار نیز تکرار شد و افت فشار هم‌خوانی نزدیک‌تری را با وابستگی ارتفاع زلال مایع به شبکه نشان داد. بنابراین شبکه دوم به عنوان بهترین ساختار سلول محاسباتی در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. شماتیک شبکه‌بندی استفاده شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



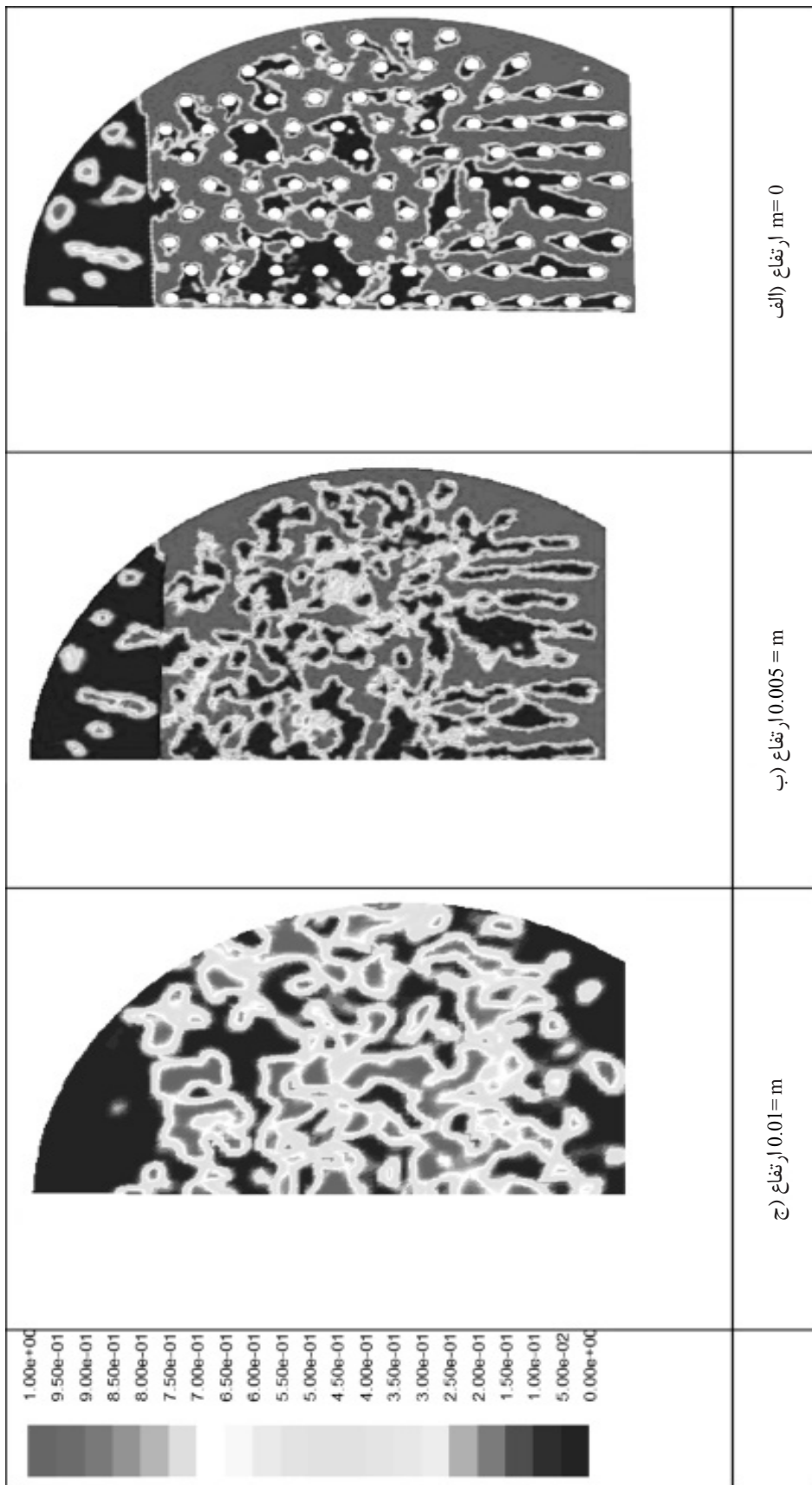
شکل ۳- شماتیک شبکه‌بندی مورد استفاده برای هندسه سینی غربالی

#### کانتورهای کسر حجمی مایع بر روی سینی

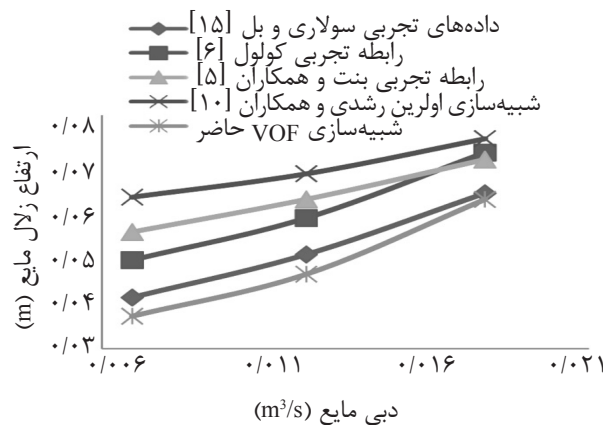
در شکل ۴ مشاهده می‌شود که تجمع مایع در اطراف دیواره (قسمت سه‌موی سینی) نسبت به سایر نقاط روی سینی (قسمت چهار وجهی) به دلیل اثرات دیواره و پراکندگی نادرست گاز، بیشتر شده و سبب پراکندگی نامناسب گاز در مایع می‌شود در نتیجه میزان انتقال جرم و بازده در این قسمت از سینی کمتر از سایر نقاط می‌باشد. همچنین در شکل ۴ مشاهده می‌شود که در نواحی دور از دیواره (قسمت چهار وجهی سینی) و به‌خصوص اطراف خط مرکزی سینی پراکندگی دو فاز مایع و گاز بهتر صورت می‌گیرد، به‌همین دلیل مایع تا ارتفاع بالاتری نسبت به نواحی اطراف دیواره می‌رسد. همچنین در این نواحی مایع

1. Lockett

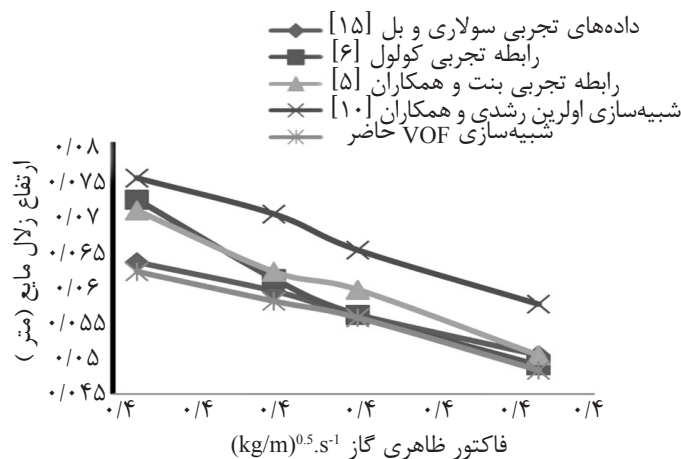
2. Soalri & Bell



شکل ۴- کسر حجمی مایع در ارتفاعات مختلف سینی



شکل ۵- نمودار تغییرات ارتفاع مایع زلال در دبی های مختلف مایع و فاکتور ظاهری گاز  $0.462 (kg/m)^{0.5}.s^{-1}$



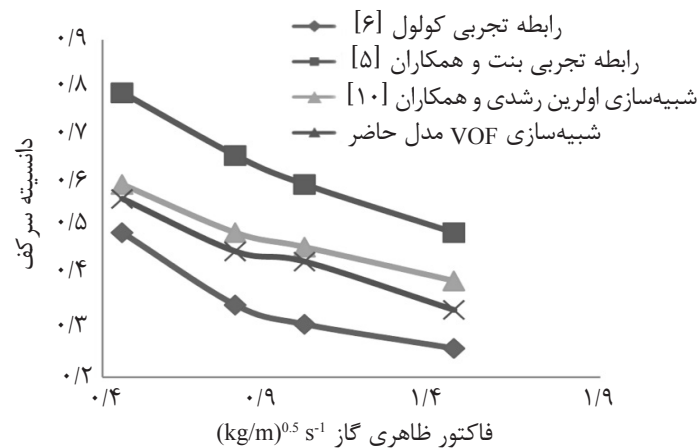
شکل ۶- نمودار تغییرات ارتفاع مایع زلال در سرعت های متفاوت گاز در دبی مایع  $17/8 \times 10^{-2} (m^3/s)$

طبق تحلیل های تحقیقات گذشته جزء روابط تجربی می باشد که دانسیته مایع در سرکف را بیشتر از حد مورد نظر پیش بینی می کند [۳، ۴، ۶، ۹ و ۱۰] در نتیجه به دلیل دقت بالای مدل سازی، دانسیته سرکف مشاهده شده از نتایج شبیه سازی کمتر از رابطه پیش بینی شده بنت است (شکل ۷). با افزایش سرعت گاز، ارتفاع سرکف بر روی سینی افزایش می یابد، زیرا برهم کنش بین فاز مایع و گاز بیشتر شده و مایع به ارتفاعات بالاتری از سینی منتقل می شود (انتقال از بخش ارتفاع مایع زلال به بخش ارتفاع سرکف شکل ۸) البته از آنجایی که مقدار دقیق تجربی برای ارتفاع سرکف و همچنین دانسیته سرکف وجود ندارد، بنابراین نمی توان به صورت قاطع در مورد دقت روش ارائه شده و رابطه تجربی کولول اظهار نظر کرد.

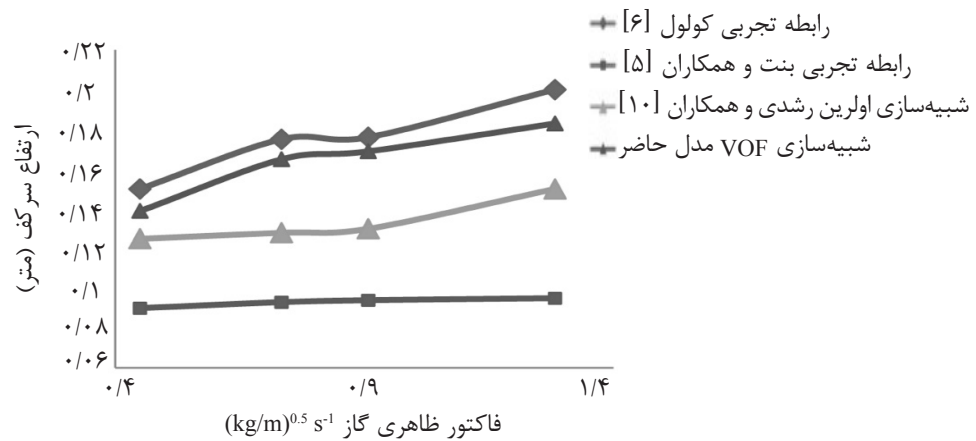
در صورتی که در روش ارائه شده در این تحقیق معادلات ممنوم فقط برای مخلوط حل می شود در نتیجه خطای موجود در روش اولرین- اولرین حذف می شود. همچنین در بعضی از شرایط عملیاتی مانند نقطه ابتدایی در شکل ۶ نتایج پیش بینی شده با استفاده از مدل ارائه شده بهتر از نتایج پیش بینی روابط تجربی (روابط بنت<sup>۱</sup> و کولول<sup>۲</sup>) در مقایسه با داده های سولاری و بل می باشد [۱۱]. در مجموع مدل VOF پیش بینی بهتری را نسبت به روابط تجربی و مدل شبیه سازی شده اولرین ارائه می دهد.

به منظور به دست آوردن ارتفاع سرکف و دانسیته سرکف مشابه روش تحقیق پیشین عمل گردید [۱۰]. با افزایش سرعت گاز، ارتفاع سرکف بر روی سینی افزایش می یابد، زیرا برهم کنش بین فاز مایع و گاز بیشتر شده و مایع به ارتفاعات بالاتری از سینی منتقل می شود (انتقال از بخش ارتفاع مایع زلال به بخش ارتفاع سرکف). رابطه بنت بر

1. Bennet  
2. Colwell



شکل ۷- نمودار تغییرات دانسیته سرکف در دبی‌های مختلف گاز و دبی مایع  $17/8 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$



شکل ۸- نمودار تغییرات ارتفاع سرکف در دبی‌های مختلف گاز و دبی مایع  $17/8 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$

مایع کسرهای حجمی بیشتر مایع مشاهده می‌شود (شکل ب-۱۰).

#### بررسی فشار مخلوط در دامنه محاسباتی

به منظور محاسبه نحوه توزیع فشار نسبت به ارتفاع، صفحاتی به موازات سینی در نظر گرفته شد. این صفحات با مساحت برابر و در راستای x و z می‌باشند. با استفاده از فرمول (۷)، می‌توان فشار متوسط را به صورت زیر محاسبه کرد. از معادله ۷ برای محاسبه فشار استاتیک و فشار کل نیز استفاده گردید. در معادله (۷)  $A_i$  و  $P_i$  به ترتیب سطح و فشار مربوط به سلول محاسباتی i می‌باشند.

$$p_{ave} = \frac{\int PdA}{A} = \frac{\sum P_i A_i}{\sum A_i} \quad (7)$$

چنانچه در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در مدل VOF فشار کل، مجموع فشار استاتیک و دینامیک برای مخلوط گاز و مایع می‌باشد.

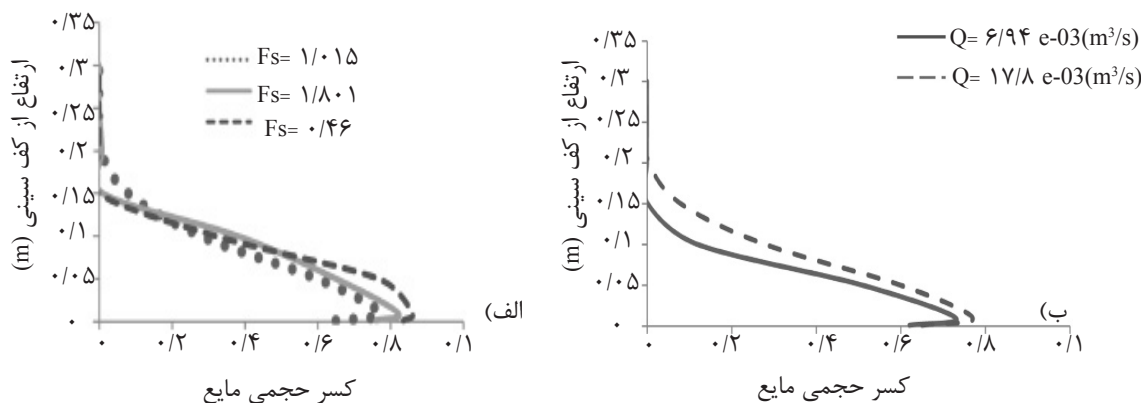
اما از آنجا که روش ارائه شده نسبت به روش‌های بنت و اولرین- اولرین هم‌گرایی بیشتری به رابطه نسبتاً دقیق کولول را داراست، می‌توان نتایج روش ارائه شده را قابل قبول دانست. همچنین در شکل ۹ به ترسیم کانتورهای ارتفاع زلال مایع (با رنگ قرمز) پرداخته شده است.

تغییرات موجودی متوسط مایع بر حسب ارتفاع از کف سینی به منظور بیان توزیع عمودی فاز مایع در ارتفاعات مختلف از سینی و بررسی اثر سرعت جریان گاز ورودی بر پراکندگی فاز مایع، مقادیر کسر حجمی فاز مایع برای سه دبی از گاز ورودی در ارتفاع‌های مختلف و صفحات افقی متوسط‌گیری شده و در شکل (الف-۱۰) ترسیم گردیده است. در فاکتور ظاهری  $Fs=1.015$  مشاهده می‌شود تا ارتفاع  $0.2 \text{ m}$  از کف سینی، کسرهای حجمی مایع مشاهده می‌شود که نتایج شکل ۷ را تایید می‌کند. همچنین در دبی‌های بیشتر

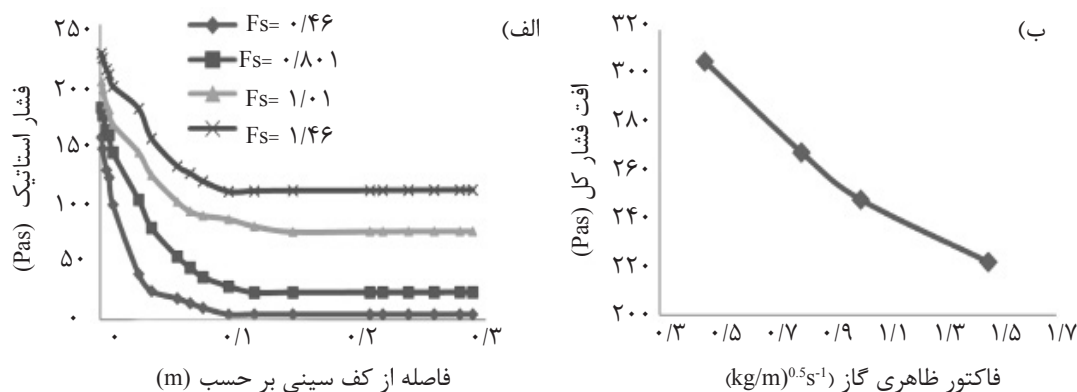




شکل ۹- کانتورهای ارتفاع زلال مایع در فاکتورهای ظاهری مختلف گاز در دبی مایع  $10^{-3} \times 17/8$  (m<sup>3</sup>/s)



شکل ۱۰- تغییرات موجودی مایع در ارتفاعات مختلف از کف سینی الف) دبی‌های مختلف گاز و دبی مایع  $17/8 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$  ب) در دبی‌های مختلف مایع و فاکتور ظاهری گاز برابر  $Fs=0/462 \text{ (kg/m}^{0.5} \text{ s}^{-1})$



شکل ۱۱- توزیع فشار استاتیک الف) افت فشار کل ب) در ارتفاعات متفاوت از کف سینی و شرایط عملیاتی دبی مایع  $17/8 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$  و فاکتورهای ظاهری گاز متفاوت

مایع کمتر، در نتیجه افت فشار گاز در کل کمتر خواهد شد. بنابراین از آنجا که افت فشار گاز، افت فشار غالب در مخلوط می‌باشد، در نتیجه با افزایش سرعت ظاهری گاز، افت فشار مخلوط کمتر خواهد شد (شکل ۱۱). افت فشار دینامیکی گاز در مقایسه با افت فشار استاتیکی قابل صرف نظر کردن است.

### سطح تماس بین فازی

یکی از مزیت‌های مهم مدل چندفازی حجم سیال (VOF)، محاسبه نسبتاً دقیق سطح تماس بین فازی می‌باشد. امکان گزارش‌گیری مستقیم سطح تماس از نرم‌افزار فولونت وجود ندارد. بنابراین برای محاسبه این پارامتر از رابطه زیر به صورت کد کاربر استفاده می‌شود [۱۳]:

$$A = V_{cell} \times \nabla \cdot \alpha \quad (۸)$$

نمودارهای فشار استاتیک در ابتدا دارای روند نزولی با شیب تند می‌باشند که انتهای این شیب تند به طور تقریبی همان انتهای ناحیه ارتفاع مایع شفاف است. به علت تجمع مایع با چگالی بسیار زیاد در این ناحیه، تفاوت قابل توجه در فشار استاتیک با تغییر اندکی از ارتفاع اتفاق می‌افتد. بعد از این ناحیه، در هر دو نمودار فشار استاتیک و فشار کل (نمودار مربوط به فشار کل به دلیل تشابه با روند نمودار فشار استاتیک در اینجا آورده نشده است)، شیب خطوط کمتر می‌شود که نمایان‌گر تغییر ناحیه از ارتفاع مایع زلال به ناحیه سرکف می‌باشد که به علت مقدار کم مایع در این ناحیه تغییرات فشار آنچنان شدید نخواهد بود. همچنین با افزایش سرعت گاز، برهم کنش فازی بیشتر، ارتفاع زلال مایع کمتر، ناحیه دارای شیب زیاد کوچک‌تر می‌شود. با افزایش سرعت ظاهری گاز، به دلیل کاهش ارتفاع زلال مایع و کاهش حد مایع، افت فشار گاز در مواجهه با هد

فشار کل سینی در شرایط عملیاتی متفاوت از نتایج این تحقیق به شمار می‌آیند. همچنین یکی از مشخصه‌های مهم دیدگاه VOF، ارزیابی سطح تماس مشترک گاز-مایع می‌باشد. که نتایج این تحقیق پیش‌بینی نمود که با افزایش سرعت ظاهری گاز، سطح تماس بین گاز و مایع افزایش می‌یابد. اما در سرعت‌های بیشتر گاز، این افزایش به مقادیر ثابت می‌رسد. بنابراین در مجموع، دیدگاه VOF اطلاعات کامل‌تری با درجه صحت مطلوب را نشان می‌دهد. تحقیق در مورد تغییرات در هندسه سینی که بتواند سطح تماس را به میزان مطلوب بهبود بخشد به نحوی که سبب افزایش راندمان سینی‌های غربالی شود، از گام‌های بعدی ضروری این تحقیق به شمار می‌آید به گونه‌ای که سبب افزایش نامطلوب افت فشار نگردد.

### علایم و نشانه‌ها

$A$ : مساحت ناحیه حبابی مورد استفاده در معادله ۶ ( $m^2$ )

$A_b$ : مساحت مربوط به ناحیه حبابی ( $m^2$ )

$A_{hole}$ : مساحت مربوط به حفره گاز ( $m^2$ )

$A_{hole,i}$ : مساحت حفره‌ای ( $m^2$ )

$F$ : ترم چشمه در معادله مومنتم (معادله ۳) ( $N/m^3$ )

$F_s$ : فاکتور ظاهری گاز ( $(kg/m)^{0.5} s^{-1}$ )

$g$ : شتاب گرانشی ( $ms^{-2}$ )

$h_{ap}$ : ارتفاع ناودان (m)

$h_{cl}$ : ارتفاع زلال مایع (m)

$h_w$ : ارتفاع بند (m)

$K$ : انرژی سینتیک اغتشاش ( $m^2 s^{-2}$ )

$n$ : تعداد سوراخ‌ها

$t$ : زمان (Sec)

$P$ : فشار (Pa)

$QL$ : دبی مایع ( $m^3 s^{-1}$ )

$u_{l,inlet}$ : شرط مرزی ورودی مایع به سینی ( $ms^{-1}$ )

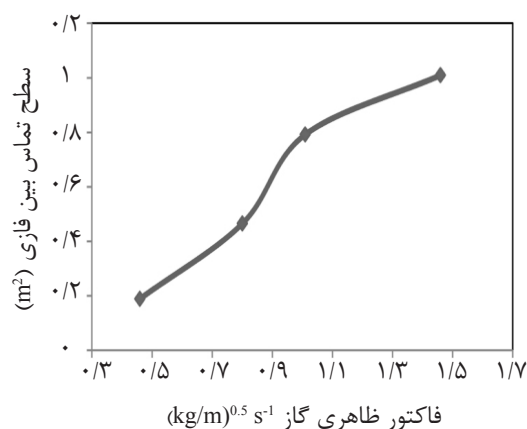
$\bar{v}$ : بردار سرعت ( $ms^{-1}$ )

$V_s$ : سرعت ظاهری گاز بر مبنای ناحیه حبابی ( $ms^{-1}$ )

$v_{hole,i}$ : سرعت حفره‌ای گاز ( $ms^{-1}$ )

$W$ : درازای بند (m)

در معادله بالا  $V_{cell}$  حجم سلول محاسباتی و  $\alpha$  موجودی فاز پراکنده می‌باشد. در شکل ۱۲ میزان سطح تماس بین فازی در سرعت‌های ظاهری مختلف گاز ورودی ترسیم شده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است با افزایش میزان دبی گاز ورودی، به علت پخش شدن قطرات مایع بر روی سینی و کاهش اندازه آنها، سطح تماس بین فازی افزایش می‌یابد. همچنین روند نمودار در دبی‌های بالا نشان می‌دهد که شدت افزایش سطح تماس با افزایش دبی از ۱/۰۱ به ۱/۴۶ نسبت به دبی‌های کمتر کاهش پیدا کرده است. این بدین معنی است که افزایش دبی گاز بیشتر از ۱/۰۱ تأثیر زیادی روی توزیع و پخش مایع بر روی سینی ندارد.



شکل ۱۲- سطح تماس بین فازی در دبی‌های مختلف گاز ورودی و دبی مایع دبی مایع  $17/8 \times 10^{-7} m^3/s$

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق به مدل‌سازی سینی غربالی در ۳ بعد از دیدگاه VOF با معادلات اغتشاشی K-ε پرداخته شده است. شرایط عملیاتی و هندسه سینی غربالی دقیقاً منطبق بر هندسه سولاری با تعداد سوراخ‌های واقعی انتخاب گردید. برای مدل‌سازی از معادله اندازه حرکت برای فاز مخلوط استفاده گردید. در نتیجه این دیدگاه از مدل‌سازی نیازمند استفاده از نیروی درگ نبود که یکی از عوامل خطای مهم مدل‌های اولرین در مقایسه پارامترهای هیدرولیکی با نتایج تجربی بود. بنابراین نتایج مدل حجم سیال توانست ارتفاع زلال و سرکف را دقیق‌تر از مدل اولرین پیش‌بینی نماید. پیش‌بینی پارامترهای هیدرولیکی و کانتورهای کسر حجمی مایع و محاسبه پروفایل کسر حجمی مایع در نقاط مختلف سینی و پروفایل‌های فشار و محاسبه افت

علایم یونانی	$\delta$ : تابع دلتای دیراک
$\alpha$ : حجم مربوط به فاز	$\sigma$ : کشش سطحی ( $\text{Nm}^{-1}$ )
$\varepsilon$ : نرخ اتلاف انرژی سینتیکی اغتشاش ( $\text{m}^2\text{s}^{-3}$ )	$p$ : فاز ام
$\mu$ : ویسکوزیته دینامیک ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	$q$ : فاز ام
$\mu_{eff}$ : ویسکوزیته مؤثر ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	$G$ : پسوند مربوط به فاز گاز
$\rho$ : جرم مخصوص ( $\text{kgm}^{-3}$ )	

## مراجع

- [1]. Mehta B., Chuang K. T., and Nandakumar K., "Model for liquid phase flow on sieve trays", Chem.Eng.Res. Des., Vol. 76, Issue 7, pp. 843–848, 1998.
- [2]. Fischer C. H. and Quarini J. L., *Three-dimensional heterogeneous modeling of distillation tray hydraulics*, AIChE Meeting, Miami Beach, 1998.
- [3]. Krishna R., van baten J. M., Ellenberger J., Higler A. P., and Taylor R., "CFD simulations of sieve tray hydrodynamics", Chem. Eng. Res. Des., Vol. 76, Issue 7, pp. 639–646, 1999.
- [4]. van Baten J. M. and Krishna R., "Modelling sieve tray hydraulics using computational fluid dynamics", Chem. Eng. J., Vol. 77, Issue 3, pp. 143-151, 2000.
- [5]. Bennett D. L., Agrawal., and P.J Cook., "New pressure drop correlation for sieve tray distillation columns", AIChE J., Vol. 29, Issue 3, pp. 434–442, 1983.
- [6]. Gesit G., Nandakumar K., and Chuang K. T., "CFD modeling of flow patterns and hydraulics of commercial-scale sieve trays", AIChE J., Vol. 49, Issue 4, pp. 910-924, 2003.
- [7]. Li X.Gang, Liu D. Xin, Xu S. Min, and Li H., "CFD simulation of hydrodynamics of valve tray", Chem. Eng. and Proc., Vol. 48, Issue 1, pp. 145, 2009.
- [8]. Alizadehdakhel A., Rahimi M., Alsairaf A., and Abdulaziz, "CFD and experimental studies on the effect of valve weight on performance of valve tray column" Comp.& Chem.Eng. Volume 34, Issue 1, ,pp. 1–8, 2010.
- [9]. Zarei T., Rahim R., Zidvar M., "Computational fluid dynamic of MVG tray hydraulic", Korean J. of Chem. Eng., Vol. 26, Issue5, pp. 1213-1219, 2009.
- [10]. Roshdi S., Kasiri N., Hashemabadi S. H., and Ivakpour J., "Computational fluid dynamics simulation of multi-phase flow in packed sieve tray of distillation column", Korean J. Chem. Eng., Vol. 30, Issue3, pp. 563-573, 2013.
- [11]. Rahimi R., Ameri A. and Setoodeh N. "Effect of Inlet Downcomer on the Hydrodynamic Parameters of Sieve Trays Using CFD Analysis" *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 45, Issue 1, pp. 27-38, 2011.
- [12]. دکتر هاشم آبادی، دکتر دهنوی، "شبیه‌سازی CFD جریان‌های چندفازی با نرم افزار فلوئنت"، انتشارات اندیشه سرا.
- [13]. Rahimi R., Sotoodeh M. M., and Bahramifar E., "The effect of tray geometry on the sieve tray efficiency", Chem. Eng. Sci., Vol. 76, Issue 9, pp. 90-98, 2012.
- [14]. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide, April 2012.
- [15]. Solari B. and Bell R. L., "fluid flow patterns and velocity distribution on commercial-scale sieve trays", AIChE J., Vol.32, Issue 4, pages 640-649, 1986.
- [16]. Lockett M. J., *Distillation tray fundamental*, Cambridge University Press, Cambridge, 1968.