

# کاربرد روش دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی استفاده از دریچه‌های هدایت بخار در عمل کرد سینی غربالی

طالب زارعی<sup>۱</sup> و رهبر رحیمی<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۴/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۱

## چکیده

در این مقاله، یک مدل سه‌بعدی و دوفازی در چارچوب اولری-اولری برای پیش‌بینی هیدرودینامیک سینی‌ها با استفاده از نرم‌افزار CFX ارائه شده است. ابتدا هیدرودینامیک سینی غربالی شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی داده‌های پیشین مقایسه شد. نتایج پیش‌بینی توافقی خوب با نتایج آزمایشگاهی داشتند. سپس برای بهبود الگوی جریان در سینی غربالی و از بین بردن نقاط مردابی و ساکن، از آرایش‌های گوناگون دریچه‌های هدایت بخار استفاده شد. بهترین آرایش از جنبه توزیع سرعت روی سینی، افت فشار و تشکیل حباب آرایش سینی غربالی به‌همراه ۸ دریچه هدایت بخار (در گوشه‌های سینی) انتخاب شده است. مهم‌ترین عامل در طراحی دریچه‌ها نسبت سطح دهانه دریچه‌ها به کل سطح آزاد سینی تشخیص داده شد. این مشخصه بدون بعد برای آرایش هشت‌دریچه‌ای  $1.14/31$  است که این محدوده برای طراحی دریچه‌ها روی سینی‌های غربالی پیشنهاد می‌شود. سینی بهبودیافته غربالی به‌همراه دریچه‌های طراحی شده روی آن می‌تواند در رفع تنگناهای سینی‌های موجود و همچنین طراحی‌های آینده بدون تحمیل هزینه قابل توجه استفاده شود.

**کلمات کلیدی:** سینی غربالی، دریچه‌های هدایت بخار، CFD، الگوی جریان، افت فشار.

## مقدمه

دارند. یکی از مشکلات سینی‌های غربالی تمایل جریان مایع برای حرکت غیریک‌نواخت روی سینی، به‌علت انبساط و انقباض جریان مایع از ورودی تا خروجی، است. دلیل این مشکلات آن است که پهنای سینی‌های دایره‌ای در جهت جریان مایع افزایش و کاهش می‌یابد و تمایل مایع به جریان از قسمت وسط سینی بیش‌تر می‌شود، در نتیجه سرعت مایع روی سینی غیریک‌نواخت می‌شود و به ایجاد نقاط ساکن و مرده در سینی و کاهش بازده سینی می‌انجامد.

تقطیر پرکاربردترین روش جداسازی و معمولاً انتخاب اول در جداسازی مخلوط مایعات است، تا آن جا که تنها پس از کنار گذاشته شدن آن دیگر جایگزین‌ها بررسی می‌شوند، ضمن این که برج‌های تقطیر و جذب با سینی‌های غربالی، که از متداول‌ترین انواع سینی‌ها هستند، نیز استفاده گسترده در صنعت

مدل سه‌بعدی را در چارچوب اولری-اولری برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک هر دو فاز ارائه کردند [۶] و [۷]. یکی از نقاط قوت کار ایشان ارائه ضریب پسایی است که در کارهای بعدی در زمینه سینی غربالی از آن استفاده شد. جسیت و همکارانش مدل CFD خود را روی یک سینی در مقیاس صنعتی اجرا و نتایج خود را با نتایج تجربی مقایسه کردند [۸]. محمدی زرغان و همکارانش نیز از دیدگاه حجم سیال برای هیدرودینامیک سینی غربالی استفاده کردند [۹]. رحیمی و همکارانش یک مدل سه‌بعدی دو سیالی را در چارچوب اولری-اولری برای تعیین هم‌زمان هیدرودینامیک و توزیع غلظت سینی غربالی ارائه کردند که تحولی در شبیه‌سازی سینی غربالی است [۱۰]. بازده مورفری سینی‌ها با کمک CFD برای اولین بار گزارش شده است. زارعی و همکارانش به شبیه‌سازی سینی دریچه‌ای ساکن از نوع MVG پرداختند و مزایای این سینی را به نسبت سینی‌های دریچه‌ای بررسی کردند [۱۱]. زارعی و همکارانش به بررسی آزمایشگاهی و دینامیک سیالات محاسباتی پدیده ریزش در سینی غربالی، در سینی‌های مستطیلی و دایره‌ای پرداختند [۱۲ و ۱۳]. آنها برای اعتبارسنجی داده‌های مدل‌سازی خود یک پایلوت آزمایشگاهی با قطر  $1/2$  m را طراحی و در تحقیقی دیگر یک سینی جدید از نوع کلاهی را معرفی کردند که با استفاده از ایجاد خلاء نیروی محرکه اضافی به سینی اعمال می‌کند [۱۴] و [۱۵]. مشخصه‌های گوناگون این سینی نیز بررسی شده‌اند. اخیراً نیز پژوهشگران استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی را در طراحی سینی‌های جدید بررسی کرده‌اند [۱۶ و ۱۷]. امروزه دینامیک سیالات محاسباتی ابزاری قوی در شبیه‌سازی سینی‌هاست. در این مقاله ابتدا یک سینی غربالی در مقیاس صنعتی شبیه‌سازی و سپس، با استفاده از دریچه‌های هدایت بخار، تلاش شده عمل‌کرد هیدرودینامیکی سینی غربالی بهبود یابد.

برای کاهش نقاط مرده و توزیع یک‌نواخت سرعت و در نهایت افزایش کارایی سینی می‌توان به استفاده از بافل‌ها و دریچه‌های هدایت بخار در سینی اشاره کرد [۱ و ۲]. بافل‌ها و دریچه‌های هدایت بخار بر اندازه حرکت مایع اثر می‌گذارند.

دریچه‌های هدایت بخار<sup>۱</sup> ابزارهایی روی سینی هستند که جهت عمودی ورود بخار به سینی را به مسیری افقی هدایت می‌کنند؛ در نتیجه اگر از این دریچه‌های هدایت بخار به‌درستی استفاده شود، آن سهم از انرژی بخار که باعث افزایش ماندگی مایع می‌شود به حرکت مایع و در نتیجه بالا بردن کارایی سینی منجر خواهد شد. از فواید دیگر این دریچه‌ها نصب آسان و مستحکم و ارزان بودن آنهاست [۳]. دریچه‌های هدایت بخار به‌خصوص در مواقعی مفیداند که به تغییرات جریان مایع نیاز باشد و رسوب روی سینی نیز رخ دهد.

در پژوهش حاضر از دریچه‌های هدایت بخار برای بهبود الگوی جریان استفاده شده و با روش دینامیک سیالات محاسباتی بهترین طراحی برای آنها انجام شده است. برای این کار افت فشار، تشکیل حباب، توزیع سرعت و حرکت جریان مایع روی سینی بررسی می‌شود. در تحقیق حاضر با استفاده از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی هیدرودینامیک سینی غربالی و دیگر آرایش‌های گوناگون دریچه‌ها شبیه‌سازی می‌شود. از سال ۱۹۹۸ محققان مختلف سینی‌های غربالی را با کمک آنالیز CFD بررسی کرده‌اند و توانایی مدل CFD را برای پیش‌بینی هیدرولیک سینی غربالی نشان داده‌اند. مهتا و همکارانش یک مدل یک‌بعدی و پایا را برای فاز مایع در رژیم جریان سرکف ارائه دادند [۴]. فیشر و کرینی نیز کوشیدند هیدرودینامیک گاز-مایع را به کمک یک مدل سه‌بعدی گذرا توصیف کنند [۵]. فرض سه‌بعدی بودن و در نظر گرفتن حالت گذرا از ویژگی‌های اصلی این کاراند، اما ایراد اصلی آن انتخاب ضریب پاساست. کریشنا و همکارانش یک

$$\beta = \frac{3}{4} \frac{\rho_g - \rho_L}{\rho_L} \frac{1}{\nu_{slip}} \quad (7)$$

$\nu_{slip}$ ، سرعت لغزشی حباب‌های انبوه گاز نسبت به مایع است که از رابطه بین سرعت ظاهری،  $V_s$ ، و کسر حجمی متوسط گاز به دست می‌آید و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \frac{V_s - V_g}{V_g} \quad (8)$$

برای حل معادلات بالا از نرم‌افزار ANSYS CFX استفاده شده است.

فرضیات مدل‌سازی هیدرودینامیک سینی در قالب سه‌بعدی اولری و دوفازی عبارت‌اند از:

- ۱- مدل پایا فرض می‌شود؛
- ۲- توجه این مدل به ناحیه سرکف است، بنابراین فاز گاز فاز گسسته و فاز مایع پیوسته است؛
- ۳- معادلات انتقال جرم و انتقال انرژی در نظر گرفته نشده‌اند؛
- ۴- تنها نیروی بین‌فازی نیروی پاست؛
- ۵- از مدل استاندارد k-ε برای پیش‌بینی آشفتگی فاز مایع استفاده شده و فاز گاز در حالت آرام است. این مدل آشفتگی یک مدل تاییدشده در پیش‌بینی رفتار سیال روی سینی است که در شبیه‌سازی‌های پیشین دیگر محققان [۱۰-۱۳] نیز انتخاب و استفاده شده است.

### مشخصات هندسی، مش و شرایط مرزی

مشخصات هندسی سینی و شرایط عملیاتی استفاده‌شده در شبیه‌سازی‌ها منطبق با سینی غربالی است که سولاری و بل آزمایش کرده‌اند [۱۸]. کارهای آزمایشگاهی منتشرشده در زمینه سینی‌های برج تقطیر در مقیاس صنعتی بسیار محدوداند و بیش‌تر داده‌ها در اختیار شرکت‌های بزرگ تولیدکننده سینی‌ها هستند که موسسه تحقیقاتی جداسازی (FRI) آنها را جمع‌آوری کرده است. داده‌های آزمایشگاهی سولاری و بل از معدود کارهای جامع منتشرشده در زمینه الگوی جریان روی سینی در مقیاس صنعتی است.

به این منظور آرایش‌ها و تعدادی متفاوت از این دریچه‌ها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی روی سینی غربالی بررسی شد. مشخصه‌هایی گوناگون مانند توزیع سرعت، افت فشار، بردارهای سرعت و کانتورهای کسر حجمی برای آرایش‌های گوناگون بررسی شدند و مشخصه طراحی برای نصب این دریچه‌ها روی سینی غربالی ارائه شد.

### مدل دینامیک سیالاتی سینی

جریان دوفازی گاز-مایع روی سینی از پیچیده‌ترین حالت‌های جریان سیال در دستگاه‌های فرآیندی است. برای مدل‌سازی حرکت فازها روی سینی با استفاده از CFD، علاوه بر معادلات بقای اندازه حرکت و بسته به شرایط جریان، به مدل‌های تکمیلی از جمله مدل آشفتگی، معادلات ضرایب انتقال اندازه حرکت بین فازها (ضرایب پسا) و معادلات ضرایب انتقال جرم بین فازها نیاز است. در این شبیه‌سازی از روش اولری-اولری برای حل مسئله دوفازی استفاده شده است و معادلات حاکم در زیر آورده شده‌اند:

$$\alpha_g + \alpha_l = 1 \quad (1)$$

$$\nabla(\alpha_g \rho_g V_g) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla(\alpha_l \rho_l V_l) = 0 \quad (3)$$

معادلات اندازه حرکت فاز گاز و مایع نیز به صورت زیر هستند:

$$\nabla(\alpha_g(\rho_g V_g V_g)) = -\alpha_g \nabla P_g - M_g + \nabla(\alpha_g \mu_{eff,g}(\nabla V_g + (\nabla V_g)^T)) \quad (4)$$

$$\nabla(\alpha_l(\rho_l V_l V_l)) = -\alpha_l \nabla P_l + M_l + \nabla(\alpha_l \mu_{eff,l}(\nabla V_l + (\nabla V_l)^T)) \quad (5)$$

تنها نیروی بین‌فازی نیروی پسا در نظر گرفته شده است. با توجه به این که فاز گاز فاز پراکنده است، رابطه به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$M_{GL} = \frac{3}{4} \frac{C_D}{d_G} \alpha_g \rho_L |V_G - V_L| (V_G - V_L) \quad (6)$$

$C_D$ ، ضریب درگ یا به عبارتی ضریب انتقال مومنتم بین‌فازی است. در شرایط ازدحام حباب‌های بزرگ، برای معادله کریشنا و همکاران [۷] از رابطه زیر استفاده می‌شود:

- در دیواره‌ها شروط عدم لغزش برای مایع و لغزش آزاد برای گاز استفاده می‌شوند؛

- چون ریزش مایع از سینی و حمل قطرات با گاز در سینی‌ای که سولاری و بل آزمایش کرده‌اند [۱۸] ناچیز است، در این جا نیز از آنها صرف نظر می‌شود. این سینی در دی‌های گازی آزمایش شده که مقدار ماندگی و ریزش ناچیز است (در  $F_g$  های ۰/۴ تا ۱/۵). بنابراین در مرزهای ورودی و خروجی، فازهای گاز و مایع تک‌فازی هستند؛

- توزیع سرعت سهمی گون برای سرعت مایع ورودی به سینی در نظر گرفته شده است؛

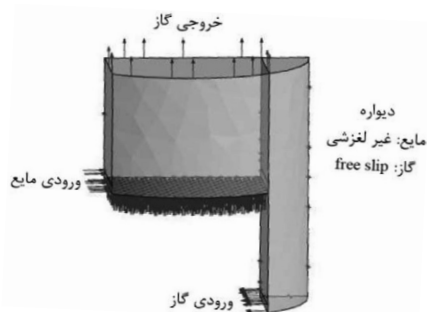
- سرعت بخار ورودی یک‌نواخت فرض شده است؛

- برای تنظیم شرایط مرزی فازها در خروجی از عامل فشار استفاده شده است. در شرایط مرزی خروجی فازها، فشار نسبی صفر در نظر گرفته شده است.

روابط ریاضی شرایط مرزی به صورت زیر است:

سرعت سهمی گون مایع:

$$U_{L, \text{in}} = 1.5 \frac{Q_L}{A_{CL}} \left[ 1 - \left( \frac{r}{L_w} \right)^2 \right] \quad (9)$$



شکل ۱ مشخصات سینی غربالی شبیه‌سازی شده و شرایط مرزی.

در شکل ۱، سینی شبیه‌سازی شده به همراه شرایط مرزی و در جدول ۱ مشخصات این سینی آورده شده‌اند. این سینی در مقیاس صنعتی است و به دلیل قرینگی و کاهش توان لازم محاسباتی نصف آن شبیه‌سازی شده است. برای ایجاد هندسه و شبکه‌بندی مدل هندسی از نرم‌افزار استاندارد ANSYS WorkBench و برای شبکه‌بندی از شبکه ترکیبی<sup>۱</sup> استفاده شده که ترکیبی از مش‌های چهاروجهی<sup>۲</sup>، گوه‌ای<sup>۳</sup> و منشوری<sup>۴</sup> است. برای افزایش دقت حل و همچنین جلوگیری از افزایش بی‌دلیل هزینه‌های محاسباتی، در فاصله نزدیک سینی شبکه ریزتر و در فاصله دور از آن شبکه درشت‌تر قرار گرفته است، زیرا در این کار توجه اصلی به ناحیه سرکف، در مجاورت کف سینی، است. چون که عدد مش بالا سبب افزایش هزینه و استهلاک و زمان محاسباتی می‌شود، تعیین آستانه استقلال از مش بسیار مهم است. در این فعالیت با در نظر گرفتن سه اندازه مش، استقلال از مش بررسی و عدد شبکه برای این استقلال و اجرای طرح مشخص شده است (جدول ۲).

طبق این نتایج و با بررسی آنها مشخص شد که از عدد مش ۸۰۰۰۰ به بعد داده‌های هیدرودینامیکی حاصل تفاوت چندانی با هم ندارند و شبکه‌بندی مستقل از عدد مش است؛ لذا عدد مش ۸۰۰۰۰ نوده<sup>۵</sup> برای این طراحی انتخاب شد.

- در ورودی مایع و گاز سرعت‌ها و جزء حجمی مشخص شده‌اند؛

جدول ۱ مشخصات هندسی سینی غربالی

۱/۲۱۳	قطر سینی (m)
۰/۶۱	فاصله سینی‌ها (m)
۰/۰۱۲۷	قطر سوراخ‌ها (m)
۰/۰۵	ارتفاع بند خروجی (m)
۰/۰۳۸	ارتفاع مایع ورودی از ناودانی (m)
٪۱۳	مساحت ناودانی (m <sup>2</sup> )
٪۵	مساحت سوراخ نسبت به سطح حباب‌ساز سینی غربالی (m <sup>2</sup> )

جدول ۲ مقایسه نتایج افت فشار در سه مش.

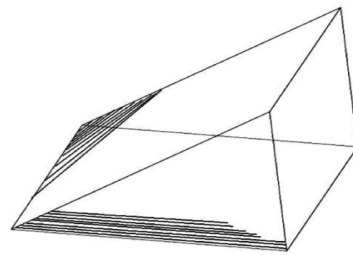
افت فشار (Pa)	تعداد مش شبکه (Node)
۷۱۰	۵۱۰۰۰
۶۲۰	۸۰۰۰۰
۶۱۵	۱۱۷۰۰۰

1. Hybrid Mesh
2. Tetrahedral
3. Wedge
4. Pyramide
5. Node

سرعت یک‌نواخت بخار:

$$V_{hole} = \frac{Q_G}{A_h} \quad (10)$$

برای بهبود وضعیت الگوی جریان مایع روی سینی از دریچه‌های هدایت بخار استفاده شد (شکل ۲). در جدول ۳، مشخصات هندسی دریچه‌های استفاده‌شده آورده شده‌اند.



شکل ۲ طرح‌واره‌ای از دریچه هدایت بخار.

جدول ۳ مشخصات هندسی هر دریچه.

۴۵	زاویه دریچه‌ها
۰/۰۰۰۱۲۶۶ (m <sup>2</sup> )	مساحت هر سوراخ
۰/۰۰۰۴۲۴۲۶ (m <sup>2</sup> )	مساحت دهانه هدایت بخار

هر یک از این دریچه‌ها یک شکاف دارند که بخار از آنها خارج می‌شود و به‌صورت افقی روی سینی مایع به حرکت در می‌آید. در شکل ۳ مشخصات قرارگیری دریچه‌ها روی سینی غربالی نشان داده شده‌اند. مشخصات هندسی سینی شبیه‌سازی‌شده همان سینی سولاری و بل [۱۸] است که قبلاً توضیح داده شد و تنها در ورودی گاز از آرایش‌های متفاوت دریچه‌ها استفاده شده است. هشت آرایش متفاوت دریچه روی سینی طراحی شده‌اند. تعداد دریچه‌ها ۴، ۸، ۱۲، ۱۴، ۱۸، ۲۴، ۲۸، ۳۶ و ۴۲ است که به‌ترتیب در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. در جدول ۴، محل قرارگیری و مشخصات هندسی دریچه‌ها آورده شده‌اند. در این پژوهش آرایش‌های گوناگون شبیه‌سازی‌شده دریچه‌ها روی سینی غربالی براساس ایده‌های زیر بوده‌اند:

۱- در ورودی جریان مایع به سینی، برای ایجاد یک‌نواختی در جریان و حفظ این یک‌نواختی طی مسیر جریان مایع در سینی از آرایش‌های ۳۶، ۴۲،

۲۸ و ۱۸ تایی استفاده شده است؛

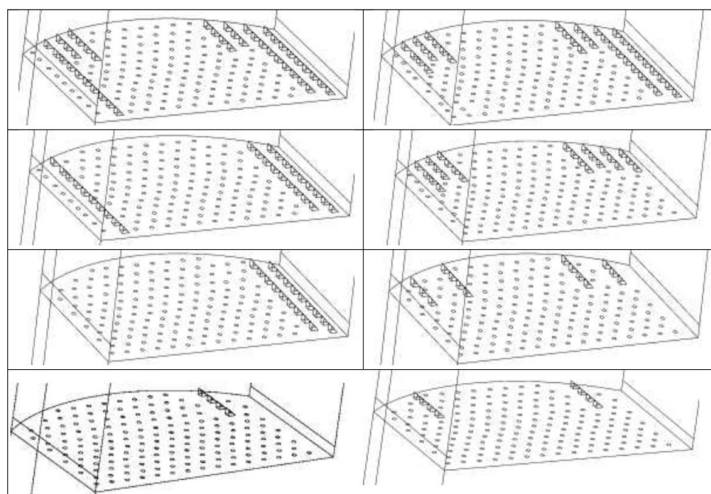
۲- در گوشه‌های سینی، همان‌گونه که در شبیه‌سازی‌های سینی غربالی دیده شد، نقاط مردابی و ساکن بیش‌تر در گوشه‌های سینی تشکیل می‌شوند و برای از بین بردن آنها دریچه‌ها در گوشه‌ها و قبل از شروع نقاط چرخشی نصب می‌شوند. در همه آرایش‌ها، به‌جز آرایش ۱۸ تایی، از این ایده استفاده شده است؛

۳- نزدیک بند خروجی، به‌علت وجود مانع در برابر جریان مایع پیشنهاد شده که از این دریچه‌ها استفاده و به جریان مایع سرعت داده شود. این ایده در آرایش ۴۲ تایی استفاده شده است. در طراحی این دریچه‌ها، همه این ایده‌ها به‌شکل مجزا و یا ترکیبی بررسی و سعی شد رفتار هر یک کاویده شود.

## نتایج و بحث

### اثر آرایش‌های گوناگون دریچه‌ها بر توزیع جریان مایع

برای اطمینان از صحت مدل CFD، از داده‌های تجربی سولاری و بل [۱۸] استفاده شده است. این دو سرعت خطی مایع را روی دو خط عمود بر مسیر جریان مایع در صفحه‌ای به ارتفاع  $Y=0/038$  m بالای کف سینی اندازه گرفتند. سولاری و بل سرعت متوسط مایع را با تقسیم فاصله بین دو حس گر بر زمان لازم برای پوشش این فاصله با رنگ به دست آوردند. در مدل هندسی مطالعه حاضر، حس گرهای ابتدایی روی خط  $X=0/209$  m و حس گرهای انتهایی روی خط  $X=0/438$  m قرار دارند [۱۸]. برای مقایسه مقادیر تجربی با پیش‌بینی CFD، انتگرال خطی مولفه افقی سرعت مایع روی صفحه  $Y=0/038$  m بین  $X=0/209$  m و  $X=0/438$  m محاسبه شده است. پروفایل‌های سرعت به‌دست‌آمده پروفایل‌های بالادست جریان نامیده شدند. انتگرال خطی بین  $m$   $X=0/438$  m و  $X=0/667$  m نیز روی صفحه  $Y=0/038$  m محاسبه شد و پروفایل‌های سرعت به‌دست‌آمده پروفایل‌های پایین‌دست جریان نامیده شدند.



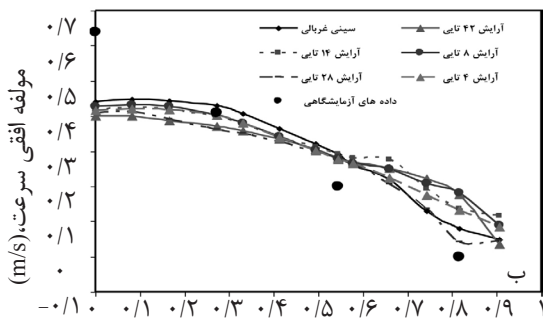
شکل ۳ نمایی از سینی‌ها با آرایش‌های گوناگون دریچه‌ها.

جدول ۴ مشخصات قرارگیری دریچه‌ها.

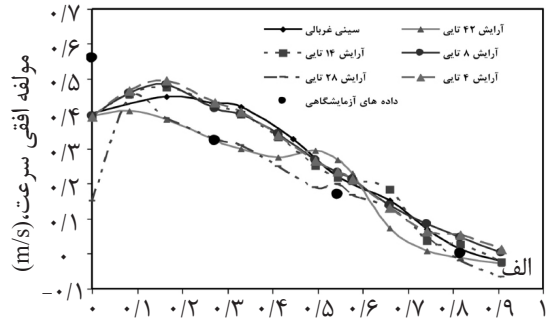
تعداد دریچه‌های کارگذاشته شده روی سینی غربالی	محل قرارگیری دریچه‌ها	مساحت کل سطح سوراخ شده به سطح حباب‌ساز (%)	مساحت دهانه دریچه‌ها به سطح سوراخ شده (%)
۴۲	دو ردیف در ورودی جریان مایع + یک ردیف در نزدیکی بند خروجی + در گوشه‌ها	۷/۴	۵۲/۵۵
۳۶	دو ردیف در ورودی + در گوشه‌ها	۷/۳	۴۷/۳۶
۲۸	دو ردیف در ورودی + یک ردیف در نزدیکی بند خروجی	۶/۷	۴۰/۲۸
۲۴	فقط در گوشه‌ها	۶/۵	۳۵/۶۶
۱۸	دو ردیف در ورودی	۶/۱	۲۸/۹۴
۱۴	فقط در گوشه‌ها	۵/۶۷	۲۳/۱۸
۱۲	فقط در گوشه‌ها	۵/۵۳	
۸	فقط در گوشه‌ها	۵/۳۸	۱۴/۳۱
۴	فقط در یک گوشه	۵/۱	۱/۸

$F_s = 1/464$ ،  $1/0.15$ ،  $0/8.01$ ،  $0/464 \text{ m/s(kg/m}^3\text{)}^{-0.5}$  انجام شده‌اند. آرایش هشت‌تایی بهترین آرایش طراحی شده برای دریچه‌های هدایت بخار روی سینی از جنبه توزیع سرعت مایع در اکثر شرایط عملیاتی است. همان‌گونه که در شرایط عملیاتی مختلف مشاهده می‌شود، این آرایش توانسته است در گوشه‌ها سرعت مایع را بالا ببرد. آرایش‌های دوازده و چهارده‌تایی اثراتی تقریباً مشابه با آرایش هشت‌تایی دارند.

در شکل‌های ۴ تا ۷ توزیع سرعت مایع برای جریان‌های بالادستی و پایین‌دستی در صفحه‌ای به ارتفاع  $Y = 0/038 \text{ m}$  به دست آمد. هدف از کاربرد این دریچه‌ها یک‌نواخت کردن توزیع سرعت مایع روی سینی است. پس اگر این دریچه‌ها بتوانند سرعت را در گوشه‌ها افزایش دهند و نقاط چرخشی و ساکن را از بین ببرند، نقشی مثبت بر جریان مایع دارند. شبیه‌سازی‌ها در دو دبی مایع  $QL = 0/0178 - 0/00694 \text{ m}^3/\text{s}$

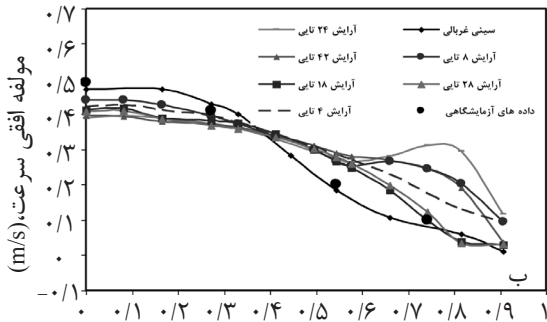


مختصات بدون بعد در جهت عمود بر مسیر جریان z/R

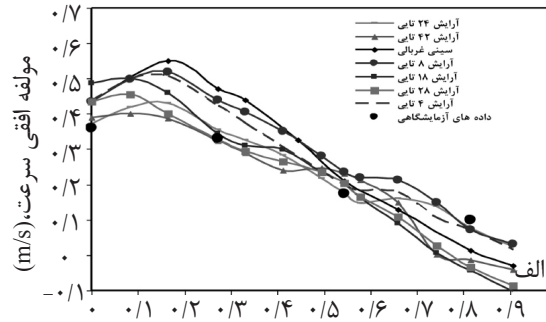


مختصات بدون بعد در جهت عمود بر مسیر جریان z/R

شکل ۴ توزیع سرعت مایع در دبی مایع:  $F_s = 0/462$  و  $Q_L = 0/178 \text{ m}^3/\text{s}$   
 الف) پروفایل بالادستی جریان و ب) پروفایل پایین دستی جریان.

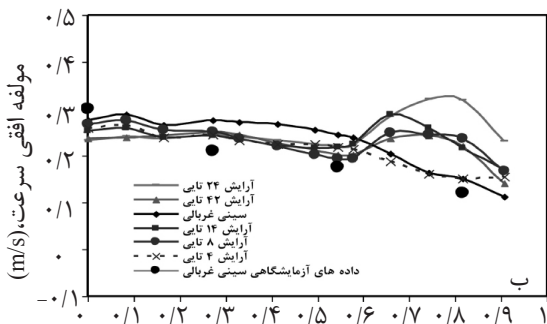


مختصات بدون بعد در جهت عمود بر مسیر جریان z/R

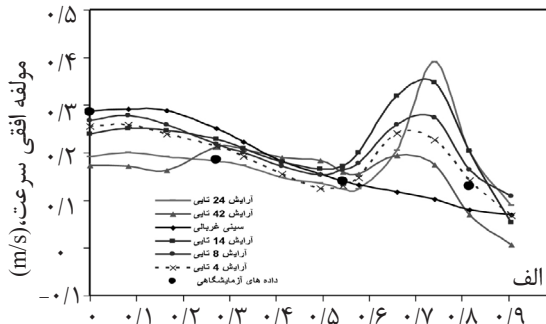


مختصات بدون بعد در جهت عمود بر مسیر جریان z/R

شکل ۵ توزیع سرعت مایع در دبی مایع:  $F_s = 0/801$  و  $Q_L = 0/178 \text{ m}^3/\text{s}$   
 الف) پروفایل بالادستی جریان و ب) پروفایل پایین دستی جریان.

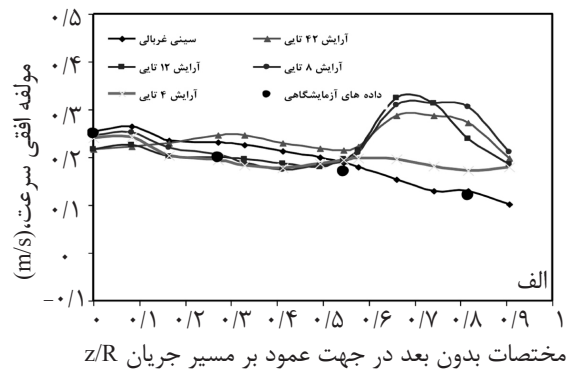
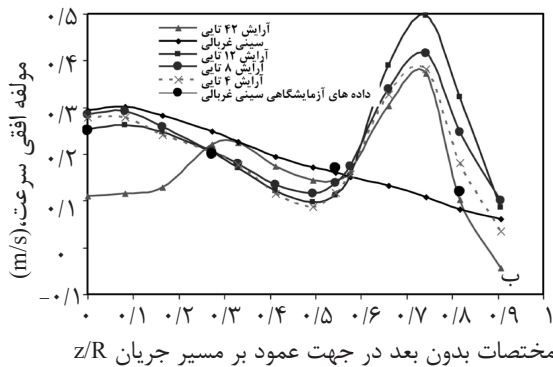


مختصات بدون بعد در جهت عمود بر مسیر جریان z/R



مختصات بدون بعد در جهت عمود بر مسیر جریان z/R

شکل ۶ توزیع سرعت مایع و دبی مایع:  $F_s = 1/015$  و  $Q_L = 0/0694 \text{ m}^3/\text{s}$   
 الف) پروفایل بالادستی جریان و ب) پروفایل پایین دستی جریان.



شکل ۷ توزیع سرعت مایع و دبی مایع:  $F_s = 1/464$  و  $Q_L = 0.0694 \text{ m}^3/\text{s}$   
 الف) پروفایل بالادستی جریان و ب) پروفایل پایین دستی جریان.

بسیار بالاست، دریچه‌ها ممنتمی بسیار بالا به جریان مایع منتقل می‌کنند. این کار باعث ایجاد آشفستگی و نوسانات زیاد در جریان مایع می‌شود و سرعت مایع در گوشه‌ها بسیار بالا می‌رود. پس در این حالت استفاده از دریچه‌ها نامطلوب است. برای ایجاد ممنتم کافی با این دریچه‌ها، همان گونه که اشاره شد، باید گاز سرعت کافی و مناسب داشته باشد. در یک دبی ثابت از بخار، با کاهش نسبت مساحت دهانه آزاد دریچه‌ها به مساحت کل فضای ورودی بخار، سرعت خروجی گاز از دریچه‌ها افزایش و در نتیجه ممنتم انتقالی به جریان مایع افزایش می‌یابد. در آرایش ۴۲ تایی با تعداد زیادی دریچه در قسمت‌های مختلف سینی، چون ممنتم بخار در دریچه‌های گوناگون پخش می‌شود، ممنتم کافی به هر دریچه نمی‌رسد، در نتیجه این آرایش نمی‌تواند تاثیری مثبت بر جریان مایع بگذارد. همان گونه که اشاره شد، آرایش هشت دریچه‌ای بهترین عمل کرد را بین آرایش‌های دیگر دارد. نسبت مساحت دهانه ورودی آرایش هشت تایی به کل مساحت ورودی سینی  $14/31\%$  است و می‌توان نتیجه گرفت که محدوده این نسبت برای این سینی مناسب است. آرایش چهار تایی که نسبتی کم‌تر از این مقدار دارد نتوانسته تاثیر مطلوب، به خصوص در جریان پایین دست، داشته باشد و به نظر می‌رسد تعداد دریچه‌ها در این آرایش کافی نیست.

اثر ایجاد شده با آرایش چهار تایی، به خصوص در جریان پایین دستی، کم‌تر از آرایش هشت تایی محسوس است. آرایش ۴۲ تایی در همه شرایط عملیاتی، علاوه بر نداشتن اثر مطلوب، باعث کاهش سرعت و افزایش آشفستگی‌ها و نوسانات فراوان در سرعت افقی مایع می‌شود. دیگر آرایش‌های طراحی شده نیز اثری چندان مطلوب بر سیستم جریان مایع روی سینی ندارند.

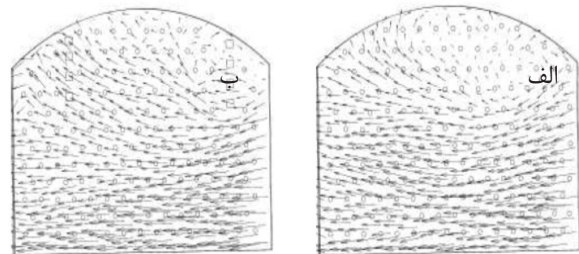
به علت این که چگالی بخار از مایع بسیار کم‌تر است، یک جریان حجمی یکسان از بخار جرمی بسیار کم‌تر از جریان مایع دارد. جرم کم‌تر ممنتم کم‌تری ایجاد می‌کند. نکته‌ای که در این جا مطرح می‌شود این است که آیا بخار تزریق شده ممنتم کافی دارد تا جهت جریان مایع را تغییر دهد. برای فراهم کردن ممنتم کافی، سرعت گاز نقشی مهم در ایجاد ممنتم دارد. هر چه سرعت بخار در سیستم بیش‌تر باشد، دریچه‌های نصب شده اثر خود را بیش‌تر نشان می‌دهند. همان گونه که در شکل‌ها نشان داده شده، در سرعت پایین گاز  $F_s = 0/462$  اثر دریچه‌ها بر سینی غربالی به علت ممنتم پایین جریان بخار کم است؛ اما دریچه‌ها بهترین اثر را در سرعت‌های  $0/801 \text{ m/s} (\text{kg/m}^3)^{1/5}$  و  $1/015 \text{ m/s} (\text{kg/m}^3)^{1/5}$  نشان داده‌اند چون در این سرعت‌ها جریان بخار ممنتم کافی برای به حرکت در آوردن جریان مایع دارد. در  $F_s = 1/464 \text{ m/s} (\text{kg/m}^3)^{1/5}$  چون سرعت گاز



در شکل ۹ الف افت فشار در دبی ثابت مایع در شکل ۹ الف افت فشار در دبی ثابت مایع نشان داده شده است. دیده می‌شود که آرایش ۴۲ دریچه‌ای بیش‌ترین افت فشار و سینی غربالی نیز کم‌ترین افت فشار را دارد. افت فشار آرایش هشت‌تایی از سینی غربالی بیش‌تر و از آرایش چهارتایی کم‌تر است. شکل ۹ ب افت فشار در دبی مایع  $Q_L=0/0694(m^3/s)$  نشان داده و افت فشار آرایش هشت‌تایی از همه حالت‌ها، حتی سینی غربالی معمولی، نیز کم‌تر شده و افت فشار آرایش ۴۲ تایی از همه بیش‌تر است. افت فشار آرایش چهارتایی از سینی غربالی کم‌تر و از آرایش هشت‌تایی بیش‌تر است. همان‌گونه که گفته شد، این دریچه‌ها خود باعث افت فشار می‌شوند، اما نتایج پیش‌بینی‌شده نشان دادند که در بعضی شرایط عملیاتی افت فشار دریچه‌ها از سینی غربالی نیز کم‌تر است.

در توجیه این مسئله شاید بتوان گفت که چگونگی توزیع مایع روی سینی عامل مهم دیگر در افت فشار است. با توجه به نتایج نشان‌داده‌شده در شکل‌ها، یک‌نواختی حرکت مایع روی سینی خود باعث کاهش افت فشار می‌شود. به‌عبارت دیگر هر قدر نقاط مردابی روی سینی کم‌تر شوند، افت فشار نیز کم‌تر خواهد بود. می‌توان نتیجه گرفت که دریچه‌های هدایت بخار دو تاثیر بر افت فشار دارند:

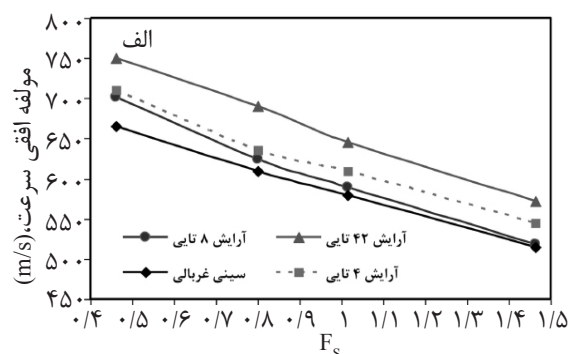
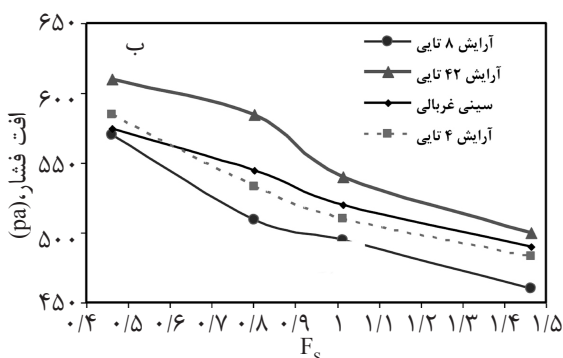
در شکل ۷ بردارهای سرعت در صفحه‌ای به ارتفاع  $m$  برای سینی معمولی و آرایش هشت‌دریچه‌ای نشان داده شده‌اند. نقاط مردابی و چرخشی در سینی غربالی مشاهده می‌شوند که در سینی با آرایش هشت‌تایی تا حدودی از بین رفته‌اند. در شکل ۸ بردارهای سرعت در صفحه به ارتفاع  $0/038$  متر برای سینی معمولی و آرایش هشت‌دریچه‌ای نشان داده شده‌اند. نقاط مردابی و چرخشی در سینی غربالی مشاهده می‌شوند که در سینی با آرایش هشت‌تایی تا حدودی از بین رفته‌اند.



شکل ۸ بردارهای سرعت برای الف) سینی غربالی معمولی و ب) آرایش هشت‌دریچه‌ای در صفحه به فاصله  $0/038$  m از کف سینی

### بررسی افت فشار

دریچه‌های هدایت بخار خود باعث ایجاد افت فشار می‌شوند. همان‌گونه که اشاره شد، آنها با ایجاد افت فشار بخار را به‌شکلی مناسب روی سینی پخش می‌کنند. این افت فشار می‌تواند باعث ایجاد انرژی‌ای شود که مایع را به حرکت در می‌آورد. هر چه تعداد دریچه‌های سینی غربالی بیش‌تر باشد، افت فشار بیش‌تری رخ می‌دهد.



شکل ۹ تغییرات فشار نسبت به  $F_s$ : الف)  $Q_L=0/178 m^3/s$  و ب)  $Q_L=0/0694 m^3/s$

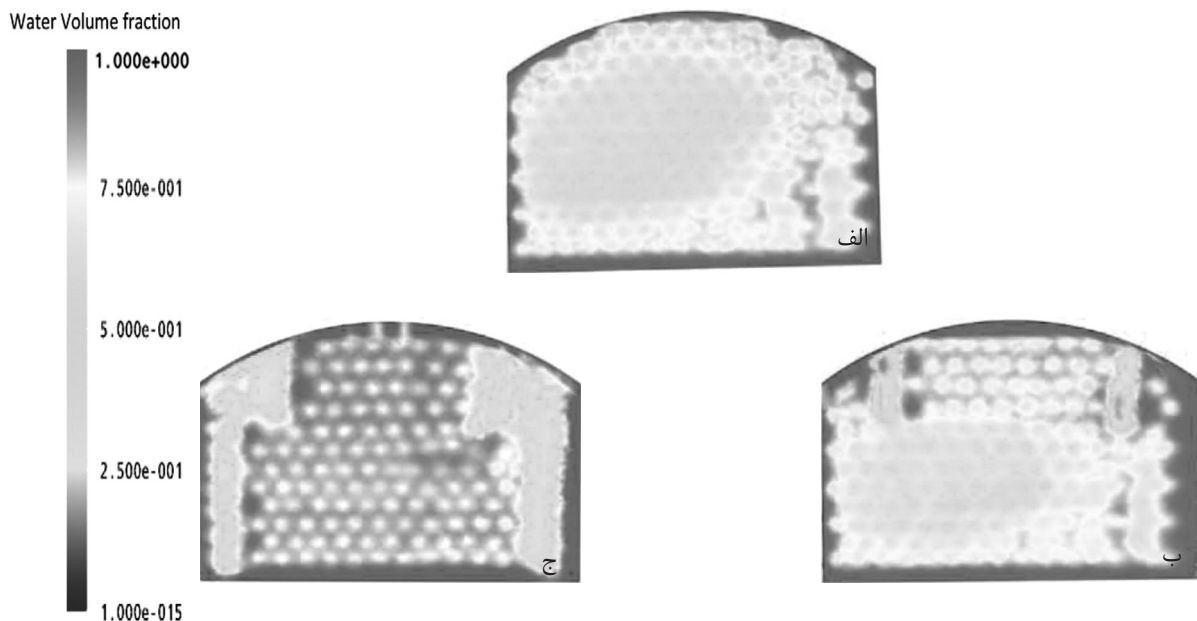
### بررسی اثر دریچه‌ها بر تشکیل حباب

شکل ۱۰ کنتور کسر حجمی آب را روی سینی غربالی و هم‌چنین سینی غربالی با آرایش‌های ۸ و ۴۲ تایی را نشان می‌دهد. دریچه‌ها باعث کاهش تشکیل حباب روی سینی می‌شوند. انرژی‌ای که باید صرف ایجاد حباب شود صرف انتقال ممتم می‌شود. سطح حباب، سطح تماس دو فاز و هم‌چنین ناحیه انتقال جرم بین فازها را ایجاد می‌کند؛ در نتیجه هر چه تعداد این دریچه‌ها روی سینی بیش‌تر باشد، تشکیل حباب و انتقال جرم نیز کم‌تر خواهد بود. پس بهترین حالت ممکن تشکیل حباب آرایش چهار و هشت‌تایی است که دریچه‌ها کم‌تراند. از طرف دیگر این دریچه‌ها فقط در گوشه‌های سینی کار گذاشته شده‌اند که نقاط مردابی و غیرفعال سینی معمولی‌اند؛ پس تاثیر چندان بر عدم‌تداخل مناسب دو فاز روی سینی ندارند. استفاده از این دریچه‌ها در دیگر نقاط برج (غیر از گوشه‌های سینی)، که سطوح فعال سینی هستند، باعث از بین رفتن سطح حباب‌ساز سینی در آن مناطق می‌شود. پس بهتر است دریچه‌ها در گوشه‌های سینی کار گذاشته شوند.

۱- به‌علت شکل فیزیکی و ماهیت عمل‌کردی‌شان، با ایجاد افت فشار و انتقال ممتم به جریان مایع، باعث افزایش افت فشار روی سینی می‌شوند. هر چه تعداد این دریچه‌ها بیش‌تر باشد، افت فشار خشک سینی بیش‌تر خواهد بود؛

۲- یکی از اهداف استفاده از این گونه ابزار روی سینی توزیع و پخش بهتر مایع روی سینی است. در صورت رسیدن به این هدف، چون دریچه‌ها باعث کاهش نقاط مردابی و تجمع مایع در سیستم شده‌اند، ارتفاع مایع زلال را نیز کم می‌کنند. این عامل باعث کاهش افت فشار تر می‌شود.

پس از یک طرف این دریچه‌ها باعث کاهش افت فشار و از طرف دیگر باعث افزایش افت فشار می‌شوند. بهترین حالت مشاهده‌شده در انواع دریچه‌های نصب‌شده از لحاظ افت فشار آرایش هشت‌دریچه‌ای است، چون طبق نکات گفته‌شده در قسمت قبل، این آرایش بهترین توزیع سرعت را در بین دیگر آرایش‌ها دارد و از طرف دیگر تعداد دریچه‌های آن نیز نسبتاً کم است.



شکل ۱۰ کنتور کسر حجمی آب در ارتفاع ۰/۰۳۸ m از کف سینی: الف) سینی غربالی؛ ب) آرایش هشت‌تایی و ج) آرایش ۴۲ تایی دریچه‌ها.

## نتیجه گیری

مهم دیگر محل قرار گرفتن این دریچه‌هاست که این پژوهش پیشنهاد می‌کند در گوشه‌های سینی باشد. بنابراین استفاده از این گونه طراحی سینی غربالی می‌تواند در رفع تنگناهای سینی‌های موجود و همچنین ساخت سینی‌های غربالی موثر باشد و به بهبود قابل توجه عمل کرد سینی و برج، بدون صرف هزینه قابل توجه، بیانجامد.

## علائم و نشانه‌ها

$A_h$ : مساحت سوراخ سینی ( $m^2$ )

$A_{Cl}$ : مساحت سطح زیر ناودانی ( $m^2$ )

$C_D$ : ضریب درگ

$d_G$ : قطر حباب گاز (m)

$F_S$ :  $F_S = V_s \sqrt{\rho_G} (m/s(kg/m^3)^{0.5})$  (F-factor)

$g$ : شتاب گرانش ( $9.81 m/s^2$ )

$h_{Cl}$ : ارتفاع مایع زلال (m)

$L_w$ : طول بند (m)

$M_{GL}$ : انتقال اندازه حرکت بین فازی ( $N/m^3$ )

$Q_L$ : دبی حجمی مایع ( $m^3/s$ )

$U_{L,lin}$ : سرعت مایع ورودی (m/s)

$V, U$ : سرعت (m/s)

$V_{Atriv}$ : سرعت گاز ورودی (m/s)

$V_S$ : سرعت مجازی فاز گاز براساس سطح

حباب ساز ( $m/s$ )

$V_{slip}$ : سرعت لغزش زنجیره حباب‌ها نسبت به

مایع (m/s)

$V_h$ : سرعت در سوراخ‌های سینی

$Z_{wide}$ : عرض به‌ازای طول راستای جریان مایع (m)

$\rho$ : چگالی ( $kg/m^3$ )

$\alpha$ : کسر حجمی فازها

$x$ : جهت محور مختصات (m)

$y$ : جهت محور مختصات (m)

$z$ : جهت محور مختصات (m)

## پانویس‌ها

$G$ : فاز گاز

$L$ : فاز مایع

آرایش‌های گوناگون دریچه‌ها روی این سینی غربالی بررسی شده‌اند. آرایش‌های ۴۲، ۳۶، ۲۸، ۲۴، ۱۸، ۱۴، ۱۲، ۸ و ۴ دریچه‌ای روی سینی غربالی نصب و شبیه‌سازی شدند. این دریچه‌ها در ورودی جریان مایع، گوشه‌ها و خروجی جریان مایع نصب شدند. عوامل موثر بر هیدرودینامیک سینی و چگونگی توزیع جریان مایع روی سینی، افت فشار، چگونگی تداخل دو فاز و تشکیل حباب نیز بررسی شدند. یکی از مشکلات این دریچه‌ها عدم انعطاف آنهاست؛ یعنی در شرایط عملیاتی مختلف وضعیت‌های عمل‌کردی متفاوت دارند. دبی‌های مایع و بخار بر عمل‌کرد این گونه دریچه‌ها تاثیر فراوان دارند. به علت ماهیت این دریچه‌ها، که با ایجاد یک افت فشار و تبدیل آن به ممتنم مایع را به حرکت در می‌آورند، می‌توان نتیجه گرفت که دبی‌های مایع و بخار در ایجاد این ممتنم نقشی حیاتی دارند. برای این سینی غربالی آرایش هشت‌دریچه‌ای بهترین گزینه و عمل‌کرد آن از جنبه توزیع سرعت، افت فشار، تشکیل حباب و ایجاد سطح تماس بین دو فاز مناسب‌ترین است. افت فشار آرایش هشت‌دریچه‌ای حتی از سینی غربالی در دبی مایع  $0.0694 m^3/s$   $QL =$  نیز کم‌تر است. به‌علت قرار گرفتن در گوشه‌های سینی که نقاط غیرفعال سینی غربالی بودند و همچنین تعداد کم دریچه‌ها، از لحاظ تشکیل حباب نیز آرایش هشت‌دریچه‌ای وضعیتی مناسب‌تر از سینی غربالی داشت. می‌توان نتیجه گرفت که مهم‌ترین عامل در کارایی دریچه‌ها روی سینی‌ها مشخصه بدون بعد نسبت سطح دهانه دریچه‌ها به سطح آزاد کل سینی است، چون این نسبت در انتقال ممتنم نقشی حیاتی دارد. این نسبت برای سینی با آرایش هشت‌دریچه‌ای  $14/31$  است که می‌توان نتیجه گرفت که این محدوده برای نصب دریچه‌ها روی سینی مناسب است. این نسبت بدون بعد می‌تواند برای انواع سینی‌های غربالی با قطرهای گوناگون مناسب باشد. عامل

## مراجع

- [1]. Nutter E. "High capacity tray for gas-liquid contact apparatus," US Patent US005360583A, Nov 1, 1994.
- [2]. Pilling, M., M. Fischer & G. Mosca. "Tray apparatus, column with same and method of assembling and using," US Patent, US 2007/0040289 A1, 2007.
- [3]. Rahimi, R., Zarei, A., Zarei, T., Firoozsalari, H.N. and Zivdar, M., "A computational fluid dynamics and an experimental approach to the effects of push valves on sieve trays," In Distillation Absorption Conference, Eindhoven, pp. 407-412, 2010
- [4]. Mehta, B., K. T. Chuang & K. Nandakumar. "Model for Liquid Phase Flow on Sieve Trays," Chemical Engineering Research and Design, Vol. 76, No. 7, pp. 843-848, 1998.
- [5]. Fischer, C. H. & J. L. Quarini. "Three-Dimensional Heterogeneous Modeling of Distillation Tray Hydraulics," AIChE Meeting, Miami Beach, FL, 1998.
- [6]. Krishna, R., J. M. Vanbatten, J. Ellrnberger, A. P. Higler & R. Taylor. "CFD simulations of sieve tray hydrodynamics," Trans.IChemE, Vol. 77, pp. 639-646, 1999.
- [7]. Krishna, R. V. J. M. "Modeling Sieve Tray Hydraulics Using Computational Fluid Dynamics," Trans.IChemE., Vol. 81, pp. 27, 2003.
- [8]. Gesit, G., K. Nandakumar & K. T. Chuang. "CFD modeling of flow patterns and hydraulics of commercial-scale sieve trays," AIChE J., Vol. 49, No. 4, pp. 910-924, 2003.
- [9]. محمدی زرغان، ش.، م. رشدی، ن. کتیری و ج. ایوک پور. "بررسی هیدرولیک سینی‌های غربالی با استفاده از دیدگاه حجم سیال"، پژوهش نفت، دوره ۲۵، شماره ۸۱، صفحات ۱۶۹-۱۸۰، ۱۳۹۴.
- [10]. Rahimi, R., M. R. Rahimi, F. Shahraki & M. Zivdar. "Efficiencies of Sieve Tray Distillation Columns by CFD Simulations," Chem. Eng. and Technol., Vol. 29, No. 3, p. 326, 2006.
- [11]. Zarei, T., R. Rahimi & M. Zivdar. "Computational fluid dynamic simulation of MVG tray hydraulics," Korean J. Chem. Eng., Vol. 26, No. 5, pp. 1213-1219, 2009.
- [12]. Zarei A, Rahimi R., Zarei, T. and Firoozsalari H. N., "A study on sieve tray lower operating limit," In 50<sup>th</sup> Distillation and Absorption Conference, Eindhoven, pp. 479-484, 2010
- [13]. Zarei T., Khorshidi J., Rahimi R. and Zarei A., "Experimental study on the Conical Cap tray performance", Journal of Chemical and Petroleum Engineering, 50 (2), pp. 47-52, 2017.
- [14]. Zarei T., Rahimi R., Zarei A. and Zivdar M., "Hydrodynamic characteristic of conical cap tray: experimental studies on dry and total pressure drop, weeping and entrainment," Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 64, pp. 17-23, 2013.
- [15]. Ostadzahi M. R., Rahimi R., Zarei T. and Zivdar M., "CFD simulation of concap tray hydrodynamics," Journal of Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 47, pp. 39-50, 2013.
- [16]. Zarei T., Farsiani M. and Khorshidi J., "Hydrodynamic characteristics of valve tray: computational fluid dynamic simulation and experimental studies," Korean J. Chem. Eng., Vol. 34, pp. 150-159, 2017.
- [17]. Zarei T, Abedini E, Rahimi R, and Khorshidi J., "Computational fluid dynamics on the hydrodynamic characteristics of the conical cap tray," Korean J. Chem. Eng., DOI: 10.1007/s11814-017-0004-6, 2017.
- [18]. Solari R. B. and Bell R. L., "Fluid flow patterns and velocity distribution on commercial-scale sieve Trays," AIChE J., Vol. 32, p. 640, 1986.