مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1397، دوره 18، شماره 02، ص‌ص 401-412

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک جریان دوفاز در سینی‌های غربالی برج تقطیر

مهدی قیاسی[1]، مهرزاد شمس[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 19991-43344 ، shams@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 آبان 1396

پذیرش: 03 دی 1396

ارائه در سایت: 26 بهمن 1396

کلید واژگان:

برج تقطیر

سینی غربالی

ارتفاع مایع زلال

دینامیک سیالات محاسباتی

جریان دوفاز گاز- مایع

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی پارامترهای هیدرولیکی موثر بر روی عملکرد برج تقطیر و مشخصات هیدرودینامیکی میدان جریان بر روی سینی غربالی در مقیاس صنعتی با استفاده از شبیه‌سازی عددی می‌باشد. از روش دینامیک سیالات محاسباتی برای تحلیل و پیش‌بینی رفتار جریان بهره گرفته شد. هندسه مورد نظر، شامل فضای بین دو طبقه از برج تقطیر به همراه بخش ناودانی می‌باشد. پس از ترسیم هندسه و شبکه‌بندی آن در نرم‌افزار گمبیت، تحلیل میدان سه بعدی جریان به کمک نرم افزار فلوئنت شکل گرفت. از مدل دوفازی اویلری- اویلری برای شبیه‌سازی جریان دوفازی و مدل k-ε RNG جهت مدل‌سازی آشفتگی استفاده گردید. اعتبارسنجی نتایج، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی سولاری و بل و رابطه تجربی ارائه شده توسط کلول انجام شد. توزیع سرعت و کسر حجمی مایع و گاز در مکان‌های مختلف بر روی سینی و اطراف آن مشخص شد. اثر دبی حجمی ورودی مایع و گاز و هم‌چنین هندسه بند بر روی پارامترهای مرتبط با عملکرد سینی نظیر ارتفاع مایع زلال و ارتفاع ناحیه کف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که کاهش آشفتگی جریان گاز و مایع موجب بهبود عملکرد سینی‌های برج تقطیر خواهد شد.

Numerical simulation of the hydrodynamics of two phase flow in distillation column sieve trays

Mehdi Ghiyasi, Mehrzad Shams*

Department of Mechanical Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 19991-43344, Tehran, Iran, shams@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 November 2017
Accepted 24 December 2017
Available Online 15 February 2018

Keywords:
Distillation Column
Sieve Tray
Clear Liquid Height
Computational Fluid Dynamics
Gas-Liquid Two phase Flow

ABSTRACT

The purpose of this research was to investigate the hydraulic parameters affecting the performance of the distillation column and the hydrodynamic characteristics of the flow field on the industrial scale-sieve tray using numerical simulation. Computational fluid dynamics method was used for analyzing and predicting flow behavior. The desired geometry including the space between two trays of the distillation column and the down comer region was considered. After plotting geometry, three dimensional grids were generated in Gambit software and the analysis of the flow field was traced in Fluent software. The Eulerian-Eulerian approach was applied to simulate two-phase flow and k-ε RNG model for turbulence modeling. Validation of the results was done successfully using Solari and Bell experiment data and the correlation presented by Colwell. The velocity distribution and volume fraction of liquid and gas in different zones were determined. The influence of inlet volumetric flow rate of liquid and gas, as well as the geometry of the weir, on parameters related to the tray performance such as clear liquid height and froth height were investigated. The results indicated that a better separation would occur in lower gas and liquid loads.

1- مقدمه

یکی از مهم‌ترین فرایندهایی که در صنایع مربوط به نفت و گاز انجام می شود، جداسازی اجزای موجود در یک ترکیب نفتی است که هر کدام از این اجزا می‌توانند ارزش بسیار بالایی در مقایسه با ترکیب اولیه داشته باشند.

گستردگی و تنوع ستون‌های غنی‌سازی و کاربرد آن‌ها زیاد است. یکی از مهم‌ترین تجهیزات در واحدهای پالایشگاهی و پتروشیمیایی، برج تقطیر است. برج‌های سینی دار، مهم‌ترین نوع برج‌هایی هستند که در مراکز مهم صنعتی مانند پالایشگاه‌ها از آن‌ها استفاده می‌شود. برج‌های سینی‌دار از نوع غربالی در بیست سال اخیر، خود را به‌عنوان عمومی‌ترین دستگاه تماس بین فازی مطرح کرده‌اند. علل استقبال از این سینی‌ها ظرفیت بالا، عملکرد مناسب، افت فشار کم‌تر نسبت به بقیه دستگاه‌ها، قیمت پایین، سهولت در بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری آسان آن‌ها در مقایسه با بقیه وسایل جداسازی و سینی‌های متداول دیگر می‌باشد. علی‌رغم رشد فزاینده و در حد کمال فناوری تقطیر، در برخی موارد به‌خصوص در زمینه هیدرودینامیک سینی‌ها و راندمان، بهره‌برداری مناسب از پتانسیل اطلاعاتی موجود برای طراحی جامع سینی‌ها صورت نگرفته است. در گذشته اغلب محاسبات

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Ghiyasi, M. Shams, Numerical simulation of the hydrodynamics of two phase flow in distillation column sieve trays, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 401-412, 2018 (in Persian)

هیدرودینامیک سینی براساس فرض نزدیک شدن به شرایط مطلوب عملکرد یا کاهش هزینه سینی انجام می‌گرفت و به‌دلیل محاسبات طولانی، اکثرا نتایج حاصل از چند دور محاسبه متناظر با شرایط بهینه نبود و طرح مناسب یک برج از نظر هیدرولیکی برای طراح آن، در هاله ای از ابهام بوده است [1].

پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه سینی‌های برج تقطیر را می‌توان به دو دسته کارهای آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی تقسیم‌بندی نمود. از مجموعه‌های پژوهش‌های تجربی صورت انجام شده در این رابطه می‌توان به پژوهش لوپز و همکاران [2] در سال 1999 اشاره کرد. آن‌ها اثر قطر سوراخ و ترکیب مایع ورودی بر روی بازده سینی‌های غربالی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند سینی‌های با قطر منفذ بزرگ‌تر، بازدهی کم‌تری نسبت به سینی‌های با سوراخ ریزتر دارند. در سال 2015 ژانگ و همکاران [3] به بررسی تجربی رفتار هیدرودینامیکی گونه‌ای جدید از سینی‌های دریچه‌ای ثابت دوراهه پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان داد که میزان تغییرات افت فشار و ارتفاع مایع زلال روند مشابهی دارند و با کاهش فاصله مراکز سوراخ‌ها از هم، افزایش قطر هر سوراخ، افزایش می‌یابد.

در سال‌های اخیر، دینامیک سیالات محاسباتی به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای شبیه‌سازی و طراحی ادوات فرایندی به‌ویژه در برج‌های تقطیر و سینی‌های جداساز آن مورد توجه قرار گرفته است. در سال 2007، سان و همکاران [4] یک مدل انتقال جرم محاسباتی سه‌بعدی برای پیش‌بینی نفوذ انتقال جرم متلاطم، پروفایل سرعت، غلظت و بازده تجهیزات انتقال جرم ارائه دادند. لی و همکاران [5] در سال 2008، مدل سه‌بعدی در چارچوب اویلری اویلری برای شبیه‌سازی سینی‌های دریچه‌ای ارائه کردند. در سال 2009، فرض‌پور ماچیانی و همکاران [6] جریان دوفاز گاز- مایع را در ستون حباب مکعبی شکل با استفاده از دیدگاه اویلری- لاگرانژی بررسی کردند. آن‌ها نیروهای پسا، برا، گرانش، گرادیان فشار، جرم افزوده و نیروی شناوری را برای شبیه‌سازی حرکت حباب درنظر گرفتند. در سال 2010، تلکن و همکاران [7]، تاثیر افزودن المان حرارتی را بر کارایی سینی‌های برج تقطیر بررسی کردند. با توجه به نتایجی که از تحلیل عددی شان به‌دست آمد، آن‌ها دریافتند که اضافه کردن المان حرارتی بر روی سطح سینی‌های برج تقطیر بر روی الگوی جریان تاثیر گذاشته و باعث همگون شدن مخلوط دوفازی، به‌خصوص در ناحیه متلاطم می‌گردد و موجب تسهیل در مکانیزم انتقال جرم بین دوفاز می‌شود. در سال 2013، رحیمی و همکاران [8] به شبیه‌سازی عددی نوعی سینی کلاهک دار و بررسی هیدرودینامیک جریان بر روی آن پرداختند. کلاهک‌ها به‌صورت مخروط هایی شبیه‌سازی شد و سرعت و کسر حجمی فازهای مایع و گاز در نواحی مختلف پیش‌بینی شد و اثر پدیده‌های نامطلوب بر روی عملکرد سینی نظیر ماندگی و چکه کردن به ازای دبی‌های حجمی گوناگون گاز و مایع ورودی در نظر گرفتند. باوسا و همکاران [9] در پژوهشی در سال 2015، ایده استفاده از سینی‌های دو طبقه با دریچه‌های متحرک را مطرح کردند. آن‌ها برای رفع نقیصه برج‌هایی با بار مایع زیاد و طول بلند آبراهه که منجر به کاهش راندمان سینی می‌شد، سینی‌ها را به صورت پلکانی تعبیه کردند. رودریگز و همکاران [10] راهکاری برای طراحی مکانیکی سینی‌های برج تقطیر جهت جداسازی اجزای مخلوطی شامل هیدروکربن‌ها درون یک برج با دیواره‌های جداکننده را مطرح نمودند. یلدریم و همکاران [11] به مدل‌سازی برج‌های تقطیر با استفاده از پرکن‌های فشرده[1] پرداختند. پرکن‌های فشرده، نوعی نوین از طبقات به‌کار رفته در برج‌های تقطیر می‌باشد که شامل پرکن‌های عادی با سطوح هندسی مختلف می‌باشند.

[1] Sandwich packing

لایه‌های بالاتر دارای نقطه طغیان پایین‌تر نسبت به دیگر لایه‌ها می‌باشد. آن‌ها به بررسی انتقال جرم درون برج پرداختند. همچنین توانستند ضرائب مربوط به انتقال جرم را محاسبه نمایند. مدل ارائه شده توسط آن‌ها تطابق خوبی با داده‌های بازدهی تجربی پرکن‌های فشرده داشت. در سال 2016 جین چو تسینگ و همکاران [12]، امکان استفاده از محیط متخلل برای شبیه‌سازی جریان گازی بر روی سینی‌های غربالی را مورد بررسی قرار دادند. هدف آن‌ها، توسعه یک چارچوب مجاسباتی، سریع و قابل اطمینان برای تحلیل میدان جریان درون برج گوگردزدایی نفت خام بود. آن‌ها چندین ترم اضافی را نیز جهت پیش‌بینی افت فشار درون سینی‌های غربالی وارد معادله ممنتوم کردند. برای شبیه‌سازی جریان، از مدل متوسط رینولدز برای معادلات ناویراستوکس و به منظور شبیه سازی آشفتگی، از مدل کی امگا اس اس تی [2]بهره گرفته شد.

تحقیق حاضر، قصد دارد تا به کمک شبیه‌سازی عددی و ابزار قدرتمند دینامیک سیالات محاسباتی، رفتار هیدرودینامیکی جریان دوفازی گاز- مایع در فضای بین دو طبقه از نوعی سینی غربالی در مقیاس صنعتی را تعیین کرده و مشخصات جریان از قبیل توزیع سرعت بر روی سینی، کسر حجمی فازهای بخار و مایع در نقاط مختلف، ارتفاع سر کف[3] و ارتفاع مایع زلال[4] در مقاطع موردنظر پیش‌بینی کند. همچنین اثرات دیواره‌بند سینی بر روی پارامترهای هیدرولیکی در نظر گرفته شد. درنهایت با استفاده از نتایج به‌دست آمده، میزان بهینه‌ای از محدوده جداسازی فازی به‌دست آمد.

2- هندسه سینی غربالی

در "شکل 1 و 2"، نمایی از هندسه مربوط به سینی غربالی موردنظر مشخص گردیده است. دامنه محاسباتی مورد بررسی، شامل شامل دو سینی غربالی، فضای بین دو سینی و بخش ناودانی می‌باشد. سیال مایع از ورودی مایع وارد برج شده و بخار یا گاز نیز از منافذ موجود بر روی سینی به داخل برج می آید و با فاز مایع تبادل ممنتوم می‌کند. پس از آن مایع پس از عبور از بند به درون ناودان ریخته شده و به سمت طبقه بعد سینی روانه می‌شود.

از نرم‌افزار سالیدورکس[5] جهت مدل‌سازی سینی، فضای بین طبقات برج تقطیر و بخش ناودانی استفاده شد. سپس مدل موردنظر جهت ایجاد شبکه

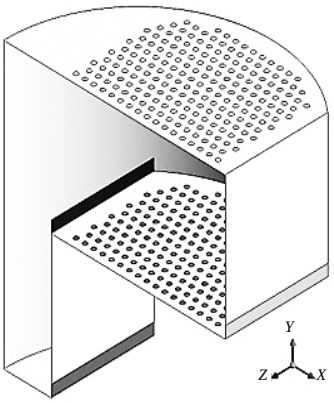

Fig. 1 Isometric view of the simulated sieve tray

شکل 1 نمای ایزومتریک سینی غربالی شبیه‌سازی شده

[2] k-ω SST
[3] Froth height
[4] Clear liquid height
[5] Solidworks

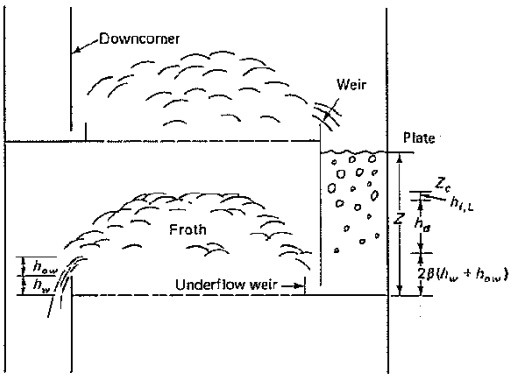

Fig. 2 Cross section view of the space between two trays of distillation column [13]

شکل 2 نمای برش خورده فضای ما بین دو طبقه برج تقطیر [13]

وارد نرم‌افزار گمبیت[1] شد. با توجه به تقارنی که برج نسبت به صفحه XY دارد، یک سمت آن مدل شده و از شرط تقارن[2] برای تحلیل قسمت متناظر آن بهره گرفته شد.

همان‌گونه که در "شکل 3" مشخص است، آرایش منافذ بر روی سینی به گونه‌ای است که مراکز سوراخ‌ها بر روی یک مثلث متساوی الاضلاع قرار بگیرند [13].

ابعاد و جزئیات سینی غربالی پژوهش حاضر در جدول 1 آمده است.

"شکل 4"، نحوه تقسیم‌بندی نواحی مختلف بر روی صفحه سینی را نشان می‌دهد.

3- تولید شبکه

تولید یک شبکه مناسب، تأثیری مستقیم بر نرخ همگرایی، دقت جواب مسئله

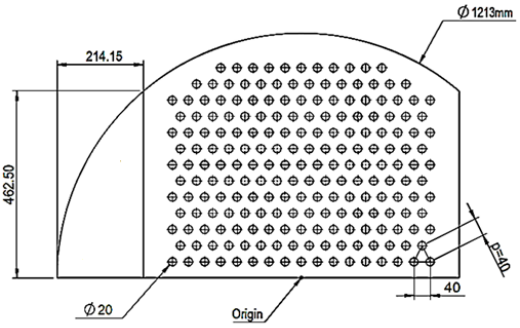

Fig. 3 The position of the holes on the sieve tray

شکل 3 وضعیت قرارگیری سوراخ‌های سینی غربالی

جدول 1 ابعاد سینی غربالی شبیه سازی شده

Table 1 Dimensions of the simulated sieve tray

مشخصه	نماد	مقدار
قطر سینی	D_T	1.213 m
فاصله بین دو سینی	H_T	0.610 m
پهنای بند	l_w	0.925 m
ارتفاع بند	h_w	0.050 m
قطر سوراخ	d_o	0.020 m
مساحت سوراخ نسبت به مساحت ناحیه حباب‌ساز	A_H/A_B	18% کل مساحت

[1] Gambit
[2] Symmetry

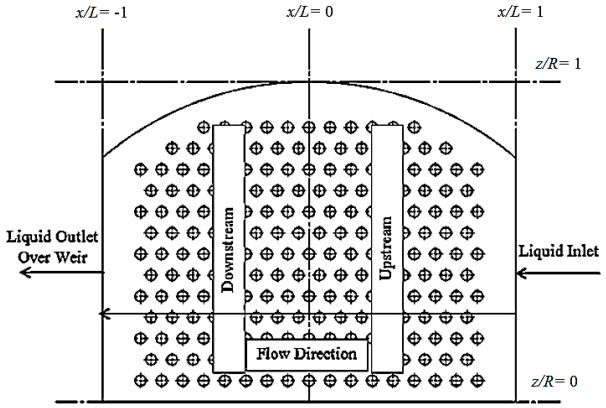

Fig. 4 Different zones on the sieve tray

شکل 4 نواحی مختلف بر روی سینی غربالی

و زمان محاسبات دارد. به‌منظور استفاده از شبکه باسازمان[3]، هندسه به چندین بلوک تقسیم شد تا منجر به تولید شبکه با کیفیت و دقت بهتری شود و به کنترل کیفیت شبکه دسترسی بهتری داشت. "شکل 5"، نمایی از شبکه تولیدی بر روی دامنه محاسباتی هندسه مدنظر را نشان می‌دهد.

در نواحی نزدیک منافذ که هیدرودینامیک جریان پیچیده تر بوده و نیاز به دقت بیشتری در محاسبات می‌باشد، مطابق "شکل 6"، شبکه ریزتر شده و

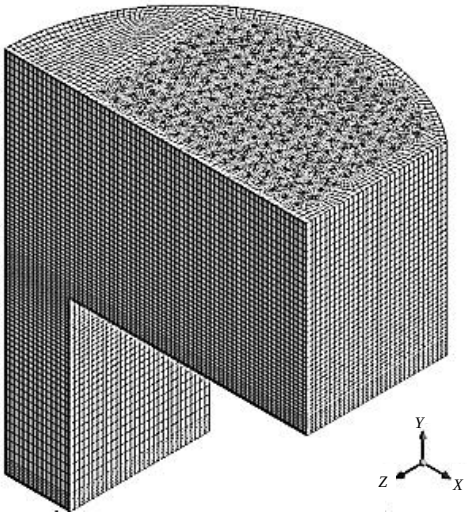

Fig. 5 Structured grid in different zones between sieve trays

شکل 5 شبکه باسازمان بر روی نواحی مختلف بین دو سینی غربالی

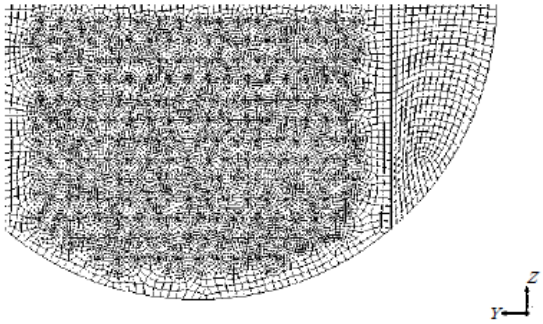

Fig. 6 2D grid applied to the sieve tray deck

شکل 6 شبکه دوبعدی به کار رفته بر روی صفحه سینی

[3] Structured mesh

تعداد سلول‌های بیش‌تری به کار برده شده است.

هم‌چنین در نواحی مرزی دیواره، به‌علت وجود جریان لایه مرزی از شبکه بندی ریزتری استفاده شده است. به‌منظور شبکه‌بندی، از انواع مش شش وجهی منتظم و غیرمنتظم در بلوک‌های مختلف استفاده شد.

4- معادلات حاکم

4-1- مدل دوفازی

جریان دوفازی گاز- مایع بر روی سینی‌های غربالی برج تقطیر، از پیچیده‌ترین حالت‌های جریان سیال در دستگاه‌های فرایندی می‌باشد. جهت مدل‌سازی حرکت فازها بر روی سینی، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، علاوه بر معادلات بقا اندازه جرکت، بسته به شرایط جریان، به مدل‌های تکمیلی از جمله مدل آشفتگی، معادلات ضرائب انتقال اندازه حرکت بین فازها (ضرائب درگ) موردنیاز می‌باشد. در این پژوهش به‌منظور مدل‌سازی جریان دوفاز درون برج تقطیر از دیدگاه اویلری- اویلری استفاده شد. در این مدل، هر فاز پراکنده به‌عنوان یک فاز پیوسته عمل کرده و معادلات ممنتوم و پیوستگی برای هر فاز حل می‌شود. ارتباط این معادلات از طریق فشار و ضرائب تبادل بین فازی صورت می‌گیرد. در برخی از نواحی میدان جریان، کسر حجمی فاز پراکنده بیش‌تر از 10 درصد بود. این روش برای پیش‌بینی رفتار سامانه‌های چند فازی که جزء حجمی فاز پراکنده در آن معمولاً بزرگ‌تر از 10 درصد باشد، مناسب است [14]. به منظور ارتباط بین کسرهای حجمی بین فازی از معادله (1) استفاده می‌شود.

$$\alpha_{\mathrm{L}} + \alpha_{\mathrm{G}} = 1 \tag{1}$$

که در آن α_{G}، کسر حجمی متوسط گاز[1] و α_{L} کسر حجمی متوسط مایع[2] می‌باشد [14]. معادله کسر حجمی فاز گاز را می‌توان به‌صورت رابطه (2) برحسب سرعت سطحی گاز و چگالی گاز و مایع نوشت [15].

$$\alpha_G^{\mathrm{ave}} = 1 - \exp[-12.55\, V_{\mathrm{s}} \left(\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{L}} - \rho_{\mathrm{G}}}{\rho_{\mathrm{L}}}}\right)^{0.91} \quad] \tag{2}$$

مالوین و همکاران [16]، کسر حجمی مایع را به‌صورت نسبت ارتفاع مایع زلال به ارتفاع کف تعریف نمودند.

معادله پیوستگی برای فاز گاز از رابطه (3) تبعیت می‌کند.

$$\frac{\partial(\alpha_{\mathrm{G}}\rho_{\mathrm{G}})}{\partial t} + \nabla(\alpha_{\mathrm{G}}\rho_{\mathrm{G}}V_{\mathrm{G}}) = S_{\mathrm{GL}} \tag{3}$$

در مورد فاز مایع معادله (4) برقرار است.

$$\frac{\partial(\alpha_{\mathrm{L}}\rho_{\mathrm{L}})}{\partial t} + \nabla(\alpha_{\mathrm{L}}\rho_{\mathrm{L}}V_{\mathrm{L}}) = -S_{\mathrm{GL}} \tag{4}$$

در معادلات (3) و (4)، S_{GL}، نرخ انتقال جرم بین فاز گاز و مایع می‌باشد.

معادلات بقای ممنتوم برای فاز مایع به‌صورت رابطه (5) خلاصه می‌شود.

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_{\mathrm{L}}\rho_{\mathrm{L}}V_{\mathrm{L}}) + \nabla\big(\alpha_{\mathrm{L}}(\rho_{\mathrm{L}}V_{\mathrm{L}}V_{\mathrm{L}})\big) &= -\alpha_{\mathrm{L}}\nabla P_{\mathrm{L}} \\ &+ \nabla\left(\alpha_{\mathrm{L}}\mu_{\mathrm{eff,L}}(\nabla V_{\mathrm{L}} + (\nabla V_{\mathrm{L}})^{\mathrm{T}})\right) \\ &+ M_{\mathrm{GL}} + \alpha_{\mathrm{L}}\rho_{\mathrm{L}}g\end{aligned} \tag{5}$$

و برای فاز گاز به صورت رابطه (6) می‌باشد.

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_{\mathrm{G}}\rho_{\mathrm{G}}V_{\mathrm{G}}) + \nabla\big(\alpha_{\mathrm{G}}(\rho_{\mathrm{G}}V_{\mathrm{G}}V_{\mathrm{G}})\big) &= -\alpha_{\mathrm{G}}\nabla P_{\mathrm{G}} \\ &+ \nabla\left(\alpha_{\mathrm{G}}\mu_{\mathrm{eff,G}}(\nabla V_{\mathrm{G}} + (\nabla V_{\mathrm{G}})^{T})\right) \\ &+ M_{\mathrm{GL}} + \alpha_{\mathrm{G}}\rho_{\mathrm{G}}g\end{aligned} \tag{6}$$

[1] Average gas volume fraction
[2] Average liquid volume fraction

در روابط (5) و (6)، V_{L} سرعت مایع و V_{G} سرعت گاز می‌باشد. ویسکوزیته موثر گاز و مایع به‌صورت روابط (7) و (8) می‌باشد.

$$\mu_{\mathrm{eff,G}} = \mu_{\mathrm{Laminar,G}} + \mu_{\mathrm{Turbulent,G}} \tag{7}$$

$$\mu_{\mathrm{eff,L}} = \mu_{\mathrm{Laminar,L}} + \mu_{\mathrm{Turbulent,L}} \tag{8}$$

و M_{GL}، نماینده نیروهای بین سطحی بین دوفاز بوده و طبق معادله (9) قابل بیان است [14].

$$M_{\mathrm{GL}} = -\frac{3}{4}\frac{C_{\mathrm{D}}}{d_{\mathrm{G}}}\alpha_{\mathrm{L}}\rho_{\mathrm{L}}|V_{\mathrm{G}} - V_{\mathrm{L}}|(V_{\mathrm{G}} - V_{\mathrm{L}}) \tag{9}$$

در رابطه (9)، d_{G} قطر میانگین حباب و C_{D}، ضریب درگ می‌باشد. در پژوهش حاضر به منظور محاسبه ضریب درگ، از رابطه (10) استفاده شد [14].

$$C_{\mathrm{D}} = \frac{4}{3}\frac{\rho_{\mathrm{L}} - \rho_{\mathrm{G}}}{\rho_{\mathrm{L}}}\, g d_{\mathrm{G}} \frac{1}{V_{\mathrm{s}}^2} \tag{10}$$

فیشر و همکاران [17] ضریب درگ را 0.44 در نظر گرفتند. این مقدار برای حباب‌های بزرگ و جریان سیال آشفته مناسب است.

4-2- مدل آشفتگی

مدل آشفتگی عبارت است از یک رویه محاسباتی برای در نظر گرفتن سامانه معادلات جریان متوسط، به‌گونه‌ای که کم و بیش بخش وسیعی از مسائل جریان را بتوان با آن حل کرد. برای جریان‌های آشفته، هر کمیت به صورت جمع یک ترم میانگین و یک ترم نوسانی قابل رهگیری می‌باشد.

در این پژوهش به منظور مدل‌سازی آشفتگی جریان مایع و گاز از مدل کی اپسیلون آر ان جی[3] بهره گرفته شد. این مدل اثرات چرخش جریان حاصل از آشفتگی را به دقت در نظر گرفته و برای جریان‌های تحت تنش زیاد بسیار مناسب است. ضمن این‌که از نظر هزینه‌های زمانی و عملیاتی حل، مقرون به‌صرفه می‌باشد. این مدل برمبنای دو دو ترم انرژی جنبشی آشفته (k) و نرخ اتلافات (ε) عمل می‌کند و در آن با حل دو معادله انتقال مجزا، الگوهای طولی و سرعت جریان درهم مستقلا محاسبه می‌گردند. معادلات (11) و (12)، روش محاسبه دو پارامتر این مدل را نشان می‌دهد.

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \tag{11}$$

$$\varepsilon = \upsilon\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_k}\right) \tag{12}$$

با دانستن k و ε، می‌توان با استفاده از رابطه (13)، ویسکوزیته آشفته سینماتیک را به دست آورد:

$$\upsilon_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{13}$$

در رابطه (13)، C_μ یک ضریب تجربی بوده و مقدار آن برابر 0.09 می‌باشد و k و ε از حل دو معادله (14) و (15) در کنار معادلات ناویر استوکس به دست می‌آید [15].

$$\frac{\partial k}{\partial \mathrm{t}} + V_i\frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\upsilon_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right) + \upsilon_t\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \varepsilon \tag{14}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathrm{t}} + V_i\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\upsilon_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right) + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\upsilon_t\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial V_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{15}$$

ضرائب ثابت نیز برابرند با:

$$\sigma_k = 1.0 \quad , \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad , \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad , \quad C_{2\varepsilon} = 1.92$$

4-3- ارتفاع مایع زلال

یکی از پارامترهای بسیار مهم جهت تشخیص عملکرد سینی‌های برج تقطیر،

[3] K-ε RNG

مقدار مایع خالص جمع شده بر روی سینی می‌باشد که به آن ارتفاع مایع زلال[1] گفته می‌شود. مقدار مایع بر روی سینی، با مقدار نرخ جریان و ابعاد بند بستگی دارد. به منظور بهبود عملکرد جداسازی، سعی می‌شود تا مقدار این کمیت افزایش یابد. طبق تئوری لاکت [18]، ارتفاع مایع زلال از انتگرال‌گیری عمودی کسر حجمی مایع بر روی سینی مطابق رابطه (16) به‌دست می‌آید.

$$h_{\mathrm{cl}} = \int \alpha_{\mathrm{ave}} dy = \int \left(\frac{\alpha_i dA_{\mathrm{B}}}{A_{\mathrm{B}}}\right) dy = \frac{1}{A_{\mathrm{B}}} \int \left(\int \alpha_i dA_{\mathrm{B}}\right) dy = \frac{\int \alpha dv}{A_{\mathrm{B}}} = \frac{\sum \alpha_i v_i}{A_{\mathrm{B}}} \tag{16}$$

در معادله (16)، v_i حجم مربوط به سلول محاسباتی i ام و A_{B} برابر با مساحت ناحیه حبابی می‌باشد.

کلول [19] از رابطه (17) جهت تخمین ارتفاع مایع زلال استفاده نمودند.

$$h_{\mathrm{cl}} = \alpha_{\mathrm{L,ave}}\left[h_{\mathrm{w}} + \frac{0.73}{C_{\mathrm{b}}^{0.67}}\left(\frac{Q_{\mathrm{L}}}{\alpha_{\mathrm{L,ave}} l_{\mathrm{w}}}\right)^{0.67}\right] \tag{17}$$

در معادله (17)، h_{w} و l_{w} به ترتیب ارتفاع و عرض بند[2]، Q_{L} گذر حجمی مایع می‌باشد. ضریب C_{b} با توجه به ارتفاع مایع بالاسر بند که با h_{ow} نمایش داده می‌شود طبق روابط (18) و (19) محاسبه می‌گردد [19].

$$C_{\mathrm{b}} = 0.61 + 0.08\frac{h_{\mathrm{ow}}}{h_{\mathrm{w}}} \quad , \quad \frac{h_{\mathrm{ow}}}{h_{\mathrm{w}}} \le 8.14 \tag{18}$$

$$C_{\mathrm{b}} = 1.06 + \left(1 + \frac{h_{\mathrm{ow}}}{h_{\mathrm{w}}}\right)^{1.5} \quad , \quad \frac{h_{\mathrm{ow}}}{h_{\mathrm{w}}} > 8.14 \tag{19}$$

5- روش حل معادلات و شرایط مرزی

به‌منظور جفت‌سازی سرعت و فشار، از الگوی سیمپل برای هرفاز[3] استفاده شد. همچنین به‌منظور همگرایی هر چه بهتر، برای حل معادلات مربوط به ممنتوم، کسر حجمی و انرژی جنبشی آشفته، حل ابتدا با روش آپویند مرتبه اول[4] شروع شده و پس از گذشت چند تکرار و یکنواخت‌تر شدن حل، ادامه حل با استفاده از روش آپویند مرتبه دوم انجام شد. این ترکیب منجر به حلی دقیق و پایدار می‌شود. حداکثر ضرایب زیر تخفیف[5] که برای کنترل حل و همگرایی استفاده شدند برابر با 0.8 بود. با توجه به گذرا بودن شرایط حل، انتخاب گام زمانی و تعداد آن و در نتیجه زمان موردنیاز برای حل، اهمیت بالایی دارد. از رابطه (20) می‌توان برای تخمین گام زمانی بهره گرفت [16].

$$\Delta t = \frac{v_{\mathrm{cell,min}}^{1/3}}{(V_{\mathrm{inlet}})_{\mathrm{L}}} \tag{20}$$

که در آن $v_{\mathrm{cell,min}}$ حجم کوچترین سلول محاسباتی می‌باشد. در این پژوهش گام زمانی بین 0.001 تا 0.005 ثانیه در نظر گرفته شد. معیار همگرایی حل، پیوستگی بود؛ به‌گونه‌ای که مجموع مقادیر دبی جرمی در ورود و خروج به شرایط بدون نوسان برسند. حل زمانی که مقادیر مانده[6] مربوط به پیوستگی زمانی که به مقداری کمتر از 0.001 می‌رسید، وارد گام زمانی بعدی می‌شد.

شرایط مرزی، امری ضروری در مدل ریاضی یک مسئله می‌باشد. صورت حدس اولیه شرایط جریان، در همگرایی حل و سرعت آن تأثیر مهمی دارد. در این پژوهش، با توجه به اطلاعات در دسترس برای اعتبارسنجی نتایج، از آب به‌عنوان فاز مایع و هوا به‌عنوان فاز گاز استفاده شد. هوا به‌صورت یک گاز ایده‌آل فرض شد. همچنین فرض بر این بود که آب فاز پیوسته بوده و جریان گاز به‌صورت فاز ثانویه به‌صورت حباب‌هایی وجود دارد. با توجه به مطالعه تجربی صورت گرفته توسط بنت و همکاران و داده‌های به‌دست آمده، برای فاز مایع، دبی حجمی مایع برای سه مقدار وجود داشت. به همین علت برای ورودی مایع به داخل برج تقطیر، از شرط مرزی سرعت ورودی استفاده شد و مقادیر سرعت به ازای دبی حجمی‌های مطابق رابطه (21) محاسبه شد.

$$(V_{\mathrm{inlet}})_{\mathrm{L}} = \frac{Q_{\mathrm{L}}}{(A_{\mathrm{inlet}})_{\mathrm{L}}} \tag{21}$$

مساحت ورودی مایع $(A_{\mathrm{inlet}})_{\mathrm{L}}$ به‌صورت حاصل‌ضرب ارتفاع بند در طول بند قابل محاسبه می‌باشد. هم‌چنین جسیت و همکاران [20] از رابطه (22) جهت پیش‌بینی سرعت مایع در ورود بهره گرفتند.

$$(V_{\mathrm{inlet}})_{\mathrm{L}} = \frac{1.5 Q_{\mathrm{L}}}{(A_{\mathrm{inlet}})_{\mathrm{L}}}\left[1 - \left(\frac{2z}{l_{\mathrm{w}}}\right)^2\right] \tag{22}$$

فرض بر این است که در ورودی مایع، مخلوط تنها شامل فاز مایع می‌باشد. لذا کسر حجمی فاز گازی شکل در این مرز برابر صفر قرار داده می‌شود. گاز از منافذ موجود بر روی سینی میانی وارد برج می‌شود. بنابراین مجموع سوراخ‌های سینی به‌عنوان سطح ورود گاز در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌شود که کسر حجمی گاز برابر یک می‌باشد. برای فاز گاز، از فاکتور جریان گاز برای معرفی گذر حجمی آن استفاده می‌کنند که تابعیتی از چگالی گاز و سرعت سطحی آن داشته و رابطه آن مطابق معادله (23) ارائه می‌شود [13].

$$F_{\mathrm{S}} = V_{\mathrm{s}}\sqrt{\rho_{\mathrm{G}}} \tag{23}$$

حدس اولیه سرعت سطحی گاز براساس مساحت ناحیه حباب‌ساز و سرعت ورود گاز انجام گرفت. جسیت و همکاران فرض کردند اگر میزان دبی جرمی به صورت یکسان و یکنواخت از هر سوراخ وارد برج بشود، سرعت ورود گاز از رابطه (24) تبعیت می‌کند.

$$(V_{\mathrm{inlet}})_{\mathrm{G}} = \left(\frac{V_{\mathrm{S}} A_{\mathrm{B}}}{2N_{\mathrm{H}}}\right)\frac{1}{A_{\mathrm{o}}} \tag{24}$$

که در معادله (24)، N_{H} تعداد منافذ و A_{o} مساحت منافذ می‌باشد.

مطابق "شکل 7"، در مرزهای خروجی، از شرط فشار خروجی استفاده شده است. منافذ موجود بر روی سطح زیرین سینی فوقانی به عنوان خروجی گاز و سطح شده در شکل، زیر ناودانی به عنوان سطح خروجی فاز مایع در نظر گرفته شده است. شرط اولیه این است که در مرز خروجی مایع، کسر حجمی گاز صفر و در خروجی گاز، کسر حجمی گاز برابر یک باشد. در خروجی مایع فشار برابر فشار هیدرواستاتیک ناشی از ارتفاع مایع قرار گرفته

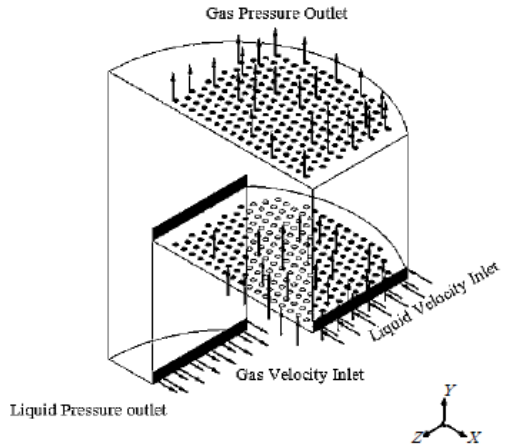

Fig. 7 Boundary conditions on domains

شکل 7 شرایط مرزی بر روی دامنه‌ها

[1] Clear liquid height
[2] Weir
[3] Phase Coupled SIMPLE
[4] First order upwind
[5] Under relaxation factor
[6] Residual

بر روی سطح پایینی ناودان می‌باشد. فشار در منافذ خروجی سطح بالایی نیز برابر با فشار جو در نظر گرفته شد. بر روی دیواره‌ها نظیر بند و دیواره‌های ناودان از شرط عدم لغزش استفاده شد.

6- نتایج و بحث

6-1- حل تک فاز

به منظور تحلیل جریان بر روی سینی، ابتدا یک بار جریان تک‌فاز آب بدون تزریق هوا شبیه‌سازی شد تا نحوه پر شدن سینی و حرکت سیال درون برج مشخص و مقادیر سرعت و فشار در نواحی مختلف سنجیده شود. پس از همگرایی نتایج، در بار دیگر جریان دوفاز همراه با تزریق هوا مورد بررسی قرار گرفت. "شکل 8" کانتور سرعت مایع در صفحه تقارن را نشان می‌دهد.

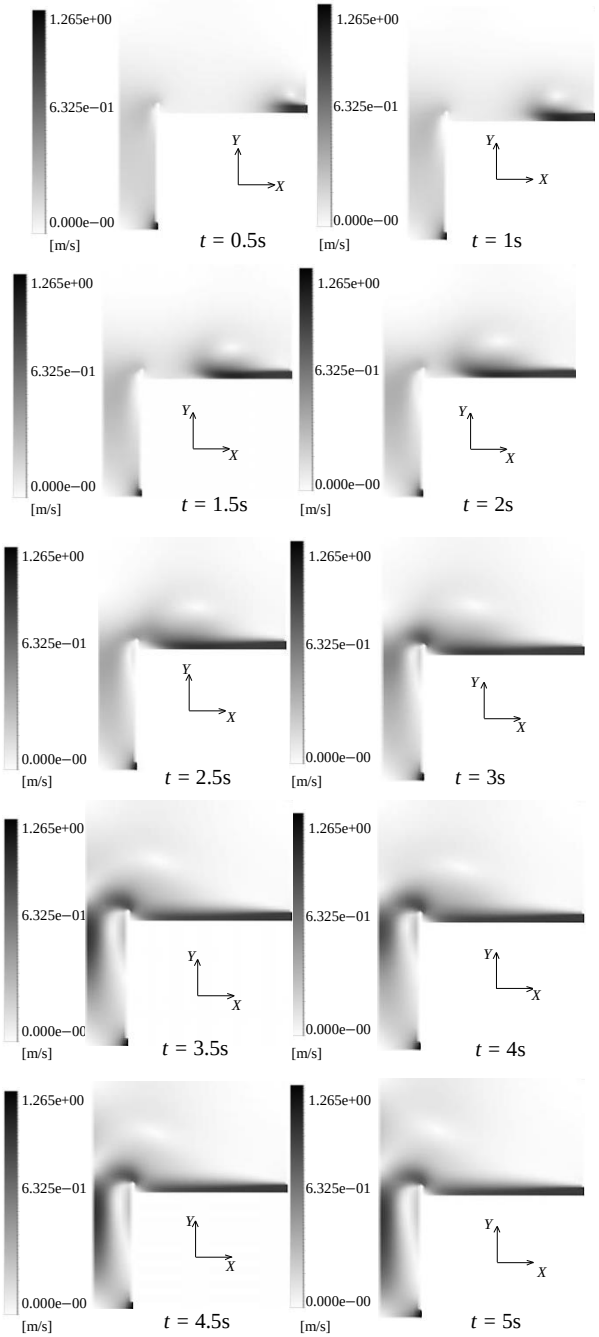

Fig. 8 Liquid velocity contour in the symmetry plane for liquid for one-phase flow

شکل 8 کانتور سرعت جریان مایع در صفحه تقارن برای جریان تک فازی

6-2- استقلال حل از شبکه

گزارش استقلال از تعداد شبکه، از ملزومات یک حل عددی می‌باشد. تعداد مناسب سلول‌های شبکه مورد استفاده بایستی در طی یک فرایند تکراری حل، به‌دست آید. به‌طوری که با ریزتر کردن تعداد سلول به‌خصوص در نواحی با گرادیان شدید کمیت یا لایه مرزی، تغییر چندانی نکند. در ضمن بایستی توجه داشت که افزایش بیش از حد سلول‌ها علاوه بر بالابردن هزینه محاسباتی و افزایش زمان حل، موجب انباشت خطا در حل عددی شده و دقت مسئله را کاهش خواهد داد.

در این پژوهش جهت استقلال حل از شبکه، چهار نوع شبکه با تعداد سلول‌های161720، 272384، 353886 و 604842 مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه نتایج آن‌ها با هم، از معیار سرعت فاز گاز در امتداد راستای حرکت جریان مایع ورودی برای یک دبی مایع ورودی و فاکتور جریان گاز مشخص استفاده شد. همان‌گونه که در "شکل‌های 9 و 10" نشان داده شده است، نتایج مبین آن است که پروفیل سرعت از شبکه 353886 تا شبکه 604842 تغییر چندانی نداشته است. بنابراین با توجه به اهمیت حجم محاسبات و هزینه زمانی، از شبکه‌بندی 353886 به‌عنوان شبکه معیار در شبیه‌سازی استفاده شد.

6-3- اعتبار سنجی نتایج

به منظور اعتبارسنجی و اطمینان از صحت کار عددی انجام شده، نتایج با داده‌های آزمایشگاهی سولاری و بل [21] و و رابطه ارائه شده توسط کلول [22] مورد مقایسه قرار گرفت. به منظور مقایسه نتایج عددی به دست آمده با داده‌های تجربی مذکور، از معیار ارتفاع مایع زلال در یک دبی حجمی ثابت برای مایع و به ازای 4 فاکتور جریان گاز اشاره شده در جدول 2 مطابق "شکل 11" استفاده شد.

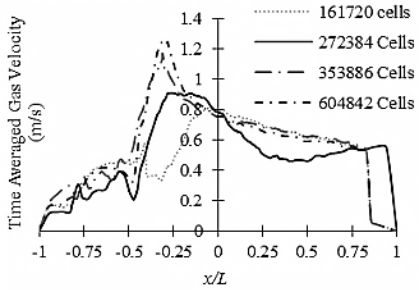

Fig. 9 Time averaged gas velocity distribution for $Q_L = 0.0178\ \frac{m^3}{s}$

شکل 9 توزیع متوسط زمانی سرعت گاز به ازای $Q_L = 0.0178\ \frac{m^3}{s}$

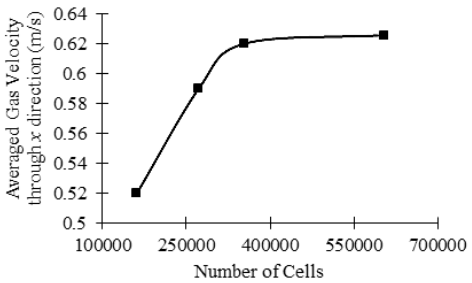

Fig. 10 Mesh independency according to averaged gas velocity for $Q_L = 0.0178\ \frac{m^3}{s}$ and $F_S = 0.801\ (\frac{m}{s})(\frac{kg}{m^3})^{0.5}$

شکل 10 استقلال حل از شبکه با توجه به میانگین سرعت گاز به ازای $Q_L = 0.0178\ \frac{m^3}{s}$ و $F_S = 0.801\ (\frac{m}{s})(\frac{kg}{m^3})^{0.5}$

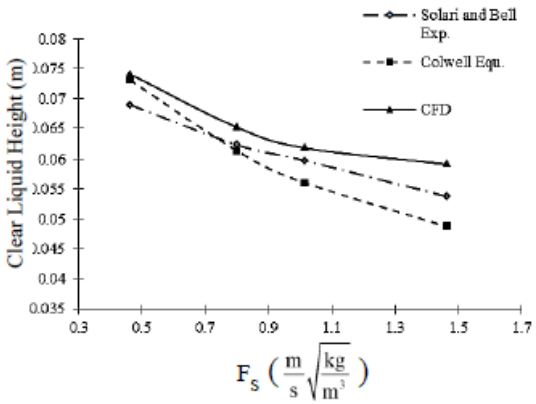

Fig. 11 Result validation using clear liquid height for $Q_L = 0.0178\ \frac{m^3}{s}$

شکل 11 اعتبارسنجی نتایج با استفاده از ارتفاع مایع زلال به ازای $Q_L = 0.0178\ \frac{m^3}{s}$

جدول 2، میزان انحراف حاصل از کار عددی را نسبت به نتایج رابطه کلول و نتایج آزمایشگاهی سولاری و بل را نشان می‌دهد.

به‌منظور تقریب زدن ارتفاع مایع زلال بالای بند در کار شبیه‌سازی عددی، میانگین کسر حجمی مایع موجود در بالای ناحیه حباب‌دار بالاسر سینی پایینی در فاصله قرارگیری دو سینی ضرب شد و عدد به دست آمده به عنوان ارتفاع مایع زلال ارائه گردید.

4-6- هیدرودینامیک جریان

در این بخش، نتایج مربوط به توزیع سرعت، کسر حجمی "شکل 12 و 13"، توزیع مایع بر روی صفحه بالای سطح سینی و صفحه تقارن آن را در لحظات مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مایع پس از ورود به سینی در تقابل با جریان گاز تزریق شده از طریق منافذ قرار گرفته و منجر به ایجاد یک جریان گردابه‌ای در قسمت بالادست جریان ورودی می‌شود. پس از گذشت جریان از بالادست و ورود به پایین دست، جریان مایع به واسطه برخورد به جریان گاز در جهت حرکت گاز به سرعتش افزوده می‌شود. در حدود لحظه t=3s جریان در آستانه عبور از دیواره بند بوده و به سمت ناودانی سقوط می‌کند. بخشی دیگر از مایع که دارای ممنتوم کافی بوده پس از عبور از بند و برخورد با دیواره برج تقطیر مجدد به روی سینی بازگشته و یک جریان ثانویه را ایجاد می‌کند که همین بخش منجر به ایجاد گردابه و به‌وجود آمدن ناحیه کف‌آلود می‌شود.

همان‌گونه که در "شکل 13" دیده می‌شود، از لحظه t=6s به بعد، مایع

جدول 2 ارتفاع مایع زلال و انحراف آن از داده‌های آزمایشگاهی به ازای $Q_L = 0.0178\ \frac{m^3}{s}$

Table 2 Clear liquid height and its deviation to experimental data for $Q_L = 0.0178\ \frac{m^3}{s}$

F_S ($\frac{m}{s}\sqrt{\frac{kg}{m^3}}$)	ارتفاع مایع زلال h_{cl} (m)			درصد خطا نسبت به نتایج تجربی سولاری و بل	درصد خطا نسبت به معادله کلول
	CFD	سولاری و بل	کلول		
0.462	0.0741	0.0690	0.0731	7.39	1.37
0.801	0.0652	0.0623	0.0613	4.65	6.36
1.015	0.0618	0.0597	0.0560	3.52	10.36
1.464	0.0591	0.0537	0.0478	10.06	21.36
میانگین خطا				6.40	9.86

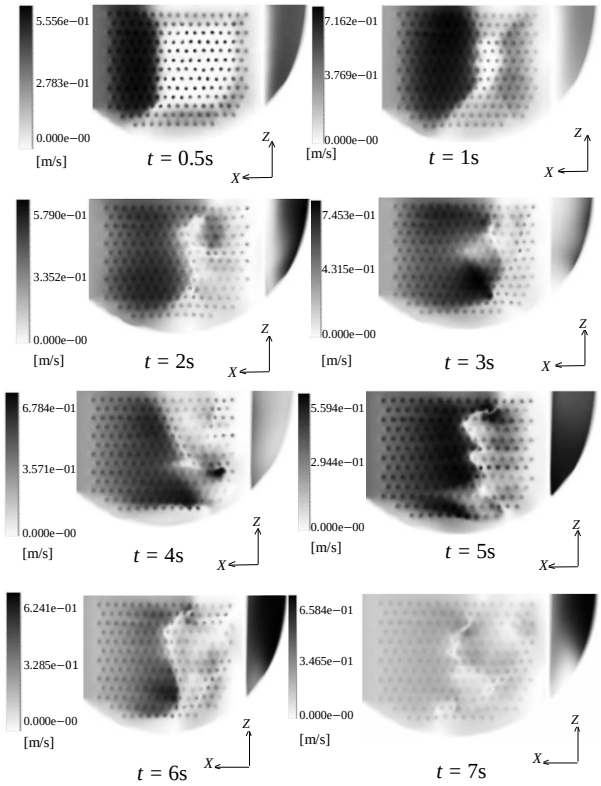

Fig. 12 Superficial liquid velocity on the tray deck in different time

شکل 12 توزیع سرعت مماسی مایع بر روی صفحه سینی در زمان‌های مختلف

از روی دیواره بند عبور کرده به سمت ناودان سرازیر می‌شود. مایع در ناحیه‌ای در میانه خروجی در نظر گرفته شده برای فاز مایع، بیش‌ترین سرعت را دارا می‌باشد. هم‌چنین بیش‌ترین برهم‌کنش بین مایع و گاز در مرکز سینی می‌باشد.

"شکل 14"، تغییرات سرعت مایع در راستای عمود بر حرکت جریان ورودی به درون سینی در فاصله 25 میلی‌متری از سطح سینی را نشان می‌دهد. "شکل 14" دو واقعیت را بیان می‌کند. اول آن‌که با فاصله گرفتن از مرکز سینی و نزدیک شدن به دیواره‌ها، سرعت مایع کاهش می‌یابد و در مرکز بیش‌ترین مقدار را دارد. علت این امر، وجود شرط عدم لغزش در دیواره‌های مجاور و وجود جریان چرخشی و بازگشتی و گردابه در این ناحیه می‌باشد. دوم آن‌که اثر تغییرات سرعت گاز ورودی بر روی سرعت جریان مایع نمایان است و مشخص است که با کاهش یافتن شدت جریان گاز، توزیع سرعت تقریبا همان‌گونه بوده ولی مقدار کلی آن کاهش می‌یابد. همچنین پروفیل سرعت دارای فرم نوسانی می‌باشد. علت این امر را می‌توان در آرایش منافذ سینی غربالی جست‌وجو کرد. در محل‌هایی که جریان مایع در تداخل با جریان گازی قرار می‌گیرد، سرعت آن افزایش می‌یابد.

"شکل 15"، تغییرات سرعت گاز را در راستای عمود بر راستای حرکت جریان مایع نشان می‌دهد. در نزدیکی مرکز سینی سرعت گاز، کم‌ترین مقدار را دارا می‌باشد. این موضوع به علت غالب بودن جریان مایع در این ناحیه می‌باشد.

"شکل 16"، اثر تغییرات فاکتور جریان گاز را بر روی افت فشار جریان مایع بر روی سینی نشان می‌دهد.

در "شکل‌های 17 و 18"، نسبت حجمی متوسط مایع در طول دو خط عمود بر ورودی و خروجی و موازی با آن ارائه شده است. "شکل 17" نشان

می‌دهد که میزان تجمع مایع در مرکز سینی و اطراف آن در نزدیکی دیواره ستون تقطیر بیش‌تر از نواحی دیگر است. در $z/R=1$ مایع جریان غالب بوده و بیش‌ترین سرعت را نیز دارا می‌باشد. در اطراف سینی نیز به علت عدم وجود

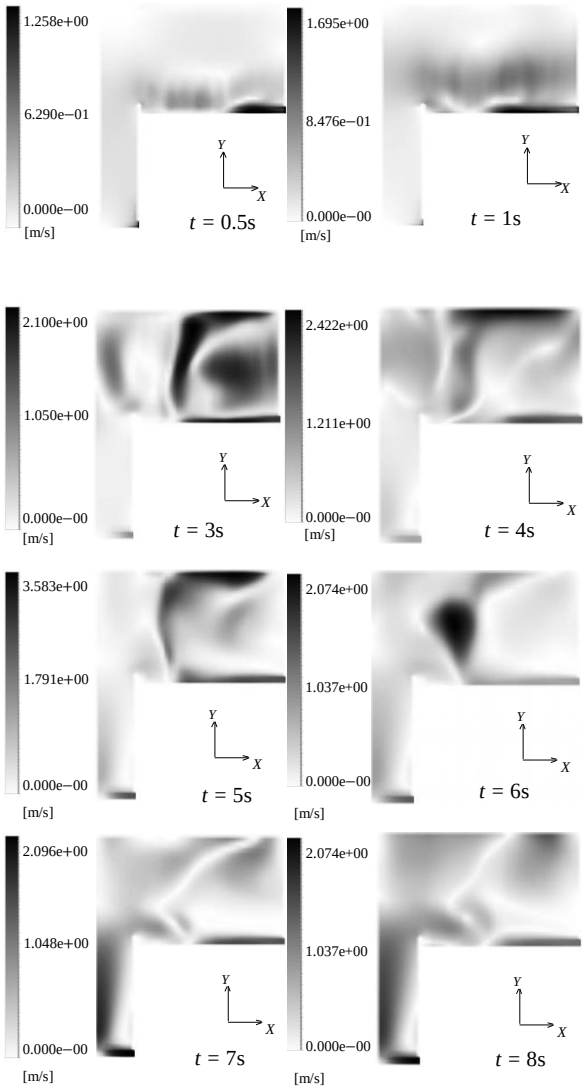

Fig. 13 Liquid velocity distribution in the symmetry plane in different time

شکل 13 نحوه توزیع سرعت مایع در صفحه تقارن سینی در لحظات مختلف

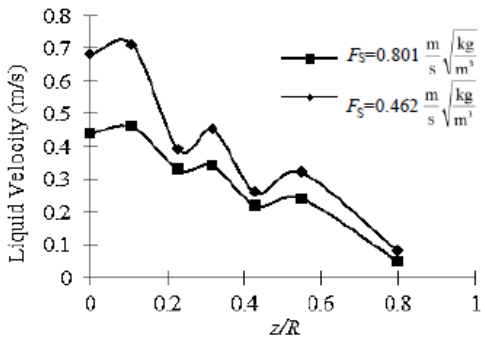

Fig. 14 Liquid velocity changes in upstream on a plane 25 mm above tray deck for $Q_L = 0.0178\ \frac{m^3}{s}$

شکل 14 تغییرات سرعت مایع در بالادست جریان بر روی صفحه‌ای 25 میلی‌متر بالاتر از سطح سینی به ازای $Q_L = 0.0178\ \frac{m^3}{s}$

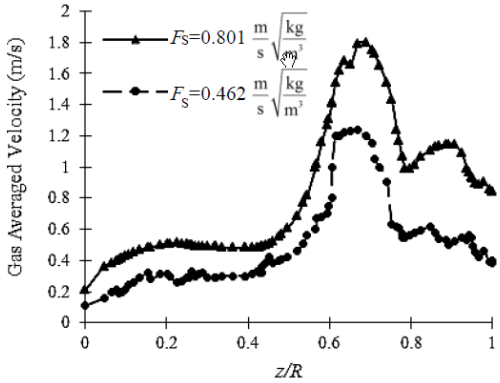

Fig. 15 Gas velocity changes in upstream on a plane 25 mm above tray deck for $Q_L = 0.0178\ \frac{m^3}{s}$

شکل 15 تغییرات سرعت گاز در بالادست جریان بر روی صفحه‌ای 25 میلی‌متر بالاتر از سطح سینی به ازای $Q_L = 0.0178\ \frac{m^3}{s}$

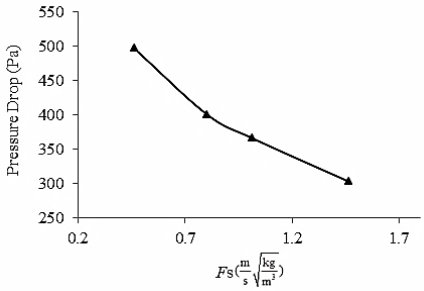

Fig. 16 Effect of gas flow factor on flow pressure drop for $Q_L = 0.0694\ \frac{m^3}{s}$

شکل 16 اثر فاکتور جریان گاز بر روی افت فشار جریان روی سینی به ازای $Q_L = 0.0694\ \frac{m^3}{s}$

منافذ و همچنین ایجاد جریان برگشتی مایع، میزان مایع جمع شده بیش‌تر خواهد بود. دلیل نوسانات کسر حجمی مایع موجود در فاصله $z/R=0$ و $z/R=1$ را می‌توان به وجود سوراخ‌ها و جریان گاز تزریقی نسبت داد. در هنگام عبور از روی منافذ، جریان گازی غالب بوده و کسر حجمی مایع کاهش می‌یابد. کم‌ترین میزان کسر حجمی مایع در حدود فاصله $z/R=0.3$ به وقوع پیوسته است.

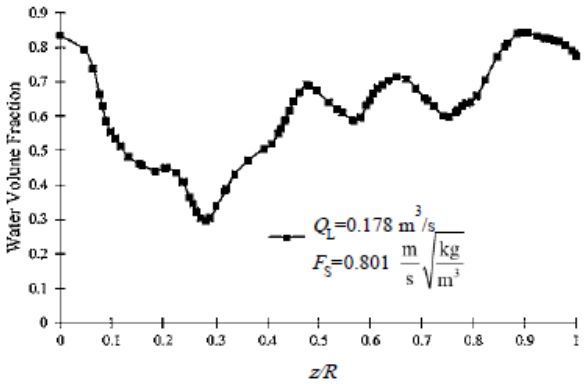

Fig. 17 Liquid volume fraction distribution perpendicular to inlet liquid flow direction on a plane 25 mm above tray deck

شکل 17 توزیع کسر حجمی مایع در راستای عمود جریان مایع ورودی بر روی صفحه‌ای 25mm بالاتر از سطح سینی

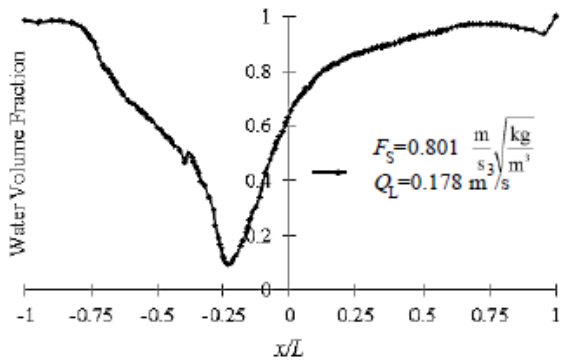

Fig. 18 Liquid volume fraction distribution along the inlet liquid flow direction on a plane 25 mm above tray deck

شکل 18 توزیع کسر حجمی مایع در راستای جریان مایع ورودی بر روی صفحه‌ای 25mm بالاتر از سطح سینی

"شکل 18"، توزیع مایع را از ورودی مایع تا نزدیکی بند و سرریز به ناودانی نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رود، میزان مایع در ورود بیشینه مقدار خود را داشته و به تدریج با فاصله گرفتن از بالادست جریان و حرکت به سمت پایین دست، از میزان آن کاسته شده تا در مرکز سینی میزان آن به کم‌ترین مقدار خود در حدود 0.09 می‌رسد. در این ناحیه، جریان گاز جریان غالب می‌باشد. از این نقطه به بعد، با ورود جریان به پایین‌دست، بر میزان مایع بر روی سینی افزوده شده تا مجدد در نزدیکی دیواره بند به بیشینه مقدار خود برسد.

5-6- اثر دبی‌های ورودی بر روی پارامترهای هیدرولیکی سینی

به منظور رسیدن به محدوده بهینه عملکرد سینی‌های غربالی، به تحلیل و بررسی دو پارامتر هیدرولیکی مهم جریان یعنی ارتفاع مایع زلال و ارتفاع ناحیه سرکف نیاز است. برای جداسازی هر چه بهتر گاز از مایع، باید ارتفاع مایع زلال را بالا نگه داشت از طرفی دیگر، ارتفاع ناحیه سرکف، معیاری برای اختلاط گاز و مایع بر روی سینی می‌باشد. جهت تخمین اندازه این ناحیه، از کف سینی پایینی به سمت سینی بالا حرکت کرده و جایی که در آن کسر حجمی مایع کم‌تر از 10 درصد شود، به عنوان ارتفاع ناحیه سرکف معرفی می‌شود. "شکل 19"، ارتفاع مایع زلال و ناحیه سر کف را بر روی سینی نشان می‌دهد.

"شکل 20"، نحوه تغییرات کسر حجمی مایع را با فاصله گرفتن از سطح سینی به نمایش کشیده است. با فاصله گرفتن از سطح سینی، میزان مایع بر روی آن در ابتدا به سرعت کاهش یافته و پس از عبور از ناحیه کف‌آلود میزان

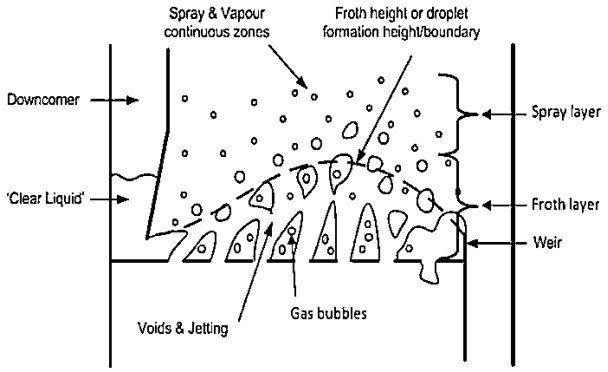

Fig. 19 Clear liquid and froth layer formation on the sieve tray [13]

شکل 19 نحوه شکل‌گیری مایع زلال و ناحیه کف بر روی سینی غربالی [13]

آن به کم‌ترین مقدار می‌رسد و تا سطح سینی بعد به همین شکل ادامه می‌یابد. از این نمودار می‌توان به ارتفاع ناحیه سرکف پی برد.

"شکل 21"، اثر میزان تزریق گاز به درون برج را بر روی میانگین کسر حجمی مایع نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در یک دبی حجمی مایع مشخص، افزایش سرعت گاز ورودی به درون برج و جریان یافتن آن بر روی سینی باعث کاهش میزان کسر حجمی مایع می‌گردد.

همان‌گونه که در "شکل 22" مشاهده می‌شود، افزایش سرعت گاز و به تبع آن دبی ورودی جریان گاز و فاکتور جریان گاز موجب افزایش ارتفاع ناحیه کف‌آلود بر روی سینی غربالی می‌شود. دلیل این امر، آن است که بر هم‌کنش بین فاز مایع و گاز بیش‌تر شده و مایع به ارتفاعات بالاتری از سینی

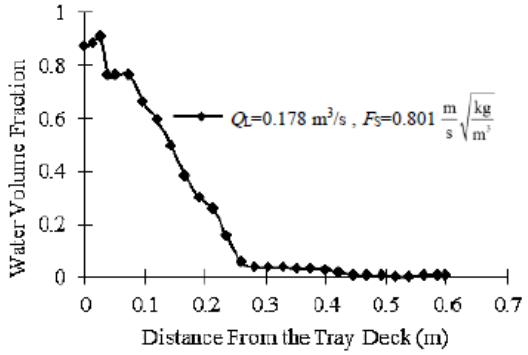

Fig. 20 Liquid volume fraction changes by distance from the tray deck

شکل 20 تغییرات میزان مایع بر روی سینی برحسب فاصله از سطح سینی

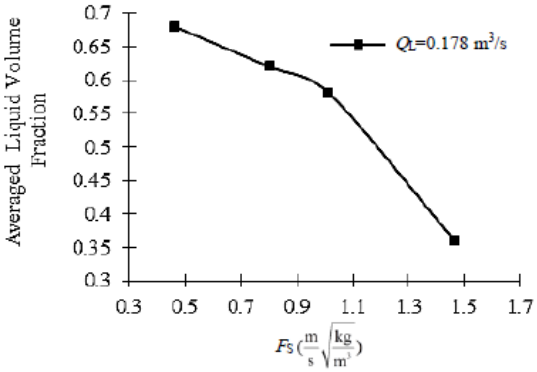

Fig. 21 Averaged liquid volume fraction changes relative to gas flow factor

شکل 21 تغییرات متوسط کسر حجمی مایع نسبت به فاکتور جریان گاز

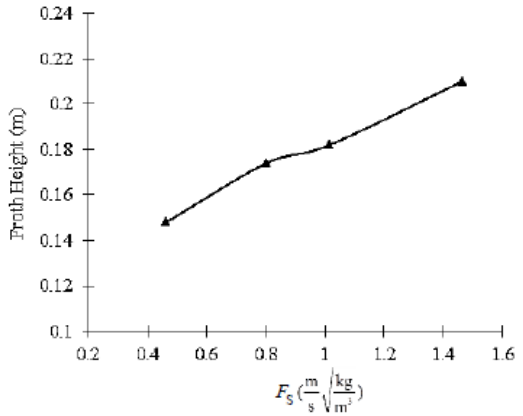

Fig. 22 Effect of gas flow factor on the froth height

شکل 22 اثر فاکتور جریان گاز بر روی ارتفاع سر کف

منتقل شود. هرچه میزان جریان گاز تزریقی به درون برج بیش‌تر شود، میزان تلاطم بر روی سینی غربالی بیش‌تر شده و این امر موجب به‌وجود آمدن ناحیه کف‌آلود بزرگ‌تری بر روی سینی غربالی می‌شود.

علاوه بر اثر جریان گاز بر روی افزایش ارتفاع ناحیه‌آلود، افزایش جریان مایع نیز اثر مشابهی را بر روی این ارتفاع می‌گذارد. نکته قابل توجهی که از نتایج می‌توان برداشت کرد، آن است که افزایش دبی جریان مایع اثر بیشتری بر روی ارتفاع کف نسبت به جریان وردی گاز دارد. "شکل 23"، اثر افزایش سرعت مایع ورودی را بر روی میزان ناحیه کف‌آلود برحسب جریان گاز نشان می‌دهد.

در "شکل 24"، در فاکتور جریان $0.801\ \mathrm{m/s}\sqrt{\mathrm{kg/m^3}}$ برای گاز، اثر دبی حجمی ورودی مایع بر هیدرودینامیک جریان بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش دبی حجمی مایع در ورود، میزان ارتفاع مایع زلال افزایش می‌یابد. "شکل 24"، نتایج حاصل از شبیه سازی و انحراف آن از نتایج حاصل از رابطه کلول و نتایج تجربی سولاری و بل را نشان می‌دهد.

6-6- اثر هندسه بند

به منظور در نظر گرفتن اثرات هندسه بند، یک‌بار به ازای پهنای ثابت بند به میزان 0.925 متر، میزان ارتفاع مایع زلال بر روی سینی غربالی برای سه ارتفاع دیواره بند با اندازه‌های صفر، 50 و 100 میلی‌متر بررسی شد. بار دیگر، با ثابت نگه داشتن ارتفاع بند به میزان 50 میلی‌متر، اثرات تغییر عرض بند بر روی پارامتر هیدرولیکی سینی غربالی برج تقطیر بررسی شد. نمونه هندسه‌های بررسی شده در "شکل 25 " نشان داده شده است.

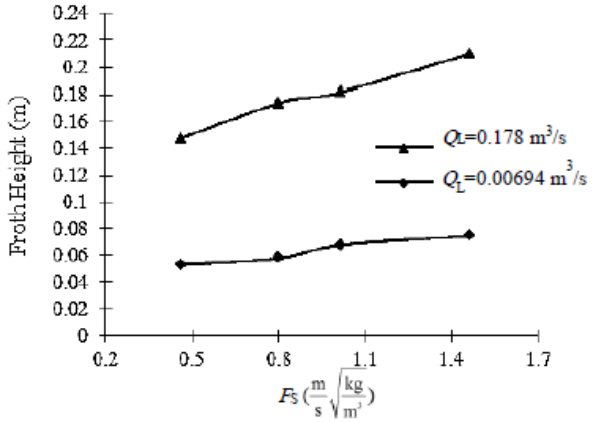

Fig. 23 Effect of inlet liquid and gas flow rate on the froth height

شکل 23 اثر دبی مایع و گاز ورودی بر روی ارتفاع سر کف

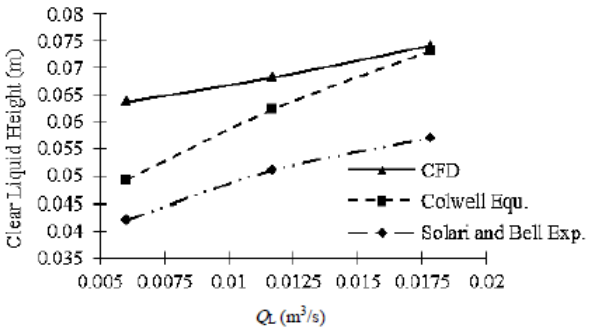

Fig. 24 Effect of liquid volume flow rate on the clear liquid height

شکل 24 اثر دبی حجمی مایع بر روی ارتفاع مایع زلال

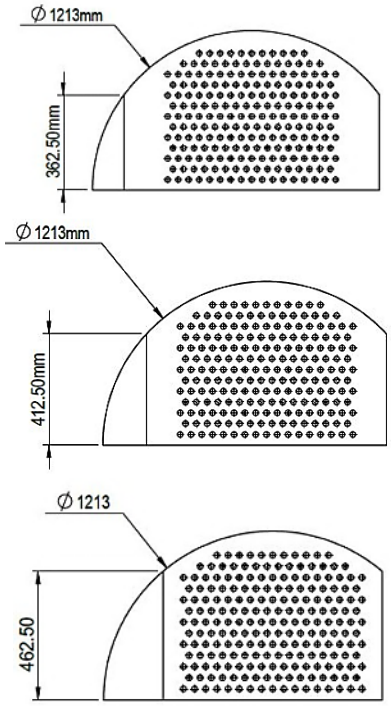

Fig. 25 Weir dimension of three sieve trays

شکل 25 ابعاد بند سه نمونه سینی غربالی بررسی شده

همان‌طور که در "شکل 26" مشاهده می‌شود، با افزودن بر عرض بند و ثابت نگه داشتن ارتفاع آن و دیگر پارامترهای هیدرودینامیکی نظیر دبی جریان مایع و فاکتور جریان گاز، ارتفاع مایع زلال کاهش می‌یابد. در واقع هر چه عرض بند بیشتر شود، ناحیه پایین دست جریان کم‌تر شده و جریان مایع و گاز زمان کم‌تری برای اندرکنش با یک‌دیگر را دارند. ضمن این‌که اثر مولفه عمودی سرعت گاز نیز بر روی حرکت مایع کم‌تر شده و باعث می‌شود تا دامنه مایع زلال کاهش یافته و بازدهی سینی کاهش یابد.

"شکل 27"، اثر تغییرات ارتفاع دیواره بند را برروی ارتفاع مایع زلال نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن بود که افزایش ارتفاع دیواره موجب افزایش ارتفاع ناحیه زلال مایع می‌گردد. البته از ارتفاع 50 میلی‌متر به بعد، این مقدار کاهش می‌یابد. با افزودن به ارتفاع دیواره، سیال به ازای شرایط مرزی ثابت، ممنتوم کافی برای عبور از دیواره بند را نداشته و پس از برخورد به دیواره بند به روی سینی برمی‌گردد و ناحیه کف‌آلود بر روی سینی را تقویت می‌کند و موجب کاهش بازدهی سینی می‌گردد.

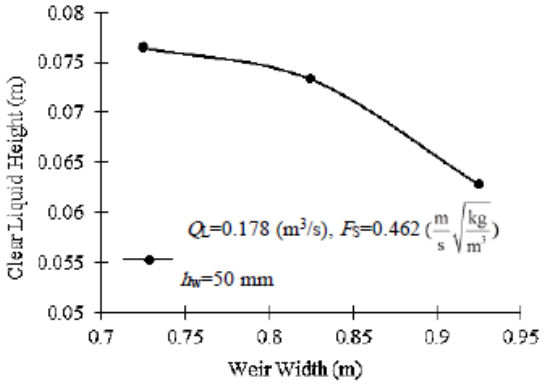

Fig. 26 Effect of weir width on the clear liquid height

شکل 26 اثر عرض دیواره بر روی ارتفاع مایع زلال

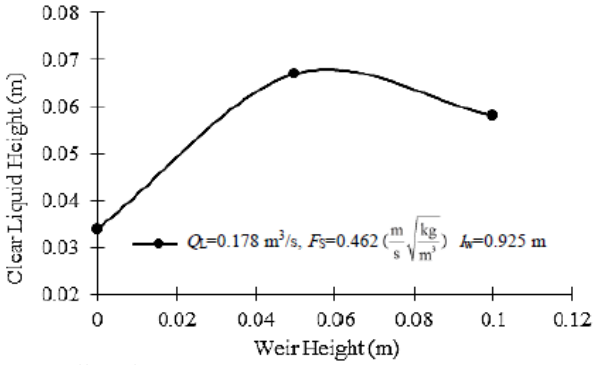

Fig. 27 Effect of weir height on the clear liquid height

شکل 27 اثر ارتفاع دیواره بر روی ارتفاع مایع زلال

7- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثرات دبی جریان مایع ورودی، دبی جریان گاز و اثرات هندسه دیواره بند بر روی پارامترهای هیدرولیکی اساسی سینی‌های غربالی نظیر ارتفاع مایع زلال، ارتفاع ناحیه کف آلود، توزیع سرعت مایع و گاز، توزیع کسر حجمی گاز و مایع و میزان افت فشار بر روی سینی مورد تحلیل قرار گرفت. به‌منظور برهم‌کنش بیشتر بین فازهای مایع و گاز و انتقال ممنتوم و انتقال جرم بین آن‌ها، شرایط جریان بایستی به گونه‌ای اتخاذ شود تا از ارتفاع سر کف کاسته شده و به ارتفاع مایع زلال افزوده شود تا انتقال ممنتوم و انتقال جرم بهتر صورت گیرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که هر چه فاکتور جریان گاز که مرتبط با دبی حجمی ورودی گاز می‌باشد، کم‌تر باشد، از میزان ارتفاع ناحیه کف‌آلود کاسته شده و به میزان ارتفاع ناحیه مایع زلال افزوده می‌شود و باعث شده تا عملکرد برج بهبود یابد. از طرفی دیگر، افزایش دبی مایع باعث افزایش میزان ارتفاع مایع زلال و ارتفاع ناحیه کف‌آلود می‌شود. نتایج نشان داد که تاثیر دبی حجمی مایع بر روی ارتفاع کف به مراتب بیش‌تر از تاثیر آن بر روی ارتفاع مایع زلال می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در سرعت‌های پایین مایع و گاز اختلاط و تبادل جرم و ممننتوم بین دوفاز بهتر انجام می‌پذیرد و فرصت بهتری برای جداسازی ایجاد می‌گردد. بنابراین هر چه از آشفتگی جریان گاز و مایع کاسته شود، عملکرد سینی‌های جداسازی برج تقطیر در وضعیت مطلوب‌تری قرار خواهد گرفت.

نتایج حاصل از توزیع کسر حجمی مایع بر روی سطح سینی نشان داد که تجمع مایع بیشتر در ناحیه اطراف سینی و در ورود به آن می‌باشد. همچنین در مرکز سینی بیش‌ترین برهم‌کنش بین دو فاز گاز و مایع وجود دارد. کسر حجمی مایع با فاصله گرفتن از سطح سینی به در ابتدا به تدریج کاسته شده و پس از گذر از ناحیه کف، به‌طور ناگهانی دچار افت شدید می‌شود. شکل توزیع سرعت بر روی سینی نشان داد که در نواحی بیرونی سینی، جریان برگشتی چرخشی وجود داشته که موجب متلاطم شدن جریان و تقویت ناحیه حباب‌ها می‌شود. اثرات هندسه دیواره‌بند و مساحت ناحیه ورودی ناودانی بر روی بر روی پارامترهای هیدرولیکی جریان بررسی شد. نتایج حاکی از آن بود که افزایش پهنای دیواره بند موجب افزایش ارتفاع مایع زلال می‌شود. از طرفی دیگر، افزایش ارتفاع دیواره بند تا میزان 50 میلی‌متر باعث بالارفتن کارایی سینی برج تقطیر خواهد شد.

8- فهرست علایم

A	مساحت (m^2)
C_D	ضریب درگ
d_G	قطر حباب (m)
F_S	فاکتور جریان سطحی گاز $(\frac{m}{s}\sqrt{\frac{kg}{m^3}})$
g	شتاب گرانش $(\frac{m}{s^2})$
h_{cl}	ارتفاع مایع زلال (m)
h_{ow}	ارتفاع مایع بالای بند (m)
k	انرژی جنبشی آشفته (J)
l	پهنا (m)
M	نیروهای بین سطحی (N)
N_H	تعداد منافذ روی سینی

علایم یونانی

α	کسر حجمی
ε	نرخ اتلافات (J/kgs)
μ	ویسکوزیته (Pas)
ρ	چگالی (kgm^{-3})

بالانویس‌ها

ave	مقدار متوسط

زیرنویس‌ها

B	حبابی
eff	موثر
G	خصوصیت گاز
L	خصوصیات مایع
S	کمیت سطحی
w	بند

9- مراجع

[1] M. Stewart, K. Arnold, *Gas-liquid and Liquid-liquid Separators*, pp 103-176, Gulf Professional Publishing, Oxford UK, 2008.
[2] F. Lopez, F. Castells, Influence of tray geometry on scaling up distillation efficiency from laboratory data, *Industrial & engineering chemistry research*, Vol. 38, No. 7, pp. 2747–2753, 1999.
[3] J. Zhang, Y. Wang, G. Yu, X. Mao, F. Wang, Experimental study of two phase flow characteristics on the dual-flow tray, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 102, pp. 90–99, 2015.
[4] Z. M. Sun, K. T. Yu, X. G. Yuan, C. J. Liu, A modified model of computational mass transfer for distillation column, *Chemical Engineering Science*, Vol. 62, No. 7, pp. 1839–1850, 2007.
[5] X. G. Li, D. X. Liu, S. M. Xu, H. Li, CFD simulation of hydrodynamics of valve tray, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 48, No. 1, pp. 145–151, 2009.
[6] A. Farzpourmachiani, M. Shams, A. Shadaram, F. Azidehak, Eulerian–Lagrangian 3-D simulations of unsteady two-phase gas–liquid flow in a rectangular column by considering bubble interactions, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 46, No. 8, pp. 1049–1056, 2011
[7] J. G. Teleken, L. O. Werle, I. G. B. Parisotto, C. Marangoni, A. P. Meneguelo, R. A. F. Machado, Fluid-dynamics study of multiphase flow in a sieve tray of a distillation column, *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol. 28, pp. 73–78, 2010.
[8] M. Zivdar, T. Zarei, R. Rahimi, M. R. Ostadzehi, CFD simulation of concap tray hydrodynamics, *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 47, No. 1, pp. 39–50, 2013.
[9] J. Bausa, B. Pennemann, Vapor/liquid parallel-flow channeling on cascade trays with moving valves, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 99, pp. 43–48, 2015.
[10] M. A. Rodríguez-Ángeles, F. I. Gómez-Castro, J. G. Segovia-Hernández, A. R. Uribe-Ramírez, Mechanical design and hydrodynamic analysis of sieve trays in a dividing wall column for a hydrocarbon mixture, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 97, pp. 55–65, 2015.
[11] Ö. Yildirim, E. Y. Kenig, Rate-based modelling and simulation of distillation columns with sandwich packings, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 98, pp. 147–154, 2015.
[12] C. C. Tseng, C. J. Li, Numerical investigation of the inertial loss coefficient and the porous media model for the flow through the perforated sieve tray, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 106, pp. 126–140, 2016.

[13] W. L. McCabe, J. C. Smith, P. Harriott, *Unit Operations of Chemical Engineering*, Vol. 5, pp. 253-262, New York: McGraw-Hill, 1993.
[14] Ansys FLUENT User's Guide, Version 15, 2014.
[15] A. R. Haghighi, S. A. Chalak, Mathematical modeling of blood flow through a stenosed artery under body acceleration, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 39, No. 7, pp. 2487–2494, 2017
[16] D. L. Bennett, D. N. Watson, M. A. Wiescinski, New correlation for sieve-tray point efficiency, entrainmnt, and section efficiency, *AIChE Journal*, Vol. 43, No. 6, pp. 1611–1626, 1997.
[17] A. Malvin, A. Chan, P. L. Lau, CFD study of distillation sieve tray flow regimes using the droplet size distribution technique, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 45, No. 4, pp. 1354–1368, 2014.
[18] C. H. Fischer, G. L. Quarini, Three-dimensional heterogeneous modeling of distillation tray hydraulics, *AIChE Annual Meeting*, pp. 15–20, 1998.
[19] D. Feldman, *Distillation Tray Fundamentals*, by M. J. Lockett, Cambridge University Press, New York, pp 226, 1986
[20] C. J. Colwell, Clear liquid height and froth density on sieve trays, *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 20, No. 2, pp. 298–307, 1981.
[21] G. Gesit, K. Nandakumar, K. T. Chuang, CFD modeling of flow patterns and hydraulics of commercial-scale sieve trays, *AIChE Journal*, Vol. 49, No. 4, pp. 910–924, 2003.
[22] R. B. Solari, R. L. Bell, Fluid flow patterns and velocity distribution on commercial-scale sieve trays, *AIChE Journal*, Vol. 32, No. 4, pp. 640–649, 1986.