

بررسی هیدرودینامیک برج‌های مخروطی چرخان توسط دینامیک سیالات محاسباتی

مرتضی زیودار*¹، مجتبی یوسفی²، نسیم شهریوی³

¹ استاد گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

^{2,3} دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

نوع مقاله: ترویجی

دریافت: 1400/03/27 پذیرش: 1400/07/22

چکیده

برج‌های تقطیر سینی چرخان¹ (SCC) امروزه با گسترش کاربرد در صنایع شیمیایی روبرو هستند. در این تحقیق پارامتر افت فشار سیستم آب‌وهوا درون برج SCC در مقیاس پایلوت و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته و با داده‌های تجربی مقایسه شده است. مدل در این تحقیق شامل دو مرحله از برج بوده و پارامترهای افت فشار خشک و دوفازی در سرعت‌های چرخشی 500، 1000 و 1500 دور بر دقیقه گزارش شده‌اند و تأثیر سرعت چرخش بر میزان افت فشار درون برج نیز بررسی شده است. متوسط خطای نسبی در حالت افت فشار خشک برابر با 11 درصد و برای داده‌های افت فشار دوفازی در شدت جریان‌های مایع 0/6 و 0/9 و 1/5 کیلوگرم بر دقیقه برابر با 13 درصد است. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت چرخشی، افت فشار سیستم نیز افزایش پیدا می‌کند.

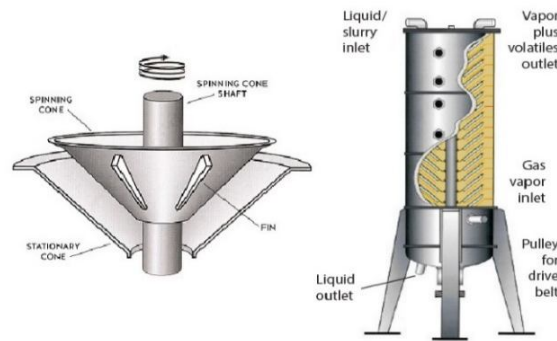
کلمات کلیدی: برج SCC، سینی چرخان، دینامیک سیالات محاسباتی، افت فشار

* mzivdar@eng.usb.ac.ir

¹ Spinning cone column

مقدمه

برج‌های تقطیر در حالت کلی به دو نوع آکنده و سینی‌دار تقسیم می‌شوند. یکی از انواع برج‌های تقطیر سینی‌دار، برج تقطیر با سینی‌های مخروطی چرخان است [1]. برج‌های SCC دارای سینی‌های ثابت و چرخان هستند که سینی‌های ثابت به دیواره و سینی‌های چرخان به محور وسط متصل هستند. محور وسط نیز به یک موتور متصل است و نیروی گردش خود را از آن تأمین می‌کند [2]. نمای کلی برج SCC و سینی‌های آن در شکل 1 قابل مشاهده است.



شکل 1- نمای کلی برج SCC و سینی‌های آن [3]

برای طراحی بهینه برج‌های SCC پارامترهای زیادی باید مورد بررسی قرار گیرند. از جمله پارامترهای مؤثر بر عملکرد برج می‌توان به افت فشار خشک، افت فشار دوفازی و بازده انتقال جرم اشاره کرد [4]. به‌طور کلی بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی و پارامترهای مربوط به انتقال جرم برای بهینه‌سازی و کنترل این برج‌ها اهمیت فراوانی دارد [5]. نخستین بار در سال 2002، ماکاریف² به همراه همکارانش، شبیه‌سازی CFD بر روی الگوهای جریان و توزیع فشار در یک برج SCC در مقیاس آزمایشگاهی (قطر 0/15 متر)، در حالت سه‌بعدی و با در نظر گرفتن سه مرحله از برج و در غیاب جریان مایع انجام دادند [6]. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مقادیر افت فشار پیش‌بینی شده با CFD در مقایسه با نتایج تجربی در کل دامنه عملیاتی برج، به میزان 85 تا 95 درصد سازگاری دارد. افزایش سرعت چرخش به بیش از 1000 دور بر دقیقه سبب افزایش بیش‌ازپیش بی‌ثباتی در برج، لرزش‌های مکانیکی و افزایش افت فشار می‌شود. در سال 2004 ماکاریف و لانگریش³، بی‌بعد سازی متغیرهای روابط چرخشی را بررسی کردند و ساختار بدون بعدی را برای فشار در یک برج SCC در حالت خشک معرفی کردند [7]. از این ساختار می‌توان برای توسعه مدل‌های قابل استفاده در آنالیز CFD این نوع برج‌ها بهره برد که سبب می‌شود در طراحی برج‌های SCC جدید پیش‌بینی افت فشار بسیار آسان‌تر شود.

در سال 2005، ماکاریف و همکارانش مکانیسم‌های انتقال جرم و رژیم عملکرد ستون را برای سه برج SCC در مقیاس آزمایشگاهی بررسی کردند [8]. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق به این شرح است که جریان در مقیاس‌های متوسط و بزرگ، مشابه برج SCC در مقیاس کوچک بوده و به‌صورت ناپایا باقی می‌ماند و نوسانات فشاری متناسب با اندازه برج و عدد رینولدز افزایش پیدا می‌کند. رژیم جریان در بهترین حالت به‌صورت گذرا است. علاوه بر این برای مقیاس بزرگ، حالت آشفتگی کامل پیش‌بینی نمی‌شود.

² Makarytchev

³ Langrish

در سال 2008 زیودار و همکاران، میزان افت فشار خشک برای برج SCC، در سرعت‌های چرخشی 500، 1000 و 1500 دور بر دقیقه و در مقیاس پایلوت را بررسی کردند [9]. نتایج به‌دست آمده نشان داد که با افزایش سرعت چرخشی، افت فشار سیستم نیز افزایش می‌یابد. به‌عبارتی‌دیگر با افزایش سرعت چرخشی، میزان مکش مایع به سمت بالا (مکش ناشی از نیروی گریز از مرکز بخش چرخان) در هر مرحله از برج افزایش یافته و افزایش مکش منجر به افزایش افت فشار در هر مرحله و نهایتاً در کل برج می‌شود. حداقل افت فشار خشک در سرعت چرخشی 500 دور بر دقیقه و دبی گاز 55 لیتر بر دقیقه برابر با 15 میلی‌متر آب و حداکثر افت فشار خشک در سرعت چرخشی 1500 دور بر دقیقه و دبی گاز 150 لیتر بر دقیقه برابر با 174 میلی‌متر آب گزارش شده است. میزان خطای متوسط نسبی بین مقادیر تجربی و شبیه‌سازی شده در سرعت 1000 دور بر دقیقه معادل 15 درصد است. در سال 2019، سونگ ونگ باو⁴ و همکارانش، هیدرودینامیک جریان در برج SCC را با استفاده از شبیه‌سازی CFD و رویکرد اویلری-لاگرانژی مورد بررسی قرار دادند [10]. در این تحقیق به‌منظور درک بیشتر نحوه رفتار سیال درون برج، مدل‌سازی به‌صورت کاملاً سه‌بعدی صورت پذیرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که جریان‌ات داخلی برج SCC به‌دلیل ساختار منحصربه‌فرد آن، از الگوهای مشخصی پیروی می‌کنند. در فاز مایع بهبود قابل توجهی در سرعت فیلم مایع درون برج SCC مشاهده شد. بهبود در انتقال جرم ناشی از تولید قطرات مایع، بین 20٪ تا 40٪ تخمین زده شد که میزانی قابل توجه است. در سال 2020 زیودار و شهرویی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، ضخامت فیلم مایع، ضرایب انتقال جرم و بازدهی بخار مورفوری را برای سیستم اتانول آب در یک برج SCC در مقیاس پایلوت بررسی کردند [11]. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله شعاعی از محور، ضخامت فیلم مایع به‌تدریج کاهش یافته و ضرایب انتقال جرم نیز در فازهای گاز و مایع با افزایش سرعت جریان تقریباً ثابت می‌مانند.

هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی و درک بهتر هیدرودینامیک دو مرحله از برج SCC و مقایسه نتایج به‌دست آمده از طریق شبیه‌سازی CFD با داده‌ها و نتایج تجربی است. در پژوهش‌های گذشته، تحقیقات انجام شده محدود و با فرضیات ساده‌کننده‌ای نظیر یک سینی متحرک و یک سینی ثابت یا در ابعاد یک‌چهارم انجام گرفته است که نتایج آن با داده‌های تجربی اختلاف دارد. در این تحقیق دو مرحله کامل از برج SCC مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن نیز به واقعیت نزدیک‌تر بوده و نسبت به تحقیقات پیشین خطای کم‌تری دارد. علاوه بر این در اغلب تحقیقات پیشین، مدل‌های بررسی شده در مقیاس آزمایشگاهی بوده، درحالی‌که در تحقیق حاضر مقیاس پایلوت بررسی شده است.

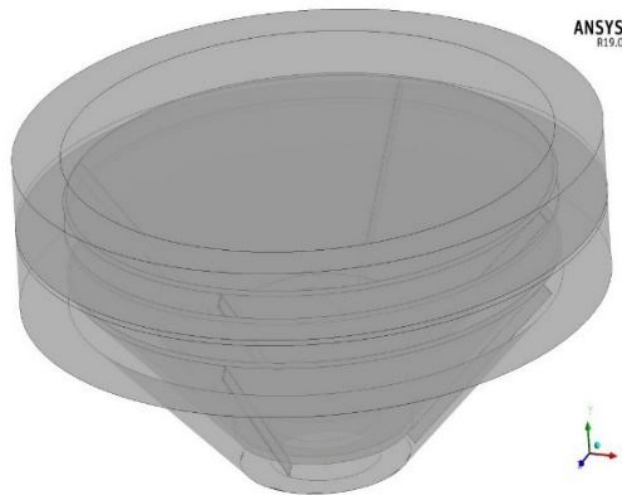
2- مدل‌سازی CFD

2-1- تولید هندسه و مدل‌سازی

در اولین اقدام برای انجام شبیه‌سازی، هندسه برج با استفاده از نرم‌افزار Ansys Workbench ترسیم می‌گردد. مدل مورد بررسی در این تحقیق، 2 مرحله از برج در مقیاس پایلوت و شامل دو سینی چرخان و سه سینی ثابت بوده که در شکل 2 و پارامترهای هندسی برج در جدول 1 قابل مشاهده هستند. این برج دارای دو بخش چرخان و ثابت است. بخش چرخان شامل دو سینی چرخان بوده که با زاویه 45 درجه رسم شده و به شفت مرکزی متصل هستند و نیروی چرخشی خود را از آن تأمین می‌کنند. زیر هر سینی چرخان چهار فین متصل شده است. بخش ثابت نیز شامل سه سینی ثابت بوده که به دیواره برج متصل‌اند. در زمینه انتخاب روش ارتباط سرعت-فشار، پیش‌فرض نرم‌افزار، الگوریتم

⁴ Seongwoong Bae

SIMPLE⁵ بوده که الگوریتمی برای حدس و خطا در محاسبه فشار در سیستم است. در این نرم‌افزار، برای حل معادلات از روش حجم محدود بهره‌گیری می‌شود [12 و 6]. مقدار تابع خطا در حالت خشک برابر با 10^{-5} و در حالت دوفازی برابر با 10^{-6} در نظر گرفته شده است. برای تحلیل آشفتگی در فاز گاز در هر دو حالت خشک و دوفازی از مدل $k-\varepsilon$ ، برای تحلیل آشفتگی در فاز پراکنده مایع از مدل صفر معادله‌ای اختلاط فاز پراکنده⁶ و برای مدل‌سازی پارامترهای افت فشار از مدل گریس⁷ بهره‌گیری شده است. از آنجاکه هندسه این مدل دارای حداقل یک قسمت بیرونی ثابت و حداقل یک قسمت داخلی متحرک است، از روش MRF⁸ برای مدل‌سازی بخش چرخان استفاده شده است [13].



شکل 2- هندسه شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار

جدول 1- مقادیر پارامترهای هندسی در مقیاس پایلوت [3]

مقدار	پارامتر
0/0525	شعاع داخلی سینی چرخان، R_{Si} (متر)
0/145	شعاع خارجی سینی چرخان، R_{So} (متر)
0/05	شعاع داخلی سینی ثابت، R_{Fi} (متر)
1/2	ارتفاع برج (متر)
0/1735	شعاع داخلی برج، R_C (متر)
0/0325	شعاع محور چرخان (شفت)، R_S (متر)
0/04	گام، P_C (متر)
0/3625	پارامتر فاصله، B (متر)
45	زاویه سینی (θ)
30	تعداد مراحل برج، N (تعداد جفت سینی‌ها)

⁵ Semi-implicit Method for Pressure Linked Equation

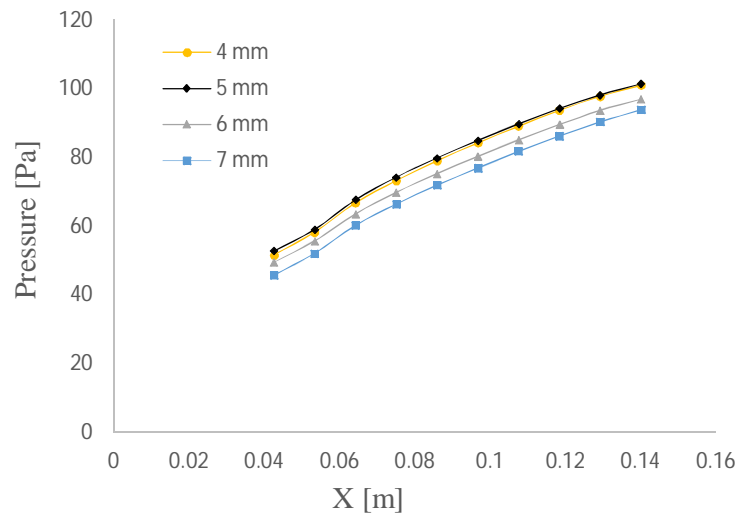
⁶ Dispersed phase zero equation

⁷ Grace

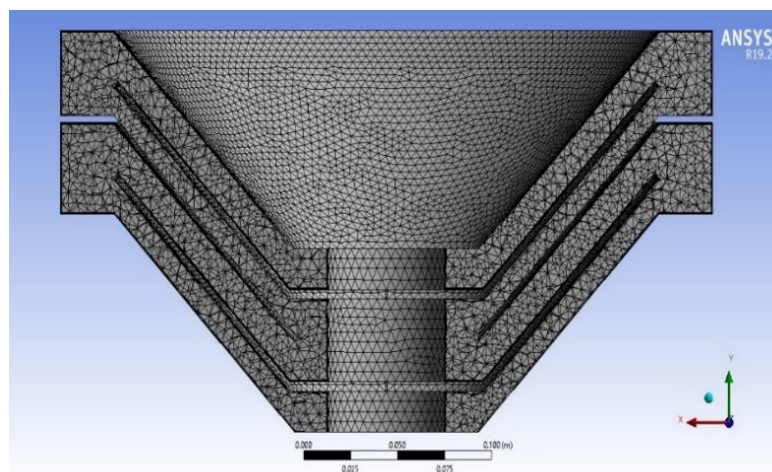
⁸ Multiple Reference Frames

2-2- شبکه‌بندی و استقلال از شبکه

برای به دست آوردن هم‌گرایی مناسب در حل معادلات به یک شبکه‌بندی مناسب نیاز داریم. عملیات شبکه‌بندی، در نرم‌افزار Ansys Workbench انجام می‌گردد. با توجه به هندسه پیچیده برج‌های SCC، استفاده از ساختار شبکه نامنظم مناسب است. شبکه‌های استفاده شده به صورت هرمی، چهاروجهی و منشوری هستند. برای انتخاب اندازه مناسب شبکه‌ها، باید جواب‌هایی مستقل از اندازه شبکه به دست بیایند؛ به این معنا که با تغییر در اندازه آن‌ها، تغییری در نتایج مشاهده نگردد. بدین منظور در این تحقیق، مدل‌های موردنظر توسط شبکه‌هایی با اندازه‌های 4، 5، 6 و 7 میلی‌متر شبکه‌بندی شدند. سپس با بررسی پارامتر فشار، مشخص شد که جواب‌های حاصل از شبیه‌سازی برای شبکه‌هایی با اندازه 4 و 5 میلی‌متر تقریباً یکسان هستند؛ بنابراین برای کاهش محاسبات، شبکه‌ای با اندازه شبکه بزرگ‌تر یعنی 5 میلی‌متر برای مدل انتخاب شد که در آن بهترین هم‌گرایی حاصل گردید. در شکل 3 بررسی استقلال از شبکه توسط پارامتر فشار اندازه‌گیری شده در امتداد سطح سینی چرخان قابل مشاهده است. در شکل 4 نمای شبکه‌بندی شده مدل مشاهده می‌شود.



شکل 3- نمودار بررسی تغییرات فشار برحسب واحد طول



شکل 4- مدل شبکه‌بندی شده

3-2- معادلات حاکم بر جریان سیال

در CFD دو دیدگاه اویلری و لاگرانژی برای حل سیستم معادلات چندفازی وجود دارد. در دیدگاه لاگرانژی فرض می‌شود که فاز گسسته از اجزای مجزا تشکیل شده است. در روش اویلر-اویلر یا چند سیالی، فازها به صورت نیمه پیوسته در نظر گرفته می‌شوند که تمام فازها به عنوان محیط‌های پیوسته با تبادلات متقابل هستند در روش لاگرانژی، ذرات ردیابی شده و نیاز شدیدی به توان محاسباتی بالا است. در نتیجه برای کاربردهای واقعی محاسبات جریان‌های چندفازی که فازهای پراکنده دارای پراکندگی بالایی هستند، روش لاگرانژی نامناسب است؛ بنابراین در این تحقیق، از روش اویلر-اویلر استفاده شده است که به کمک آن می‌توان محاسبات دوفازی گاز-مایع را در یک سیستم سه بعدی با هزینه محاسباتی قابل قبول انجام داد [14]. جریان دوفازی گاز-مایع در حالت جریان متقابل در این سیستم استفاده شده است. فاز گاز شامل هوا با چگالی (1.185 kg/m^3) و فاز مایع شامل آب با چگالی (997 kg/m^3) است. فرم کلی معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در حالت‌های یکفازی و دوفازی به صورت زیر هستند [15].

معادله پیوستگی در حالت یکفازی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

معادله اندازه حرکت در حالت یکفازی:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U) + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla P + \nabla \tau + B \quad (2)$$

معادله پیوستگی در حالت دوفازی:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (\gamma_\alpha \rho_\alpha U_\alpha - \Gamma_\alpha \nabla \gamma_\alpha) = 0 \quad (3)$$

معادله اندازه حرکت در حالت دوفازی:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) + \{\gamma_\alpha [\rho_\alpha U_\alpha U_\alpha - \mu_{e\alpha} (\nabla U_\alpha + (\nabla U_\alpha)^T)]\} = \gamma_\alpha (B_\alpha - \nabla P) + F_\alpha \quad (4)$$

4-2- تعیین الگوی جریان

برای تعیین الگوی جریان، ابتدا باید مقادیر رینولدز هیدرولیکی (Re^{hyd}) و رینولدز چرخشی (Re^{rot}) را برای فاز گاز و مایع و با استفاده از پارامترهای هندسی از جدول 1 و معادلات 5 و 6 به دست آورد [15].

$$Re^{hyd} = \frac{v R_H}{\nu} = \frac{Q}{2\pi R_H \nu} \quad (5)$$

$$Re^{rot} = \frac{\omega_{rotor} R_{SO}^2}{\nu} \quad (6)$$

برای به دست آوردن مقادیر رینولدز هیدرولیکی و چرخشی، محاسبات در بیشترین شدت جریان گاز 210 (lit/min) یا $0.0035 \text{ (m}^3/s)$ و کمترین شدت جریان مایع 0.6 (kg/min) یا $1 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/s)$ انجام شده‌اند. در محاسبه اعداد رینولدز، سرعت چرخشی برابر با 1000 rpm ($16/66$ دور بر ثانیه)، $v_{Liq} = 9.02 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/s)$ و $v_{Gas} = 1.49 \times 10^{-5} \text{ (m}^2/s)$ در نظر گرفته شده است.

$$Re_{Gas}^{hyd} = \frac{0.0035}{2 \times \pi \times 0.05 \times 1.49 \times 10^{-5}} = 748$$

$$Re_{Liquid}^{hyd} = \frac{1 \times 10^{-5}}{2 \times \pi \times 0.05 \times 9.02 \times 10^{-7}} = 35$$

$$Re_{Gas}^{rot} = \frac{16.66 \times 0.145^2}{1.49 \times 10^{-5}} = 23508$$

$$Re_{Liquid}^{rot} = \frac{16.66 \times 0.145^2}{9.02 \times 10^{-7}} = 388333$$

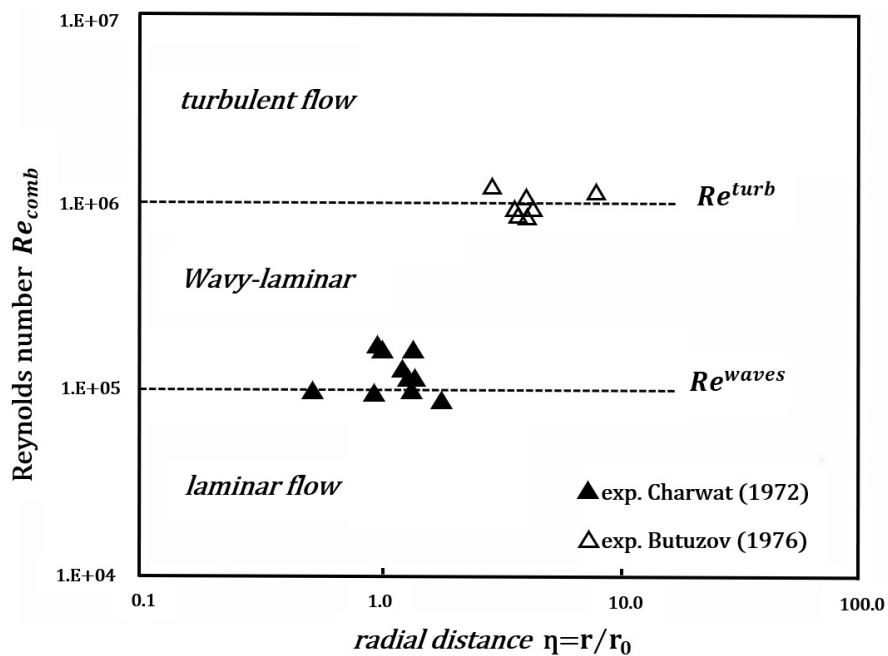
سپس باید با جای‌گذاری مقادیر به‌دست آمده در معادله 7، پارامتر رینولدز ترکیبی را برای فاز گاز و فاز مایع به‌دست آورد.

$$Re_{Comb} = Re^{rot} Re^{hyd} \quad (7)$$

$$Re_{Comb}^{Gas} = 17.58 \times 10^6$$

$$Re_{Comb}^{Liquid} = 13.6 \times 10^6$$

از مقایسه مقادیر فوق با شکل 5، مشخص می‌شود که جریان در هر دو فاز گاز و مایع به‌صورت آشفته هستند.



شکل 5- تعیین رژیم جریان توسط عدد رینولدز ترکیبی برای برج SCC [16]

5-2- شرایط مرزی و فرضیات

در حالت تک‌فازی، شرایط مرزی مورد استفاده عبارت‌اند از: شرط مرزی سرعت جریان ورودی در مرز پایینی مدل، شرط مرزی سرعت جریان خروجی در بالای مدل و شرط مرزی سرعت چرخشی 500، 1000 و 1500 دور بر دقیقه برای سینی متحرک و سرعت صفر برای دیواره‌ها و سینی‌های ثابت. برای محاسبه افت فشار خشک از هوا به‌عنوان فاز گاز استفاده شده و فاز مایع در سیستم حضور ندارد. در حالت دوفازی، شرایط مرزی استفاده شده عبارت‌اند از: شرط مرزی سرعت ورودی در پایین مدل، شرط مرزی سرعت خروجی در بالای مدل، شرط مرزی سرعت‌های چرخشی 500، 1000 و 1500 دور بر دقیقه برای قسمت چرخان و شرط مرزی سرعت صفر برای سینی‌های ثابت و دیواره. در این حالت از سیستم آب و هوا به‌عنوان فازهای مایع و گاز استفاده شده است. جریان آب و هوا در مدل

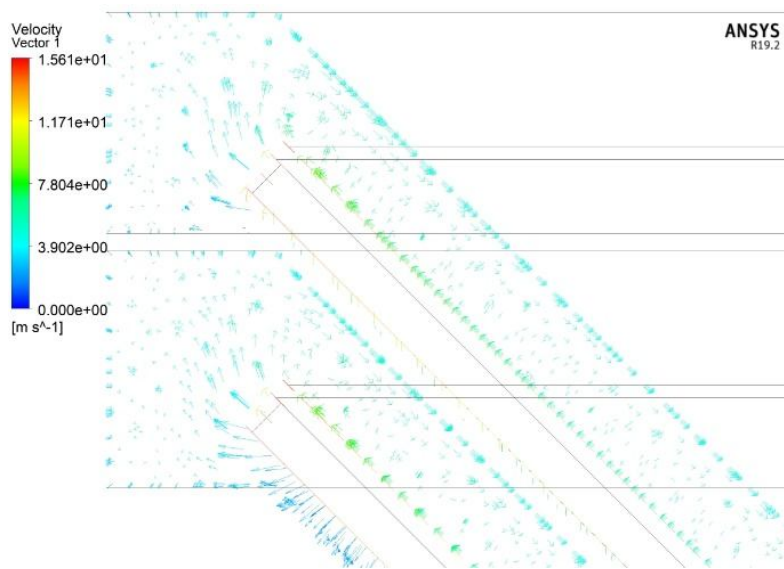
به صورت متقابل هستند. هر دو فاز گاز و مایع، به صورت آشفته فرض شده‌اند. از سطح پایینی، هوا با جزء حجمی 0/95 وارد و آب با جزء حجمی 0/05 خارج می‌شود.

فرضیات در نظر گرفته شده برای این مدل‌سازی شامل این موارد هستند: معادلات در دمای ثابت 25 درجه سانتی‌گراد بررسی شده‌اند؛ بنابراین نیازی به بررسی معادلات انرژی نیست. از انتقال جرم بین فازها صرف نظر شده و تنها از معادلات پیوستگی و اندازه حرکت استفاده شده است. با توجه به فرض ثابت بودن دما در طول برج، خواص فیزیکی در طول برج ثابت در نظر گرفته شده است. واکنش شیمیایی صورت نمی‌گیرد. تغییرات افت فشار در برج خطی در نظر گرفته می‌شود. مدل‌سازی و حل معادلات در حالت پایا در نظر گرفته می‌شود. آب سیال تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است. جریان سیال درون برج به صورت یکنواخت (بدون تغییر در سرعت) در نظر گرفته شده است.

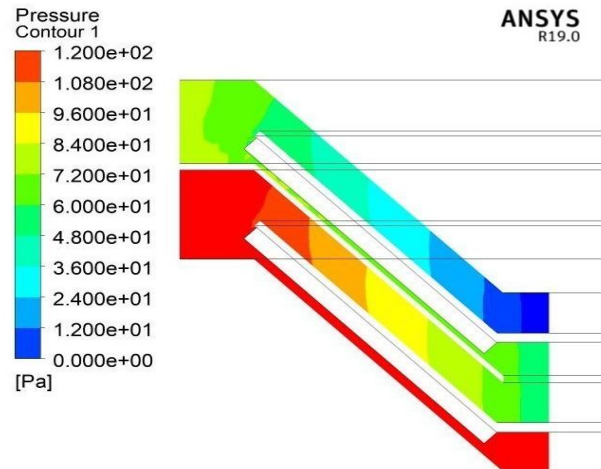
3- نتایج و بحث

مدل مورد بررسی در این تحقیق دارای دو سینی چرخان و سه سینی ثابت است که شبیه‌سازی، مدل‌سازی و حل معادلات آن با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و نرم‌افزار Ansys CFX انجام گرفته است. با انجام محاسبات تعیین الگوی جریان، جریان گاز و مایع در هر دو حالت خشک و دوفازی، آشفته در نظر گرفته شده است. برای بیان آشفته‌گی در فاز گاز از مدل $k - \epsilon$ و برای تحلیل آشفته‌گی در فاز مایع پراکنده از مدل صفر معادله‌ای استفاده شده است. جریان دوفازی آب و هوا به صورت متقابل است. محاسبات برای حالت خشک و دوفازی در سرعت‌های چرخشی 500، 1000 و 1500 دور بر دقیقه بررسی شده‌اند.

در شکل 6 مسیر جریان گاز به وسیله بردارهای سرعت در حالت خشک با سرعت چرخشی 1000 دور بر دقیقه، قابل مشاهده است. جریان گاز از گلوگاه داخلی پایینی وارد می‌شود و پس از طی مسیری چرخشی از گلوگاه داخلی بالایی خارج می‌شود. شکل 7 نشان‌دهنده کانتورهای فشار در حالت خشک در سرعت چرخشی 1000 دور بر دقیقه است. نواحی با رنگ قرمز مربوط به نواحی با فشار بالا و رنگ آبی مربوط به نقاطی با فشار کم‌تر هستند. بیشترین مقدار فشار در پایین مدل وجود دارد و با حرکت به سمت بالا، فشار کم‌تر می‌شود که این با حالت تجربی برج مطابقت دارد.

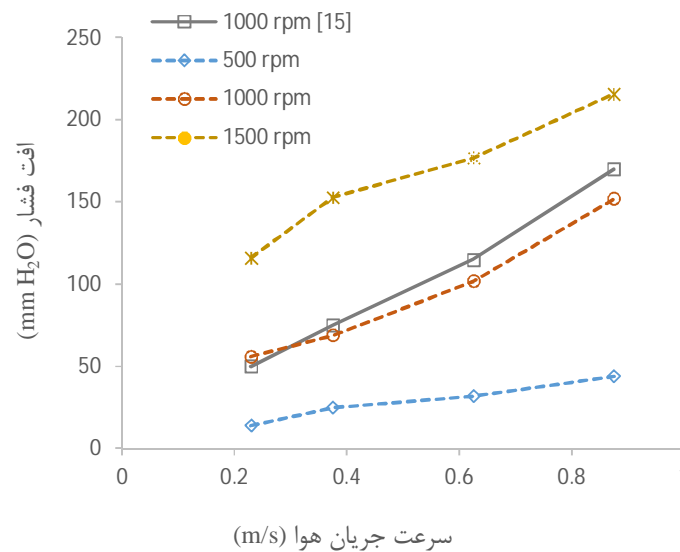


شکل 6- مسیر جریان گاز در حالت خشک با سرعت چرخشی 1000 دور بر دقیقه به وسیله بردارهای سرعت



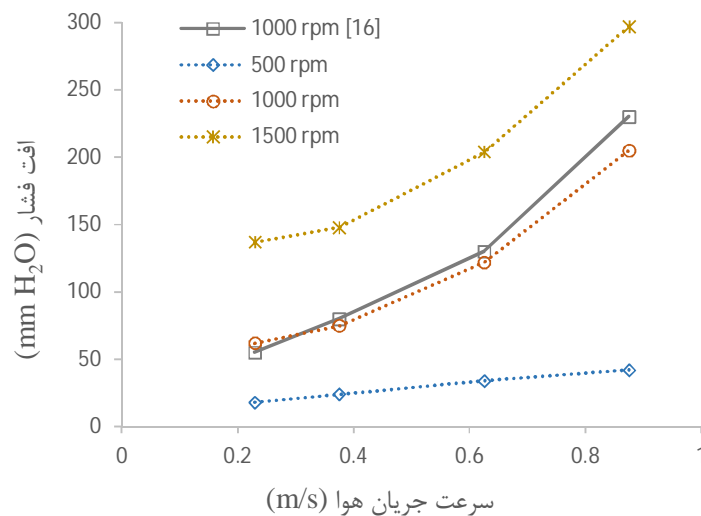
شکل 7- کانتورهای فشار در حالت خشک با سرعت چرخشی 1000 دور بر دقیقه

در شکل 8 تأثیر سرعت چرخشی بر روی پارامتر افت فشار خشک برای سرعت جریان‌های مختلف گاز و نیز مقایسه داده‌های CFD با داده‌های تجربی در سرعت چرخشی 1000 دور بر دقیقه نشان داده شده است.



شکل 8- مقایسه تأثیر سرعت‌های چرخشی مختلف بر روی پارامتر افت فشار خشک

شکل 9 مقایسه تأثیر سرعت چرخش بر روی پارامتر افت فشار دوفازی در شدت جریان مایع 0/9 کیلوگرم بر دقیقه برای سرعت جریان‌های مختلف گاز و نیز مقایسه داده‌های CFD با داده‌های تجربی در سرعت چرخشی 1000 دور بر دقیقه را نشان می‌دهد.



شکل 9- مقایسه تأثیر سرعت چرخشی بر روی پارامتر افت فشار دوفازی در شدت جریان مایع 0/9 کیلوگرم بر دقیقه

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، شبیه‌سازی پارامترهای افت فشار خشک و دوفازی برای دو مرحله از برج SCC با استفاده از نرم‌افزار Ansys CFX و به صورت سه‌بعدی انجام گرفته است. جریان گاز و مایع در هر دو حالت خشک و دوفازی، آشفته در نظر گرفته شده و برای بیان آشفتگی در فاز گاز از مدل $k - \epsilon$ و برای تحلیل آشفتگی در فاز مایع پراکنده از مدل صفر معادله‌ای استفاده شده است. برای مدل‌سازی و حل معادلات نیز از روش پایا استفاده شده است؛ زیرا زمان هم‌گرایی در آن نسبت به حالت ناپایا کم‌تر است.

در حالت خشک، کم‌ترین و بیش‌ترین افت فشار به ترتیب 14 و 217 میلی‌متر آب و در حالت دوفازی به ترتیب 18 و 297 میلی‌متر آب به دست آمده است. بررسی کانتور فشار نشان می‌دهد در هر دو حالت خشک و دوفازی با افزایش سرعت جریان گاز و افزایش سرعت چرخش صفحات، افت فشار در برج افزایش می‌یابد که با حالت تجربی نیز تطابق دارد. سرعت جریان گاز (که از پایین وارد برج می‌شود) به مرور و تحت تأثیر سرعت چرخش صفحات افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت جریان گاز، تأثیر نیروی جاذبه بر فاز پراکنده مایع کاهش می‌یابد که باعث بالا بردن فاز مایع پراکنده توسط جریان گاز می‌شود. این امر سبب افزایش ماندگی مایع در گلوگاه‌های جریان شده و در نتیجه افت فشار سیستم را افزایش می‌دهد. با افزایش سرعت چرخش، میزان مکش ناشی از نیروی گریز از مرکز در هر مرحله از برج افزایش یافته و این افزایش مکش منجر به افزایش اختلاف فشار در هر مرحله از برج و در نهایت سبب افزایش افت فشار در کل برج می‌شود.

متوسط خطای نسبی محاسبه شده برای داده‌های افت فشار خشک و افت فشار دوفازی به ترتیب برابر با 10 و 13 درصد و متوسط خطای نسبی محاسبه شده بین مقادیر شبیه‌سازی شده و تجربی برابر با 10 درصد است. خطای موجود، ناشی از فرضیات استفاده شده در مدل‌سازی است. از جمله این دلایل، می‌توان به خطی فرض کردن تغییرات فشار در برج و حذف تأثیر چرخش صفحات مراحل قبل و بعد اشاره نمود. در اغلب موارد، افت فشار CFD کمتر از مقادیر تجربی به دست آمده است. این خطا ناشی از فرضیات استفاده شده در مدل‌سازی است. از جمله فرض یکنواخت بودن جریان؛ که در نرم‌افزار به صورت پیش‌فرض وجود دارد، در صورتی که در حالت واقعی، جریان سیال درون سیستم

یکنواخت نیست. در حالت دوفازی نیز نسبت به حالت خشک افزایش خطا مشاهده شد؛ که دلیل آن افزایش معادلات نسبت به حالت خشک است.

5- فهرست علائم

علائم انگلیسی

سطح مقطع ذره کروی	$A (m^2)$
نیروی جاذبه	$B (N)$
ضریب کلی نیروی پسا	C_D
ضریب نیروی پسا در فصل مشترک	C_{LG}
ضریب نیروی پسا در فصل مشترک	C_{GL}
ضریب ثابت	C_μ
قطر ذرات مایع	$d_p (m)$
نیروی پسا	$F (N/m^3)$
گرانروی توده	$K (kg/m.s)$
انرژی سینتیک اغتشاش	$k (J)$
تعداد مراحل برج	N
فشار	$P (Pa)$
شدت جریان حجمی	$Q (m^3/s)$
شعاع داخلی سینی ثابت	$R_{FI} (m)$
شعاع هیدرولیکی	$R_H (m)$
واحد سرعت چرخشی	$rpm (round/min)$
شعاع خارجی سینی چرخان	$R_{SO} (m)$
زمان	$t (s)$
سرعت حد ذرات مایع	$U_T (m/s)$
بردار سرعت	$U (m/s)$
سرعت حقیقی	$U (m/s)$
سرعت گاز	$U_G (m/s)$
سرعت مایع	$U_L (m/s)$
سرعت	$V (m/s)$
حجم اشغال شده توسط فاز گاز	$V_G (m^3)$
حجم اشغال شده توسط فاز مایع	$V_L (m^3)$

علائم یونانی

ضریب پراکندگی	Γ
جزء حجمی اشغال شده توسط هر فاز	γ
افت فشار دو مرحله	$\Delta P_{stage} (Pa)$
افت فشار کل برج	$\Delta P_{total} (Pa)$
تانسور شاخص	δ
سرعت پراکندگی اغتشاش	ε
گرانروی مولکولی	$\mu (kg/m.s)$
گرانروی مؤثر سیال	$\mu_e (kg/m.s)$
گرانروی آشفتگی	$\mu_T (kg/m.s)$
ویسکوزیته سینماتیکی	$\nu (m/s^2)$
چگالی سیال	$\rho (kg/m^3)$
تانسور تنش	$\tau (N/m^2)$
سرعت چرخشی بخش چرخان	$\omega_{rotor} (rpm)$

6- منابع

- [1] Riley, P.C., Sykes, S. J., "Industrial Application of Spinning Cone Column Technology: A Review", International Conference on Distillation and Absorption, 2002, pp. 1-15.
- [2] Sykes, S. J., "Operating Characteristics of the Spinning Cone Column", Ph.D. Thesis, Department of Chemical Engineering, the University of Sydney, 1995.
- [3] Zivdar, M., "Distillation for Food Flavour Separation", Ph.D. Thesis, the University of Sydney, 1998.
- [4] زیودار، م.، خنشا، ا.، مرادیان، م.، «شبه‌سازی افت فشار خشک در برج‌های تقطیر با سینی مخروطی چرخان (SCC) توسط دینامیک سیالات محاسباتی»، دوازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، 1388.
- [5] پورجعفر، ل.، «بزرگنمایی در برج‌های تقطیر از نوع SCC با استفاده از آنالیز CFD»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، 1388.
- [6] Makarytechev, S. V., Langrish, T. A. G., Fletcher, D.F., "CFD Analysis of Spinning Cone Columns: Prediction of Unsteady Gas Flow and Pressure Drop in a Dry Column", Chemical Engineering Journal, 87, 2002, pp. 301-311.
- [7] Makarytechev, S.V., Langrish, T. A. G., "Dry column approximation for pressure drop in spinning cone columns", Chem. Eng. Comm., 191, 2004, pp. 641-664.
- [8] Makarytechev, S.V., Langrish, T. A. G., Fletcher, D.F., "CFD Analysis of Scale Effects in Spinning Cone Columns", Trans IChemE, 83, 2005, pp. 951-958.
- [9] زیودار، م.، خنشا، ا.، مرادیان، م.، «شبه‌سازی افت فشار خشک در برج‌های تقطیر با سینی چرخان (SCC) توسط دینامیک سیالات محاسباتی»، دوازدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، 1388.

- [10] Seongwoong, Bae. Shin Hyuk, Kim, Jay, H. Lee., “An Investigation into the Hydrodynamics of a Spinning Cone Column: CFD Simulations by an Eulerian-Lagrangian Approach”, *Computers and Chemical Engineering*, 132, 2020.
- [11] Zivdar, M., Shahrouei, N., “Murphree vapor efficiency prediction in SCC columns by computational fluid dynamics analysis”, *Chemical Product and Process Modeling*, Vol. No., 2021,
- [12] Langrish, T. A. G., Makarytechev, S. V., Fletcher, D. F., Prince, R. G. H., “Progress in Understanding the Physical Processes Inside Spinning Cone Columns”, *Chemical Engineering Journal*, 87, 2002, pp. 301-311.
- [13] Chung, T. J., “Computational fluid dynamics”, Cambridge, Cambridge University Press, 2002.
- [14] Ranade, V. V., “Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering”, Academic Press, 2002, pp. 24-25.
- [15] Bird, R. B., Stewart, W. B., Lightfoot, E. N., “Transport Phenomena”, John Wiley & Sons, Inc. 1960.
- [16] Makarytechev, S.V., Langrish, T. A. G., Prince, R. G. H., “Structure and Regimes of Liquid Film Flow in Spinning Cone Columns”, *Chemical Engineering Science*, 53, 1998, pp. 1541-1550