



شبیه سازی هیدرولیکی برج سینی همسو با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۱

حدیثه حبیب زاده^۱ - نورالله کشیری^{۲*} - فرهاد شهرکی^۳ - جواد ایوک پور^۴ - نادر نظیری^۵
hadiseh_habibzadeh@yahoo.com^۱ - capepub@cape.iust.ac.ir^{۲*} - fshahraki@eng.usb.ac.ir^۳
ivakpour@gmail.com^۴ - info@azarenergy.com^۵

چکیده :

چند سالی است که شبیه سازی هیدرودینامیکی جریان های چندفازی در برجهای تقطیر مورد توجه صنایع فرآیندی قرار گرفته است، در این تحقیق هیدرولیک سینی همسو به روش حجم محدود در مقیاس صنعتی مورد بررسی قرار گرفت. شبیه سازی با استفاده از نرم افزار فلوئنت^۲ ۶.۳.۲۶ صورت گرفته است. فاز مایع گسسته و فاز گاز پیوسته به عنوان دو فاز با اثرهای متقابل از دیدگاه اولرین-اولرین^۳ برای حل معادلات استفاده شد. معادلات شامل معادله ی مومنتم و پیوستگی می باشد. حل این معادلات نیازمند معادلات کمکی می باشد که بدین منظور از معادلات اغتشاش و معادلات برهم کنش بین دوفازی استفاده شد. معادلات اغتشاش به کار برده شده معادلات $k-\epsilon$ RNG می باشد. برای به دست آوردن عبارت برهم کنش بین دوفازی از ضریب درگ شیلر- نیومن^۵ استفاده شد. در ابتدا مدل سینی همسو، مورد ارزیابی با داده های تجربی قرار گرفت و سپس افت فشار محاسبه شد و نتایج در دامنه ی سرعت ظاهری گاز از بازه ی ۱/۴ تا ۲ متر بر ثانیه و سرعت ظاهری مایع در دامنه ۰/۱۸ تا ۰/۲۷ متر بر ثانیه تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی با خطای ۱۱ درصد نشان داد. نتایج نشان می دهند در سرعت های ظاهری گاز بیشتر و متعاقبا با افزایش دبی فاز گاز، افت فشار مربوط به سینی کاهش می یابد و بر عکس با افزایش دبی مایع در دبی گاز ثابت، افت فشار سینی افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، سینی با جریان همسو، پارامترهای هیدرولیکی، افت فشار، پره.

^۱ CFD(Computational Fluid Dynamic)

^۲ Fluent

^۳ Eulerian- Eulerian

^۴ Re-Normalisation Group

^۵ Schiller-Nauman drag coefficient



۱- مقدمه

در مهندسی شیمی، مدل‌سازی کلید اصلی برای حل مسایل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی است. فرایندهای شیمیایی باید به طور پیوسته، به سرعت و با حداقل هزینه، بهبود یابند. برای افزایش مقیاس و توسعه، تغییر و یا بهبود عملیات فرایندی و سیستم‌های کنترل، به کارهای آزمایشگاهی زیادی نیاز است و این امر در تضاد با نیاز به تصمیم‌گیری سریع است. به شرط داشتن مدل‌های کامل، برای تمام انواع عملیات واحدها می‌توان تعداد آزمایش‌های لازم برای افزایش مقیاس یا تغییر در طراحی فرایند را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.

مدل‌های CFD که می‌توان آنها را جزء مدل‌های کامل به شمار آورد، دارای انعطاف‌پذیری زیادی هستند، به طوری که با تغییر میزان جزئی‌نگری می‌توان خانواده‌ای از مدل‌ها برای مراحل متفاوت طراحی به دست آورد. تقطیر پر کاربردترین روش جداسازی است و به طور معمول انتخاب اول در جداسازی مخلوط مایعات است. وقتی این انتخاب کنار گذاشته شود، سایر جایگزین‌ها بررسی می‌شوند [۱].

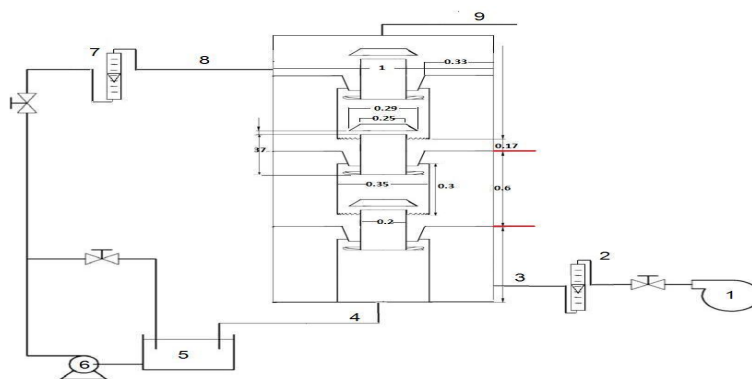
در سال‌های اخیر Kister [۲] نشان داده است که در میان علت‌های بد کار کردن برج‌های تقطیر، شبیه‌سازی با ۴۷ مورد در رده دوازدهم قرار گرفته است که بیشتر آنها در دهه گذشته گزارش شده‌اند. برج‌های شبیه‌سازی شده متعلق به واحدهای فرایندی شیمیایی مشکلات بیشتری نسبت به برج‌های تقطیر صنایع نفت و گاز داشته‌اند، احتمالاً دلیل آن مشکل بودن شبیه‌سازی فعل و انفعالات در فرایندهای شیمیایی است. توسعه کامپیوترهای قدرتمند، پیشرفت در تکنیک‌های عددی و بهبود در مدل‌های جریان چند فاز می‌دهد که دامنه تحقیقات، به مسایل پیچیده‌ی جریان همانند برج‌های حباب‌کار، راکتورهای چند فاز و سینی برج تقطیر کشانده شود. در سال‌های اخیر، در صنعت و دانشگاه علاقه زیادی به استفاده از CFD^۱ برای مدل‌سازی جریان‌های دو فاز در تجهیزات فرایندی مشاهده شده است. با وجود پیشرفت‌هایی در زمینه درک جریان دو فاز در برج‌های حباب‌کار [۳] با استفاده از CFD و وجود سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای مناسب کامپیوتری، شبیه‌سازی سینی نیز امکان‌پذیر است [۴].

برج استفاده شده در این تحقیق نوع خاصی از برج‌های سینی دار است که دارای جریان همسو با پره می‌باشد. مایع از بالای برج و از روی قسمتی از سینی که به صورت کاسه است، وارد برج شده و پس از برخورد به پره به صورت همگن توزیع شده و با گاز داخل برج به شکل همسو به پایین سرازیر می‌شود. پس از تماس دو فاز و انتقال جرم مورد نظر گاز از لوله‌ی وسط برج به سمت بالا حرکت کرده و وارد سینی بالایی می‌شود. لازم به ذکر است که در این پروژه از تاثیر انتقال جرم در شبیه‌سازی دینامیک سینی صرف نظر شده است. از نکات جالب توجه دیگر این برج وجود یک کلاهک می‌باشد. این کلاهک باعث می‌شود که مایع بالا رفته توسط گاز، به آن برخورد کرده و به صورت قطره‌ای به پایین ریخته شود. پره و کلاهک لوله خروجی گاز و کاسه ورودی مایع همه از اجزاء سینی حساب می‌شوند.

¹ Computational Fluid Dynamics

۲- بخش آزمایشگاهی

مشخصات هندسی سینی همسو مورد استفاده قرار گرفته در شکل ۱ خلاصه شده است. برای شبیه سازی، تنها قسمتی از برج کامل که در شکل، بین دو علامت قرمز نشان داده شده، انتخاب شده است. این قسمت مربوط به فضای بین دو سینی که شامل پره، لوله انتقال گاز، کلاهک، کاسه ورودی مایع و خروجی آن و نهایتاً یک پوشش استوانه ای می باشد. اندازه های مربوط به برج نیز در شکل به وضوح نشان داده شده است که برحسب متر می باشند.



شکل ۱: نمای شماتیک برج با جریان همسو ۱. کمپرسور هوا ۲. جریان سنج هوای ورودی ۳. جریان هوای ورودی به برج ۴. جریان آب خروجی از برج ۵. مخزن آب برای پمپاژ ۶. پمپ آب ۷. جریان سنج آب ورودی به برج ۸. جریان آب ورودی به برج ۹. جریان هوای خروجی از برج

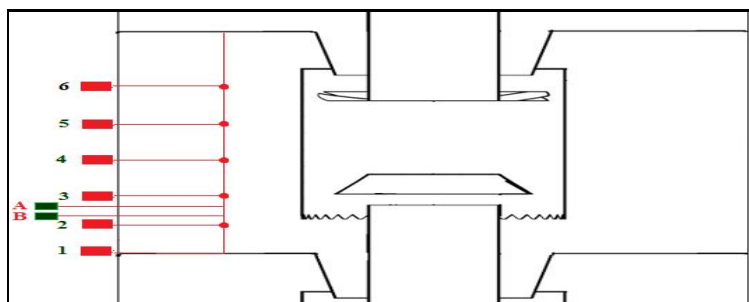
آنطور که واضح است مایع توسط پمپ شماره ۶ از روتامتر شماره ۷ گذشته و از بالا وارد برج می شود و نهایتاً از قسمت پایین برج خارج شده و وارد مخزن ۵ می شود در سمت دیگر هوا با استفاده از کمپرسور شماره یک از درون روتامتر ۲ گذشته و از پایین وارد برج می شود و نهایتاً از بالای برج خارج می شود.

۲-۱- داده های آزمایشگاهی

برای صحت سنجی شبیه سازی صورت گرفته، تغییرات فشار درون برج مورد بررسی قرار گرفتند. برای ایجاد فشار های مختلف از دو متغیر دبی مایع و گاز ورودی به برج استفاده شد. بدین صورت که یک بار در دبی ثابت مایع با تغییرات دبی گاز، مقدار فشار ۶ نقطه درون برج که در فاصله ی ۲۰ سانتی متری از دیواره برج (در جهت قطر برج) قرار داشتند، اندازه گیری شدند و بار دیگر با ثابت نگه داشتن دبی گاز، اندازه گیری های بالا صورت گرفتند. برای اندازه گیری فشار از مانومتر آبی استفاده شد. دقت این مانومتر به میزان ۱ سانتی متر آب می باشد. یک سر لوله مانومتر به اتمسفر و سر دیگر آن به نقاط مورد نظر متصل بود.

نقاط نشان داده شده در شکل ۲ نقاطی هستند که فشار آنها اندازه گیری شده اند. این نقاط بین سینی اول و دوم از بالا می باشند که شبیه سازی نیز به همین ناحیه می پردازد. در اندازه گیری اولیه ۶ نقطه نشان داده شده اند

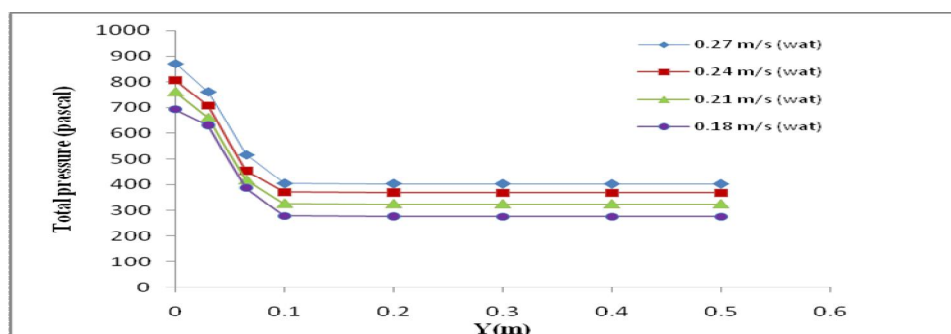
که با شماره ۱ تا ۶ به نمایش درآمده‌اند. تمام این نقاط به جز نقطه ی ۶ به فاصله ی ۱۰۰ میلی متری از یکدیگر نصب شده اند. نقطه ی ۶ در فاصله ی بین پره و قسمت انتهایی کاسه ورودی مایع قرار داده شده است. پس از اندازه گیری این نتیجه حاصل شد که فشار نقطه ی ۱ بیشترین مقدار را ارائه می دهد که این



شکل ۲: نقاط مورد نظر برای اندازه گیری فشار (داده های آزمایشگاهی)

به خاطر تجمع مایع و همان فشار هیدرو استاتیکی می‌باشد. پس از آن نقطه ی ۲ مقدار فشار کمتری را نسبت به نقطه انشان می‌دهد و نقاط ۲ تا ۶ نیز مقدار فشار بسیار نزدیک به نقطه ۲ را نشان می‌دهند. و این یعنی ارتفاع مایع تجمع یافته بین نقاط ۱ و ۲ می‌باشد به همین دلیل ۲ عدد فشارسنج دیگر در این نقطه نصب شد که در شکل با حرف لاتین A و B و به رنگ قرمز مشخص شده است. به دلیل اینکه فاصله ی نقاط کم می باشند (۱۰ سانتی متر) امکان نصب بیش از ۲ گیج در این فاصله وجود نداشت.

در این قسمت انجام آزمایش تصمیم بر آن بود تا میزان فشار درون پوشش یعنی در فاصله ی ۳۸ سانتی متری جداره نیز اندازه گیری شود. پس از اندازه گیری فشار این نقاط نتایجی که حاصل شد بیانگر این نکته بودند که تغییرات فشار در این ناحیه بسیار کم می‌باشند. از طرف دیگر در این ناحیه به دلیل ریزش مایع از بالا و برخورد نا منظم قطرات آب با دهانه لوله مانومتر، داده های دیده شده توسط این وسیله فاقد اعتبار کافی می‌باشد. بازه تغییرات هر یک از فاکتورهای جمع‌آوری شده به صورت نمودار در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: بخشی از داده های آزمایشگاهی جمع آوری شده توسط نگارنده



در این نمودار نقاط نشان داده شده در نمودار فشار کل را در ارتفاع های مختلف برج و بین دو سینی هستند. روند این نمودارها اینگونه اند که با افزایش سرعت ظاهری مایع در یک دبی ثابت گاز فشار کل روی سینی افزایش می یابد. بیشترین افت فشار بر اساس ارتفاع تجمع یافته مایع روی سینی می باشد ولی این افت فشار هیچ مقاومتی در برابر جریان گاز ایجاد نمی کند، که نشانگر فشار هیدرواستاتیکی مایع است. داده ها بر حسب متر مکعب بر ساعت بودند که پس از معادل سازی با سرعت ظاهری (به صورتی که نشان داده می شود) این سرعت ها در نمودار فوق به نمایش گذاشته شدند. پس از تقسیم کردن دبی حجمی بر عدد ۳۶۰۰ و مقدار سطح مقطع ورودی، سرعت ظاهری بر حسب متر بر ثانیه حاصل می شود.

۳- مدل سازی هیدرولیکی سینی همسو با تکنیک CFD

۳-۱- معادلات حاکم بر مدل سازی

معادلات حاکم بر مدل سازی شامل معادلات پیوستگی و مومنتم و معادلات بقای کسر حجمی و معادلات اغتشاش می باشد. عبارت های چشمه هم به معادلات اضافه میشود که با صرف نظر کردن از نیروهای جرم مجازی و نیروی لیفت، تنها قسمت چشمه ی موجود نیروی درگ خواهد بود که اثر فاز گاز بر روی فاز مایع است که بر اثر برهم کنش حباب های گازی با فاز مایع و نیروی اصطکاکی بینابین در معادله ی مومنتم تاثیر می گذارد [۵].

۳-۱-۱- معادله ی پیوستگی

فاز گاز

$$\frac{\partial(r_G \rho_G)}{\partial t} + \nabla \cdot (r_G \rho_G V_G) = 0$$

(۱)

فاز مایع

$$\frac{\partial(r_L \rho_L)}{\partial t} + \nabla \cdot (r_L \rho_L V_L) = 0$$

(۲)

۳-۱-۲- معادلات مومنتم

معادله ی مومنتم در فاز گاز

$$\frac{\partial(r_G \rho_G V_G)}{\partial t} + \nabla \cdot (r_G (\rho_G V_G V_G)) = -r_G \nabla P_G + \nabla \cdot (r_G \mu_{eff,G} (\nabla V_G + (\nabla V_G)^T)) - M_{GL} \quad (3)$$

معادله ی مومنتم در فاز مایع

$$\frac{\partial(r_L \rho_L V_L)}{\partial t} + \nabla \cdot (r_L (\rho_L V_L V_L)) = -r_L \nabla P_L + \nabla \cdot (r_L \mu_{eff,L} (\nabla V_L + (\nabla V_L)^T)) + M_{GL} \quad (4)$$



همانطور که در قسمت های قبل توضیح داده شد فاز گاز به عنوان فاز اولیه و مایع به عنوان فاز پراکنده مطرح گردید. برای انفصال سازی تمامی معادله های روش ^۱ QUICK و برای کوپل کردن معادلات فشار و سرعت از الگوریتم ^۲ SIMPLE استفاده شد [۶].

برای عبارت های زمان روش ضمنی مرتبه یک^۳ به کار گرفته شد. ضمن حل سیستم معادله ها، این نتیجه به دست آمد که ضریب زیر تخفیف^۴ کم، به طور معمول کمتر از ۰/۲ به کار برده شود.

۳-۲- دیدگاه شبیه سازی

برای حل این مسئله از نرم افزار فلونت استفاده شد. دو ماده آب و هوا به عنوان دو فاز مایع و گاز انتخاب شدند. برای حل این مسئله حالت ناپایا انتخاب شد و مقدار گام زمانی ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شد. مقدار گام زمانی به کار گرفته شده نیز تاثیر زیادی در روند حل مساله دارد، مدل چند فاز اولی-اولری برای بررسی رفتار فازها و همچنین مدل RNG K-ε به عنوان مدل مناسب اغتشاش برگزیده شد [۷].

۴- روش حل مسئله

۴-۱- مشخصات هندسی و مش بندی

دامنه محاسباتی کل فضا، فاصله بین دو سینی می باشد این سینی از اجزای مختلفی تشکیل شده است. قطر اصلی برج ۱ متر و قطر لوله داخلی تعبیه شده در برج (محل ورود و خروج گاز) ۰/۲ متر و قطر کاسه وسط سینی که در واقع محل ورود مایع می باشد ۰/۴۴ متر می باشد.

این برج دارای یک کاسه می باشد که ورودی مایع می باشد. مایع پس از عبور از کاسه به روی پره ها (به تعداد ۲۰ پره) ریخته و به دلیل پراکنده شدن فاز مایع، سطح تماس بین فازها (مایع و گاز) افزایش می یابد. بیشترین انتقال جرم بین گاز و مایع در این بخش صورت می گیرد. در سمت دیگر، گاز از لوله ی در نظر گرفته شده، وارد شده و پس از برخورد به کلاهک آن را دور زده و قسمت عمده ی آن از بیرون پوششی که تعبیه شده است، خارج و قسمت اندکی از آن از درون پوشش عبور می کند. گاز عبوری از خارج پوشش به بالا می رود. این گاز خروجی با مایعی که قبلا روی سینی تجمع پیدا کرده است تماس پیدا می کند، همین تماس باعث کف آلود شدن سیال می شود و مقداری از ارتفاع مایع خالص را کم می کند قسمتی از انتقال جرم هم در این ناحیه صورت می گیرد. در ادامه گاز به پایین سینی بالایی رسیده و وارد پوشش شده از قسمت بالای آن به صورت همسو با مایع به پایین ریخته شده و وارد پوشش می شود و پس از تماس کافی با مایع، از درون لوله خروجی که میان پره هاست، به بالا حرکت میکند.

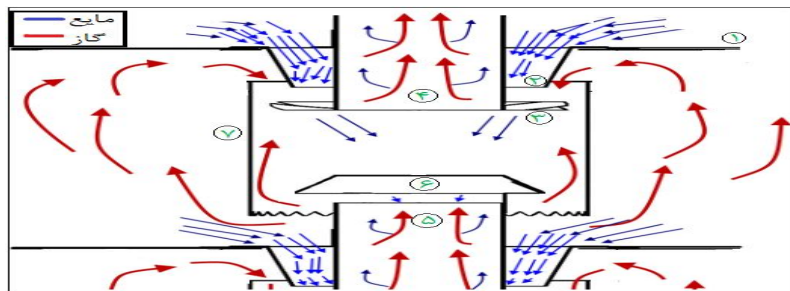
¹ Quadratic Upstream Scheme

² Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

³ Implicit first-order

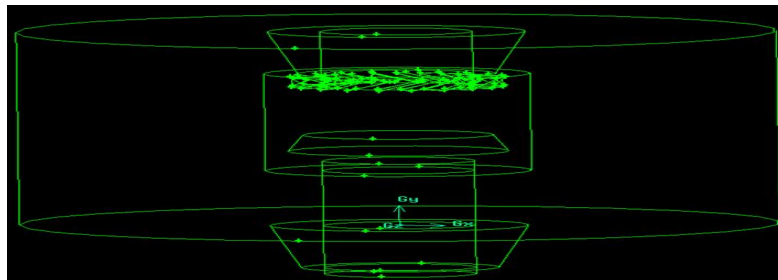
⁴ Under Relaxation

مایع پس از تماس با فاز گاز به پایین ریخته و از پوشش عبور کرده وارد کاسه پایینی که خود به عنوان ورودی برای سینی پایین تر استفاده می شود. لازم به ذکر است کلاهک مورد نظر به آن جهت تعبیه شده که هم گاز ورودی به سینی بالا را پخش کرده و موجب خروج آن از درون پوشش شود و هم در مقابل مقدار مایعی که با گاز به سمت بالا حمل می شود، بایستد و آن را به صورت قطره ای به پایین هدایت کند که همین امر نشان دهنده ماندگی کم در این برج است. روند حرکت فازها در این سینی به صورت واضحتر در شکل ۴ به نمایش درآمده است.

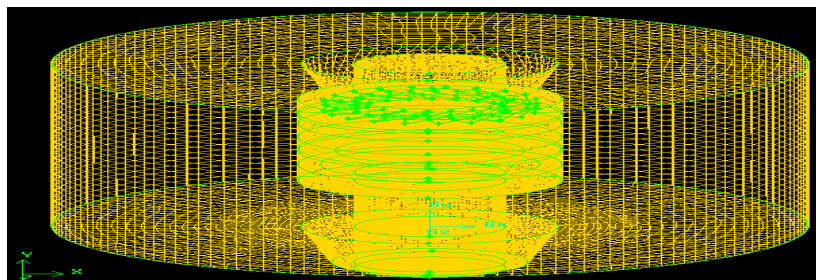


شکل ۴: قسمت انتخاب شده جهت شبیه سازی، نحوه حرکت فازهای گاز و مایع و اجزای مربوطه ۱. سینی ۲. کاسه ۳. پره ۴. لوله خروجی گاز ۵. لوله ورودی گاز ۶. کلاهک ۷. پوشش

برج همسو با پره دارای سطح انتقال جرم زیاد بوده و در کل راندمان آن بیشتر از برج های یاد شده می باشد. در شکل ۵ سه بعدی برج دیده می شود.



شکل ۵: نمای سه بعدی برج که در نرم افزار گمبیت ساخته شده است



شکل ۶: نمونه ای از مش بندی که در نرم افزار گمبیت نشان داده شده است.



به منظور مش بندی سیستم برخی از قسمت ها از جمله ناحیه اطراف پره ها و قسمت های زیرین آن از مش غیر-ساختاری چهاروجهی استفاده شد که برای هندسه های پیچیده مورد استفاده قرار می گیرد. ولی برای برخی قسمت های دیگر که تراکم مش بندی در نواحی نزدیک پره، کلاهک و اطراف پوشش به دلیل اختلاط شدید جریان، گرادیان بالای متغیرها و تشکیل گردابه ها و نواحی مرده احتمالی، بیشتر در نظر گرفته شد از مش بندی نوع شش وجهی (هگز-کوپر) استفاده شد که در شکل ۶ مش بندی آن مشاهده می شود. جهت بررسی استقلال نتایج از تعداد مش، در هر مورد از شبیه سازی ها، مش بندی موجود ریزتر شده و شبیه سازی چندبار تکرار شد. مشخصات مش بندی ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: جزییات مش بندی های صورت گرفته

تعداد گره	تعداد صفحه	تعداد سل	نوع مش
0.55×1.05	0.61×1.06	0.3×1.06	نوع ۱
$2/1 \times 1.05$	$1/2 \times 1.06$	0.6×1.06	نوع ۲
$4/3 \times 1.05$	$1/6 \times 1.06$	0.8×1.06	نوع ۳

۴-۲- شرایط اولیه و مرزی

۴-۲-۱- شرط مرزی ورودی و خروجی برای مایع

بدلیل اینکه داده های جمع آوری شده در آزمایشگاه بر مبنای دبی حجمی بودند لذا در شرایط پایا به دلیل اینکه دبی ثابت میباشد این دبی را بر سطح مقطع ورودی مایع تقسیم کرده و سرعت ظاهری آن بدست می آید. پس از مدل سازی و مقایسه ی نتایج با روابط تجربی مشاهده شد که در برخی از شرایط عملیاتی مطابقت مناسبی بین داده های تجربی و نتایج مدل سازی وجود ندارد که علت آن ورود مایع به صورت پلاگ و بدون پروفایل می باشد لذا برای این منظور شرط مرزی ورودی مایع به برج به صورت پروفایل در نظر گرفته شد. به این ترتیب که شبیه سازی ابتدا با همان شرط مرزی ورودی پلاگ اجرا شد و بعد از اینکه به مرحله ی پایا رسید، پروفایل خروجی مایع از قسمت زیرین برج به عنوان شرط مرزی ورودی به برج در نظر گرفته شد. شرایط خروجی برای مایع به صورت فشار خروجی در نظر گرفته شده است.

۴-۲-۲- شرایط مرزی برای ورودی و خروجی گاز

لوله هایی که بین هر دو سینی برج در نظر گرفته شده اند به عنوان ورودی و خروجی گاز در نظر گرفته شده اند. شرط مرزی ورودی برای گاز، سرعت ورودی و برای خروجی با توجه به توضیحات ارائه شده در قسمت قبل فشار خروجی فرض شد.

۴-۲-۳- شرط مرزی برای دیواره ها و قسمت های داخلی

نهایتا از دو نوع شرط مرزی دیگر نیز استفاده گردید شرط مرزی نوع دیواره غیر لغزشی برای دیواره ها و شرط interior برای برخی قسمتهای داخلی برج مذکور.

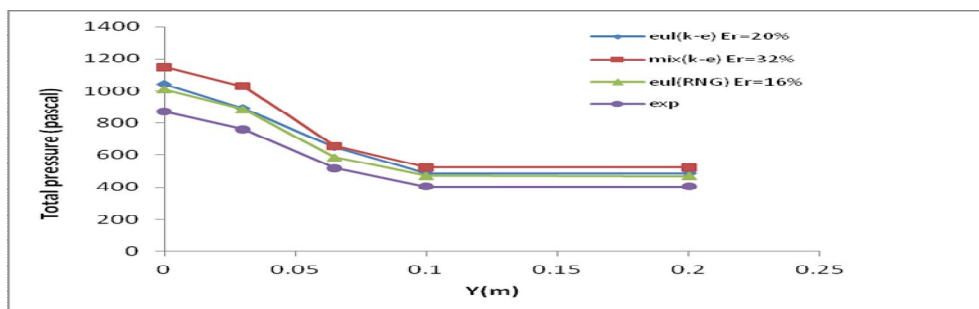
۴-۲-۴- شرط اولیه

از آنجا که فاز گاز در این برج فاز پیوسته است کسر حجمی گاز را برابر یک در نظر می گیریم.

۵- نتیجه ها و بحث

۵-۱- بررسی نتایج بدست آمده و صحت سنجی

شبیه سازی برای سه حالت صورت گرفت. حالت اول رویکرد اولرین-اولرین با مدل اغتشاشی Standard k-ε، حالت دوم رویکرد مخلوط با مدل اغتشاش Standard k-ε و حالت سوم رویکرد اولرین-اولرین با مدل اغتشاش RNG k-ε است. برای انجام این شبیه سازی ها از یک نوع مش بندی خاص یعنی نوع ۱ استفاده می کنیم. روند کار به این گونه است که ابتدا در یک مشبندی خاص شبیه سازی ها انجام میشوند، سپس حالت شبیه سازی مناسب انتخاب شده و مرحله استقلال از مش بر روی این شبیه سازی بررسی خواهد شد. پس از شبیه سازی های صورت گرفته نتایج توزیع فشار برای هر سه حالت شبیه سازی در شکل ۷ آمده است. محور افقی این نمودار ارتفاع برج را در فاصله های مختلف نشان می دهد. این شبیه سازی برای حالتی است که در آن سرعت ظاهری مایع ۰/۲۷ متر بر ثانیه و سرعت ظاهری گاز ۲ متر بر ثانیه می باشد. نمودار حاصل از شبیه سازی حالت سوم یعنی اولرین-اولرین (RNG) نیز در شکل ۷ قابل مشاهده می باشد.

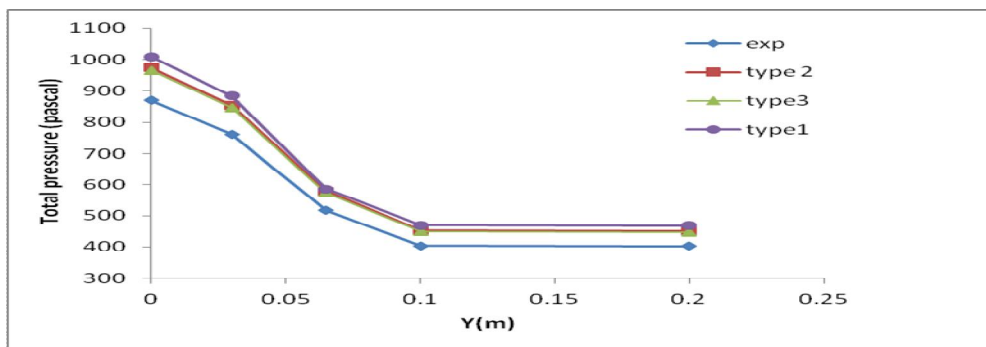


شکل ۷: نتایج توزیع فشار در قسمت بیرون از پوشش، سرعت ظاهری مایع ۰/۲۷ متر بر ثانیه و سرعت ظاهری گاز ۲ متر بر ثانیه

واضح است که روند تغییرات محوری پروفایل فشار مایع کل در هر سه حالت مشابه داده های تجربی است. اما نتایج شبیه سازی مربوط به حالت سوم که از دیدگاه اولرین-اولرین و مدل RNG استفاده شده است، به داده های واقعی نزدیکتر می باشد.

۵-۲- استقلال از مش بندی

برای اطمینان از صحت نتایج مدل، مش هایی با دانسیته های متفاوت به کار گرفته شد. و درصد خطا در هر مورد محاسبه و با درصد مش قبلی مقایسه شد. زمانیکه نتایج دو مش متوالی تفاوت قابل ملاحظه ای نداشتند، از مش با دانسیته ی کمتر استفاده شد که نیازمند زمان پردازش کمتری بود. برای انجام مرحله ی استقلال از مش بندی، شبیه سازی حالت اول که نتایج بهتری را نشان داده بود، مورد بررسی قرار گرفت. سه نوع مش بندی متفاوت که در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج حاصل از آنها در جدول ۲ آمده است.



شکل ۸: نتایج حاصل از شبیه سازی در مش بندی های متفاوت

جدول ۲: نتایج خطا برای سه نوع مش بندی متفاوت

نوع مش	زمان اجرای برنامه (روز)	خطا (%)
نوع ۱	۸	۱۶
نوع ۲	۱۷	۱۲
نوع ۳	۲	۱۰

همانطور که مشاهده می شود، خطای مورد نظر از مش بندی نوع ۱ به نوع ۲ به میزان محسوسی کاهش می یابد ولی این خطا از مش بندی نوع ۲ به نوع ۳ کمتر تغییر می کند و بدلیل اینکه زمان محاسبه به مقدار قابل توجهی افزایش می یابد، همان مش بندی نوع ۲ مناسب تر به نظر می رسد.

۵-۳- بررسی ارتفاع مایع تجمع یافته روی سینی

ارتفاع و نحوه ی تجمع مایع روی سینی نیز در هیدرولیک سینی موثر می باشد لذا در سیر مطالعه و بررسی نتایج شبیه سازی، به تاثیر تغییرات دبی گاز و مایع بر ارتفاع مایع تجمع یافته روی سینی نیز پرداخته شد [۸].

با توجه به رابطه ی ۵ داریم :

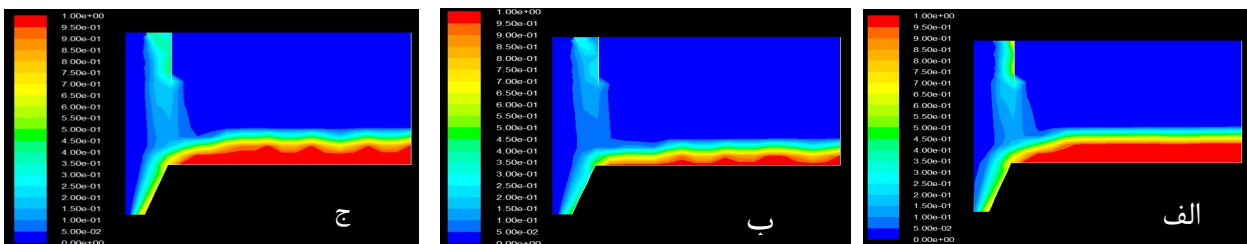
$$\rho_t = \rho_l x_l + \rho_g x_g \quad (5)$$

که در آن ρ_t همان دانسیته کل و ρ_l دانسیته مایع x_l نسبت جرمی مایع به نسبت جرمی کل می باشد و ρ_g

دانسیتته گاز و X_g نسبت دبی جرمی گاز به دبی جرمی کل می باشد. هرچه دبی گاز را بیشتر کنیم مقدار X_g افزایش یافته و سهم دانسیته گاز افزوده می شود در طرف دیگر با افزایش سهم دانسیته گاز، سهم دانسیته مایع کاهش می یابد نهایتاً از دانسیته کل کاسته می شود. از طرفی عمده عامل ایجاد فشار در محلی که تجمع مایع وجود دارد، پارامتر فشار هیدرو استاتیکی می باشد. فشار هیدرواستاتیکی با رابطه ی ۶ نشان داده می شود.

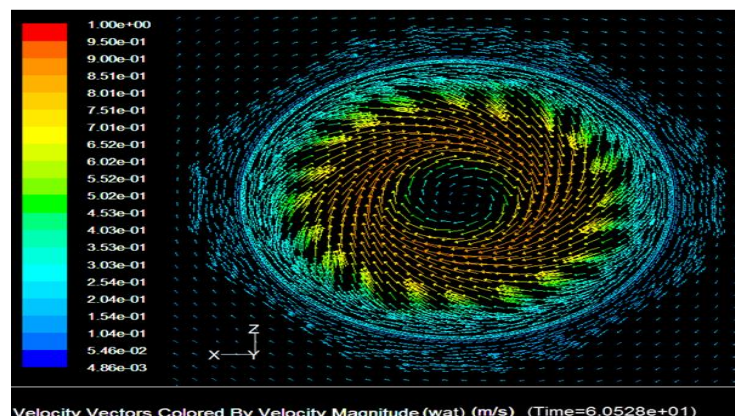
$$p = \rho gh \quad (6)$$

در این رابطه ، شتاب گرانش و ارتفاع تجمع مایع دیده می شوند. با کاهش دانسیته کل، فشار هیدرواستاتیکی و نهایتاً فشار کل نیز کاهش می یابد. واقعیت این است که با افزایش دبی گاز همراه بری مایع نیز بیشتر می شود و روی مایع تجمع یافته حالت کف مانند ایجاد می شود که از مقدار مایع تجمع یافته کاسته و بیشتر وارد فاز گاز می شود. شکل ۹ کانتور فازی را روی سینی نشان می دهد قسمتی که رنگ قرمز دارد مایع خالص یا همان زلال می باشد و قسمت تار که پراکنده تر و کمرنگ تر دیده می شود همان قسمت کف آلود می باشد.



شکل ۹: کانتور فازی برای بررسی ارتفاع مایع تجمع یافته روی سینی. الف) سرعت ظاهری مایع ۰/۲۷ متر بر ثانیه و سرعت ظاهری گاز ۱/۴ متر بر ثانیه. ب) سرعت ظاهری مایع ۰/۱۸ متر بر ثانیه و سرعت ظاهری گاز ۱/۴ متر بر ثانیه. ج) سرعت ظاهری مایع ۰/۲۷ متر بر ثانیه و سرعت ظاهری گاز ۲ متر بر ثانیه

مایع پس از برخورد به پره ها به علت شیب پره، دچار یک حرکت چرخشی می شود که شکل بردار سرعت آن در شکل ۱۰ آورده شده است.



شکل ۱۰: بردار سرعت برای فاز مایع



۶- نتیجه گیری

هدف از انجام این تحقیق بررسی هیدرولیک یک نوع برج مخصوص دارای سینی با جریان همسو و همراه پره مورد شبیه سازی قرار گرفت، طی کردن چندین مرحله برای به انجام رساندن این مطالعه لازم بود. در مرحله اول، از توزیع فشار مایع تجمع یافته روی سینی برای صحت سنجی استفاده شد. برای داشتن یک مبنا نیاز به داشتن داده های آزمایشگاهی معتبر بود. به همین خاطر به جمع آوری داده های معتبر و مناسب پرداخته شد. پس از اعتبار سنجی و انتخاب مدل و دیدگاه مناسب برای شبیه سازی، حال نوبت به مرحله بررسی استقلال از مش می رسد. در این مرحله از سه نوع مش بندی استفاده شد. نهایتاً یکی از انواع مش بندی انتخاب شد. پس از انتخاب نهایی شبیه سازی بهینه، به بررسی چند پارامتر که بر هیدرولیک سینی و همچنین بر راندمان موثر بودند، پرداخته شد. توزیع فشار و تاثیر تغییرات دبی ها بر روی ارتفاع مایع تجمع یافته روی سینی، مواردی بودند که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه ای از یافته ها را در این تحقیق می توان به صورت زیر بیان نمود :

- کاهش افت فشار ناشی از مایع تجمع یافته روی سینی با افزایش دبی گاز، با افزایش دبی گاز و تماس این فاز با فاز مایع باعث می شود چگالی قسمتی از مایع که با گاز در تماس است کاهش یافته و به همین علت از فشار هیدرواستاتیکی مایع تجمع یافته روی سینی کاسته می شود.
- افزایش افت فشار ناشی از مایع تجمع یافته روی سینی با افزایش دبی مایع. با افزایش دبی مایع، ارتفاع مایع تجمع یافته روی سینی بیشتر می شود به همین ترتیب فشار هیدرواستاتیکی مایع نیز که تابعی از ارتفاع مایع می باشد نیز افزایش می یابد.
- افزایش قابل توجه سطح تماس بین فازها در حضور پره ها نسبت به برج بدون پره. مطابق نتایجی که به تفصیل ارائه شد، هنگامی که از پره استفاده می شود، پراکندگی و پخش شدن فاز مایع بیشتر می شود و به همین علت سطح تماس بین فازها بیشتر می شود. از طرفی زاویه ای که پره دارد باعث ایجاد سرعت در جهت θ می شود که به همین علت زمان تماس بین فازها نیز بیشتر می شود.
- استفاده از مدل توربولنسی RNG به دلیل چرخشی شدن جریان پس از برخورد به پره ها. پس از اینکه چرخشی شدن جریان محرز شد، مدل RNG برای شبیه سازی انتخاب شد که در شبیه سازی ها هم مشاهده شد که این مدل جواب مناسب تر و دقیق تری ارائه می کند.

سپاسگذاری

با سپاس از جناب آقای مهندس نظیری مدیرعامل محترم شرکت آذر انرژی که طراحی و ساخت برج مورد نظر را به عهده گرفتند.



علائم

P (Pa)	فشار
\bar{g} (ms^{-2})	شتاب گرانش
μ ((cP, $\text{Pa}^{-\text{s}}$, $\text{lbm/ft}^{-\text{s}}$)	ویسکوزیته ی دینامیکی
V (m/s)	بردار سرعت
ρ_G (kgm^3)	دانسیتته ی گاز
ρ_L (kgm^3)	دانسیتته ی مایع
u_G (ms^{-1})	سرعت گاز
u_L (ms^{-1})	سرعت مایع
t (s)	زمان
ρ (Kgm^{-3})	چگالی

مراجع

- [1] VISION 2020, 1998 Separation Roadmap, Center for waste reduction technologies, *AIChE.*, New York, (1998).
- [2] Kister, H.Z., *Trans. IchemE.*, **81**, Part A, January (2003).
- [3] Jakobsen, H.A., et al., *Ind. Eng. Chem. Res.*, **36**, p. 4052 (1997) .
- [۴] رهبررحیمی، محمودرضا رحیمی، شهرکی، فرهاد" بررسی توانمندی دینامیک سیالات محاسباتی در طراحی سینی های غربالی برج تقطیر"، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، دوره ی ۲۴، سال ۱۳۸۴.
- [5] J.M. van Baten, R. Krishna, "Modelling sieve tray hydraulics using Computational fluid dynamics", *Chemical Engineering Journal* 77 143–151, 2000
- [6] Ranade, V.V., 2002, *Computational Flow Modelling for Chemical Reactor Engineering*, ACADEMIC PRESS, A Harcourt Science and Technology Company, California 92101-4495, USA.
- [7] Anderson, DA., 1984, *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, McGraw Hill Book Company, New York, USA.
- [8] M. R. Rahimi, R. Rahimi, F. Shahraki and M. Zivdar, "*Prediction of Temperature and Concentration Distributions of Distillation Sieve Trays by CFD*", *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 2006



Hydraulic Simulation of co-current distillation tray by using of Computational fluid dynamic

H.Habibzadeh¹- N.Kasiri^{2*}-F.SHahraki³-J.Ivakpour⁴-N.Naziri⁵

hadiseh_habibzadeh@yahoo.com¹ - capepub@cape.iust.ac.ir^{2*} - fshahraki@eng.usb.ac.ir³ -
ivakpour@gmail.com⁴ - info@azarenergy.com⁵

Abstract

The hydrodynamic simulation of multi-phase flows in distillation towers in process industries has become of ever increasing importance and interest over the recent years. In this paper the hydraulics of an industrial scale co-current tray distillation column was studied using the finite volume method in the Fluent 3.6.26 software environment. The liquid phase is assumed discrete while the gas phase is considered to be continuous with the two phases interacting. Eulerian-Eulerian framework has been used to solve the equations including momentum and continuity equations. RNG Dispersion model has been used to estimate the turbulent fluid viscosity while Schiller-Naumann is used for drag calculations as closure equations. The simulation results demonstrate good agreement compared to the experimental results with an average error of 0.11 when gas superficial velocity varied from 1.4 (m/s) to 2 (m/s) and liquid superficial velocity was varied from 0.18 m/s to 0.27 m/s. The results show that the tray pressure drop is reduced in the higher apparent gas velocities consequently with increasing gas phase flow and the tray pressure drop increases with increasing liquid flow in a constant gas flow.

Key Words: Computational Fluid Dynamic, Co-Current distillation tray, hydraulic parameters, pressure drop, impeller.