

مروری بر آنالیز CFD افت فشار و انتقال جرم در برجهای سینی دار مخروطی چرخان

مرتضی زیودار*، شیروان شیردل، ایمان خنشا، لیلا پور جعفر

زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، گروه مهندسی شیمی

پیام نگار: mortaza@hamoon.usb.ac.ir

چکیده

تاکنون تحقیقات مختلفی در خصوص آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برجهای سینی دار مخروطی چرخان (SCC) انجام گرفته است، به ویژه در سالهای اخیر با ورود کامپیوترهای پر سرعت و نیز تولید نرم افزارهای پیشرفته دینامیک سیالات محاسباتی نظیر نرم افزار CFX، این تحقیقات رو به افزایش است. ساختار هندسی پیچیده این برجها و کنترل دشوار آنها سبب شده است که به کمک دینامیک سیالات محاسباتی به دنبال توسعه و بهینه سازی در طراحی و کنترل این نمونه از برجها باشند. اکثر تحقیقات انجام شده در این زمینه، در دانشگاه سیدنی استرالیا و دانشگاه سیستان و بلوچستان صورت گرفته است. در این مقاله یک مرور کلی بر پژوهشهای موجود در زمینه آنالیز CFD برجهای SCC انجام گرفته و تحقیقات انجام شده در زمینه افت فشار، انتقال جرم و رژیم های جریان، معرفی می شوند. این تحقیق می تواند در جهت گیری های آینده در زمینه آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و پژوهش های جدید مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: برج سینی دار مخروطی چرخان (SCC)، CFD، افت فشار، انتقال جرم

۱- مقدمه

ثابت تحت تاثیر جاذبه پایین می آید و بوسیله نیروی گریز از مرکز از مخروط های چرخنده بالا می رود. بالای سطح سینی ها بوسیله یک لایه نازک از فیلم مایع خیس می شود [۳]. بخار از فاصله بین مخروطهای ثابت و چرخنده عبور کرده و به صورت نا همسو نسبت به مایع بالا می رود [۴]. شکل (۱) بخشی از نمای داخلی برجهای SCC به همراه مسیرهای جریان مایع و گاز را نشان می دهد [۵].

برجهای از نوع سینی دار مخروطی چرخان (SCC) یکی از انواع برجهای تقطیر سینی دار است [۱]. این برج ها به علت افت فشار پایین و مدت ماند کوتاه بطور وسیعی در صنایع غذایی در خصوص جداسازی و بازیافت طعم دهنده های غذایی کاربرد دارند [۲]. این برج از مخروطهای چرخان و ثابت تشکیل شده است که مایع از مخروط های

1. Spinning Cone Column

تحقیقاتی انجام شده که منجر به توسعه یک مدل برای جریان فیلم مایع روی سطح سینی چرخان و بوجود آمدن اولین مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۲ برای این نوع برج ها شده است [۱۱]. در این مقاله آخرین تحقیقات و پژوهش های انجام شده در زمینه آنالیز CFD برجهای SCC معرفی می شود و مورد بحث قرار می گیرد.

۲- تاریخچه استفاده از CFD برای مدل سازی برجهای SCC

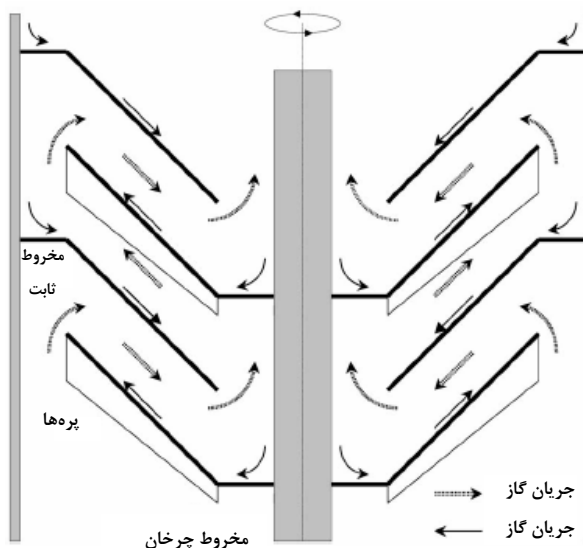
اولین بار در سال ۲۰۰۲، ماکاریچیف^۳ به همراه همکارانش در دانشگاه سیدنی استرالیا شبیه سازی CFD روی الگوهای جریان و توزیع فشار در یک ستون تقطیر سینی دار مخروطی (SCC) در مقیاس آزمایشگاهی (قطر ۰/۱۵m) و در غیاب جریان مایع را انجام دادند [۵].

نرم افزار مورد استفاده در این تحقیق CFX 4.3 بود.

در سال ۲۰۰۳، لانگریش^۴ به کمک همکارانش در دانشگاه سیدنی، دینامیک جریان گاز در غیاب مایع در برج SCC را با آنالیز CFD مورد مطالعه قرار دادند [۱۲]. نرم افزار استفاده شده CFX 4.3 بوده و نتایج حاصل کاملاً مشابه کار قبلی است. آنها همچنین مشخصات جریان مایع روی سطوح چرخان را با آنالیز ابعادی مرتبط کردند. از پارامترهای کلیدی که مشخص کننده انتقال جرم و عملکرد کلی SCC می باشد، ضخامت و سرعت فیلم های نازک جاری بر سطح سینی مخروطی چرخان است.

در سال ۱۳۸۲ زیودار و هدایتی در گروه مهندسی شیمی دانشگاه سیستان و بلوچستان ایران، هیدرودینامیک جریان گاز در غیاب جریان مایع را به کمک آنالیز CFD برای ستونی در مقیاس آزمایشگاهی بررسی کرده و شرایط فیزیکی مناسبی از لحاظ آرام بودن یا آشفته بودن جریان و چگونگی نحوه توزیع سرعت و فشار را با بکار بردن سرعتهای متفاوت گردش محور به دست آوردند [۴ و ۱۳]. مدلسازی و شبیه سازی با استفاده از نرم افزارهای تجاری انجام شد.

علاوه بر این، شبیه سازی در فاز مایع نیز انجام گردید که ضخامت فیلم مایع و ضخامت لایه موجی با استفاده از سرعت های مماسی و شعاعی به دست آمد.



شکل ۱- بخشی از مسیر جریان در SCC [۵]

در طول توسعه SCC برای عملیات بازیافت اسانس، کازیمیر^۱ طراحی اولیه را با قرار دادن پره (تیغه)های شعاعی در قسمت زیر مخروط چرخان اصلاح کرد [۶]. پره ها تا حدی به عنوان پمپ های چرخشی عمل می کنند وافت فشار گاز را در طول برج کاهش می دهند و فشار داخل برج را بیشتر کنترل می کنند. تعداد و طراحی پره ها بر توزیع فشار درون برج تاثیر می گذارند و در جداسازی موثر گاز و مایع مهم می باشند. انتقال جرم از فاز مایع به بخار در برج SCC از طریق سطح وسیعی از لایه (که ممکن است کمتر از یک میلی متر ضخامت داشته باشد) و از طریق پراکندگی مایع در نواحی بین سینی های چرخان و ثابت رخ می دهد [۷]. ضخامت لایه مایع و شکل سطح آن، پارامترهای کلیدی موثر بر انتقال جرم و انتقال تکانه می باشند [۸]. مزایای SCC در مقایسه با برج های سنتی عبارتند از: کاهش ماندگی مایع (مدت اقامت مایع)، کاهش افت فشار، قابلیت چند مرحله ای خوب و قابلیت ورود خوراک به صورت ذرات جامد معلق با نسبت بالا [۹]. روابطی که برای افت فشار و محدوده طغیان برای برج های سنتی آکنده و سینی دار توسعه یافته است، در اینجا کاملاً غیر کاربردی است که دلیل آن، طراحی خاص و روابط چرخشی برای برج SCC است [۱۰]. از سال ۱۹۹۵ برای درک اساسی فرایندهای فیزیکی در برج های SCC و بدست آوردن مدل ریاضی قابل درک از شرایط SCC، کارهای

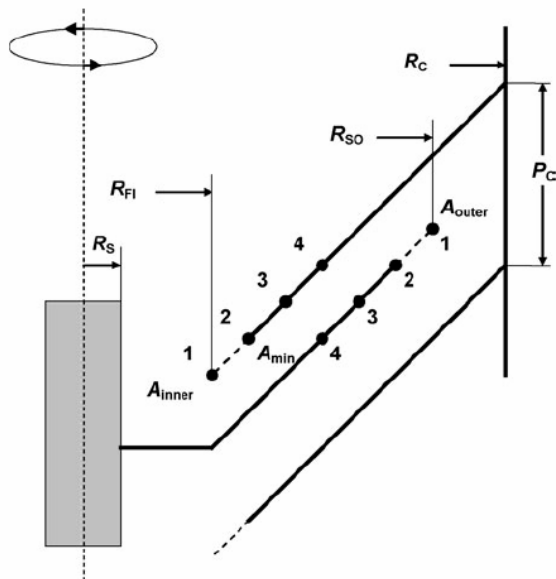
2. Computational Fluid Dynamics

3. S.V. Makarytchev

4. T.A.G. Langrish

1. Casimir

در سال ۲۰۰۵، ماکاریچیف و همکارانش تأثیرات تغییر در هندسه SCC (تغییر در اندازه گلو گاه های داخلی و خارجی) بر ظرفیت و عملکرد انتقال جرم دستگاه را با آنالیز CFD تحقیق کردند [۱۵]. چگونگی تغییرات در اندازه گلو گاه در شکل (۳) و جدول (۱) آمده است. در شکل (۳) محل نقاط مورد نظر برای چهار هندسه تحت بررسی مشخص شده است که با توجه به تغییر مکان این نقاط که اندازه های آن ها در جدول (۱) آمده است چهار هندسه متفاوت با وسعت گلو گاه های مختلف ایجاد شده است.



شکل ۳- تغییرات در هندسه در SCC [۱۵]

برای مشخص کردن چهار هندسه مورد نظر از C (Opening Parameter) که به شکل زیر تعریف می شود استفاده شده است.

$$C = \frac{A_{inner}}{A_{column}} = \frac{R_{FI}^2 - R_S^2}{R_C^2 - R_S^2} \quad (1)$$

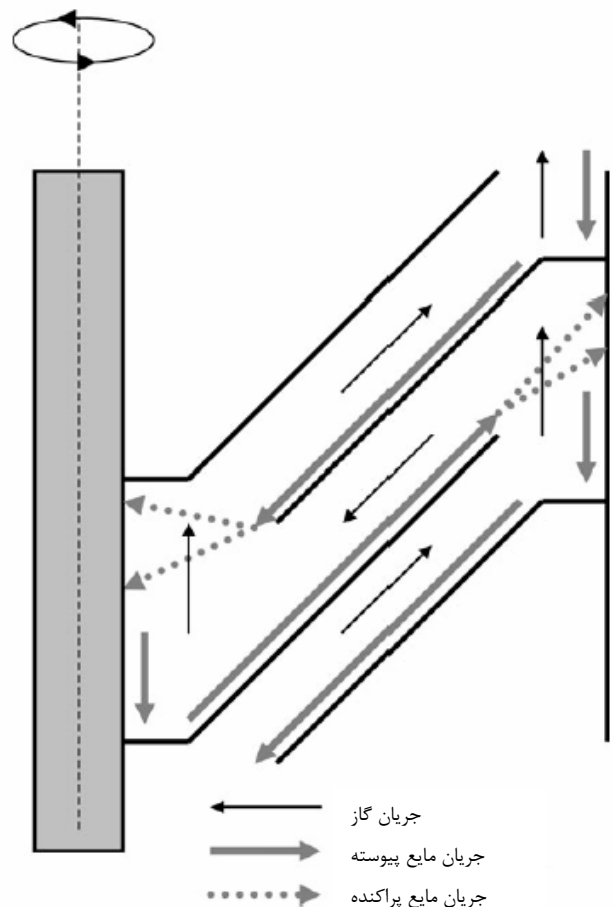
که مقدار آن در این تحقیق، بین ۰/۰۹ تا ۰/۳۷ (جدول (۱)) تغییر می کند.

در سال ۲۰۰۵ ماکاریچیف و همکارانش مکانیزمهای انتقال جرم و رژیم عملکرد ستون را برای سه برج SCC در مقیاس آزمایشگاهی (قطر داخلی ستون ۰/۱۴۸ m، $D_c = 0.148m$)، پایلوت ($D_c = 0.346m$) و تجاری

($D_c = 0.810m$) بررسی کردند [۱۶].

در سال ۲۰۰۴، ماکاریچیف و لانگریش از دانشگاه سیدنی بی بعد سازی متغیرهای روابط چرخشی را بررسی و ساختار بدون بعدی را برای فشار در یک ستون خشک SCC معرفی کردند [۱۱]. از این ساختار برای توسعه مدلهای قابل استفاده در آنالیز CFD و فراهم کردن موجبات توانایی پیشگویی آن استفاده می شود.

در همین سال ماکاریچیف و همکارانش مکانیزم انتقال جرم گاز- مایع در SCC را در مقیاس پایلوت با قطر داخلی پوسته ۰/۱۴۸ m و سرعت چرخش (500 rpm) برای یک سیستم آب- بخار مورد ارزیابی قرار دادند [۱۴]. سیستم جریان واقعی به صورت سه فازی (فیلیم مایع پیوسته، قطرات مایع پراکنده و گاز) است که در شکل (۲) نشان داده شده [۱۵]، و با یک مدل اولرین دو فازی CFD (مایع پراکنده و گاز) و با هندسه و شرایط مرزی برای سه فاز واقعی شبیه سازی شده است. نرم افزار مورد استفاده CFX 4.4 بوده است.



شکل ۲- سیستم جریان واقعی در SCC [۱۵]

جدول ۱- اندازه تغییرات در هندسه SCC [۱۵]

مکان				پارامتر	
۴	۳	۲	۱		
SCC واقعی					
۰/۰۴۸	۰/۰۴۱	۰/۰۳۵	۰/۰۳۰	RFI (m)	اندازه مخروط
۰/۰۴۸	۰/۰۵۷	۰/۰۶۴	۰/۰۶۹	RSO (m)	
۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۱۴	A _{داخلی} (m ²)	مساحت‌های بحرانی
۰/۰۱۰۰	۰/۰۰۷۰	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۲۲	A _{بیرونی} (m ²)	
۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۰۹	Amin (m ²)	
۰/۳۷	۰/۲۵	۰/۱۶	۰/۰۹	C. (وسعت گلوگاه)	

و آنالیز عملکرد SCC این است که ضخامت فیلم بدون بعد در بزرگنمایی، در ظرفیت وابسته ثابت لزوماً حفظ می شود اما رژیم جریان از آرام به آشفته تغییر می کند. نتایج حاصل از این تحقیق، نگرش خوبی از طراحی و عملکرد SCC دارد که در تحقیقات بعدی و برای حالت دو فازی از آن استفاده می شود. ماکارپیچ و لانگرایش نشان دادند که افت فشار شامل مجموعه ای از عناصر گریز از مرکز و دینامیکی است که تحت شرایط خاص SCC به صورت رابطه زیر در می آید:

$$\Delta P_G = 2N_{st}(k_{reg}Ro^2 + k_{rot}) \quad (2)$$

که در آن، N_{st} تعداد مجموعه سینی های مخروطی، k_{rot} و k_{reg} ثابت های تجربی مشخص کننده رژیم جریان و بازدهی گریز از مرکز می باشند، Ro عدد Rossby (سرعت جریان گازی بعد چرخشی) است [۱۰]. از شبیه سازی CFD برای بدست آوردن ثابت های تجربی k_{rot} و k_{reg} استفاده شده که در جدول (۲) با مقادیر تجربی مقایسه شده اند.

۳- معادلات و مدل های حاکم در شبیه سازی

تخمین ضخامت و سرعت فیلم های نازک جاری بر سطح سینی مخروطی چرخان، از پارامترهای کلیدی تعیین انتقال جرم و عملکرد کلی SCC است. مدل های تجربی بدون بعدی از ضخامت و سرعت شعاعی فیلم موجی بر اساس ضخامت اندازه گیری شده روی یک سینی مخروطی چرخان در مقیاس آزمایشگاهی به کمک لامپ فرابنفش توسعه داده شد. در این مدل، فیلم به صورت یک لایه موجی روی یک لایه آرام زیرین چسبیده به سطح صفحه مدل شده است، و ضخامت با یک جمله تصحیح مدل ناسلت محاسبه می شود [۸].

$$\delta^+ = \delta_N^+ + \delta_{wave}^+ = 0.91\eta^{-2/3} + 1.95\eta^{-3} \quad (1)$$

که در آن، η فاصله شعاعی بدون بعد و δ^+ ضخامت بدون بعد است. اگر مدل های پیشنهادی به شکل ابعادی بیان شوند، باز گو کننده این مطلب خواهند بود که ضخامت و سرعت شعاعی تابعی از پارامتر های هندسی ستون (فاصله شعاعی در طول سطح سینی، زاویه رأس سینی)، پارامتر های عملیاتی (شدت جریان مایع، سرعت چرخش) و مشخصات مایع (چگالی، گرانشی) می باشد. نکته قابل توجه در طراحی

جدول ۲- نتایج حاصل از شبیه سازی CFD برای بدست آوردن

ثابت‌های تجربی k_{reg} و k_{rot} و مقایسه با مقادیر تجربی [۱۱]

k^{CFD}	k^{exp}	Δp_G (pa)	ω_{rot} (rpm)
۱/۰۷	۱/۱۹±۰/۱۳	۵۲/۳	۰
۰/۱۸	۰/۱۳±۰/۰۸	۵۸/۳	۵۰۰
۰/۱۲	—	۶۵/۷	۱۰۰۰
۰/۱۶	—	۹۱/۰	۱۵۰۰

نکته قابل توجه اینکه با استفاده از شبیه‌سازی CFD می‌توان مجموعه‌ای از ثابت‌های تجربی برای هر SCC مخصوص ساخته شده یا در حال طراحی، بطور اقتصادی تعیین کرد که به تعداد اندکی شبیه‌سازی CFD همراه با استفاده از روابطی که بر اساس ملاحظات فیزیکی می‌باشد، نیاز است و این، بدان معناست که پیش بینی افت فشار برای طراحی SCC جدید ممکن است بسیار آسان شود.

برای بررسی انتقال جرم، ماکارپیچیف و همکارانش ابتدا مقادیر مایع پراکنده Q_{LD} ، و مایع پیوسته Q_{LC} را به وسیله عامل بار گذاری K_{load} مرتبط کردند [۱۴]:

$$K_{load} = \frac{Q_{LD}}{Q_{LC}} \quad (۳)$$

در رژیم Pre-Loading، K_{load} مساوی یک است که با ورود به رژیم Loading این مقدار به تدریج افزایش می‌یابد و این، بدان معناست که با افزایش شدت جریان مایع مقدار مایعی که اسپری می‌گردد بیشتر می‌شود که خود عامل مهمی در انتقال جرم است. در این تحقیق همان گونه که گفته شد از یک مدل اولرین دو فازی (مایع پراکنده و گاز) با هندسه و شرایط مرزی برای سه فاز واقعی استفاده شده است. در واقع مدل اولرین برای توصیف معادلات ناویر-استوکس حاکم بر سیستم بکار می‌رود، در این حالت فاز پخش شده نیز به صورت محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود. همه فازها دارای حوزه جریان مشترک هستند و در هنگام حرکت در حوزه جریان می‌توانند در همدیگر تداخل داشته باشند. در این روش از مجموعه‌ای از معادلات ناویر-استوکس برای هر کدام از فازهای مورد مطالعه استفاده می‌شود. با توجه به اینکه چه نوع نیروهای بین فازی در نظر گرفته شوند، این

معادلات شکل های متفاوتی به خود می‌گیرند. برای تحلیل انتقال جرم علاوه بر معادلات کلی پیوستگی و اندازه حرکت به معادلات انتقال جرم نیز احتیاج می‌باشد، ارتباط بین فازها توسط معادلات اساسی و کمکی تعیین می‌شود. به همین منظور ماکارپیچیف و همکارانش از روابط زیر برای توصیف ضرایب انتقال جرم در حالت اسپری و فیلمی استفاده کردند.

$$k_{G, film} = 0.023 \frac{c_A D_A^{2/3} \Delta U_{LG}^{0.83}}{v_G^{1/2} P_C^{0.17}} \text{ (mol/m}^2\text{s)} \quad (۴)$$

$$k_{G, spray} = \frac{c_A D_A}{d_L} \left(2 + 0.6 \frac{d_L^{1/2} \Delta U_{LG}^{1/2}}{v_G^{1/6} D_A^{1/3}} \right) \text{ (mol/m}^2\text{s)} \quad (۵)$$

که در آن، d_L قطر قطرات مایع، D_A نفوذ پذیری بخار، c_A غلظت مولی جزء منتقل شونده، v_G گرانیروی سینماتیکی گاز، P_C ارتفاع یک مرحله از برج، ΔU_{LG} تغییرات سرعت گاز-مایع و k ضریب انتقال جرم است [۱۴، ۱۵].

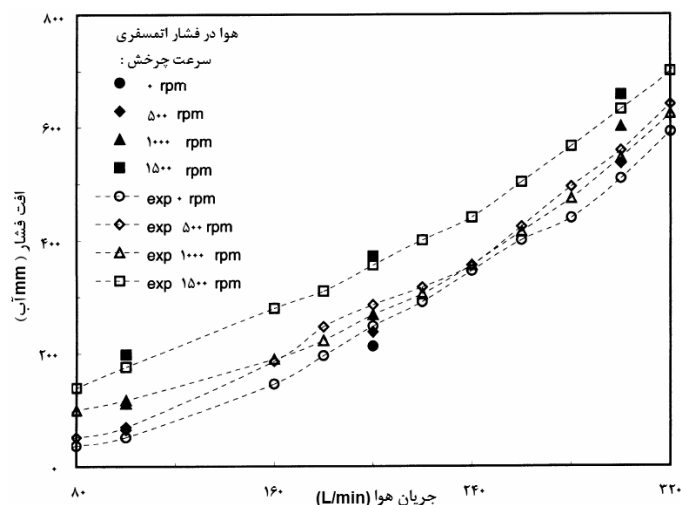
۴- نتایج حاصل از شبیه‌سازی

نتایج بدست آمده از تحقیقات انجام شده در مورد جریان گاز، در غیاب جریان مایع، بدین شکل است که جریان گاز در یک SCC تحت شرایط عملیاتی با $Re > 100$ ناپایدار است و باعث نوساناتی در مؤلفه‌های سرعت و فشار حول مقادیر میانگین آنها می‌شود، رژیم جریان به صورت آرام، ناپایا و نه کاملاً آشفته، است که برای کل محدوده عملیاتی صدق می‌کند [۵].

همچنین مقادیر متوسط زمانی از افت فشار پیش بینی شده با CFD در مقایسه با مقادیر تجربی در کل دامنه عملیاتی ستون ۱۵-۱۰ درصد سازگاری دارد که نتایج در شکل (۴) مشاهده می‌شود.

همانگونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود افت فشار با افزایش جریان گاز و همچنین با افزایش سرعت چرخش سینی مخروطی چرخان افزایش می‌یابد که با مقادیر تجربی نیز سازگار است.

با توجه به نتایج بدست آمده معلوم شد که نوسانات فشار ممکن است منجر به لرزشهای مکانیکی در تجهیزات و باعث ناپایداری شرایط عملیاتی ستون در جریانهای کم مایع شود.

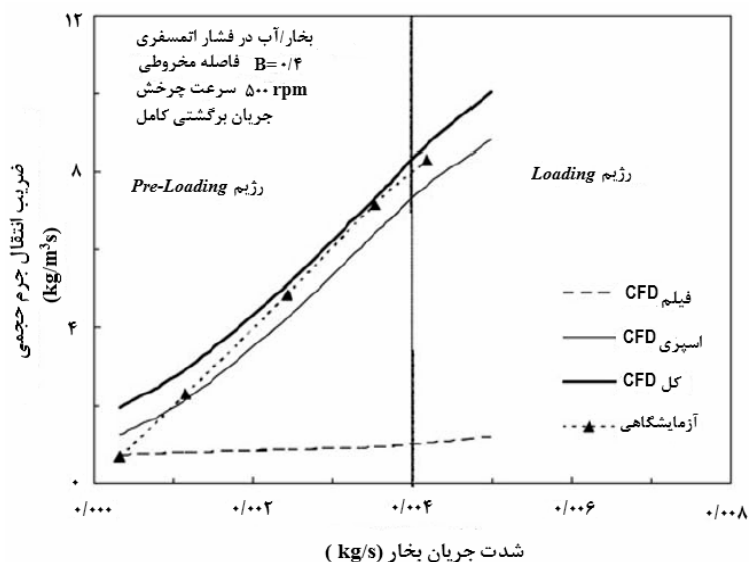


شکل ۴- مقادیر متوسط زمانی افت فشار پیش بینی شده با CFD در مقایسه با مقادیر تجربی [۵]

دستیابی به ضریب انتقال جرم موضعی برج است به گونه ای که در بالای سینی مخروطی متحرک به بیشترین مقدار خود می رسد که علت آن، افزایش سرعت مایع و کاهش ضخامت فیلم مایع در بالای سینی است [۱۳ و ۴].

ماکاریچیف و همکارانش مقادیر ضرائب انتقال جرم برای حالت های اسپری و فیلمی را محاسبه کردند که در شکل (۵) مشاهده می شود [۱۴].

به همین صورت در کار زیودار و هدایتی مشاهده شد که جریان گاز در برج های SCC در غیاب جریان مایع و در حالت پایدار، آشفته است و مقدار افت فشار با بالا رفتن سرعت گردش محور و همچنین سرعت گاز ورودی افزایش پیدا می یابد. این تحقیق برای سه سرعت گردش ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ دور در دقیقه انجام شده است. علاوه بر این، در مورد پیش بینی ضخامت فیلم مایع نیز با پیشروی در طول سینی این ضخامت ها کمتر می شوند به طوری که در بالای سینی لایه موجی اثر خود را از دست می دهد. اهمیت بدست آوردن ضخامت فیلم در



شکل ۵- مقادیر ضرائب انتقال جرم پیش بینی شده با CFD در مقایسه با مقادیر تجربی [۱۴]

همانگونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود ضرایب انتقال جرم فیلمی تقریباً در کل محدوده شدت جریانهای بررسی شده ثابت است، ولی ضرایب انتقال جرم اسپری به تدریج افزایش پیدا می‌کنند به طوری که در شروع رژیم Loading افزایش آنها چشمگیر است. در مقایسه با ضرایب انتقال جرم تجربی، ضرایب انتقال جرم اسپری مطابقت خوبی نشان می‌دهند در حالیکه ضرایب انتقال جرم فیلمی هرگز به تنهایی جوابگوی مشاهدات موجود نمی‌باشند. بنابر این می‌توان اظهار کرد که مکانیزم انتقال جرم در SCC از نوع اسپری است. یک راه ممکن برای توسعه انتقال جرم در ستون، افزایش اندازه و شدت جریان مایع اسپری است، پس طراحی ستون باید به گونه‌ای تصحیح شود که افزایش قابل ملاحظه‌ای در فاز ورودی و پراکنده مایع بدون ایجاد طغیان در برج را شاهد باشیم.

نتایج حاصل از تحقیقات ماکارپیچف در مورد اثرات تغییر در هندسه و اندازه گلوگاه بر ضرایب انتقال جرم و ظرفیت برج بدین شکل بیان می‌شود [۱۵]:

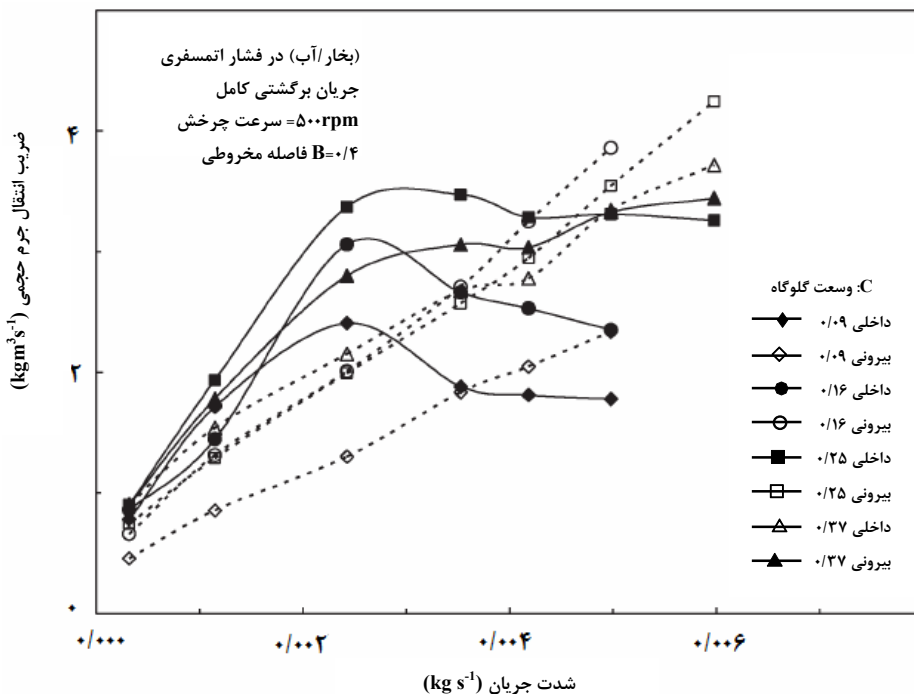
در شکل (۶) نقش مایع اسپری شده در گلوگاه داخلی و بیرونی بر ضریب انتقال جرم حجمی، تجزیه و تحلیل شده است.

در شکل (۶) مشاهده می‌شود که با افزایش میزان جریان سیال، انتقال جرم داخلی بطور نسبی افزایش می‌یابد (در رژیم

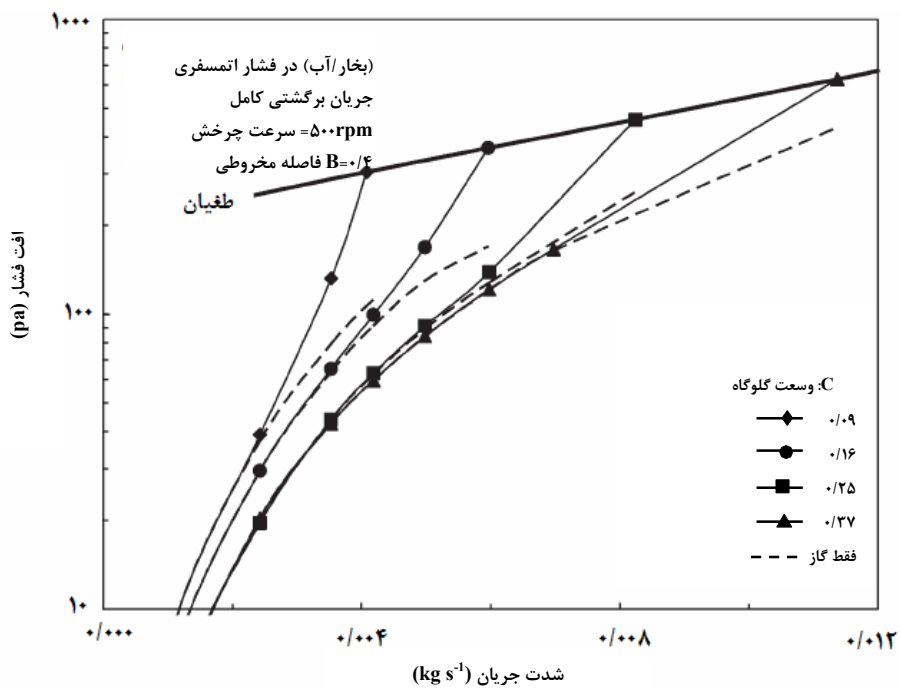
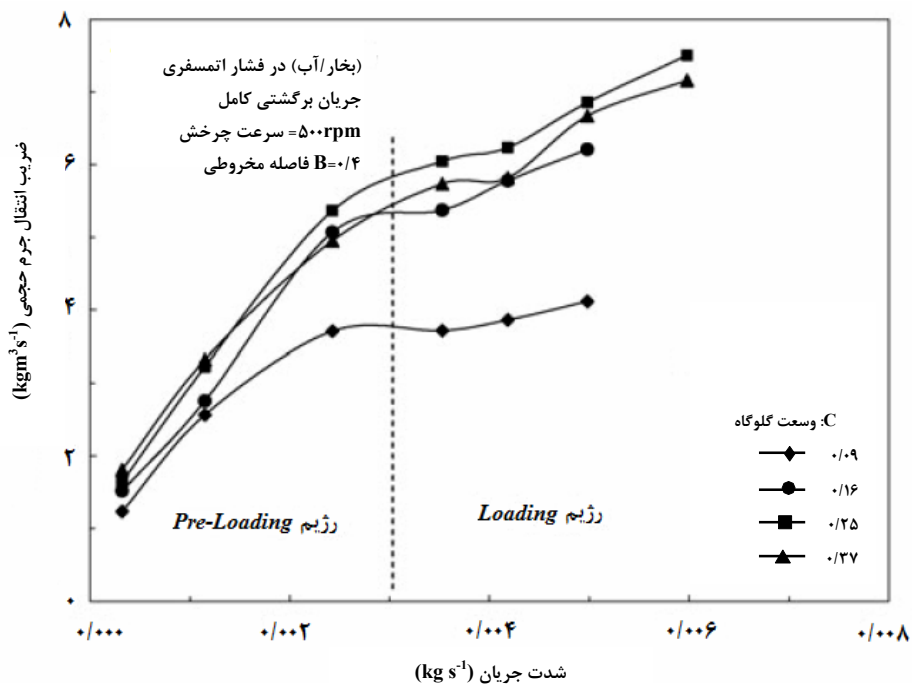
Pre-Loading) تا به یک مقدار ماکزیمم میرسد سپس کاهش می‌یابد (رژیم Loading)، که این تغییرات، وابسته به موضع اسپری داخلی در گلوگاه است. حد اکثر میزان انتقال جرم مطابق با وسعت بزرگترین اسپری است. نرخ انتقال جرم اسپری بیرونی در رژیم Pre-Loading و Loading بطور خطی افزایش می‌یابد، که به نظر می‌رسد موقعیت و وسعت اسپری بیرونی بی تأثیر از شدت جریان گاز است.

چگونگی تغییر در ضریب انتقال جرم حجمی مؤثر با تغییر در شدت جریان و وسعت گلوگاه را در شکل (۷) مشاهده می‌کنید، همانطور که مشاهده می‌شود در رژیم Pre-Loading نرخ انتقال جرم متناسب با شدت جریان سیال افزایش می‌یابد ولی در رژیم Loading این افزایش آهنگ آرامتری به خود می‌گیرد. افزایش در وسعت گلوگاه ($C=0/09$ تا $C=0/25$) باعث افزایش در میزان انتقال جرم می‌شود، هر چند در وسعت بیشتر (از $C=0/25$ تا $C=0/37$) شاهد کاهش نرخ انتقال جرم هستیم.

نتایج حاصل از ارزیابی افت فشار برای ۴ هندسه مذکور در شکل (۸) آمده است. مشاهده می‌شود که وسعت بیشتر گلوگاه باعث افت فشار کمتری با افزایش شدت جریان سیال می‌شود. همچنین برای ستون با گلوگاه وسیعتر، طغیان در شدت جریانهای بالاتر سیال رخ می‌دهد، به عبارتی ظرفیت برج افزایش می‌یابد.



شکل ۶- توزیع ضریب انتقال جرم حجمی در گلوگاه داخلی و بیرونی SCC [۱۵]



نشان می‌دهد. در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که ضریب انتقال جرم حجمی با افزایش اندازه برج به میزان زیادی کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود این کاهش به علت کم شدن مؤلفه اسپری انتقال جرم است. در صورتی که مؤلفه فیلمی انتقال جرم در این سه برج در عمل ثابت می‌ماند و مکانیزم انتقال جرم کلی حاکم از حالت اسپری در برج کوچک به حالت فیلمی در مقیاس متوسط و بزرگ تغییر می‌کند.

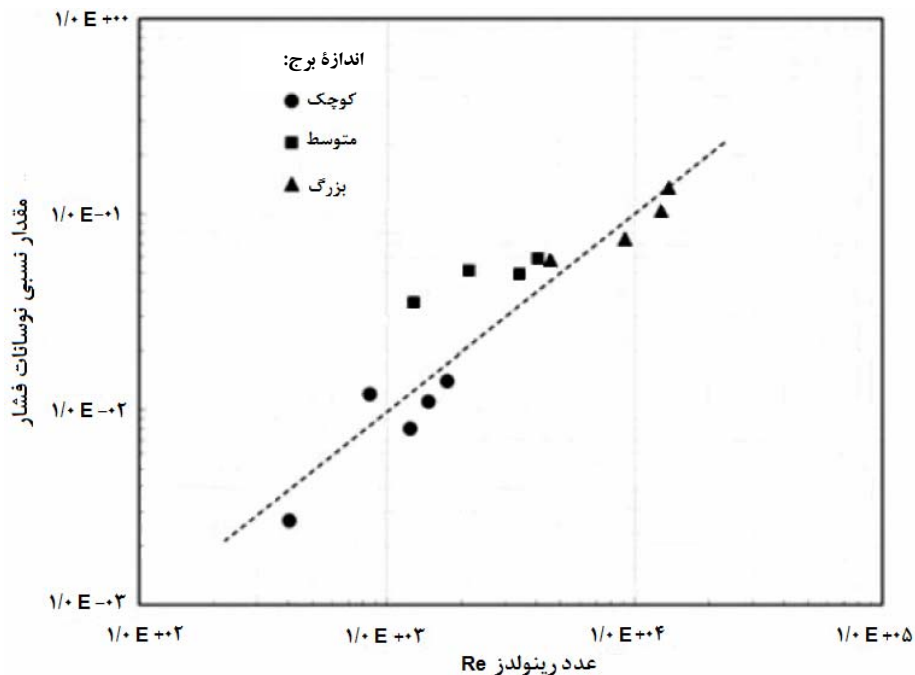
شکل (۱۲) تغییرات افت فشار با سرعت جریان جرمی گاز در اندازه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود افزایش در اندازه برج منجر به افزایش در ظرفیت نسبی آن بر حسب مقدار ماکزیمم سرعت جریان جرمی که در محدوده طغیان بدست آمده است، می‌شود. ظرفیت نسبی SCC در بزرگنمایی بصورت $L_{max} \approx D_c^{1/4}$ افزایش می‌یابد.

به طور کلی با مقایسه انجام شده بین ۴ هندسه مورد بررسی، بهترین نتایج برای هندسه با پارامتر $C=0.25$ وسعت گلوگاه بدست آمده است که منجر به افزایش ۱۵٪ در نرخ انتقال جرم و افزایش ۴۰٪ در حد اکثر ظرفیت برج شده است.

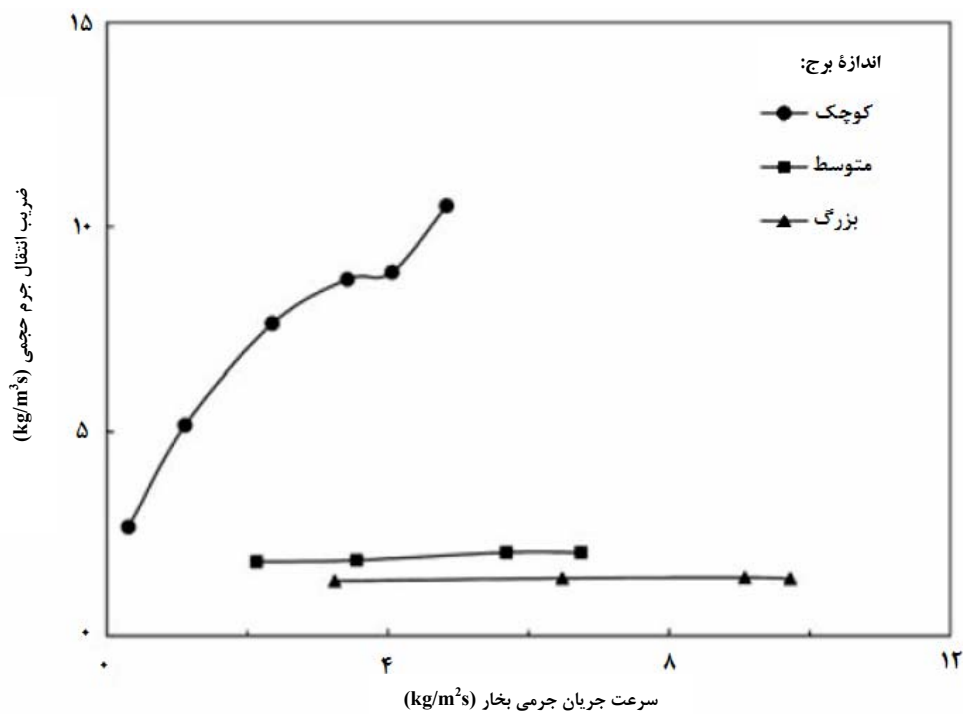
نتایج حاصل از تاثیر بزرگنمایی بر مکانیزم انتقال جرم و ظرفیت برج بدین شکل بیان می‌شود [۱۶]:

جریان در مقیاس‌های متوسط و بزرگ مشابه SCC کوچک بصورت ناپایا (حالت ضربانی - نوسانی) باقی می‌ماند، و بزرگی نوسانات فشاری با اندازه برج و متناسب با عدد رینولدز افزایش می‌یابد. (شکل (۹)) رژیم جریان در بهترین حالت به صورت گذرا است. همچنین برای مقیاس بزرگ نیز حالت آشفته‌گی کامل پیش‌بینی نمی‌شود.

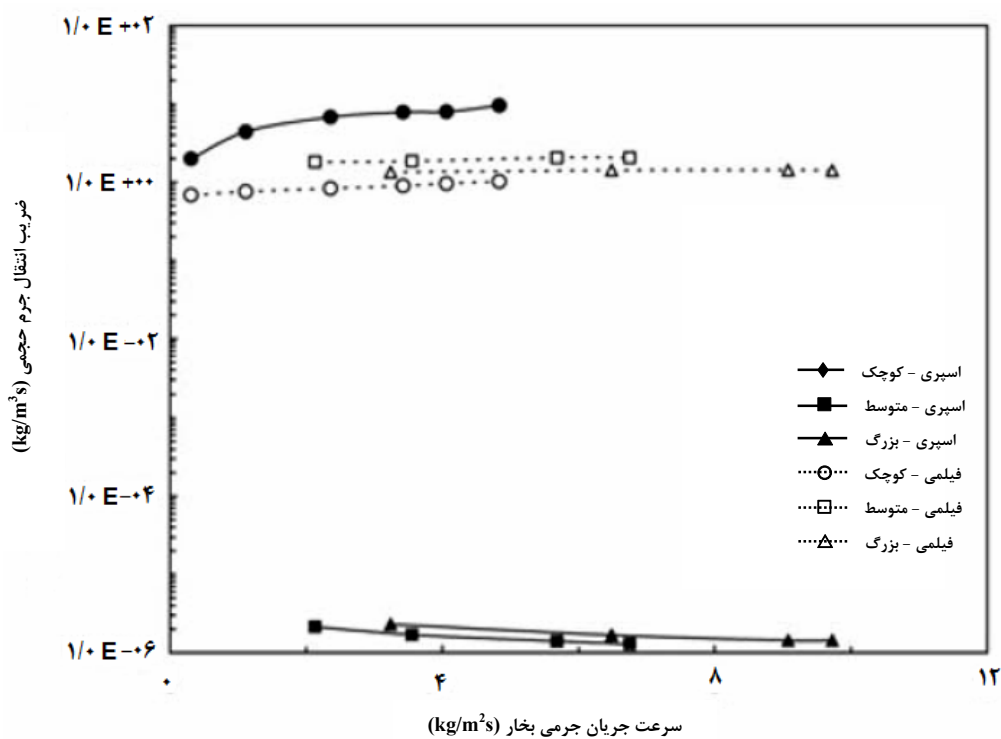
شکل (۱۰) تغییرات ضریب انتقال جرم حجمی با افزایش اندازه برج و شکل (۱۱) تغییرات ضریب انتقال جرم اسپری و فیلمی با اندازه برج را



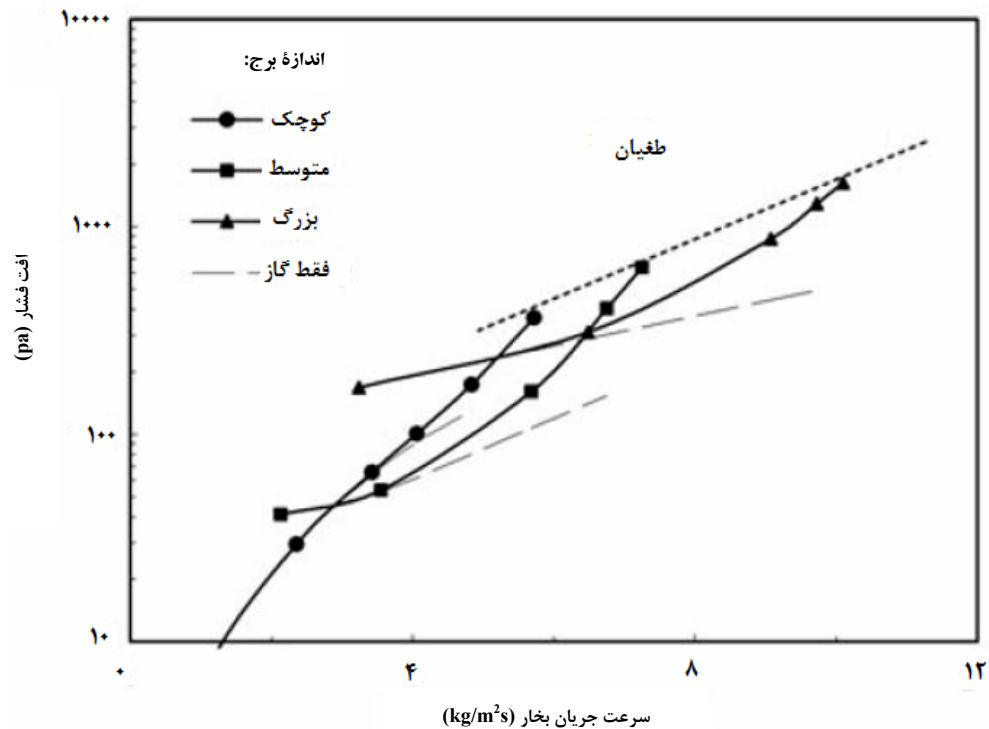
شکل ۹- افزایش نوسانات فشاری متناسب با عدد رینولدز [۱۶]



شکل ۱۰- تغییرات ضریب انتقال جرم حجمی با افزایش اندازه برج [۱۶]



شکل ۱۱- تغییرات ضریب انتقال جرم اسپری و فیلمی با اندازه برج [۱۶]



شکل ۱۲- تغییرات افت فشار با سرعت جریان جرمی گاز در اندازه‌های مختلف [۱۶]

فهرست علائم اختصاری

A_{inner}	مساحت گلوگاه داخلی (m^2)
A_{column}	مساحت ستون (m^2)
A_{outer}	مساحت گلوگاه خارجی (m^2)
C	پارامتر وسعت گلوگاه
D_c	قطر داخلی ستون (m)
K_{load}	عامل بارگذاری
k_{reg}	ثابت تجربی مشخص‌کننده رژیم جریان
k_{rot}	ثابت تجربی مشخص‌کننده بازدهی گریز از مرکز چرخنده
L_{max}	حد اکثر سرعت جریان جرمی مایع ($kg\ m^{-2}\ S^{-1}$)
N_{st}	تعداد مجموعه سینی‌های مخروطی
P_C	فاصله عمودی بین دو مرحله از ستون (m)

نتایج حاصل از این تحقیق با مقادیر تجربی بدست آمده برای برج‌های کوچک و بزرگ مقایسه شده‌اند که مطابقت خوبی را نشان می‌دهند. بطور کلی می‌توان گفت که در بزرگنمایی دو اثر مخالف وجود دارد، اول یک افزایش نسبی در ظرفیت SCC و دوم یک کاهش شدید در ضریب انتقال جرم به علت محدود شدن سهم اسپری در ضریب انتقال جرم کلی.

نتیجه‌گیری

ساختار هندسی پیچیده برجهای SCC و کنترل مشکل آنها سبب شده است که به کمک آنالیز CFD به دنبال توسعه و بهینه‌سازی در طراحی و کنترل این نمونه از برجها باشند. در واقع، وجود مکانیزم‌های مختلف انتقال جرم، نقش مؤثر سینی چرخان و پره‌ها در افت فشار و جریان متقابل فاز مایع و گاز و بطور کلی هندسه پیچیده SCC، استفاده هر چه بیشتر و دقیقتر از آنالیز CFD برای طراحی و کنترل بهتر این برج‌ها را می‌طلبد.

- [6] Casimir, D.J, "Technological Aspects of the Production of Concentrates of Passion fruit" PhD Thesis, University of New South Wales, Australia, (1974).
- [7] S.V.Makarytechev, T.A.G.Langrish, R.G.H.Prince, "Structure and Regimes of Liquid Film Flow in Spinning Cone Columns", Chemical Engineering Science, 53, 1541-1550, (1998).
- [8] S. V. Makarytechev, T. A. G. Langrish, R. G. H. Prince, "Thickness and Velocity of Wavy Liquid Films on Rotating Conical Surfaces", Chemical Engineering Science, 56, 77-87, (2001).
- [9] M.Zivdar, R.G.H.prince, "Pressure Drop and Mass Transfer in the Spinning Cone Distillation Column", 5th National and 4th International Chemical Engineering Congress, Shiraz, Iran, 250-259, (2000).
- [10] S. V. Makarytechev, T. A. G. Langrish, "Pressure Drop and Flooding Limit in Spinning Cone Columns", Chem. Eng. Comm, 192, 445-473, (2005).
- [11] S. V. Makarytechev, T. A. G. Langrish, "Dry Column Approximation for Pressure Drop in Spinning Con columns", Chem. Eng. Comm, 191, 641-664, (2004)
- [12] S. V. Makarytechev, T. A. G. Langrish, D.F.Fletcher, R.G.H.Prince "Progress In Understandin The Physical Processes Inside spinning Cone Column", Chemical Engineering Journal, 87, 301-311, (2002).
- [۱۳] مرتضی زیودار، بهنام هدایتی، "تحلیل جریان گاز در برج های SCC با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی"، مجله مهندسی شیمی ایران، سال سوم، شماره ۱۱، ۳۳-۲۶، (۱۳۸۳).
- [14] S.V.Makarytechev, T.A.G.Langrish, D.F.Fletcher, "Mass Transfer Analysis of Spinning Cone Columns Using CFD", Chemical Engineering Research and Design, 82, 752-761, (2004).
- [15] S.V.Makarytechev, T.A.G.Langrish, D.F.Fletcher, "Exploration of Spinnin Cone Column Capacity and Mass Transfer Performance Using CFD", Chemical Engineering Research and Design, 83, 1372-1380, (2005).
- [16] S.V.Makarytechev, T.A.G.Langrish, D.F.Fletcher, "CFD Analysis Of Scale Effects In Spinning Cone Columns", Chemical Engineering Research and Design, 83, 951-958, (2005).
- Q_{LC} شدت جریان مایع پیوسته ($m^3 s^{-1}$)
- Q_{LD} شدت جریان مایع پراکنده ($m^3 s^{-1}$)
- R_C شعاع ستون (m)
- R_{FI} شعاع داخلی سینی ثابت (m)
- R_S شعاع شفت (محور) (m)
- R_{SO} شعاع خارجی سینی چرخان (m)
- Re عدد رینولدز
- Ro عدد روسبی، بدون بعد
- ΔP_G افت فشار خشک (Pa)
- ω_{rot} سرعت چرخشی (rpm)
- δ^+ ضخامت بدون بعد فیلم مایع
- η فاصله شعاعی بدون بعد

مراجع

- [1] M.Zivdar, "Distillation for Food Flavour Separation", Ph.D. Thesis, the University of Sydney, Australia, (1998).
- [۲] سید محمد رضا میر پوریان، "طراحی برج های SCC در مقیاس پایلوت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، (۱۳۸۲).
- [3] M.Zivdar, T.A.G.Langrish, R.G.H.Prince, "Comparison of Mass Transfer Efficiencies of SCC and Structured Packing", International Journal of Engineering, Vol.14, No.1, (2001).
- [۴] بهنام هدایتی، "آنالیز CFD برج های تقطیر از نوع SCC"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، (۱۳۸۲).
- [5] T. A. G. Langrish, S. V. Makarytechev, D.F.Fletcher, "CFD Analysis of Spinning Cone Columns: Prediction of Unsteady Gas Flow and Pressure Drop in a Dry Column", Chemical Engineering Journal, 87, 301-311, (2002).