

آنالیز افت فشار دوفازی در آکنه‌های ساختاریافته به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

مرتضی زیودار*^۱، علی شاه‌محمدی^۲

^۱ استاد گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

^۲ کارشناس ارشد مهندس شیمی گروه مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۲۹ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲

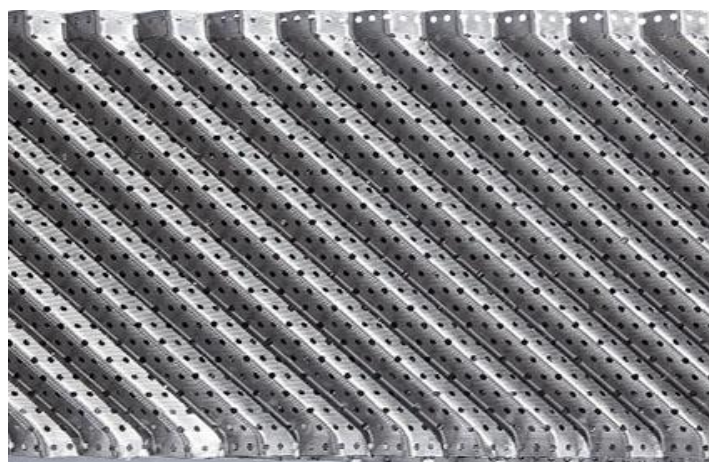
چکیده

در آکنه‌های ساختاریافته افت فشار یکی از مهم‌ترین پارامترهای مهم در محاسبه قطر بهینه برج است. در پژوهش پیشرو افت فشار دوفازی در آکنه ساختاریافته SulzerBX توسط دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. درصد خطای نسبی ۹/۱٪ به دست آمده است. میزان افت فشارها در بیش‌ترین حالت ۸۳۳/۷ پاسکال بر متر به ترتیب در سرعت‌های گاز و مایع ۰/۸۹۹ و ۰/۰۲۹۸ متر بر ثانیه و در کم‌ترین حالت، ۲۵/۱ پاسکال بر متر به ترتیب در سرعت‌های گاز و مایع ۰/۳۴۱ و ۰/۰۲۹۸ متر بر ثانیه به دست آمده است. در مقایسه نتایج حاصل از افت فشار صفحات سوراخ‌دار با نتایج حاصل از افت فشار در صفحات ساده و بدون سوراخ، افت فشار در صفحات سوراخ‌دار ۷٪ کاهش داشته است. در این پژوهش به بررسی اثر سوراخ‌های موجود بر روی صفحات آکنه بر افت فشار دوفازی پرداخته شده است.

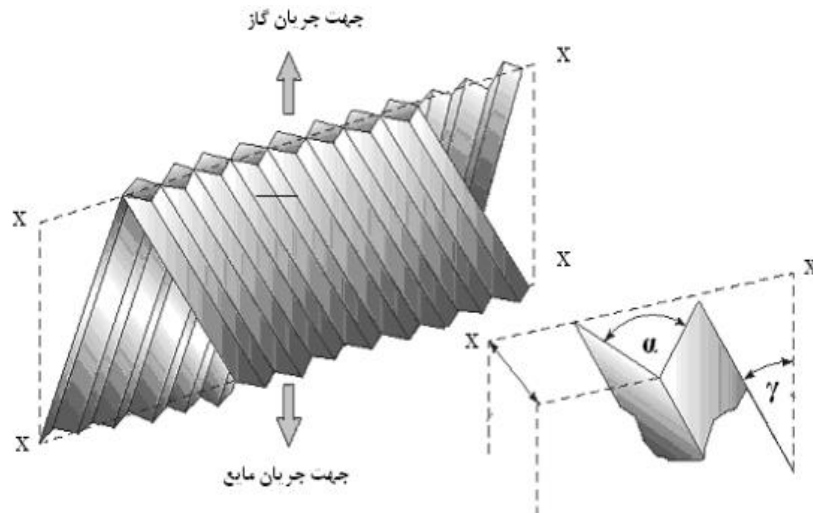
کلمات کلیدی: آکنه ساختاریافته، افت فشار دوفازی، دینامیک سیالات محاسباتی

۱- مقدمه

امروزه در صنایع پالایش و پتروشیمی برج‌های آکنده با جریان‌های متقابل در فرایندهای مختلفی از جمله تقطیر و جذب کاربرد بسیاری دارند. به علت تنوع زیاد آکنده‌ها و همچنین بازده بالای آن‌ها، توجه زیادی را به خود جلب نموده‌اند [۱]. استفاده از آکنده‌های ساختاریافته در مقابل آکنده‌های نامنظم و سینی‌ها موجب کاهش قطر و ارتفاع برج، کاهش انرژی مصرفی، کاهش میزان افت فشار در بستر و همچنین افزایش انتقال جرم می‌گردد. آکنده‌های ساختاریافته به علت دارا بودن افت فشار بسیار پایین‌تر نسبت به سینی‌ها در عملیات تقطیر تحت خلأ باتوجه به هزینه ساخت بیش‌تر نسبت به سینی‌ها ترجیح داده می‌شوند [۲ و ۳]. این آکنده‌ها دارای ساختار هندسی پیچیده‌ای بوده و از صفحات موج‌دار و مشبک ساخته می‌شوند. جنس این آکنده‌ها معمولاً از استیل ضدزنگ بوده ولی مدل‌های سرامیکی و پلیمری این آکنده‌ها نیز تولید می‌شوند. صفحات تشکیل‌دهنده این آکنده‌ها به صورت استاندارد دارای زاویه کانال‌های ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به افق می‌باشند. اولین بار آکنده‌های ساختاریافته توسط شرکت سولزر و با جنس صفحات موج‌دار و توری شکل ارائه شدند، پس از آن در اواخر دهه هفتاد شرکت سولزر آکنه ساختاریافته فلزی Mellapak 250Y را ارائه نمود [۴]. نمونه اولیه آکنده‌های ساختاریافته دارای زاویه کانال ۴۵ درجه بودند که به آن‌ها آکنده‌های نوع Y گفته می‌شد. باگذشت زمان تقاضای بازار جهت ظرفیت آکنده‌ها زیاد شد. در آن زمان محققین شرکت سولزر با انجام بررسی‌ها و آزمایش‌های گوناگون آکنه با صفحات فلزی تحت عنوان ملاپک^۱ نوع X را ارائه کردند. در این مدل زاویه صفحات از ۴۵ درجه به ۶۰ درجه افزایش یافته بود. آکنده‌های نوع X افزایش چشمگیری در ظرفیت برج ایجاد کردند [۵]. در بستر آکنده معمولاً آکنده‌های ساختاریافته با زاویه چرخشی ۹۰ درجه نسبت به آکنه قبل خود قرار می‌گیرند. در این حالت گاز در زمان بالا رفتن مجبور به تغییر جهت جریان ناگهانی می‌شود و همین امر منجر به افزایش افت فشار ناگهانی می‌گردد [۶]. به منظور اصلاح و رفع این مشکل شرکت Koch آکنه Flexipak-HC را ارائه نمود که در بخش انتهایی صفحات موج‌دار این آکنده‌ها لایه‌ای در نظر گرفته شده بود به منظور افزایش قطر هیدرولیکی و تغییر جهت گاز به سمت محور عمودی، در این حالت جریان به صورت عمودی به آکنه وارد و همچنین خارج می‌گردید و گاز در بین دو آکنه دچار تغییر جهت ناگهانی نمی‌گردید. شکل ۱ شماتیک صفحات تشکیل‌دهنده آکنه ساختاریافته Flexipak-HC و شکل ۲ نشان دهنده جهت جریان فازها در آکنه ساختاریافته را نشان می‌دهند.



شکل ۱. صفحات تشکیل‌دهنده آکنه Flexipak-HC [۱۴]



شکل ۲. جهت جریان فازها در آکنه ساختاریافته [۷]

بر پارامتر افت فشار گاز عوامل زیادی مانند نوع آکنه، سطح ویژه، ابعاد کانال‌های آکنه، زاویه کانال‌ها و میزان تخلخل تأثیر می‌گذارد. دینامیک سیالات محاسباتی یکی از روش‌های قدرتمند برای بررسی رفتار سیال است. در شبیه‌سازی توسط دینامیک سیالات محاسباتی معادلات و روابط اساسی بر جریان سیال حاکم هستند که شامل معادلات حرکت و معادلات پیوستگی می‌باشند. در بخش‌های بعدی به تعریف این معادلات پرداخته می‌شود. پژوهش‌های متعددی به کمک نرم‌افزار CFD^۲ صورت گرفته است که به تعدادی از آن‌ها در سال‌های اخیر اشاره خواهد شد. مزارعی ستوده و همکاران در سال ۲۰۱۸ در طراحی یک مدل دوبعدی و سه‌فازی، هیدرودینامیک، انتقال حرارت و انتقال جرم چند جزئی را در فرایند تقطیر همراه با واکنش شیمیایی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. مشاهده شد که نتایج CFD با داده‌های تجربی سازگاری خوبی دارد و خطاهای نسبی پایین‌تر از ۱۰ درصد بوده است. [۷]. در سال ۲۰۱۹ سچر^۳ و همکاران در پژوهش خود یک مدل جدید شبیه‌سازی دینامیک سیالات فاز گازی با مقیاس متوسط^۴ (مقیاس مزو) و توزیع غلظت در پرکن‌های ساختاری را ارائه دادند که در ستون‌های جذب و تقطیر کاربرد دارد. افت فشار در این کار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که لایه برشی در اتصالات متقاطع دلیل قسمت عمده‌ای از افت فشار در پرکن‌های ساختاری است [۸]. در سال ۲۰۲۰ حسن وند و همکاران، پژوهشی با روش دینامیک سیالات محاسباتی برای آکنه ساختاریافته PACK-1300Y انجام دادند. در این کار بررسی پارامترهای کلیدی هیدرودینامیکی این پرکن مانند افت فشار خشک و مرطوب و همچنین بازده انتقال جرم برای سیستم هوا/آب انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که میانگین خطای نسبی بین خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و نتایج تجربی برای بازده انتقال جرم و افت فشار مرطوب و خشک به ترتیب ۲۴٪، ۲۷٪ و ۱۶٪ بوده است [۹]. در سال ۲۰۲۰ Miramontes و همکارانش آکنه Mellapak 250Y را با پرینت سه‌بعدی پلیمری و ساختار آلومینیومی ساختند و پارامترهای افت فشار دوفازی، انتقال حرارت، جرم را برای جذب مونوکسید کربن بر روی این دو مدل بررسی نمودند و از نرم‌افزار CFD نیز برای آنالیز آن‌ها استفاده کردند. در نهایت نتایج به‌دست‌آمده را با مدل اصلی که از استیل ساخته شده است مقایسه کردند. افت فشار خشک در ساختار آلومینیومی از ساختار پلیمری نیز

2- Computational Fluid Dynamics

3- Johannes Sacher

4- Mesoscale

بیش تر بوده؛ درحالی که افت فشار مرطوب و تر شوندگی آن به مدل اصلی نزدیک است [۱۰]، در سال ۲۰۲۱ Sun و همکارانش به بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی و انتقال جرم در آکنه spiropack پرداختند. ابتدا آن‌ها این آکنه را با استفاده CFD شبیه‌سازی کردند و سپس آن را با مدل‌های پرینت شده Mellpak 250X و Montzpak B1-500 مقایسه نمودند. علت استفاده از این آکنه افت فشار بسیار کم و سطح ویژه زیاد آن است. در نتایج به‌دست‌آمده Spiropack می‌تواند در مقایسه با سایر آکنه‌های تجاری دارای سطح ویژه ۵۰ تا ۲۰۰ واحد در واحد سطح داشته باشد و همچنین افت فشار را تا ۵۰٪ نیز کاهش دهد [۱۱]. در این پژوهش به بررسی پارامتر افت فشار دوفازی در آکنه ساختاریافته SulzerBX با صفحات سوراخ‌دار پرداخته شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیز با نتایج تجربی مقایسه گردیده است. با توجه به پژوهش‌هایی انجام شده در زمینه آکنه ساختاریافته با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، در این پژوهش پارامتر افت فشار دوفازی در هندسه با صفحات سوراخ‌دار مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ضخامت صفحات آکنه نیز در نظر گرفته شده است که در شبیه‌سازی‌های قبل مورد توجه نبوده است.

۲- مدل‌سازی با نرم‌افزار CFD

۲-۱- تولید هندسه

قدم اول در هر شبیه‌سازی تولید هندسه است. با طراحی و تولید یک هندسه دقیق و پرهیز از شرایط ساده کننده در تولید هندسه می‌توان به هم‌گرایی سریع سیستم و همچنین نتایج دقیق‌تر دست‌یافت. در این بخش از پژوهش به طراحی هندسه آکنه ساختاریافته SulzerBX با صفحات سوراخ‌دار پرداخته شده است. در پژوهش‌های گذشته شبیه‌سازی‌های صورت گرفته شامل هندسه‌های ساده که دربرگیرنده دو صفحه ساده از کل‌المان و یا یک کانال از کل‌المان بوده‌اند. در این پژوهش سعی گردیده تا هندسه بسیار نزدیک به مدل واقعی و صنعتی طراحی گردد و بر روی صفحات این هندسه مطابق با مدل صنعتی سوراخ‌های نامنظمی ایجاد شده است. مشخصات هندسی آکنه Sulzer_BX در جدول ۱ آورده شده است، هندسه طراحی شده آکنه Sulzer_BX جهت شبیه‌سازی افت فشار دوفازی در شکل ۳ نمایش داده شده است. جهت طراحی از نرم‌افزار Design Modeler 18.2 استفاده گردیده است.

جدول ۱. مشخصات هندسی آکنه ساختاریافته SulzerBX

نوع آکنه	زاویه آکنه	قطر سوراخ‌ها d (mm)	تخلخل ε (%)	سطح ویژه ap(m-1)	ابعاد کانال مثلثی		
	θ (deg)				b(m)	S(m)	h(m)
Sulzer_BX	۶۰	۰/۵	۹۰	۴۹۸	۰/۰۱۱۴	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵۷



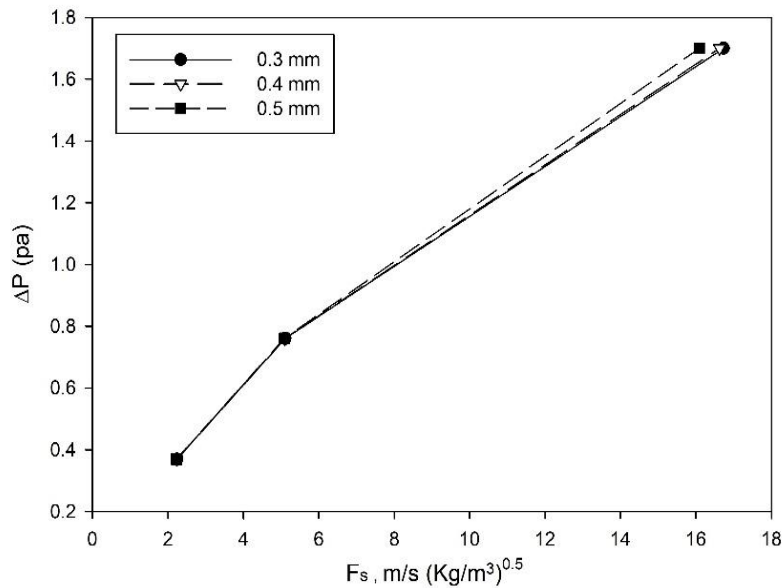
شکل ۳. هندسه آکنه SulzerBX با صفحات سوراخ‌دار

۲-۲- شبکه‌بندی مدل

جهت حل معادلات حاکم بر مدل، ایجاد یک شبکه مناسب جزء مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی است. در صورتی که شبکه ایجاد شده نامناسب باشد، باعث عدم رسیدن سیستم به هم‌گرایی مناسب و همچنین ایجاد ناپایداری در سیستم می‌شود. در این پژوهش عملیات شبکه‌بندی ابتدا از لبه‌های مدل شروع گردیده و سپس سطوح و در آخر هم کل مدل شبکه‌بندی می‌گردد.

حالت‌های گوناگونی برای شبکه‌بندی مدل‌ها وجود دارد که از انواع آن می‌توان به المان‌های مثلثی ساختار نیافته و مربعی اشاره کرد. در این تحقیق با توجه به هندسه مدل از شبکه‌های ساختار نیافته مثلثی استفاده کردیم. دلیل استفاده از این نوع مش‌بندی این است که چون ساختار نیافته است زوایا را به خوبی پوشش می‌دهد و با کوچک‌تر کردن اندازه شبکه‌ها تعداد گره بیش‌تری ایجاد می‌شود که این خود در نزدیک شدن نتایج حاصل از مدل‌سازی به داده‌های تجربی بسیار مؤثر است.

جهت محاسبه افت دوفازی، شبکه‌بندی از نوع چهاروجهی با اندازه‌های $0/3$ ، $0/4$ ، $0/5$ ، $0/6$ ، $0/7$ ، $0/8$ و $0/9$ میلی‌متر انجام گرفت و مشاهده گردید که نتایج افت فشار دوفازی در المان‌های $0/3$ و $0/4$ میلی‌متر یکسان است و نتایج افت فشار از المان $0/5$ میلی‌متر شروع به تغییر می‌کنند. در نتیجه المان $0/4$ میلی‌متر به‌عنوان بزرگ‌ترین اندازه المان جهت شبیه‌سازی انتخاب گردید. تعداد کل المان‌ها برای هندسه سوراخ‌دار برابر با 16594039 و برای هندسه بدون صفحات سوراخ‌دار برابر با 12490860 است. در شکل ۴ بررسی استقلال از شبکه در قالب نمودار نمایش داده شده است.



شکل ۴. نتایج افت فشار بر اساس سرعت‌های مختلف گاز در شبکه‌های مختلف

۲-۳- معادلات حاکم بر جریان دوفازی

شکل کلی معادلات پیوستگی در حالت دوفازی جریان گاز به صورت زیر است [۱۲]؛

معادله پیوستگی برای فاز گاز:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_g \rho_g) + \nabla(\gamma_g \rho_g u_g - \Gamma_g \nabla \gamma_g) = 0 \quad (1)$$

معادله پیوستگی برای فاز مایع:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_l \rho_l) + \nabla(\gamma_l \rho_l u_l - \Gamma_l \nabla \gamma_l) = 0 \quad (2)$$

معادله اندازه حرکت برای فاز گاز:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\gamma_g \rho_g u_g) + \nabla[\gamma_g(\rho_g u_g u_g)] = \\ -\gamma_g \nabla p_g + \nabla \cdot [\gamma_g \mu_{eg}(\nabla u_g + (\nabla u_g)^t)] + \gamma_g b_g - f_g \end{aligned} \quad (3)$$

معادله اندازه حرکت برای فاز مایع:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\gamma_l \rho_l u_l) + \nabla[\gamma_l(\rho_l u_l u_l)] = \\ -\gamma_l \nabla p_l + \nabla \cdot [\gamma_l \mu_{el}(\nabla u_l + (\nabla u_l)^t)] + \gamma_l b_l - f_l \end{aligned} \quad (4)$$

۲-۴- شرایط مرزی و فرضیات

سطح پایین آکنه به عنوان سطح ورودی و سطح بالای آکنه را به عنوان سطح خروجی در نظر گرفته شده است. سطح پایینی آکنه را به عنوان شرط مرزی سرعت ورودی هر فاز و سطح بالای آکنه را شرط مرزی فشار خروجی تعریف می نماییم. شرط مرزی سرعت صفر برای ذرات در دیواره و شرط مرزی لغزش آزاد^۵ برای سوراخ‌های روی صفحات تعریف شده‌اند. باید توجه نمود که در مرز ورودی سرعت ورودی فاز گاز با علامت مثبت و سرعت ورودی فاز مایع در خلاف جهت Y و با علامت منفی در نظر گرفته می‌شوند. در وارد نمودن مقادیر سرعت ورودی، فرض می‌شود که سرعت فقط در جهت Y است و اجزا سرعت در جهات X و Z نادیده گرفته شده است.

5- free slip

۳- بحث و نتایج

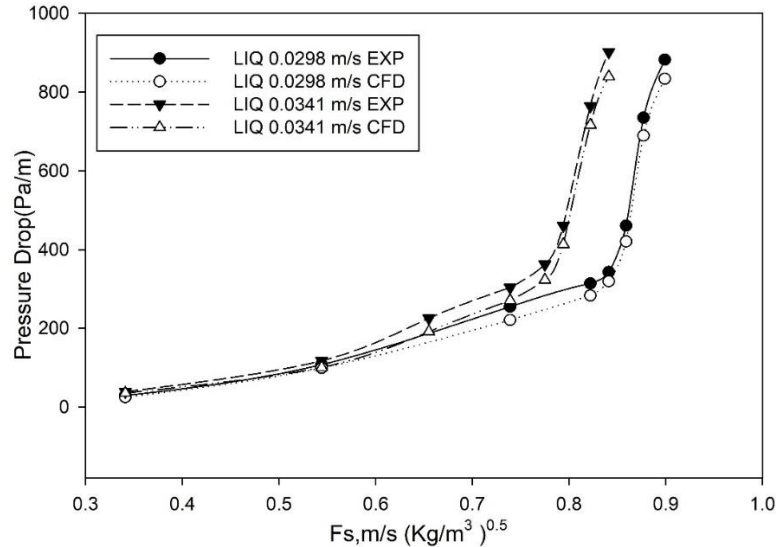
در حالت جریان دوفازی گاز-مایع، جریان سیال‌ها به صورت متقابل است. برای فاز گاز، از هوا با چگالی (kg/m^3) $1/185$ و برای فاز مایع از آب با چگالی (kg/m^3) 998 استفاده گردیده است. فاز گاز در حالت آشفته و فاز مایع در حالت آرام در نظر گرفته شده‌اند. به علت وجود سوراخ‌ها بردار جریان مایع در نزدیکی سوراخ‌ها به صورت گردابه‌ای شکل می‌گیرد، در حالی در صفحات ساده جریان مایع یکنواخت است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی افت فشار دوفازی برای آکنه ساختاریافته Sulzer_BX با صفحات سوراخ‌دار و صفحات ساده در جدول ۲ با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند و درصد خطاهای نسبی برای هر کدام از مدل‌های هندسی گزارش شده است. جهت شبیه‌سازی افت فشار دوفازی از مدل آشفته‌گی BSL استفاده گردیده است. همان‌گونه که از نتایج به‌دست‌آمده مشخص است مدل آشفته‌گی انتخاب شده جهت افت فشار دوفازی نتایج بسیار خوبی را ارائه داده است و نتایج به‌دست‌آمده مطابقت خوبی را با داده‌های تجربی دارند. متوسط خطای نسبی کل برای افت فشار دوفازی $9/1\%$ است.

جدول ۲. مقایسه نتایج افت فشار دوفازی با داده‌های تجربی [۱۳]

سرعت ظاهری مایع (m/s)	سرعت ظاهری گاز (fs) (m/s)	افت فشار تجربی (Pa) [۱۳]	نتایج شبیه‌سازی با صفحات ساده (Pa)	خطای نسبی %	نتایج شبیه‌سازی با صفحات سوراخ‌دار (Pa)	خطای نسبی %
۰/۰۲۹۸	۰/۳۴۱	۲۹/۴	۲۱/۷۲۹	۲۶/۰۹	۲۵/۱۰۴	۱۴/۶۱
۰/۰۲۹۸	۰/۵۴۴	۱۰۷/۸	۸۵	۲۱/۱۵	۹۹/۲۲۱	۷/۹۶
۰/۰۲۹۸	۰/۷۳۹	۲۵۴/۸	۲۰۹/۳۷	۱۷/۸۲	۲۲۱/۰۰۴	۱۳/۲۶
۰/۰۲۹۸	۰/۸۲۲	۳۱۳/۶	۲۴۵/۱۰۲	۲۱/۸۴	۲۸۳/۲۰۹	۹/۶۹
۰/۰۲۹۸	۰/۸۴۱	۳۴۳	۲۹۴/۷۷۱	۱۴/۰۶	۳۱۹/۲۸	۶/۹۲
۰/۰۲۹۸	۰/۸۵۹	۴۶۰/۶	۴۰۳/۹۳	۱۲/۳	۴۲۰/۵۶۹	۸/۶۹
۰/۰۲۹۸	۰/۸۷۷	۷۳۵	۶۶۷	۹/۲۵	۶۸۹/۲۳۴	۶/۲۳
۰/۰۲۹۸	۰/۸۹۹	۸۸۲	۸۲۵/۵۱۳	۶/۴	۸۳۳/۷۳۸	۵/۴۷
متوسط خطای نسبی				۱۶/۱۱		۹/۱

در شکل ۵ نتایج حاصل از شبیه‌سازی افت فشار دوفازی برای دو سرعت ثابت مایع و سرعت‌های مختلف فاز گاز با نتایج تجربی مقایسه و ترسیم شده‌اند. با افزایش سرعت مایع افت فشار نیز افزایش می‌یابد. علت این امر ماندگی مایع درون آکنه است. مایع بخشی از حجم کانال‌های بستر را اشغال نموده و باعث می‌گردد تا فاز گاز فضای کافی برای عبور از درون کانال‌های آکنه را نداشته باشد.

۶- ضریب f_s از حاصل ضرب جذر چگالی گاز در سرعت ظاهری گاز به‌دست می‌آید: $f_s = u_g \sqrt{\rho_g}$ واحد آن $[m/s(kg/m^3)^{0.5}]$ دبی جرمی می‌باشد.

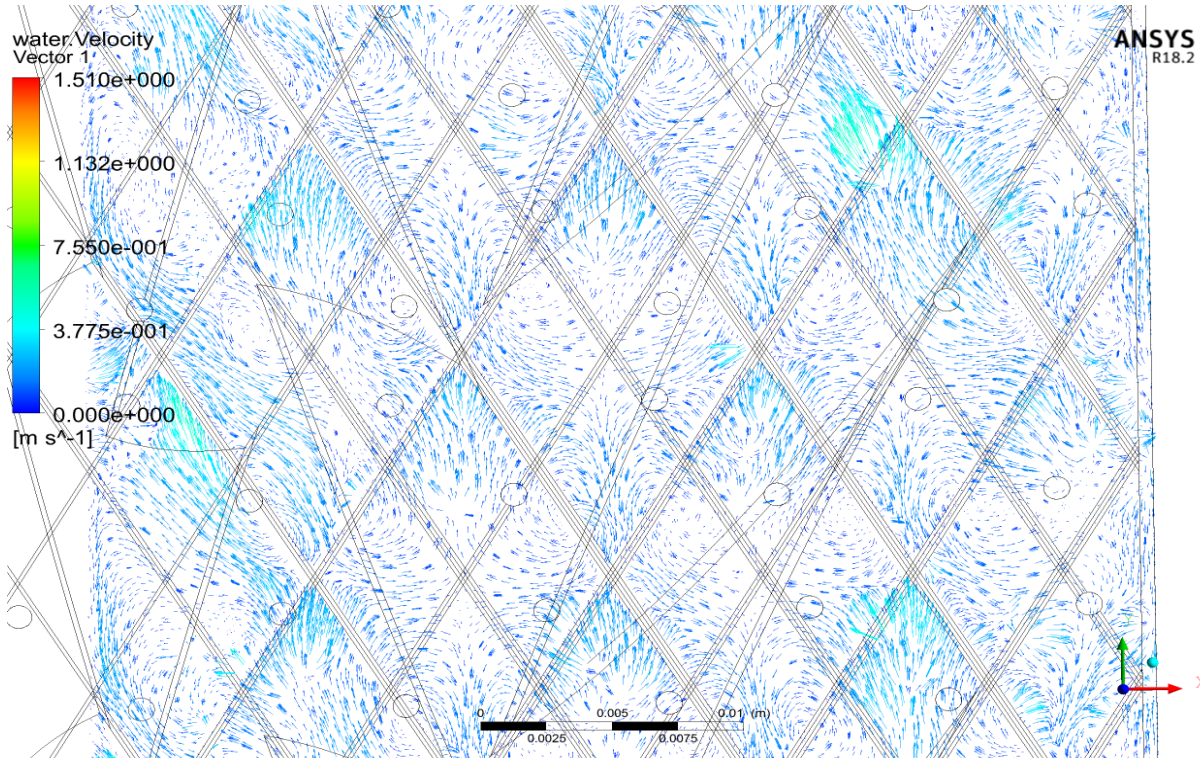


شکل ۵. مقایسه افت فشار دوفازی در صفحات سوراخ‌دار با اعداد تجربی [۱۳] بر حسب افزایش فاکتور ظرفیت (F_s)

شکل ۶ نشان‌دهنده کانتور فشار در جریان دوفازی بوده که توسط مدل BSL محاسبه شده است. نواحی آبی‌رنگ مربوط به فشار کم‌تر و قرمز رنگ مربوط به فشار و سرعت بیشتر است. در قسمت‌هایی که سیال با دیواره برخورد می‌کند فشار بالاتر است. در پایین برج فشار هوا زیاد بوده و در اثر عبور از داخل آکنه فشار آن کاهش می‌یابد. با دقت در این شکل مشخص می‌شود که در نواحی پایین بستر، فشار در یک سری از نقاط به صورت متناوب در جهت افقی کاهش و افزایش می‌یابد. علت به وجود آمدن این پدیده وجود کانال‌های متقاطع که در بستر آکنه وجود دارد است. در شکل ۷ مشاهده می‌شود وجود سوراخ‌ها بر روی صفحات تأثیر زیادی در حرکت فاز گاز و مایع درون آکنه دارند. در شکل ۷ در نقاطی که سوراخ‌ها وجود دارند، حرکت سیال به صورت گردابه‌ای اطراف آن‌ها قابل مشاهده است. علت این امر عبور فاز گاز از درون سوراخ‌ها است و باعث می‌گردد فاز مایع به صورت پیوسته به سمت پایین حرکت نکند. این پدیده باعث افزایش انتقال جرم در طول بستر نیز می‌شود. وجود این سوراخ‌ها بر روی صفحات تأثیر زیادی بر روی سرعت و جریان سیال دارد.



شکل ۶. کانتور فشار در آکنه سوراخ‌دار



شکل ۷. بردار سرعت مایع در مرکز آکنه

در شبیه‌سازی افت فشار در سرعت‌های بالای جریان، درصد خطا نسبت به داده‌های تجربی بیش‌تر می‌گردد. از مهم‌ترین دلایل این پدیده می‌توان به دو مورد اشاره نمود. مورد اول توزیع ناقص گاز در انجام آزمایش‌ها در سرعت‌های بالای جریان است که در شبیه‌سازی این‌چنین نبوده و توزیع گاز به‌صورت یکنواخت صورت می‌گیرد. مورد دوم در انجام آزمایش‌ها در سرعت‌های بالای جریان، پدیده کانالیزه شدن و طغیان به وجود می‌آید که باعث ایجاد افت فشار زیادی می‌گردد ولی در شبیه‌سازی این پدیده رخ نمی‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش شبیه‌سازی افت فشار دوفازی برای هندسه با صفحات سوراخ‌دار توسط آنالیز CFD انجام‌گرفته است. مدل آشفتگی BSL جهت شبیه‌سازی بهترین تطابق را با داده‌های تجربی دارد. کانتورهای فشار و سرعت گزارش شده است. همان‌طور که در نمودارها و کانتورها مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت گاز و مایع میزان افت فشار در آکنه افزایش می‌یابد. با استفاده از صفحات سوراخ‌دار و مقایسه نتایج نسبت به صفحات ساده و بدون سوراخ افت فشار در صفحات سوراخ‌دار ۷٪ کاهش داشته است. با توجه به میانگین درصد خطای کم نسبت به مقادیر آزمایشگاهی، می‌توان بیان کرد که نرم‌افزار CFX یک ابزار مهم و پرکاربرد در پیشگویی و تحلیل مسائل با هندسه‌های پیچیده است.

فهرست علائم

نشانه	علامت
سطح مقطع	$A (m^2)$
سطح ویژه آکنه	$a_p (m^{-1})$
نیروی جسمی، گرانش	$B (n/m^3)$
قاعده کانال مثلثی	$b (m)$
ضریب دراگ بین فازها	$C (kg/sm^3)$
ضریب نیروی دراگ	C_D
فاکتور جریان گاز	$Fs (m/s(kg/m^3)^{0.5})$
ارتفاع کانال در آکنه	$h (m)$
ارتفاع بستر آکنه	$h_{pb} (m)$
ارتفاع المان آکنه ساختاریافته	$h_{pe} (m)$
فشار	$P (pa)$
دبی حجمی	$Q (m^3 / m^2.h)$
ضلع مجاور قاعده در کانال مثلثی	$s (m)$
زمان	$t (s)$
سرعت	$U (m / s)$
افت فشار به ازای واحد طول	$\Delta P / \Delta z (pa / m)$
سرعت ظاهری فاز مایع	$uls (m/s)$

علائم یونانی

تخلخل آکنه	ε_p
زاویه رأس کانال آکنه	ϑ
جزء حجمی فاز α	γ_a

۵- منابع و مراجع

- [1] Stichlmair J.G., Fair J.R., "Distillation, Design and Practice", 1998, Wiley VCH, New York
- [2] Brunazzi E., Nardini G., Paglianti A., "Interfacial area of Mellapak packing: Absorption of 1,1,1-trichloroethane by Genosorb 300, Chem. Engineering Technology, 1995, 18, pp. 248-255
- [3] Parkison G., Ondrey G., Packing towers, 1999, Chem. Eng., pp. 39-43,
- [4] Brunazzi E., Paglianti A., Spiegel L., Tolaini F., Hydrodynamics of a gas-Liquid column Equipped with Mellapakplus packing, 2002 University of Pisa, Italy
- [5] Spiegel L., Meier W., AIChE Spring National Meeting, 1994, Paper 91C
- [6] Brunazzi E., Paglianti A., AIChE J., 43, pp. 317-327, 1997
- [7] Mazarei Sotoodeh M., Zivdar M., Rahimi R, CFD modeling of multiphase flow in reactive distillation Column, Chemical Engineering and Processing, 2018.
- [8] Sacher J., Repk J., Development of a mesoscale model for the gasphase fluid dynamics in structured packings based on fundamental experiments and CFD investigations, Chemical Engineering Research and Design, 2019, 147, 430-442.
- [9] Hassanvand A., Esmaeili-Faraj S.H., Moghaddam M.S., Moradi R., Characterization of New Structured Packing by using of computational fluid dynamics, 2020, Chemical Engineering & Technology
- [10] Miramontes E., Additively manufactured packed bed device for process intensification of CO₂ absorption and other chemical processes. Chemical Engineering Journal, . 2020, 388: p. 124092
- [11] Sun B., Hydrodynamics of a novel 3D printed structured packing-SpiroPak. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification. , 2021. 167: p. 108533
- [۱۲] شجاعی، سعید. زیودار، مرتضی. محاسبه افت فشار خشک در آکنه‌های ساختاریافته توسط آنالیز CFD، ۱۳۸۵، کنگره ملی دانشجویی مهندسی شیمی، دانشگاه رازی کرمانشاه
- [13] Zivdar. M, Distillation for Food Flavour Separation, Ph.D. Thesis, 1998, The University of Sydney.
- [14] <https://koch-glitsch.com>