

بررسی تجمع مایع و توزیع فشار در آکنه‌های ساختار یافته توسط دینامیک سیالات محاسباتی

مرتضی زیودار^۱، مسعود حق شناس فرد^۲، بهاره نتهانی^۳، علی آیتی^۳

۱- زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، گروه مهندسی شیمی

۲- اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی شیمی

۳- مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی شیمی

پیام‌نگار: Haghshenas@cc.iut.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، پارامترهایی از قبیل تجمع مایع، افت فشار خشک و افت فشار دو فازی به کمک تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی برای چهار نوع آکنه ساختار یافته ملاپک نوع یک و دو، فلکسیپک^۱ و جمپک^۲ محاسبه شده است. جهت تعیین افت فشار خشک، یک مدل سه بعدی و برای محاسبات دو فازی، یک مدل دو بعدی در نظر گرفته شد. نتایج تجمع مایع و افت فشار خشک حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی برای محاسبه افت فشار دو فازی بصورت غیر مستقیم بکار گرفته شده‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، مقدار متوسط ضخامت فیلم مایع در ناحیه زیر انباشتگی برای آکنه‌های ملاپک نوع دو، فلکسیپک، جمپک و ملاپک نوع یک، به ترتیب، ۰/۳۲۴، ۰/۱۰۲۸، ۰/۳۴ و ۰/۳۲۳۲ میلی‌متر است. مقدار متوسط تجمع مایع در ناحیه زیر انباشتگی ۰/۷/۶۲، ۰/۴/۲۴، ۰/۳/۷۷ و ۰/۷/۵۵، به ترتیب، برای آکنه‌های ملاپک نوع دو، فلکسیپک، جمپک و ملاپک نوع یک است. بطور کلی مطابقت خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده در این تحقیق وجود دارد بطوریکه می‌توان نشان داد که مدل‌های ارائه شده در این تحقیق می‌توانند بخوبی برای پیشگویی پارامترهای هیدرودینامیکی در آکنه‌های ساختار یافته بکار روند.

کلمات کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، آکنه‌های ساختار یافته، تجمع مایع، افت فشار خشک، افت فشار دو فازی

۱- مقدمه

است. تجمع مایع عبارت است از مقدار مایعی که بصورت لایه‌هایی آکنه‌ها را خیس کرده و بصورت حوضچه‌هایی در لابلاهای آکنه‌ها در گیر شده است [۱]. معمولاً اولین خاصیتی که جهت بررسی عملکرد برج‌های آکنده تعیین می‌شود افت فشار بستر خشک است [۲]، به این معنی که فرض می‌شود در ابتدا هیچ جریان مایعی درون برج برقرار نباشد و تنها فاز

درک و فهم دقیق پارامترهای مؤثر در عملکرد برج‌های آکنده باعث رشد و بهبود طراحی و نهایتاً عملکرد این برج‌ها می‌گردد. یکی از این پارامترها که در عملکرد برج‌های آکنده بسیار مؤثر است تجمع مایع

1. Mellapak [250 X, 250Y]
2. Flexipak
3. Gempak

یک محاسبه شود. جهت حل به کمک تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی معادلات و روابط اساسی حاکم بر جریان سیال که شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت می‌باشند بایستی برای هندسه مدل حل شوند. این معادلات در بخش مدل‌سازی ارائه شده‌اند. مشخصات هندسی آکنه‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) آمده است.

۲- مدل‌سازی سیستم توسط دینامیک سیالات محاسباتی

برای آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی آکنه‌های ساختار یافته تا کنون تحقیقات مختلفی صورت گرفته و مدل‌های هندسی گوناگونی پیشنهاد شده‌اند [۸ و ۷ و ۵]. در برج‌های آکنده، جریان دو فازی گاز - مایع به صورت متقابل برقرار است. یک سیستم چند فازی شامل مخلوطی از دو یا چند فاز است که هر فاز ممکن است میدان جریان متفاوتی داشته باشد. دیدگاه اویلر - اویلر یک مدل شناخته شده برای تحلیل جریان‌های چند فازی است. در این مدل، هر فاز میدان جریان مخصوص به خود را دارد. هر فاز دارای سرعت و دمای خاص خود است و سیستم را می‌توان توسط معادلات حاکم بر هر فاز تحلیل کرد. در تحلیل مسائل علم مکانیک دیدگاه لاگرانژی نیز وجود دارد که یک ذره انفرادی متحرک را در میدان جریان دنبال می‌کند و بیشتر مناسب مکانیک جامدات است. دیدگاه اویلر بیشتر مناسب جریان سیال است زیرا میدان جریان را مورد توجه قرار می‌دهد. معادلات حاکم بر جریان سیال در حالت دو فازی بصورت زیر می‌باشند:

معادله پیوستگی:

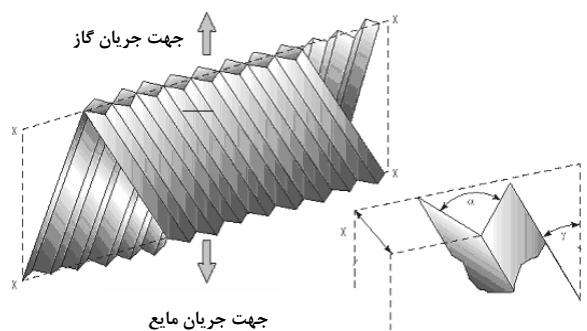
$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_{\alpha} \rho_{\alpha}) + \nabla \cdot (\phi_{\alpha} \rho_{\alpha} U_{\alpha} - \Gamma_{\alpha} \nabla \phi_{\alpha}) = 0 \quad (1)$$

جدول ۱- مشخصات هندسی آکنه‌های مورد استفاده [۶].

نوع آکنه	$a_p (m^{-1})$	$\varepsilon (\%)$	$\beta (deg)$	$b (m)$	$h (m)$	$S (m)$
ملاپک نوع ۲	۲۴۹	۹۵	۴۵	۰/۰۲۴۱	۰/۰۱۱۹	۰/۰۱۷
ملاپک نوع ۱	۲۵۰	۹۸	۶۰	۰/۰۲۴۱	۰/۰۱۱۹	۰/۰۱۷
فلکسیپک	۴۵۳	۹۱	۴۵	۰/۰۱۲۷	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۹
جمپک	۱۱۵	۹۶	۴۵	۰/۰۵۰۹	۰/۰۲۵۵	۰/۰۳۶

گاز در برج آکنده جریان داشته باشد. به کمک پارامترهای افت فشار خشک و تجمع مایع می‌توان افت فشار دو فازی را در برج‌های آکنده تعیین کرد.

آکنه‌های ساختار یافته از صفحات نازک مورب فلزی ساخته می‌شوند و بصورت منظم و موازی کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. شکل صفحات مورد استفاده ممکن است شیار دار و موجی، سواخ دار و یا ساده باشد و بطور منظم معمولا با طول ۸ تا ۱۲ اینچ تحت یک زاویه ثابت کنار هم قرار گیرند و در نتیجه کانالهایی با سطح مقطع مثلثی جهت عبور سیال تشکیل دهند. هر دسته از این صفحات در طول برج نسبت به صفحه پایینی ۹۰ درجه چرخانده می‌شود، بنابراین سیال یک مسیر زیگزاگ را در طول بستر طی می‌کند [۴ و ۳]. شکل (۱) قسمتی از آکنه ساختار یافته را نشان می‌دهد [۵].



شکل ۱- مشخصات هندسی آکنه‌های ساختار یافته [۵]

در این تحقیق سعی شده است که تجمع مایع، افت فشار خشک و افت فشار دو فازی به کمک تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی برای چهار نوع آکنه ساختار یافته ملاپک نوع دو، فلکسیپک، جمپک و ملاپک نوع

معادله اندازه حرکت:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) + \left\{ \phi_\alpha \left[\rho_\alpha U_\alpha U_\alpha - \mu_{\text{eff}} \left(\nabla U_\alpha + (\nabla U_\alpha)^T \right) \right] \right\} \\ = \phi_\alpha (B_\alpha - \nabla P) + F_\alpha \quad (2)$$

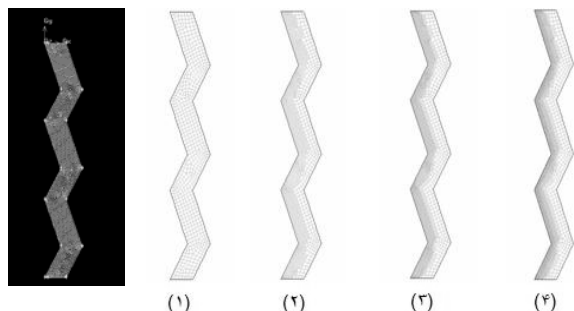
در این معادلات، t زمان، ρ چگالی، μ گرانیروی، U سرعت حقیقی، ϕ جزء حجمی اشغال شده توسط هر فاز، F نیروی پسا، Γ ضریب پراکندگی، B نیروی بدنی یا جسمی و P فشار است. در این تحقیق، برای تحلیل افت فشار خشک از یک مدل سه بعدی شامل دو صفحه از چهار نوع آکنه ساختار یافته (ملاپک نوع دو، فلکسیپک، جمپک و ملاپک نوع یک) که از نظر ابعاد و اندازه‌های h,b,s با هم تفاوت دارند، استفاده شده است. در تعیین ضخامت فیلم مایع، یک مدل دو بعدی برای هر یک از این آکنه‌ها به کار گرفته شده است.

ایجاد شبکه‌بندی مناسب برای حل معادلات اساسی حاکم بر مدل، یکی از مهمترین بخشهای مدل‌سازی است. جهت شبیه‌سازی سیستم در این تحقیق از نرم افزار فلوئنت و جهت شبکه بندی مدلها از نرم افزار گمبیت استفاده شده است. با ایجاد یک شبکه‌بندی مناسب می‌توان در حل معادلات به یک همگرایی مناسب دست یافت و بالعکس انتخاب نامناسب شبکه می‌تواند باعث ایجاد ناپایداری یا عدم همگرایی مناسب در محاسبات گردد.

در این تحقیق به منظور سازه‌بندی هندسه‌های مورد نظر، ابتدا مرحله بررسی استقلال از مش بررسی گردید به این منظور سازه‌هایی با اندازه ۱/۴، ۲/۲، ۲/۱، ۲/۴ و ۲/۶ میلی‌متر انتخاب شده و مورد ارزیابی قرار گرفتند. پس از بررسی نتایج، مشخص شد که نتایج حاصل در سازه‌هایی با اندازه‌های ۱/۴ تا ۲/۲ میلی‌متر تقریباً یکسان است. بنابراین سازه مورد نظر در این قسمت به اندازه ۲/۲ میلی‌متر انتخاب شد. شمار سازه‌های مورد استفاده در این حالت ۳۷۴۲۴۹ است.

شکل (۲) مدل شبکه بندی شده را نشان می‌دهد. برای آنالیز افت فشار بستر خشک، از هوا با چگالی (kg/m^3) ۱/۱۸۵ و گرانیروی $10^{-5} \times 1/7894$ به عنوان فاز گاز استفاده شد و مدل آشفتگی k-ε جهت تحلیل آشفتگی، مورد استفاده قرار گرفت. نوع سازه بکار

رفته در این قسمت با توجه به شکل هندسی مدل تتراهدردال انتخاب شده است. شرایط مرزی مورد استفاده در این حالت در جدول زیر آورده شده است.



شکل ۲- از مرحله (۱) تا (۴) به ترتیب مراحل ریزتر شدن شبکه ملاپک نوع ۲

جدول ۲- شرایط مرزی مورد استفاده

پارامترها	مکان	نوع شرط مرزی
سرعت و جزء حجمی هر دو فاز و پارامترهای اغتشاش	مرز پایینی بستر	ورودی سرعت ^۱
فشار نسبی	بالای بستر	خروجی فشار ^۲
سرعت صفر ذرات فازها در دیواره ها	دیواره ها	دیواره جامد

فاز گاز، هوا با چگالی (kg/m^3) ۱/۱۸۵، و فاز مایع، آب با چگالی (kg/m^3) ۹۹۸ است. برای دیواره‌ها نیز شرط مرزی "دیواره جامد" با فرض سرعت صفر برای سیال در دیواره، در نظر گرفته شد.

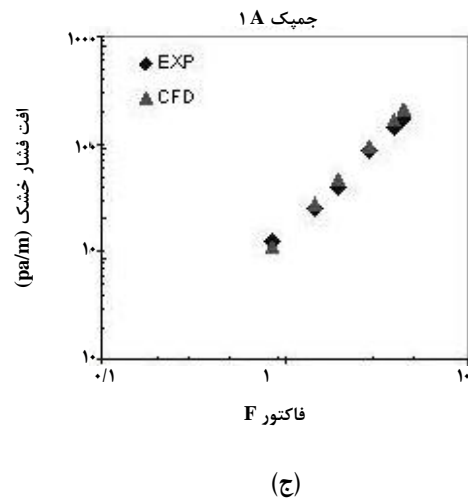
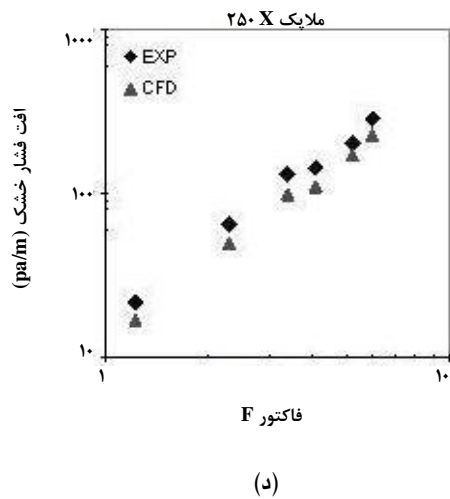
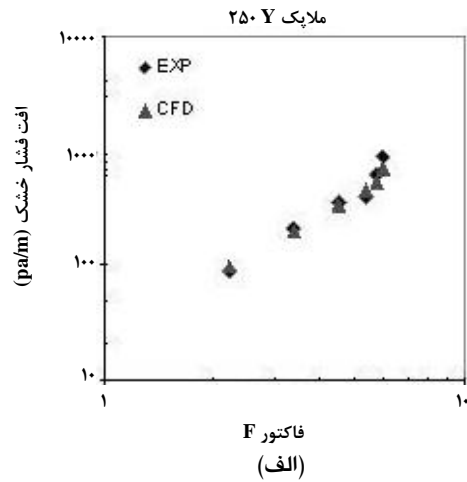
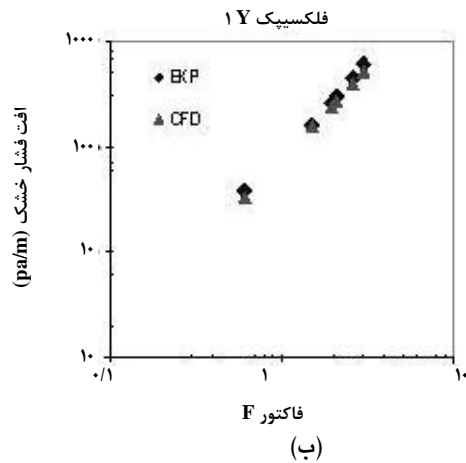
۳- تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی

نتایج مربوط به افت فشار خشک در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکلها مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت گاز افت فشار خشک نیز افزایش می‌یابد و تمام نمودارها بصورت خطی می‌باشند که در واقع علت آن، وجود رابطه خطی بین

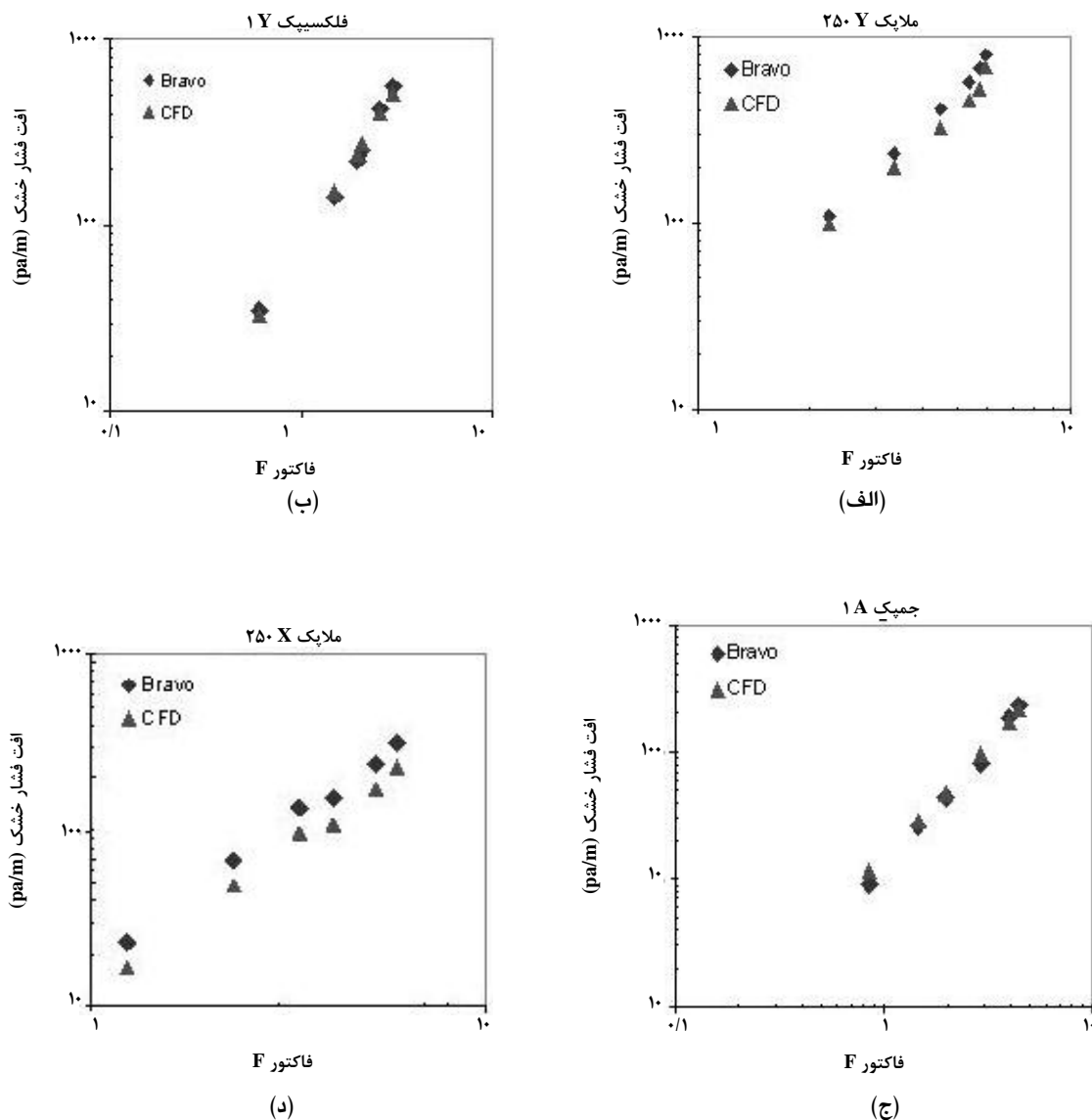
1. Velocity Inlet
2. Pressure Outlet

سرعت فاز گاز و افت فشار است که توسط براوو و روکا نیز ارائه شده است [۶]. این رابطه در معادله (۳) آمده است. در این رابطه $\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right)_{dry}$ بیانگر افت فشار خشک به ازای واحد طول بستر، ψ ضریب اصطکاک، ρ_g چگالی گاز، U_{ge} سرعت مؤثر فاز گاز و d_{eq} هم‌ارز کانال است.

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta Z}\right)_{dry} = \psi \times \rho_g \times U_{ge} / d_{eq} \quad (3)$$



شکل ۳- مقایسه افت فشار خشک حاصل از نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی، (الف): آکنه ملاپک ۲ اطلاعات تجربی در این آکنه از مرجع [۱۱]. (ب) آکنه فلکسیک اطلاعات تجربی در این آکنه از مرجع [۶]. (ج) آکنه جمپک اطلاعات تجربی در این آکنه از مرجع [۹]. (د) آکنه ملاپک ۱ اطلاعات تجربی در این آکنه از مرجع [۱۱].



شکل ۴- مقایسه افت فشار خشک حاصل از نتایج شبیه‌سازی و نتایج بدست آمده از معادله تجربی براوو [۹].

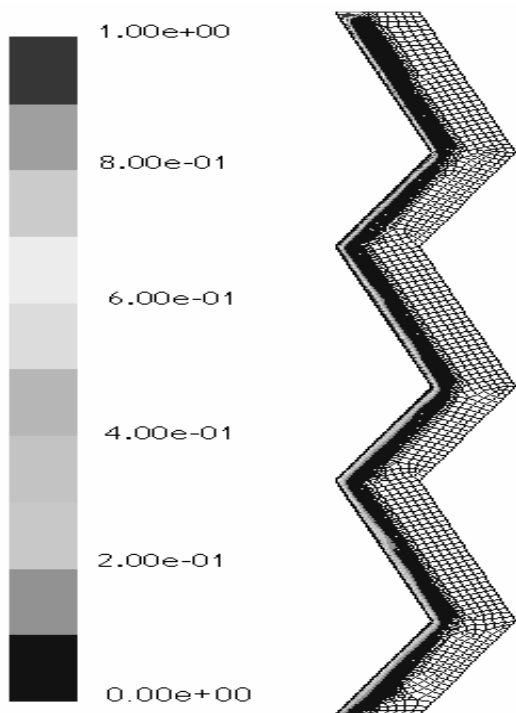
محاسباتی و نتایج تجربی موجود و نتایج حاصل از معادله براوو را در قالب در صد خطای نسبی میانگین (ARE) برای تمام آکنه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. رابطه (ARE) در زیر آمده است:

$$E(\%) = 100 * \frac{1}{N} \sum \left| \frac{\left(\frac{\Delta P}{H} \right)_{Exp} - \left(\frac{\Delta P}{H} \right)_{CFD}}{\left(\frac{\Delta P}{H} \right)_{Exp}} \right| \quad (4)$$

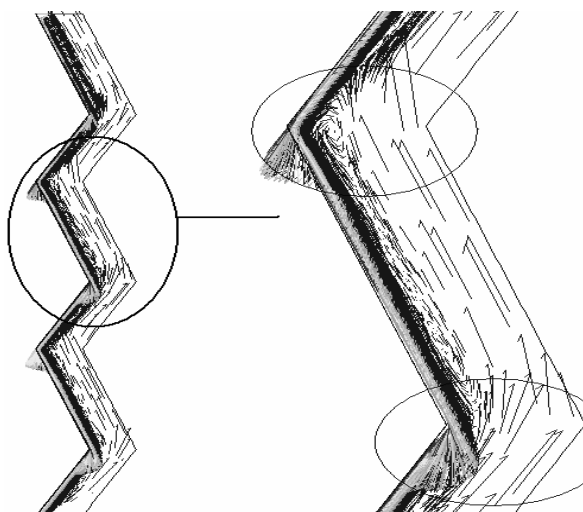
مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و نتایج تجربی بدست آمده نشان می‌دهند که بین این مقادیر، اندکی اختلاف وجود دارد. علت اصلی این اختلافات این است که در شبیه‌سازی، جریان گاز بصورت یکنواخت فرض شده است در حالی که در مقیاس‌های صنعتی پدیده‌هایی مثل توزیع ناقص گاز و کانالیزه شدن جریان وجود دارد که در واقع در شبیه‌سازی، این پدیده‌ها در نظر گرفته نشده‌اند.

جداول (۳) و (۴) مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات

بیشتر شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد که ضخامت فیلم مایع در حرکت از بالای آکنه به سمت پایین پیوسته تغییر می‌کند.



شکل ۵- کانتورهای کسر حجمی مایع در سرعت‌های گاز
($v_g = 1 \text{ m/s}$, $v_L = 0.17 \text{ m/s}$)



شکل ۶- تصویر بزرگنمایی شده از آکنه ملایک نوع ۲

در این رابطه N تعداد نقاط آزمایشگاهی است. بعنوان مثال، در شکل (۶-الف) ۶ نقطه وجود دارد که متوسط مجموع خطاهای نسبی آن ۱۳/۰۵۱ درصد است.

جدول ۳- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی در قالب ARE.

نوع آکنه	ARE(%)
ملاپک نوع ۲	۱۳/۰۵۱
فلکسیپک	۱۰/۲۸۸
جمپک	۱۴/۹۳
ملاپک نوع ۱	۲۰/۶۹۶

جدول ۴- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج بدست آمده از رابطه تجربی براوو در قالب ARE.

نوع آکنه	ARE(%)
ملاپک نوع ۲	۱۲/۳۰
فلکسیپک	۷/۶۸
جمپک	۱۶/۱۵
ملاپک نوع ۱	۲۶/۸

۴- تعیین ضخامت فیلم مایع

فاز مایع از بالای آکنه با سرعت مشخص وارد می‌شود و از پایین آکنه خارج می‌گردد در حالی که فاز گاز از پایین آکنه وارد و از بالای آکنه خارج می‌گردد. به علت تقارن، فقط ضخامت فیلم مایع بر روی یک دیواره از آکنه اندازه گیری شده است.

در شکل (۵) فیلم مایع شکل گرفته شده بر روی دیواره آکنه در تمام آکنه‌های مورد استفاده در این تحقیق آورده شده است. در این شکل رنگ قرمز (کنار دیواره‌ها) نشان‌دهنده فاز مایع و رنگ آبی (همه سطح کانال بجز لبه دیواره‌ها) نشان‌دهنده فاز گاز است. فاز مایع که از بالای آکنه وارد می‌شود با یک ضخامت خیلی کم به سمت پایین آکنه حرکت می‌کند.

شکل (۶) تصویر بزرگنمایی شده‌ای از یک قسمت از آکنه ملایک نوع ۲ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص شده است ضخامت فیلم مایع در ناحیه ۱ کم شده در حالی که این ضخامت در ناحیه ۲

از آنجا که ضخامت فیلم مایع در طول حرکت سیال از بالا به پایین آکنه تغییر می‌کند، برای محاسبه ضخامت فیلم مایع، ضخامت در چند نقطه مختلف از بالا به پایین آکنه تعیین و بین این مقادیر متوسط گیری شد.

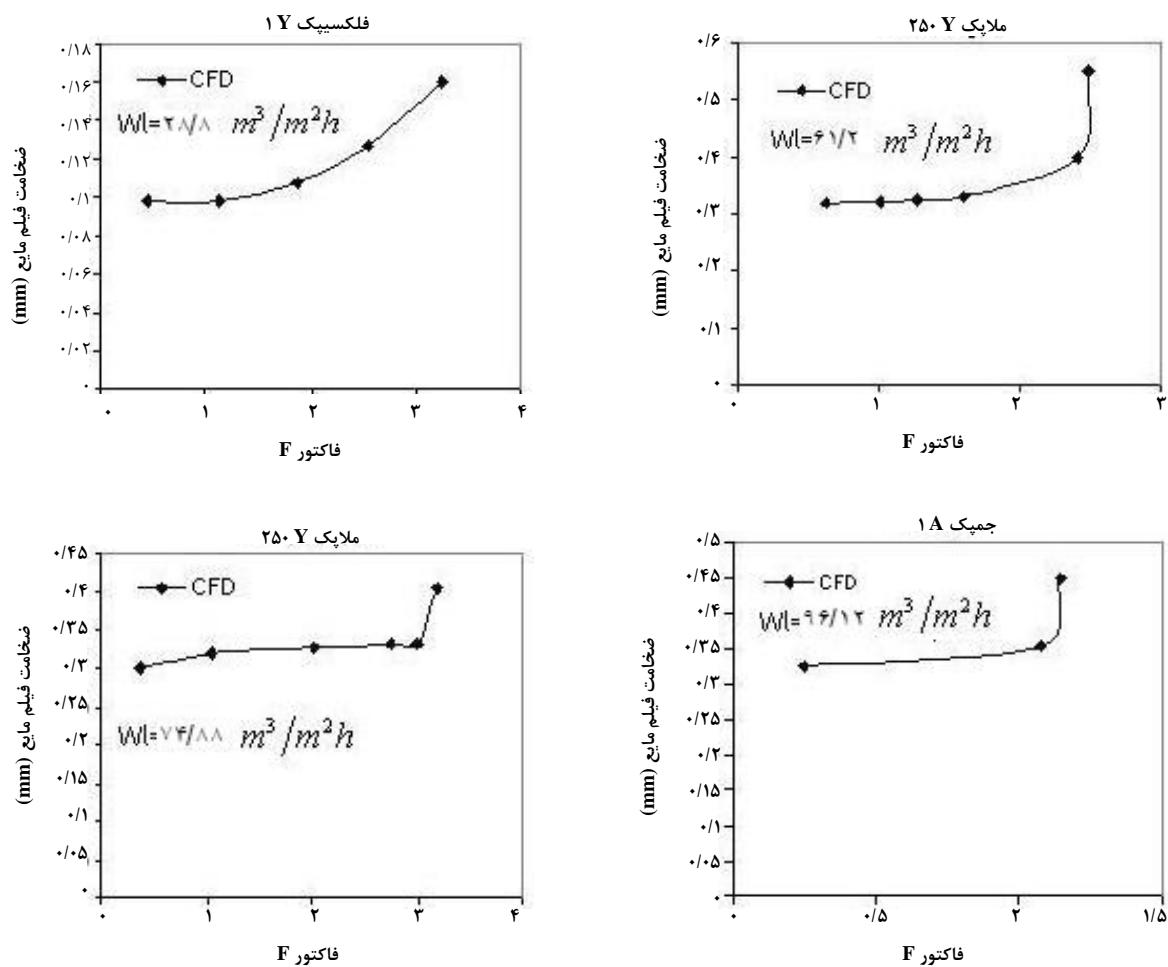
نتایج حاصل از این محاسبات در شکل (۷) آمده است. WI شدت جریان مایع است.

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌گردد ضخامت فیلم مایع با افزایش فاکتور F، در ابتدا تغییر چندانی ندارد اما در یک سرعت خاص برای هر آکنه مقدار آن افزایش یافته است. در آکنه ملاپک نوع ۲ تا فاکتور ۱/۶۱ در ناحیه زیر انباشتگی قرار دارد در حالی که این فاکتور برای آکنه‌های فلکسیپک، جمپک و آکنه ملاپک نوع ۱ به ترتیب ۱/۸۷،

۲/۹۹ و ۱/۰۷ است. مقدار متوسط ضخامت فیلم مایع در ناحیه زیر انباشتگی برای آکنه‌های های ملاپک نوع دو، فلکسیپک، جمپک و ملاپک نوع یک به ترتیب ۰/۳۲۴، ۰/۱۰۲۸، ۰/۳۴ و ۰/۳۲۳۲ میلی‌متر می‌باشند.

برای بررسی صحت نتایج بدست آمده توسط دینامیک سیالات محاسباتی، این نتایج با یک رابطه تجربی مقایسه شده است. این رابطه تجربی بصورت زیر است [۱۰]:

$$\delta = \left(\frac{3\mu_L U_{Ls}}{\rho_L g a_p \sin \theta} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$



شکل ۷- نتایج حاصل از اندازه گیری ضخامت فیلم مایع توسط دینامیک سیالات محاسباتی

از معادله (۵) برای محاسبه تجمع مایع در آکنه‌های ملاپک نوع دو، فلکسیپک، جمپک و ملاپک نوع یک استفاده شد. مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی برای محاسبه تجمع مایع با نتایج تجربی در شکل (۸) نشان داده شده است.

شکل (۸) نشان می‌دهد که در تمام آکنه‌ها روند تغییرات تجمع مایع نسبت به فاکتور F یکسان می‌باشند. به این ترتیب که در ناحیه زیر انباشتگی^۱ با افزایش سرعت گاز، تجمع مایع تقریباً ثابت است اما با رسیدن به ناحیه انباشتگی، با افزایش سرعت گاز، تجمع مایع به سرعت افزایش می‌یابد. هر کدام از آکنه‌ها در سرعت گاز خاصی به ناحیه انباشتگی می‌رسند که این سرعت‌ها در قالب فاکتور F در شکل (۸) مشخص می‌باشند. در مورد آکنه ملاپک نوع ۲ در فاکتور $F = 2/4 \frac{m}{s} \left(\frac{Kg}{m^3} \right)^{0.5}$ و در آکنه‌های فلکسیپک، جمپک و ملاپک

نوع ۱ در فاکتور F به ترتیب: ۲/۵۴، ۱/۰۷۱ و ۲/۹۹ به ناحیه انباشتگی می‌رسند. اما بعد از ناحیه انباشتگی با افزایش بیشتر سرعت گاز حالت طغیان به وجود می‌آید که در این حالت تجمع مایع بی نهایت است. با توجه به تصاویر نیز می‌توان به این روند پی برد.

مقدار متوسط تجمع مایع در ناحیه زیر انباشتگی برای آکنه‌های ملاپک نوع دو، فلکسیپک، جمپک و ملاپک نوع یک به ترتیب ۷/۶۲٪، ۴/۲۴٪، ۳/۷۷٪ و ۷/۵۵٪ می‌باشند.

با توجه به شکل مربوط به آکنه جمپک، مشاهده می‌گردد که این آکنه دارای میزان تجمع مایع پایین تری نسبت به سه نوع آکنه دیگر است. علت، این است که آکنه جمپک از نظر ابعادی از سه نوع آکنه دیگر بزرگتر است. در واقع ارتفاع کانال این نوع آکنه در حدود دوبرابر آکنه‌های نوع ملاپک و حدود چهار برابر آکنه فلکسیپک است.

تاکنون مدل‌های مختلفی جهت بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی در برج‌های آکنده ارائه شده است از جمله مدل‌های الوجیک، برونازی، براوو [۹-۱۲]. در این تحقیق، نتایج بدست آمده توسط دینامیک سیالات محاسباتی با نتایج رابطه تجربی الوجیک مقایسه شده است. جدول (۵) نتایج حاصل از این مقایسه را نشان می‌دهد. از داده‌های جدول مشخص می‌شود که آکنه‌های ملاپک انواع (۱ و ۲) با مدل الوجیک سازگاری خوبی نشان می‌دهند.

۵- محاسبه تجمع مایع

هدف از این قسمت، محاسبه تجمع مایع در آکنه‌های ساختار یافته است. رابطه کلی تجمع مایع به صورت تابعی از ضخامت فیلم مایع در معادله (۵) آمده است [۹]:

$$h_L = \frac{4\delta}{S} \quad (6)$$

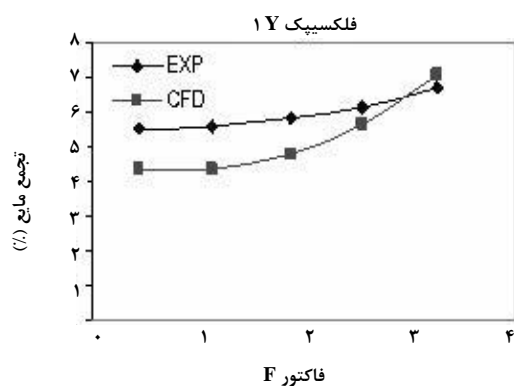
اگر در معادله (۵) بجای پارامتر δ ، ضخامت فیلم مایع محاسبه شده توسط دینامیک سیالات محاسباتی قرار داده شود معادله (۷) به دست می‌آید:

$$h_{LCFD} = \frac{4\delta_{CFD}}{S} \quad (7)$$

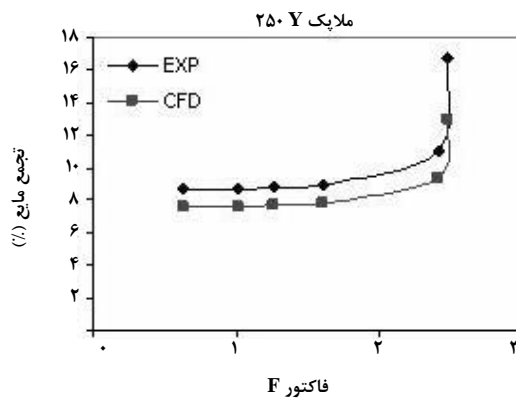
در این معادله δ_{CFD} ضخامت فیلم مایع محاسبه شده توسط نرم افزار و S هم عرض کانال است.

جدول ۵- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با نتایج حاصل از رابطه تجربی الوجیک [۱۰].

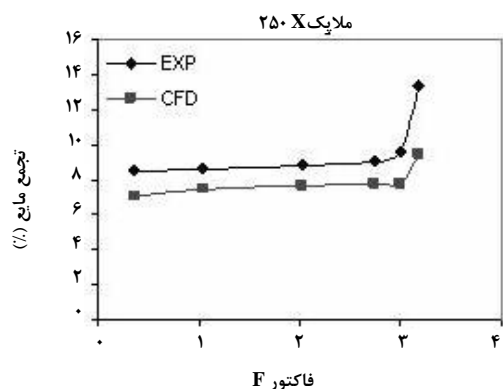
نوع آکنه	$U_{GS} (m/s)$	$U_{LS} (m/s)$	$\delta_{CFD} (mm)$	$\delta_{Ohjic} (mm)$	خطا (%)
ملاپک ۱	۰/۵۷۵	۰/۰۱۷	۰/۳۲	۰/۲۹۵	۸/۴۷
فلکسیپک	۲/۳۳	۰/۰۰۸	۰/۱۲۶۲	۰/۱۸۸	۳۲
جمپک	۰/۹۸۴	۰/۰۲۶۷	۰/۳۵۵	۰/۴۴۰	۱۹/۳
ملاپک ۲	۰/۹۶	۰/۰۲۰۸	۰/۳۲۱۵	۰/۳۰۰	۷/۱۶



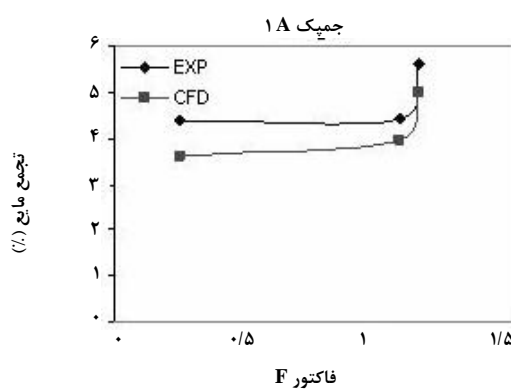
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸- مقایسه تجمع مایع حاصل از نتایج تجربی و نتایج شبیه سازی، (الف): آکنه ملاپک نوع ۲ اطلاعات تجربی در این آکنه از مرجع [۱۳]. (ب) آکنه فلکسیپک اطلاعات تجربی در این آکنه از مرجع [۲]. (ج) آکنه جمپک اطلاعات تجربی در این آکنه از مرجع [۱۳]. (د) آکنه ملاپک نوع ۱ اطلاعات تجربی در این آکنه از مرجع [۱۳].

نظر گرفتن این پدیده‌ها توسط دینامیک سیالات محاسباتی امکان پذیر نیست.

جدول ۶- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی در قالب $ARE\%$.

نوع آکنه	$W_L^* (m^3/m^2 h)$	$ARE(\%)$
ملاپک ۲	۶۱/۲	۱۵/۲۰
فلکسیپک	۲۸/۸	۱۴/۹۸
جمپک	۹۶/۱۲	۱۳/۰۴
ملاپک ۱	۷۴/۸۸	۱۷/۶۰

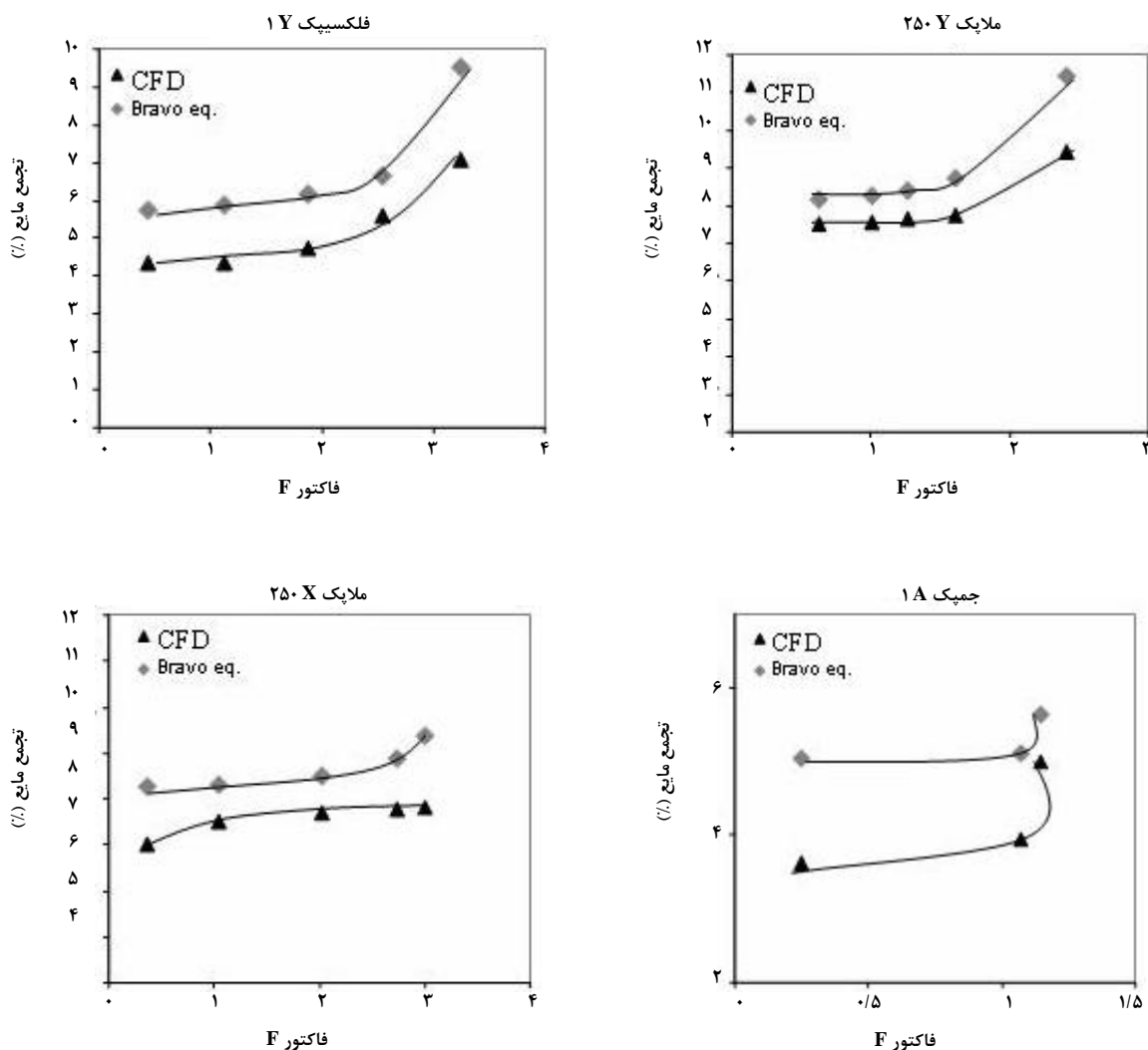
* شدت جریان مایع است.

نکته دیگری که باید در شکل (۸) به آن توجه شود این است که در تمام آکنه‌ها نتایج حاصل از دینامیک سیالات محاسباتی از نتایج داده‌های تجربی کمتر می‌باشند. فرضیات ساده کننده‌ای که در شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی در نظر گرفته شده‌اند می‌توانند از جمله دلایلی باشند که موجب این اختلافات می‌شوند. از جمله این فرضیات ساده کننده می‌توان به استفاده از فرض توزیع یکنواخت گاز در بستر و صرفنظر کردن از پدیده‌هایی نظیر برگشت مایع و کانالیزه شدن جریان در بستر و در نظر گرفتن حالت پایا اشاره کرد. در برخی از نواحی سازه ممکن است ضخامت فیلم مایع تحت تاثیر سرعت گاز قرار گرفته و پدیده‌هایی نظیر جدایی، افزایش ضخامت فیلم مایع و نیز برگشت فیلم مایع ایجاد شوند که امکان در

حاصل از معادله براوو برای هر چهار نوع آکنه دارای اختلاف می‌باشند که این اختلافات در قالب متوسط خطای نسبی (ARE) در جدول (۷) آمده‌اند. با توجه به نتایج جدول، مشاهده می‌گردد که آکنه‌های ملاپک دارای خطای کمتری نسبت به دو نوع آکنه دیگر می‌باشند بطوریکه می‌توان گفت این دو نوع آکنه با معادله تجربی براوو سازگاری بهتری در مقایسه با دو نوع آکنه دیگر دارند.

در شکل (۹) نمودارهای حاصل از نتایج تجمع مایع بدست آمده از معادله براوو با نتایج شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه شده‌اند.

در شکل (۹)، همانطور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات تجمع مایع با افزایش فاکتور F برای نتایج حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با نتایج بدست آمده از معادله براوو یکسان است. اما مقادیر تجمع مایع حاصل از دینامیک سیالات محاسباتی در مقایسه با نتایج



شکل ۹- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج معادله براوو [۹].

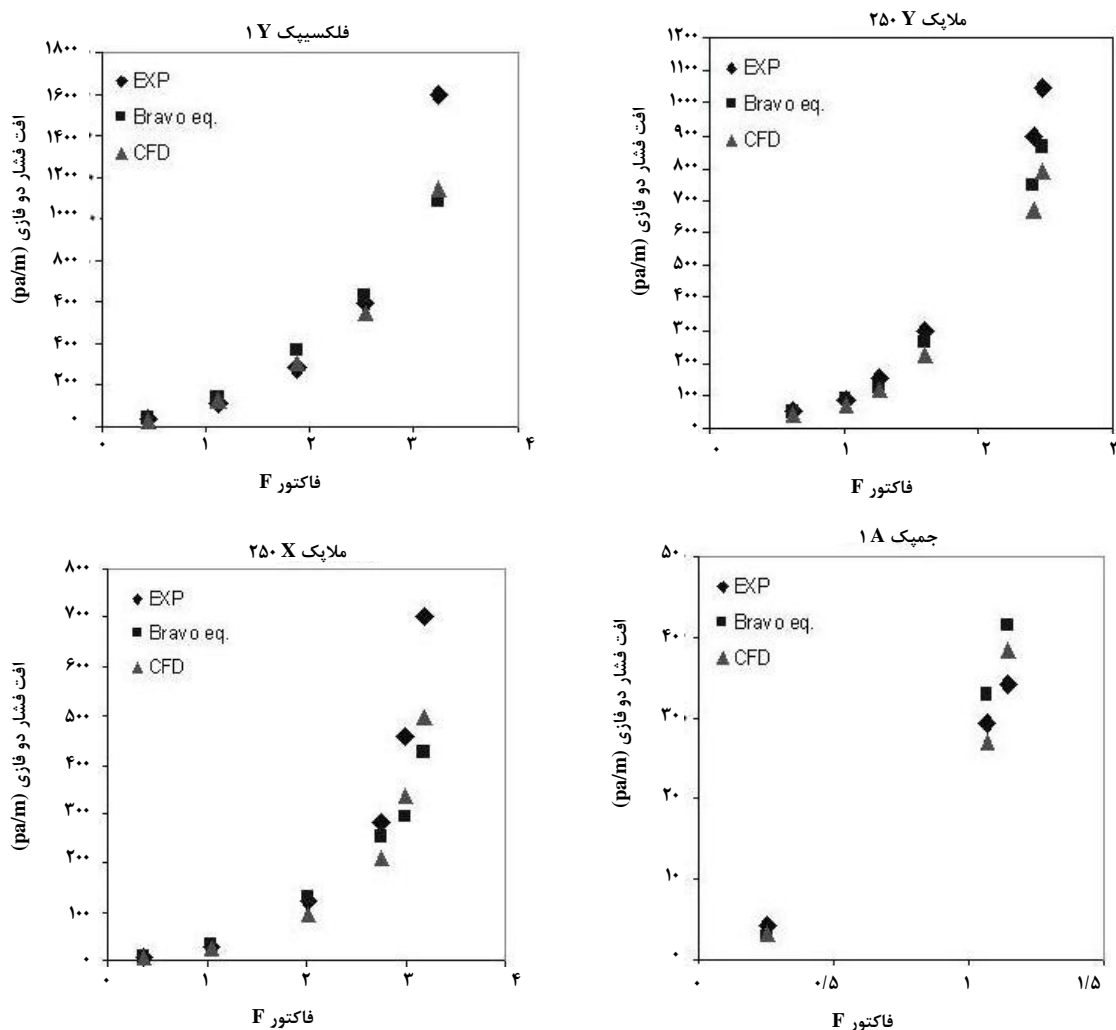
جدول ۷- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج معادله براوو در قالب (%ARE).

نوع آکنه	$W_L (m^3/m^2 h)$	ARE (%)
ملاپک نوع ۲	۶۱/۲	۱۰/۸۱
فلکسیپک	۲۸/۸	۲۲/۶۰
جمپک	۹۶/۱۲	۲۰/۷۷
ملاپک نوع ۱	۷۴/۸۸	۱۲/۶۳

۶- تحلیل نتایج حاصل از آنالیز دینامیک سیالات محاسباتی افت فشار دو فازی

یکی از کاربردهای مهم تجمع مایع در آکنه‌های ساختار یافته محاسبه افت فشار دو فازی در برجهای آکنده است. هدف از این قسمت، تاثیر

تجمع مایع در محاسبه افت فشار دو فازی برجهای آکنده است. در این تحقیق، افت فشار دو فازی به روشی غیر مستقیم از نتایج حاصل از افت فشار خشک و تجمع مایع محاسبه شده است. به این ترتیب که ابتدا افت فشار خشک توسط نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی اندازه گیری و محاسبه، و سپس به کمک ضخامت فیلم مایع محاسبه شده از دینامیک سیالات محاسباتی تجمع مایع محاسبه شده است. در نهایت با قرار دادن این نتایج در روابط براوو [۹] و دلفت [۱۴]، افت فشار دو فازی محاسبه می‌شود. به منظور بررسی صحت نتایج حاصل از محاسبه افت فشار دو فازی به روش غیر مستقیم، این نتایج با داده‌های آزمایشگاهی برگرفته شده از مقالات گوناگون و نتایج حاصل از افت فشار دو فازی بدست آمده از روابط تجربی براوو مقایسه گردیده که نتایج حاصل از این مقایسه در شکل (۱۰) آمده است.



شکل ۱۰- مقایسه نتایج افت فشار دو فازی حاصل از دینامیک سیالات محاسباتی داده‌های آزمایشگاهی و رابطه براوو

نمودارهای ارائه شده بصورت خطی می‌باشند که در واقع علت آن، رابطه خطی بین سرعت فاز گاز و افت فشار است که توسط براوو و روکا [۱۰] ارائه شد.

۲. خطای محاسبه شده نتایج افت فشار خشک حاصل از شبیه‌سازی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی برای تمام آکنه‌های مورد استفاده در این تحقیق، بین ۱۰٪ تا ۲۰٪ است.

۳. خطای محاسبه شده نتایج افت فشار خشک حاصل از شبیه‌سازی در مقایسه با نتایج بدست آمده از رابطه تجربی براوو برای تمام آکنه‌های مورد استفاده در این تحقیق، بین ۷٪ تا ۲۶٪ است.

۴. در این مقاله تاثیر سطح ویژه آکنه‌ها، زاویه کانالهای آکنه‌ها با افق و تخلخل بر روی افت فشار خشک مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش سطح مقطع ویژه، افت فشار گاز خشک نیز افزایش می‌یابد و با افزایش زاویه کانال نسبت به افق از ۴۵° به ۶۰° باعث کاهش میزان افت فشار می‌گردد. بررسی‌ها نشان دادند که با افزایش تخلخل آکنه افت فشار خشک کاهش می‌یابد.

۵. مقدار متوسط ضخامت فیلم مایع در ناحیه زیر انباشتگی برای آکنه‌های ملاپک نوع دو، فلکسیپک، جمپک و ملاپک نوع یک به ترتیب ۰/۳۲۴، ۰/۱۰۲۸، ۰/۳۴ و ۰/۳۲۳۲ میلی‌متر است.

۶. از مقایسه ضخامت فیلم مایع بدست آمده از شبیه‌سازی با رابطه تجربی الوجیک ملاحظه گردید که خطای محاسبه شده بین ۷٪ تا ۳۲٪ برای تمام آکنه‌های مورد استفاده در این تحقیق است.

۷. مقدار متوسط تجمع مایع در ناحیه زیر انباشتگی برای آکنه‌های ملاپک نوع دو، فلکسیپک، جمپک و ملاپک نوع یک به ترتیب ۰/۷۶۲، ۰/۴۱۲۴، ۰/۳۱۷۷ و ۰/۷۱۵۵ است.

۸. آکنه ملاپک نوع ۲ در فاکتور $F \left(\frac{m}{s} \left(\frac{Kg}{m^3} \right)^{0.5} \right)$ ۱/۶۱ و در آکنه‌های فلکسیپک، جمپک و ملاپک نوع یک در فاکتور F به ترتیب: ۱/۸۷، ۱/۰۷۱ و ۲/۹۹ به ناحیه انباشتگی می‌رسند.

۹. خطای محاسبه شده نتایج تجمع مایع حاصل از شبیه‌سازی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی برای تمام آکنه‌های مورد استفاده در این تحقیق، بین ۱۳٪ تا ۱۷٪ است.

۱۰. خطای محاسبه شده نتایج تجمع مایع حاصل از شبیه‌سازی در مقایسه با نتایج بدست آمده از رابطه تجربی براوو برای تمام آکنه‌های مورد استفاده در این تحقیق، بین ۱۰٪ تا ۲۰٪ است.

شکل (۱۰) نتایج افت فشار دو فازی حاصل از دینامیک سیالات محاسباتی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج افت فشار دو فازی بدست آمده از رابطه تجربی براوو را نشان می‌دهد. همانطور که از

شکل (۱۰) مشاهده می‌گردد نتایج حاصل از دینامیک سیالات محاسباتی داده‌های آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده از رابطه براوو دارای اختلاف اندکی می‌باشند. این اختلافات، با توجه به شکل، با افزایش سرعت گاز افزایش می‌یابد. در واقع شاید بتوان نزدیک شدن به حالت طغیان با افزایش سرعت گاز در برج آکنده را دلیل بر این امر دانست.

بطور کلی اختلافاتی را که در محاسبه افت فشار دو فازی حاصل از دینامیک سیالات محاسباتی با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از روابط تجربی وجود دارد می‌توان به فرضیات ساده کننده ای که در محاسبه افت فشار خشک و تجمع مایع حاصل دینامیک سیالات محاسباتی انجام شد، مربوط کرد.

دلایل ایجاد خطا در این حالت، مربوط به خطای آزمایشگاهی اندازه گیری افت فشار و نیز استفاده از فرض توزیع یکنواخت گاز در بستر و صرفنظر کردن از پدیده‌هایی نظیر برگشت مایع و کانالیزه شدن جریان در بستر است. در برخی از نواحی سازه ممکن است ضخامت فیلم مایع تحت تاثیر سرعت گاز قرار گرفته و پدیده‌هایی نظیر جدایی، افزایش ضخامت فیلم مایع و نیز برگشت فیلم مایع ایجاد شوند. این پدیده‌ها تاثیر زیادی بر افت فشار می‌گذارند، به ویژه وقتی که سرعت فاز گاز زیاد می‌شود. از جمله عوامل دیگر ایجاد خطا در این بخش مربوط به خطای موجود در مدل‌های مورد استفاده جهت شبیه‌سازی است. به عنوان مثال مدل‌های مورد استفاده جهت تحلیل جریان آشفته، خود دارای خطا می‌باشد که این خطا در محاسبات دینامیک سیالات محاسباتی نیز وارد می‌شود. به عنوان مثال در این تحقیق جهت تحلیل جریان آشفته از مدل $k-\epsilon$ استفاده شد و یا جهت در نظر گرفتن نیروی دراگ از مدل شیلر و نائومان بهره گرفته شده است. با توجه به تاثیر زیاد این پارامترها بر سیستم ممکن است با تغییر در نوع این مدلها به نتایج بهتری دست یافت.

۷- بحث و نتیجه گیری

نتایج بدست آمده در این مقاله در زیر آمده است:

۱. با افزایش سرعت گاز، افت فشار خشک نیز افزایش می‌یابد و تمام

- [4] Fische L. r, Buhlmann U. and Melcher R., Characterization of High Performance Structured Packing, *Trans IChemE*, Vol 81, Part (A), pp.79-84, (2003).
- [5] Raynal L., Boyer C., and Ballaguet J. P., "Liquid Hold up and Pressure Drop Determination in Structured Packing with CFD Simulations", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 82, 871-879, (2004).
- [6] Petre C. F., Larachi F., Iliuta I. and Grandjean B. P. A., "Pressure drop Through Structured Packings: Breakdown into the Contributing Mechanisms by CFD Modeling", *Chemical Engineering Science*, 58, 163-177, (2003).
- [7] Szulczewska B., Zbicinski I., Gorak A., "liquid flow on structure packing: CFD simulation and Experimental study", *Chem.Eng.technol.*, 26, 580-584, (2003).
- [8] Gorak A., Szulczewska B., Sek J., I. Zbicinski, "CFD Calculations of Two-Phases flow on elements of structure packing", *Materiały konferencyjne CHISA 2000*, Praga, September (2000).
- [9] Rocha J. A., Bravo J. L. and Fair J. R., "Distillation Column Containing Structured Packings: A Comprehensive Model for Their Performance". 1. Hydraulics Models, *Ind. Chem. Eng. Res.*, 32, pp.641-651, (1993).
- [10] Olujic Z., "Development of a Complete Simulation Model for Predicting the Hydraulic and Separation Performance of Distillation Columns Equipped with Structured Packings", *Chem. Biochem. Eng. Q.* 11(1), pp.31-46, (1997).
- [11] Brunazzi E. and Paglianti A., "Mechanistic Pressure Drop Model for Columns Containing Structured Packings", *AIChE Journal*, 43(2), pp.317-327, (1997).
- [12] Valluri P., Matar O., Hewitt G. F. and Mendes M. A., "Thin film flow over structured packings at moderate Reynolds number", *Chem. Eng. Sci.*, 60, 1965-1975, (2005).
- [13] Suess P. and Spiegel L., "Hold up of Mellapak structure packing", *Chemical Engineering and Processing*, 31, 119-124, (1992).
- [14] James R. Fair, Frank Seibert A., Behrens M., Saraber P. P., and Olujic Z., "Structured packing performance- Experimental evaluation of two predictive models", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39, 1788-1796, (2000).

علائم و نشانه‌ها

a_p	سطح ویژه آکنه (m^2/m^3)
ARE	خطای نسبی %
b	قاعده کانال مثلثی (m)
B	نیروی بدنی (N/m^3)
F	نیروی پسا (N/m^3)
F_s	فاکتور جریان گاز $(m/s)(kg/m^3)^{0.5}$
g	شتاب گرانش زمین (m/s^2)
h	ارتفاع کانال در آکنه (m)
s	عرض کانال (m)
U_{gs}	سرعت فاز گاز (m/s)
P	فشار (Pa)
Δp	افت فشار (Pa)
S	ضلع مجاور قاعده در کانال مثلثی (m)
t	زمان (s)
T	دما $(^{\circ}C)$
Wl	شدت جریان مایع (m^3/m^2hr)
β	زاویه کانال (درجه)
θ	زاویه کانال آکنه (درجه)
ε	تخلخل بستر آکنده
μ	گرانروی $(kg/m.s)$
ρ	چگالی (kg/m^3)
δ	ضخامت فیلم مایع (N/m^2)
Γ	ضریب پخش برای جزء حجمی $(kg/m.s)$

مراجع

- [1] Treybal Robert E., Mass transfer operation, Third Edition, MC Grow Hill, (1968).
- [2] Iliuta, I. Petre C. F., Larachi F., "Hydrodynamic continuum Model for two phase flow structured packing-containing columns", *Chemical Engineering Science*, 59, 879-888, (2004).
- [3] Zivdar M., Rahimi R., Nasr M. and Haghshenas M. "Effect of Geometric Characteristics on Dry Pressure Drop of Packed Columns Using CFD Analysis", 32nd International Conference of SSCHE, Slovak, May 23 - 27, (2005).