

شبیه‌سازی جداکننده‌های دو فازی گاز-مایع پره ای و بررسی تاثیر کانال‌های خروجی مایع بر بازده جداسازی

فاطمه کاوسی^۱، شاهرخ شاه‌حسینی^{۱*}، یعقوب بهجت^۲

^۱آزمایشگاه شبیه‌سازی و کنترل فرایندها، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲پژوهشکده توسعه فرایند و فناوری تجهیزات، پژوهشگاه صنعت نفت

*Shahrokh@iust.ac.ir

پذیرش: ۹۰/۰۸/۱۰

دریافت: ۹۰/۰۶/۱۳

چکیده

در بررسی عملکرد جداکننده‌های گاز-مایع پره‌ای تاکنون عمده تحقیقات بر بررسی تاثیرات مدل‌های جریان درهم، سرعت، فشار و اندازه قطرات متمرکز بوده است. در این پژوهش به بررسی تاثیر کانال‌های خروج مایع بر بازده جداسازی قطرات مایع از جریان گاز، افت فشار و پروفایل سرعت سیال از طریق شبیه‌سازی این فرآیند با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در حالت ناپایا پرداخته شده است. از دیدگاه اولری-لاگرانژی برای بررسی رفتار هیدرودینامیکی قطرات مایع در جریان گاز و بررسی برهمکنش این دو فاز در پره استفاده شده است. با استفاده از داده‌های تجربی موجود، مدل محاسباتی معتبرسازی شده است. در این شبیه‌سازی، بازده دو پره با کانال خروج مایع و بدون آن مقایسه شده است. با توجه به نتایج حاصل از مدل CFD، افزایش بازده در اثر کانال‌های خروج مایع اثبات گردیده است. مطابق محاسبات انجام پذیرفته بازده جداسازی قطرات مایع از فاز گاز در پره بدون کانال ۲۳/۳٪ و بازده برای پره کانالدار ۷۲/۲۲٪ است. همچنین در این مطالعه تاثیر کانال‌های خروج مایع بر افت فشار جریان و محل‌های جداسازی قطرات بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: جداساز پره‌ای گاز-مایع، پره، کانال‌های خروج مایع، بازده جداسازی، CFD

۱- مقدمه

یکی از مسائل اساسی در فرآیندهایی که دو فاز مایع و گاز در آن‌ها با هم در تماس هستند، همراه شدن فاز مایع به صورت قطرات ریز با فاز گاز است. به جهت کاهش مسائلی چون خوردگی، از دست رفتن مایعات با ارزش، ناخالصی محصول و مشکلات در تجهیزات پایین دستی در عموم مواقع جداسازی این قطرات مایع از فاز گاز توصیه می‌گردد.

از سال ۱۹۴۷ تا بحال تجهیزات گوناگونی برای حذف رطوبت از جریان گاز طراحی شده‌اند. این دستگاه‌ها که امروزه حذف‌کنندگان رطوبت یا جداکننده‌ها نامیده می‌شوند، در حجم کوچکی سطح تماس بزرگی ایجاد می‌کنند که بدون سد کردن جریان گاز، قطرات مایع را جمع می‌کند. برخلاف فیلترها که قطرات مایع را نگه می‌دارند، جداکننده‌های رطوبت، قطرات ریز را به هم چسبانیده و به مایع اجازه می‌دهند که از سیستم خارج شوند [۱]. از اهداف جداسازی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- افزایش توان عملیاتی: جداکننده‌ها هر کجا که مایع و گاز با هم در تماس باشند، توان عملیاتی را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند.
- افزایش خلوص محصول: جداکننده‌ها از ناخالص شدن محصولات جانبی و فوقانی در برج‌های خلا، تصفیه‌خانه‌ها و برج‌های تقطیر جلوگیری می‌کنند.
- کاهش هزینه‌های عملیاتی: جداکننده‌ها از طریق کاهش ناخالصی و جلوگیری از آلودگی بخش‌های پایین دست به کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک می‌کنند.

- کاهش آلاینده‌گی محیطی: جداکننده‌ها ورود قطرات آلاینده را به اتمسفر تا حد قابل قبول استانداردهای زیست محیطی کاهش می‌دهند.
 - کاهش خوردگی در تجهیزات پایین دست: جداکننده‌ها، توربین‌ها، دمنده‌ها و کمپرسورها را از خطر آسیب‌های جدی محافظت می‌کنند.
 - افزایش بازیابی مایعات گران قیمت: جداکننده‌ها به طور خاص مصرف‌گرایکول، آمین و حلال‌ها را در برج‌های جذب و بازیابی کاهش می‌دهند [۲].
- نموداری از جداکننده‌های پره‌ای^۱ در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد پره‌ها مسیر حرکت گاز حاوی ذرات ریز مایع را به سمت مارپیچ‌های تنگ هدایت می‌کند. با تغییر مسیر گاز، اینرسی یا ممنوم جریان باعث می‌شود قطرات در مسیر مستقیم‌تری حرکت کرده و به دیواره‌های پره برخورد کنند. این قطرات در دیواره‌های پره بعلت نیروی کشش سطحی باقی می‌مانند و با چسبیدن قطرات به یکدیگر، قطرات بزرگتر تشکیل شده، در اثر نیروی وزن رو به پایین می‌چکند. اگر مواد سازنده پره قابل خیس شدن باشند یک لایه سطحی، به هم چسبیدن قطرات و چکیدن را بهبود می‌بخشد. در جریان‌های رو به بالا مایعات به هم چسبیده و با رسیدن به انتهای پره و بزرگ شدن قطرات از انتهای پره می‌افتند.

^۱ - Vane

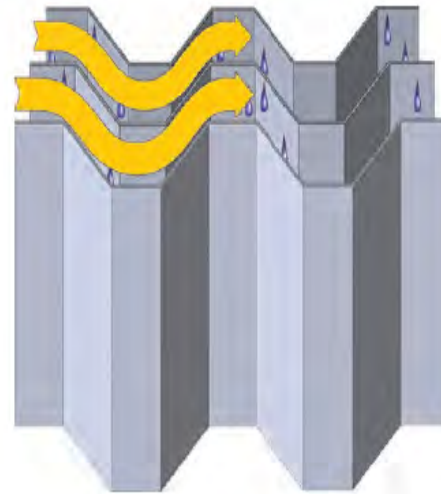
قطرات مایع در فاز پیوسته افزایش یابد، یا در صورت بسیار کم بودن فاصله بین صفحات پره و در کل در برخی طراحی‌های پره‌ها، امکان گرفتگی در پره‌ها هم افزایش می‌یابد [۲].

برای کاستن از احتمال وقوع این پدیده، استفاده از کانال‌های خروج مایع پیشنهاد می‌شود. لازم به ذکر است که در جریان‌های بسیار چگال به دلیل امکان ایجاد گرفتگی در این کانال‌ها استفاده از پره‌های عادی توصیه می‌گردد [۲].

۲- مطالعات پیشین

جیمز و همکارانش (۲۰۰۳) مدلی برهمکنش گردابه‌ای (EIM) را برای محاسبه بازده جداسازی جداکننده‌های پره‌ای با کانالهای خروج مایع استفاده کردند. این مطالعات برای محدوده‌ای از سرعت‌های گاز، فاصله صفحات، اندازه کانال و توزیع اندازه قطرات انجام شده است. همچنین مدلی برای تولید و خروج جریان مایع در جداکننده‌های بدون پره ارائه کردند [۳].

در مطالعه‌ی لی جیا و همکارانش (۲۰۰۷) رفتار قطره در کانال‌های موجی (بدون پره و پره‌دار) بررسی گردیده است. در این مطالعه تولید قطرات ثانویه در اثر برخورد قطرات با دیواره در نظر گرفته شده است. آنها نشان دادند جداسازی قطرات زیر ۲۰ میکرون در جداکننده‌های بدون کانال ناچیز است زیرا در این حالت نیروی پَسار^۳ غلبه دارد و قطرات با اندازه متوسط نیروی کافی برای برخورد با دیواره را ندارند و به دلیل برتری نیروی پَسار نسبت به ماند^۴ حمل می‌شوند. اما در کانالهای پره‌دار به علت نیروی آشفتگی قوی، زمان پاسخ قطرات ریز بسیار کمتر



شکل ۱: نمودار پره با جریان افقی [۱]

متغیرهای گوناگونی از قبیل سرعت، فشار و اندازه قطرات مایع جریان گاز ورودی، در طراحی این جداکننده‌ها سهم به‌سزایی اجرا می‌کنند. به علاوه عواملی از قبیل هندسه پره مورد استفاده، مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی و فرضیات ساده‌کننده در پیش‌بینی صحیح بازده و افت فشار در پره‌ها بسیار تاثیر گذارند.

در انتخاب جداکننده پره‌ای مناسب و متغیرهای طراحی آن، بازده جداسازی نقش اساسی دارد. یکی از موثرترین راه‌های افزایش بازده، ایجاد کانال‌هایی برای خروج مایع و در نتیجه کاهش بازگشت مایع به درون فاز گاز، به علاوه افزایش آشفتگی در جریان است. البته باید در نظر داشت که افزایش آشفتگی می‌تواند به افزایش افت فشار منجر گردد که مطلوب نمی‌باشد.

در صنعت یکی از مشکلات استفاده از انواع جداکننده‌های گاز-مایع، مساله گرفتگی است. جداکننده‌های پره‌ای به دلیل طراحی متمایز و امکان خروج راحت‌تر لایه مایع تشکیل شده، عملکرد بسیار بهتری از جداکننده‌های مش پد دارند. اما باز هم در مواردی که نسبت جرمی

^۲- Eddy Interaction Model

^۳- Drag

^۴- Inertia

^۱ Model

از زمان تشکیل ادی‌های حامل انرژی است که باعث افزایش میزان درگیری قطرات در جریان آشفته‌ی هوا گشته، بنابراین قطرات امکان بیشتری برای برخورد به دیواره‌ها دارند [۴].

گالتی و همکارانش (۲۰۰۸) دو پره دارای کانالهای خروج مایع را با مدلی اولری- لاگرانژی مدل‌سازی کرده، با نتایج تجربی مقایسه کردند. نتایج مدل آنها نشان می‌دهد که برای محدوده قطرات مورد جداسازی مدل برهمکنش گردابه‌ای مهم است اما به نظر می‌رسد که مدل EIM خطای بالایی می‌دهد. بنابراین اصلاحاتی انجام دادند و مدلی برای حرکت توربولنس در سرعت‌های پایین ارائه کرده‌اند [۵].

در مطالعات رفیعی و همکارانش (۲۰۱۰)، حرکت قطره و برخورد آن به دیواره در جریان توربولنس با استفاده از دیدگاه اولری- لاگرانژی بررسی شده است. برای مدل‌سازی جریان توربولنس از مدل تنسور تنش رینولدز^۱ (RSTM) با شرایط مرزی دیواره استاندارد استفاده شده است. یک کد کامپیوتری برای حل معادلات ناویراستوکس همراه با شبکه بدون ساختار در حالت دو بعدی توسعه داده شده است. همچنین مسیر حرکت قطرات با بررسی تاثیر نیروهای لیفت و پَسار بر قطره همراه با مدل برهمکنش گردابه‌ای (EIM) بررسی شده است [۶].

شاه‌حسینی و نریمانی (۲۰۰۹) در مطالعه اخیر خود به بررسی تاثیر هندسه پره بر بازده و افت فشار پرداخته، با استفاده از روش پاسخ سطحی مقادیر بازده را پیش‌بینی کردند.

در این مطالعه از بین سازوکارهای تولید قطرات ثانویه، برخورد قطره با لایه مایع مکانیزم مهمتر شناخته شد و بر این مبنا شبیه‌سازی‌ها صورت

گرفت. در این مطالعه هم‌چنین برای بدست آوردن شرایط بهینه هریک از متغیرهای عملیاتی داده‌های بدست آمده و پیش‌بینی‌های انجام شده در منحنی‌هایی برازش شده، مقادیر بهینه به صورت دوتایی بدست آمده است [۷].

در مطالعه ی زوا و همکاران (۲۰۰۷)، هندسه ی وین مورد بررسی واقع شد و پارامترهای هندسه ی وین به روش پاسخ سطحی بهینه شدند. در این مطالعه کانال‌های خروج مایع در هندسه وین در نظر گرفته نشد [۸].

با توجه به مطالعات انجام پذیرفته توسط سایر محققین برای افزایش بازده جداسازی قطرات مایع از فاز گاز، نیاز به بررسی دقیق تاثیر کانال‌های خروج مایع بر میزان جداسازی قطرات آب از فاز گاز می‌باشد. بنابراین در این تحقیق بعد از معتبرسازی مدل محاسباتی با استفاده از داده‌های تجربی [۵]، تاثیر کانال‌های خروجی مایع بر بازده جداسازی و افت فشار پره مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- الگوسازی CFD و معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی جریان‌های چند فازی، می‌توان از الگوهای حجم سیال، اولری- لاگرانژی و اولری- اولری استفاده کرد.

دیدگاه حجم سیال عموماً زمانی که شکل فرآیندهای جریانی که در نزدیک فصل مشترک رخ می‌دهند، مورد نظر باشد، استفاده می‌شود. در دیدگاه حجم سیال چارچوب اولری برای هر دو فاز به کار می‌رود. دیدگاه حجم سیال از نظر مفهومی ساده است. در این دیدگاه حرکت همه فازها توسط معادلات بقا لحظه‌ای جرم، مومنتوم و انرژی الگوسازی می‌شوند.

^۱ - Reynolds Stress Tensor Model

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

معادله پیوستگی مویید آن است که در فرآیند انتقال، جرمی تولید نشده و از بین نمی‌رود. همچنین معادله مومنتوم برای فاز گاز بصورت زیر می‌باشد.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = \rho f + \nabla \cdot \Pi_{ij} \quad (2)$$

که در آن f نیروهای وارد بر حجم کنترل و Π_{ij} ترم مربوط به تنش می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\Pi_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (3)$$

$$(i, j, k = 1, 2, 3)$$

معادله (۳) همزمان با معادله پیوستگی و مومنتوم و انرژی برای فاز پیوسته حل می‌شود. معادله موازنه انرژی برای فاز پیوسته به شکل کلی زیر نوشته می‌شود معادلات ممنتوم، پیوستگی و انرژی به طور همزمان حل می‌شوند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{V}(\rho p + P)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{v}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_E \quad (4)$$

که در آن k_{eff} هدایت موثر $k+k_t$ ، که k_t هدایت گرمایی توربولنس است) و J فلاکس نفوذ اجزاء J است. سه ترم اول سمت راست معادله نمایانگر انتقال انرژی در اثر هدایت، نفوذ و جایجایی ویسکوز است. S_E ترم چشمه معادله انرژی است.

در دیدگاه اولری- لاگرانژی حرکت فاز پیوسته با استفاده از چهارچوب اولری الگوسازی می‌گردد و حرکت‌های ذرات فاز پراکنده با چارچوب لاگرانژی مدل می‌شود. در این دیدگاه فرآیندهای سطح ذره مانند واکنش‌ها، انتقال جرم و حرارت و غیره را می‌توان بطور جزئی شبیه‌سازی کرد. در حالت جریان درهم، لازم است تعداد خیلی زیادی از مسیرها جهت بدست آوردن یک متوسط منطقی شبیه‌سازی شوند. بنابراین مطابق با این دیدگاه، وقتی تعداد ذراتی که باید شبیه‌سازی گردند، زیاد می‌شود، به منابع محاسباتی خیلی زیاد نیاز می‌باشد. بنابراین این دیدگاه برای شبیه‌سازی جریانهای چندفازی پراکنده حاوی کسر حجمی کمتر از ۱۰ درصد از فاز پراکنده مناسب است. برای جریانهای فاز پراکنده چگال، استفاده از دیدگاه اولری- اولری مناسب می‌باشد.

دیدگاه اولری- اولری جریان تمامی فازها را در چارچوب اولری الگو می‌کند. در روش اولرین- اولرین بسیاری از نیروهای موثر در موازنه نیرو قابل صرف‌نظر کردن هستند. این دیدگاه در مواردی که کسر حجمی فاز گسسته از ۱۰٪ بیشتر باشد مناسب است.

در این مطالعه به دلیل کم بودن کسر حجمی فاز گسسته، از دیدگاه اولری- لاگرانژی برای حل معادلات فاز پیوسته و بررسی مشخصات قطرات مایع شامل مسیر حرکت، اندازه، دما و ردیابی قطرات فاز گسسته استفاده شده است.

۳-۱- معادلات حاکم بر فاز پیوسته [۹]

معادلات حاکم بر فاز گاز شامل معادله پیوستگی، اندازه حرکت و انتقال حرارت بصورت زیر نوشته می‌شود:

در نتیجه حل معادلات (۵) و (۶) مقدار انرژی جنبشی و تلفات انرژی مشخص می‌شود که با استفاده از آنها می‌توان ویسکوزیته مربوط به جریان مغشوش را بصورت زیر محاسبه کرد:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

ثابت مربوط به معادلات (۵) و (۶) و (۷) بر اساس کار لاندرو و اسپالدینگ در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: ضرایب معادله درهم مدل k-ε

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε
۰/۰۹	۱/۴۴	۱/۹۲	۱/۰۰	۱/۳۰

این الگو یکی از ساده‌ترین و کاربردی‌ترین الگو-های در حال استفاده است. به علاوه از نظر تجربی هم در بسیاری فرایندها تطابق خوبی نشان می‌دهد. مدل k-ε استاندارد در رینولدزهای بالا خوب پاسخ می‌دهد. هر چند برای دقت بیشتر در حل معادلات در نواحی دارای جریان چرخشی (مناطق درون کانالهای خروج مایع، اطراف خمیدگی‌های پره) بهتر است از شکل‌های اصلاح شده مدل استاندارد k-ε همانند مدل SST و RNG k-ε بهره جست.

۳-۳- معادلات حاکم بر فاز پراکنده (قطرات مایع) [۱۰]

برای اینکه دیدگاه لاگرانژی بر روی قطرات مایع (فاز پراکنده) اعمال شود موازنه نیروها بر روی تک تک قطرات به صورت زیر نوشته می‌شود. تاثیر سایر نیروهای وارد بر قطره (F) در ترم آخر معادله به صورت زیر می‌تواند وارد می‌گردد:

$$\frac{dv_D}{dt} = F_D(u - u_D) + g(\rho_D - \rho) / \rho_D + F \quad (8)$$

۳-۲- الگوسازی جریان توربولنس [۹]

الگوهای دو معادله‌ای به عنوان زیربنای بسیاری از تحقیقات مربوط به الگوسازی جریان‌های آشفتهدار، بالاخص در سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. ساده‌ترین الگوهای کامل آشفتگی (که در عین قابلیت‌های بالا، دارای معادلات نسبتاً ساده‌ای نیز می‌باشند)، الگوهای دو معادله‌ای هستند که در آنها، حل دو معادله انتقال جداگانه باعث تعیین شدن مقیاس سرعت آشفتگی و مقیاس طول آشفتگی بطور مستقل می‌شوند. مهمترین اختلاف بین مدل‌های دو معادله‌ای و سایر الگوها آن است که الگوهای دو معادله‌ای الگوهای کاملی می‌باشند یعنی از آنها می‌توان برای پیش‌بینی خواص جریان آشفتهدار بدون آگاهی قبلی از ساختار جریان و یا هندسه جریان استفاده کرد. در حالیکه هم در معادلات صفر معادله‌ای (جبری) و هم در معادلات یک معادله‌ای، طول مقیاسهایی وجود دارد که برای تعیین اندازه آنها، نیاز به دانستن رژیم جریان و شکل آن می‌باشد و این امر الگوسازی جریان‌های آشفتهدار قبل از حل آنها را کمی پیچیده می‌کند.

در این تحقیق از دیدگاه دو معادله‌ای k-ε برای حل معادلات جریان توربولنس فاز گاز استفاده شده است. بر اساس تحقیقات لاتدر و اسپالدینگ (۱۹۷۴) مدل دو معادله‌ای به صورت زیر برای k و ε ارائه شده است [۹].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k u) = \quad (5)$$

$$\text{div}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k\right] + E_t - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon u) =$$

$$\text{div}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon\right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} E_t \quad (6)$$

$$- C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$Re = \frac{\rho D_D |u_D - u|}{\mu_g} \quad (10)$$

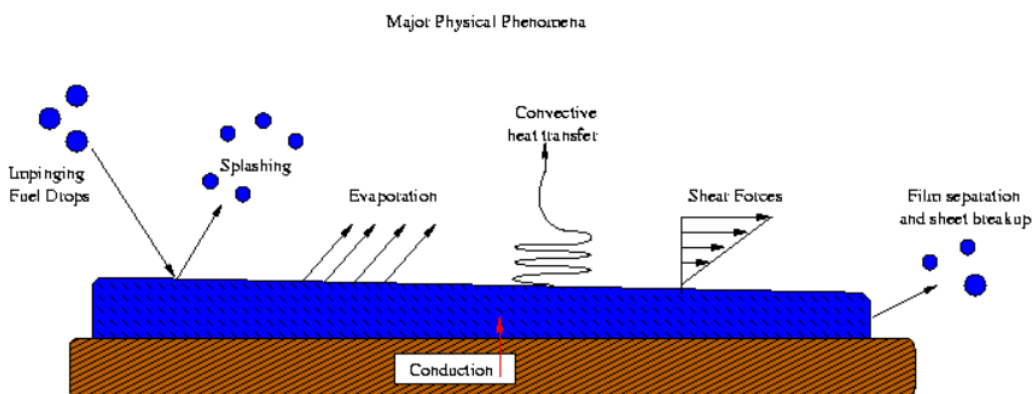
۳-۴- الگوسازی لایه مایع [۱۰]

مدل لایه مایع به یک قطره اجازه می‌دهد، که روی سطح لایه مرزی دیواره جمع شده، یک لایه نازک مایع تولید کند. این الگو می‌تواند به ۴ جزء تقسیم شود: برخورد با مرز دیواره، ردیابی ثانویه روی سطح، محاسبه متغیرهای لایه مایع و فاز چهارم هم‌بسته کردن با فاز گاز. شکل (۲) سازو-کارهای اساسی مدل لایه مایع را نشان می‌دهد.

جمله $F_D(u - u_D)$ نیروی پसार بر واحد جرم قطره می‌باشد و جمله $g(\rho_D - \rho) / \rho_D$ نیروی حجمی ناشی از جاذبه، وارد بر قطره می‌باشد. برای محاسبه نیروی پसार وارد بر ذرات معمولی جمله F_D بصورت زیر تعریف می‌شود:

مدل محاسباتی پس از حل معادلات حاکم برای مسیریابی قطرات مایع تاثیر آن را در دوره‌های معین در معادلات فاز گاز وارد می‌کند و معادلات فاز گاز و قطرات مایع همزمان حل می‌شوند.

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_D D_D^2} \quad (9)$$



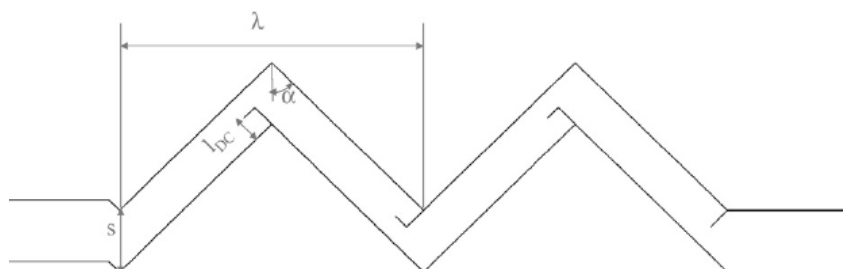
شکل ۲: مکانیزم های پاشش، انتقال حرارت و جرم در لایه مایع

۴- روش تحقیق

سازي از نوع شبکه صورت گرفته و شبکه مناسب انتخاب گردید. متغیرهای هندسی پره مورد بررسی در زیر آمده است:

$$s=25 \text{ mm} \text{ و } \lambda=118.5 \text{ mm}, \alpha=45$$

در این تحقیق شبیه‌سازی یک نمونه پره مطابق هندسه ارائه شده در شکل (۳) انجام شده است. به عنوان پیش زمینه، بررسی شبکه‌بندی‌های گوناگون و بررسی استقلال نتایج حاصل از شبیه



شکل ۳: هندسه شکل مورد بررسی [۱۵]

جدول ۲: شرایط هیدرودینامیکی و انتقال حرارت جریان دو فازی گاز- مایع در پره [۵]

مورد	جریان	شکل جریان	فشار (MPa)	دما °C	ρ_g Kg.m ⁻³	ρ_d Kg.m ⁻³	μ_g μ Pa.S ⁻¹	μ_d μ Pa.S ⁻¹	σ m.N.m ⁻¹
شرایط عملیاتی	هوا - آب	جریان گسسته	۰/۱	۲۰	۱/۲	۹۹۸	۱۸	۹۹۸	۷۳

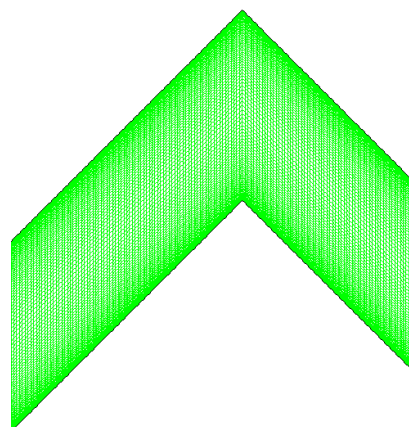
شرایط هیدرودینامیکی و انتقال حرارت جریان دو فازی گاز- مایع در پره در جدول ۲ خلاصه شده است.

۴-۱- شبکه بندی هندسه

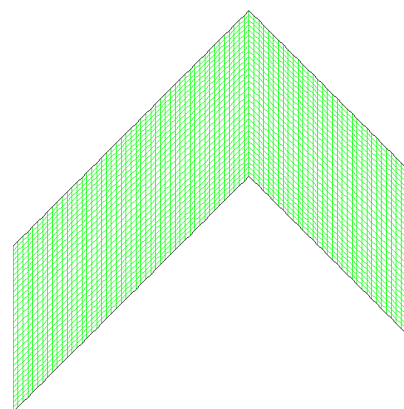
در ابتدا، قلاب‌هایی که در هندسه پره شکل (۳) برای خروج جریان مایع تعبیه شده‌اند، در شبکه بندی اولیه پره در نظر گرفته نشد. این امر به سهولت بررسی‌های اولیه و نیز کاهش زمان محاسبات کمک می‌کند. با توجه به وجود شکستگی‌ها در هندسه پره دو نوع شبکه بندی ساختار یافته در نظر گرفته شد. یکی در راستای پره و یکی مش بندی مربعی.

شبیه سازی با هر دو نوع شبکه بندی در اندازه های گوناگون اجرا شدند تا مقایسه بین دو شبکه و نیز بررسی استقلال نتایج از نوع و تعداد شبکه انجام پذیرفت. در هر دو نوع، شبکه بندی با نسبت ۱/۰۴ مش کنار دیواره‌ها ریزتر از مرکز پره زده شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود اساس تفاوت در اندازه‌ی شبکه‌ها تفاوت در تقسیم بندی ارتفاع پره است. در این بررسی ارتفاع پره از ۳۰ تا ۱۱۰ قسمت تقسیم بندی شد که تنها نتایج بازه‌ی ۵۰ تا ۱۰۰ تقسیم بندی آورده شده است. در شکل (۴) و (۵) زیر دو نمونه از شبکه بندی‌ها در اندازه‌های مختلف آورده شده‌اند.

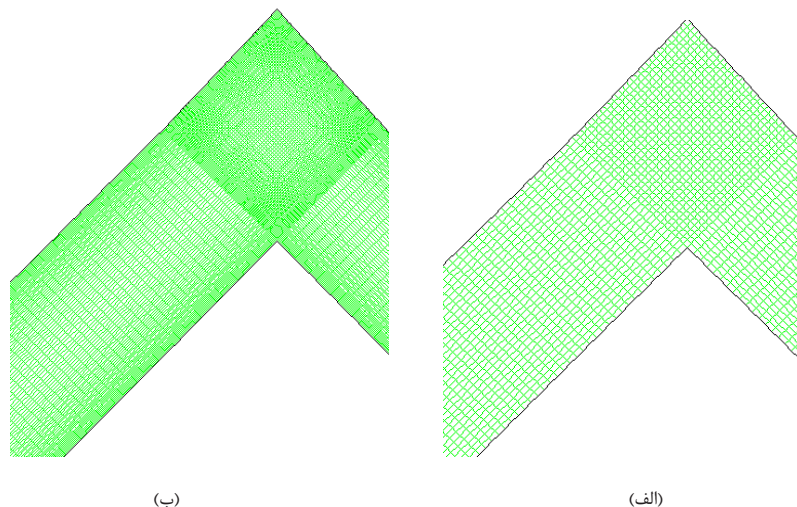


(ب)



(ف)

شکل ۴: شبکه بندی در جهت پره (الف) تقسیم بندی قطر پره به ۳۰ قسمت، (ب) تقسیم بندی قطر پره به ۱۰۰ قسمت

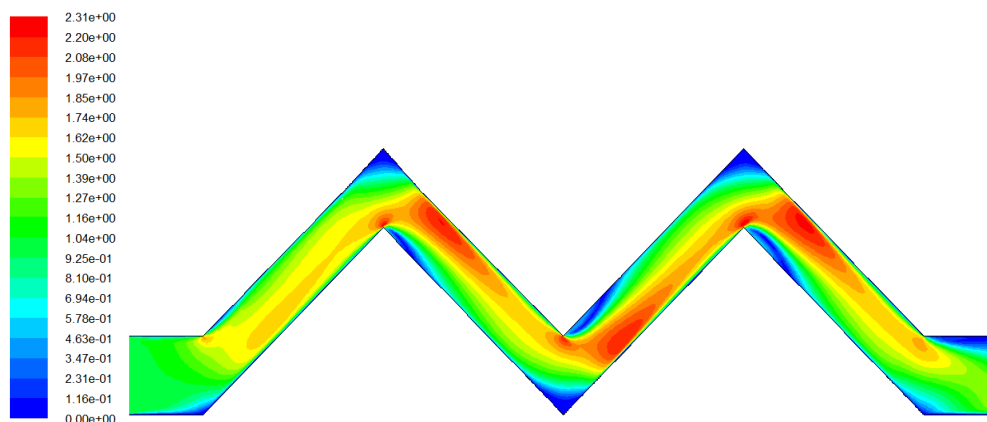


شکل ۵- شبکه بندی مربعی پره الف) تقسیم بندی قطر پره به ۳۰ قسمت، ب) تقسیم بندی قطر پره به ۸۰ قسمت

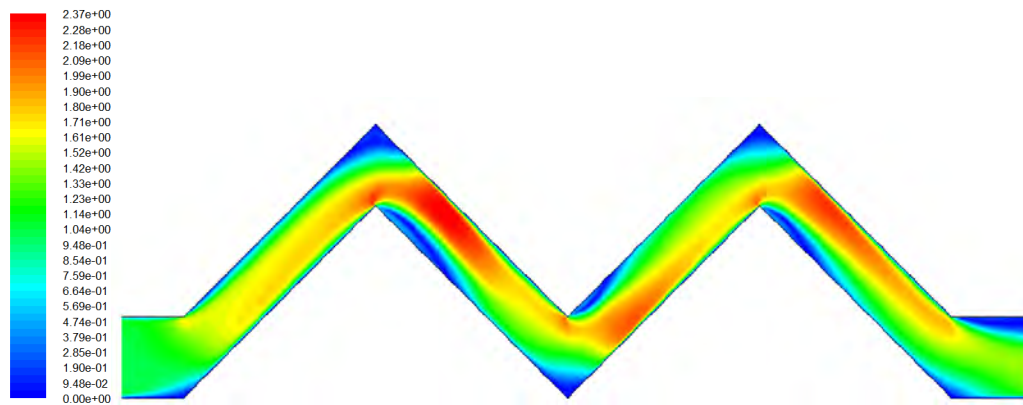
۲-۴- بررسی استقلال نتایج از تعداد شبکه بندی

شبیه سازی در پره های دارای شبکه بندی مختلف و اندازه های مختلف شبکه برای جریان توربولنس تک فازی هوا با سرعت ۱ m/s صورت گرفت. نتیجه شبیه سازی ها به شکل پروفایل سرعت برای شبکه بندی های مربعی و غیر مربعی در شکل های (۶) و (۷) آورده شده اند. با مقایسه نتیجه شبیه سازی های انجام پذیرفته و در نظر گرفتن متغیرهایی چون پایین تر بودن مقادیر

خطاها، کانتورهای سرعت و پروفایل های جریان چنین نتیجه گیری می شود که شبکه بندی مربعی دارای دامنه حل، سرعت محاسبات بالاتر و دقت بیشتری می باشد. همانطور که در شکل (۶) و (۷) نشان داده شده است، پروفایل جریان در شبکه بندی مربعی جزئیات دقیق تری دارد و این مساله در بررسی جریان به خصوص در نزدیکی دیواره ها و نیز در محل خمیدگی ها از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین این نوع شبکه بندی برای انجام باقی محاسبات انتخاب شد.



شکل ۶: پروفایل سرعت برای شبکه بندی مربعی (تقسیم بندی قطر پره به ۵۵ بازه)



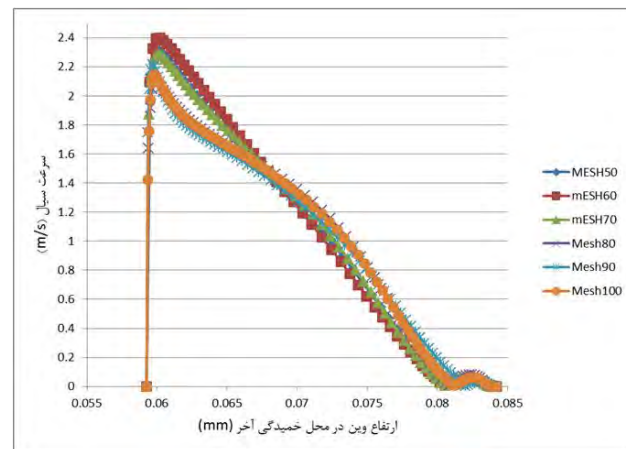
شکل ۷: پروفایل سرعت برای شبکه‌بندی غیر مربعی (تقسیم‌بندی قطر پره به ۵۵ بازه)

۵- نتایج و بحث

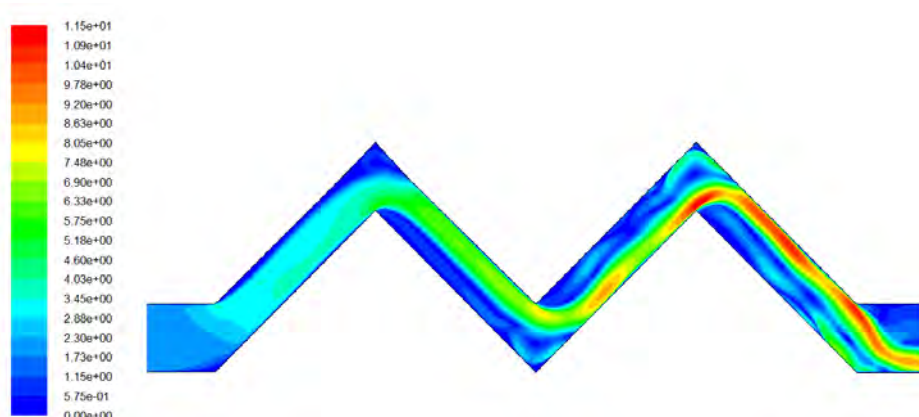
در این مطالعه شبیه‌سازی پره کانالدار و بدون کانال با شبکه‌بندی منظم و با استفاده از مدل توربولنس STD k-ε صورت پذیرفته است. سرعت در ورودی پره برای هر دو حالت 2 m/s در نظر گرفته شد. قطر قطرات ورودی $7 \mu\text{m}$ و نسبت جرمی قطرات مایع در ورودی نسبت به جریان گاز در مقدار ۱۰٪ تنظیم گردید. لازم به ذکر است که در این مطالعه از بازگشت مایع به درون فاز گاز صرف نظر گردیده است.

پروفایل‌های سرعت فاز گاز در در پره بدون کانال-های خروج مایع و همچنین پره دارای کانال‌های خروج مایع به ترتیب در شکل (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به پروفایل‌های سرعت بدست آمده ملاحظه می‌شود که کانال‌های خروج مایع به آشفتگی بیشتر جریان گاز کمک کرده، در مسیر حرکت قطرات، تغییرات ناگهانی ایجاد می‌کنند. بطوریکه کانال‌های خروج مایع باعث افزایش آشفتگی جریان و کاهش نواحی کم سرعت و به اصطلاح مرده در محل خمیدگی‌ها و بعد از آن می‌شود.

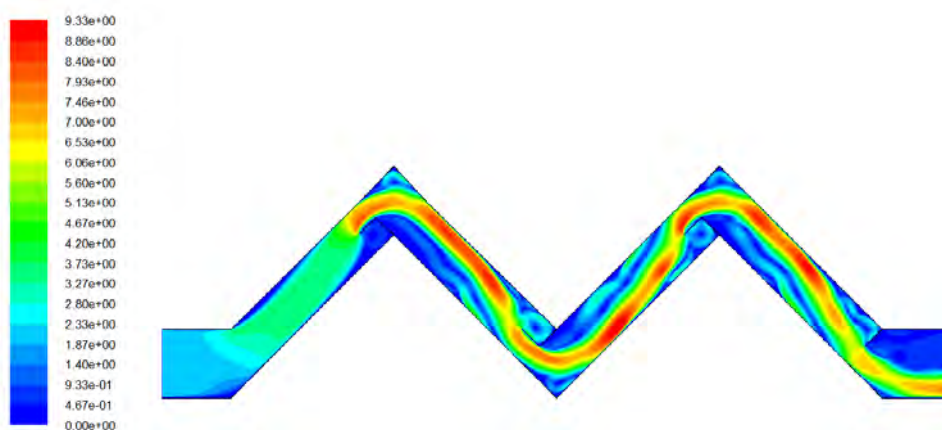
برای بررسی استقلال نتایج حاصل از شبیه‌سازی به تعداد شبکه، در محل خمیدگی آخر پره، پروفایل سرعت مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل (۸) ملاحظه می‌شود که افزایش تعداد شبکه‌ها بیشتر از ۹۰ تقسیم‌بندی در ارتفاع پره تاثیری بر پروفایل سرعت ندارد. به طوری که این شبکه‌بندی هم از نظر زمان محاسبات و هم از نظر دقت شبیه‌سازی قابل قبول می‌باشد. در نتیجه نتایج حاصل از شبیه‌سازی CFD در این تحقیق مستقل از شبکه‌بندی بوده، از این شبکه‌بندی در محاسبات و شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است.



شکل ۸: پروفایل سرعت سیال در محل خمیدگی آخر پره با تعداد شبکه‌های متفاوت در عرض پره- شبکه بندی مربعی



شکل ۹: پروفایل سرعت در پره بدون کانال



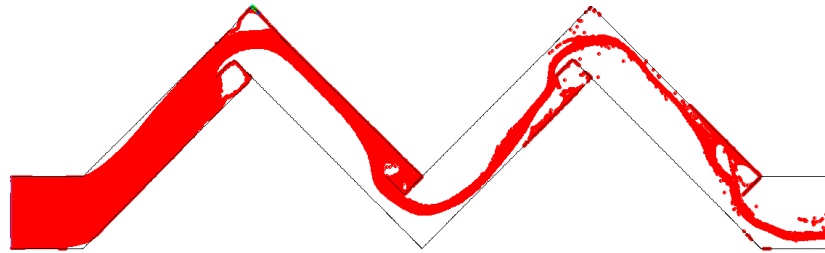
شکل ۱۰: پروفایل سرعت در پره دارای کانال

قطرات شده، نهایتاً منجر به بالا رفتن امکان برخورد قطرات با دیواره‌ها می‌گردد. این در حالی است که در پره بدون کانال خروج مایع، قطرات مایع مسیر را بیشتر در راستای پره حرکت می‌کنند که باعث کاهش نرخ تشکیل لایه مایع در نزدیکی‌های دیواره‌های پره می‌شود.

در شکل (۱۱) و (۱۲) نتایج حاصل از مسیریابی قطرات مایع در پره با استفاده از بکارگیری دیدگاه مدل لاگرانژی نشان داده شده است. نتایج حاصل از مدل محاسباتی نشان می‌دهد که کانال‌های خروج مایع تاثیر بسزایی روی مسیر حرکت قطرات دارد بطوریکه باعث تغییر مسیر حرکت

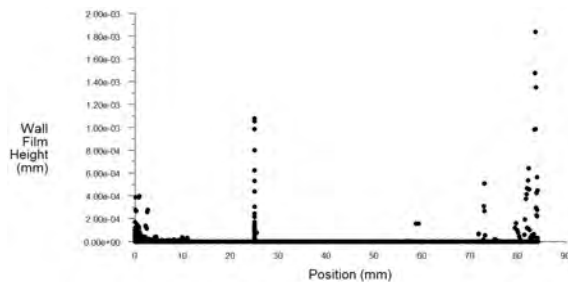


شکل ۱۱- مسیر قطرات در پره بدون کانال

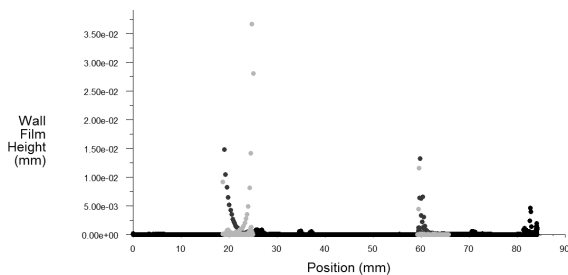


شکل ۱۲- مسیر قطرات در پره دارای کانال

کانال‌ها باعث افزایش قابل توجه بازده جداسازی می‌شود.



شکل ۱۳- محل تشکیل لایه مایع در پره بدون کانال



شکل ۱۴: محل تشکیل لایه مایع در پره کانال‌دار

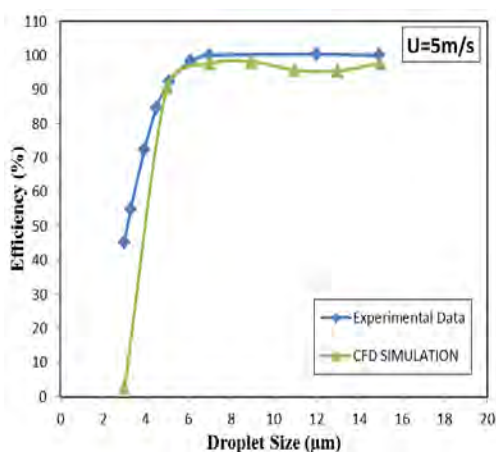
با توجه به پروفایل‌های سرعت نشان داده شده در شکل (۹) و (۱۰) مشخص است که وجود کانال‌های خروج مایع در پره باعث ایجاد آشفتگی بیشتر و همچنین افزایش افت فشار در پره می‌شود. افت فشار جریان گاز در طول پره در شکل (۱۵) برای پره دارای کانال خروج مایع و بدون کانال نشان داده شده است.

با توجه به نمودار افت فشار حاصل ملاحظه می‌شود که وجود کانال خروج مایع تاثیر منفی

از برخورد قطرات مایع با دیواره‌های پره، لایه مایع تشکیل می‌گردد که با افزایش ارتفاع و ضخامت آن، به علت نیروی وزن نهایتاً از پره خارج می‌شود. در شکل (۱۳) و (۱۴) ضخامت لایه مایع حاصل از مدل CFD در طول پره نشان داده شده است. در شکل ۱۳ نقاط خاکستری مربوط به فیلم مایع تشکیل شده روی کانال‌های خروج مایع در نمای نشان داده شده در شکل ۳ می‌باشد.

با توجه به نتایج حاصل ملاحظه می‌شود که در پره بدون کانال، قطرات مایع در بخش‌های اولیه بیشتر در راستای پره حرکت می‌کنند و در بخش‌های انتهایی پره، در اثر تغییر مسیرهای ایجاد شده بعد از هر خمیدگی قطرات از مسیر مستقیم منحرف شده و در نواحی انتهایی پره به دیواره می‌چسبند. این در حالی است که در پره دارای کانال، در اثر افزایش تغییر مسیر قطرات، بیشتر قطرات در بخش‌های اولیه پره ($L=20$ به 30mm) به دیواره می‌چسبند و در بخش‌های انتهایی، قطرات باقیمانده امکان جداسازی پیدا می‌کنند. در نتیجه‌ی این تغییر مسیرها، بازده جداسازی قطرات مایع افزایش می‌یابد. مطابق محاسبات انجام پذیرفته بازده جداسازی قطرات مایع از فاز گاز در پره بدون کانال ۲۳/۳٪ و بازده برای پره کانال‌دار ۷۲/۲۲٪ است. بنابراین وجود

پذیرفته جزء جرمی قطرات مایع در ورودی ۱۰٪ و دارای سرعت ۵ m/s می‌باشد. با توجه به شکل (۱۶) ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از مدل CFD با داده‌های تجربی ارائه شده در کار گالتی و همکاران [۵] تطابق خوبی دارد. نتایج حاصل از مدل محاسباتی نشان می‌دهد که بازده جداسازی قطرات از فاز گاز با افزایش اندازه قطرات مایع در ورودی پره بصورت نمایی افزایش می‌یابد.

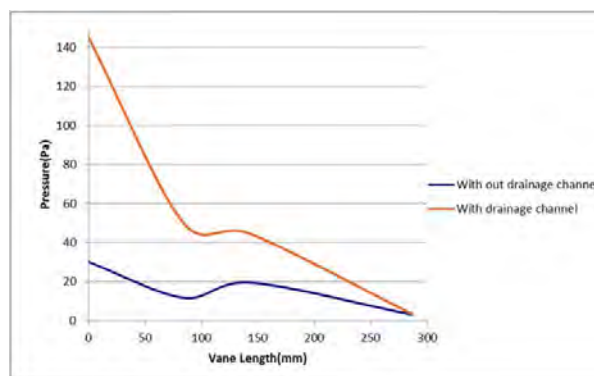


شکل ۱۶- بازده جداسازی در سرعت ۵ m/s

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، دو پره کانالدار و بدون کانال با بکارگیری دیدگاه اولری- لاگرانژی شبیه‌سازی شده است. با شبکه‌بندی دقیق کنار دیواره‌ها و استفاده از شبکه‌بندی مربعی، در این شرایط عملیاتی، نتایج شبیه‌سازی با مدل $k-\epsilon$ تطابق مناسبی با داده‌های تجربی دارد و این امر موید صحت مدل CFD به کار رفته می‌باشد. نتایج حاصل از مدل CFD نشان می‌دهد که در پره بدون کانال مناطق کم سرعتی و مناطق چرخشی به وجود آمده است. این مناطق در پره کانال دار جابجا شده است و مقدار حداکثر سرعت در آن بیشتر است. این جابجایی نقاط کم سرعت باعث جابجا شدن محل جمع آوری مایع (که قبلاً در نقاط گوشه‌ای بود) شده و افزایش تنش برشی و

روی افت فشار جریان گاز دارد (جدول ۳). با این حال از آنجا که افت فشار به معنای اتلاف انرژی است لازم است با تدبیر در متغیرهای فرآیندی مقدار آن را نسبت به بازده جداسازی بهینه کرد. با توجه به مطالعات اقتصادی و فرآیندی پروژه می‌توان میزان اهمیت افزایش بازده را در مقابل افزایش افت فشار مورد بررسی قرار داد. در اکثر موارد، افزایش بازده بسیار مطلوب‌تر از کاهش افت فشار است. با این حال می‌توان با بهینه‌سازی حد متعادلی برای افزایش افت فشار در مقابل افزایش بازده جداسازی محاسبه کرد.



شکل ۱۵: افت فشار در طول پره برای دو حالت پره با کانال و بدون کانال

جدول ۳- مقادیر افت فشار از ورودی تا خروجی برای پره کانالدار و بدون کانال

پره	فشار ورودی (Pa)	فشار خروجی (Pa)	افت فشار (Pa)
کانالدار	۱۴۵/۲۶	۳/۴۱	۱۴۱/۸۵
بدون کانال	۳۰/۱۳	۳/۱۳	۲۷

بازده جداسازی قطرات مایع برای اندازه‌های مختلف قطرات مایع ورودی با داده‌های تجربی موجود (گالتی و همکاران [۵]^۱) در شکل (۱۶) مقایسه شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام

¹ Galleti et al.

گیرد. این در حالی است که جداسازی در پره بدون کانال در نواحی انتهایی پره بیشتر است. در این شبیه‌سازی، بازده دو پره دارای کانال خروج مایع و بدون آن مقایسه شده است. با توجه به نتایج حاصل از مدل CFD، افزایش بازده در اثر وجود کانال‌های خروج مایع اثبات گردیده است. مطابق محاسبات انجام پذیرفته بازده جداسازی قطرات مایع از فاز گاز در پره بدون کانال ۲۳/۳٪ و بازده برای پره کانالدار ۷۲/۲۲٪ است.

مقادیر حداکثر سرعت، احتمال برخورد‌های بیشتر را به علت برهمکنش گردابه‌ای فراهم می‌سازد. این تغییرات در پروفایل سرعت و مسیر حرکت قطرات نهایتاً منجر به افزایش بازده جداسازی خواهد شد. از طرفی دیگر، نتایج حاصل از مدلسازی CFD نشان می‌دهد که کانال‌های خروجی مایع افت فشار فاز گاز را افزایش می‌دهند. با توجه به تاثیر کانال‌های خروج مایع بر پروفایل جریان، در پره‌های کانالدار، جداسازی قطرات بیشتر در نواحی ابتدایی پره صورت می‌

۷- مراجع

1. Mesh and Vane Mist eliminators, Amistco Separation Products, Inc., http://www.amistco.com/BULLS_PDF/brochures/MeshVaneSM.pdf
2. Mist Elimination, Koch-Glitsch. LP., http://www.koch-glitsch.com/Document%20Library/ME_ProductCatalog.pdf
3. James, P.W., Wang, Y., Azzopardi, B.J. and Hughes, J.P. 'The role of drainage channels in the performance of wave-plate mist eliminators', Trans IChemE, Part A, Chem. Eng. Res. Des., 81, 2003, pp. 639-648.
4. Li, J., Huang, S., Wang, X. 'Numerical Study of Steam-Water Separators with wave type Vanes', Chin. J. Chem. Eng., 15:4, 2007, pp. 492-498.
5. Galletti, Ch., Brunazzi, E. and Tognotti, L. 'A numerical model for gas flow and droplet motion in wave-plate mist eliminators with drainage channels, Chem. Eng. Sci., 63, 2008, pp. 5639-5652.
6. Rafee R., Rahimzadeh H., Ahmadi G. 'Numerical simulations of airflow and droplet transport in a wave-plate mist eliminator', Chem. Eng. Res. Des., 2010, pp 492-504.
7. Narimani E., Shahhoseini S., 'The Effect of Vane Angel on Mist Eliminator Efficiency', Conference on Chemical Eng. and Advanced Materials, 2010.
8. Zhoa, J., Jin, B., Zhong, Z., Study of the separation efficiency of a demister vane with response surface methodology, Journal of Hazardous Materials 147, 2007, pp. 363-369.
9. Versteeg, H. and Malalasekra, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method Approach, New Jersey, Prentice Hall Inc, 1996.
10. Fluent Documents.