

بررسی عامل‌های مؤثر بر راندمان صفحه‌های موج‌دار جداکننده مایع از گاز

الهامه نریمانی[•]، شاهرخ شاه حسینی⁺*

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی

چکیده: صفحه موج‌دار (Vane) یک ابزار بسیار مفید و با اهمیت در جداسازی قطره‌های مایع از جریان گاز در صنعت می باشد. در این پژوهش، جریان دو فاز گاز - مایع بین صفحه‌های جداکننده موج‌دار به روش دینامیک سیال‌های محاسباتی (CFD) شبیه سازی شد و تأثیر سه عامل سرعت گاز ورودی، فضای بین صفحه‌ها و زاویه وین ها بر راندمان جداسازی این صفحه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای مدل نمودن جریان دو فاز متشکل از گاز و قطره‌های مایع از دیدگاه اولرین - لاگرانژین استفاده شد. راندمان جداکننده وین در سرعت‌های $3-8 \text{ m/s}$ برای قطره‌های آب در هوا با جزء مرطوب 0.089 مورد بررسی قرار گرفت. در این شبیه سازی پدیده شکست فیلم مایع تشکیل شده بر دیواره وین در شبیه سازی ها در نظر گرفته شد. مقایسه نتیجه‌های شبیه‌سازی با داده‌های تجربی نشان داد که پیش بینی مدل ریاضی به طور متوسط 0.9 درصد نسبت به نتیجه‌های تجربی خطا دارد. مطابق نتیجه‌های شبیه‌سازی راندمان صفحه‌های موج‌دار وابسته به سرعت گاز ورودی، زاویه وین ها و فاصله صفحه‌های وین می باشد.

واژه‌های کلیدی: صفحه‌های وین؛ راندمان جداسازی؛ دیدگاه اولرین - لاگرانژین؛ دینامیک سیال‌های محاسباتی؛ زاویه وین؛ سرعت گاز ورودی؛ فاصله وین‌ها.

KEY WORDS: Vane plates; Separation efficiency; Eulerian-Lagrangian approach; Computational fluid dynamics; Vane tuning angle; Inlet gas velocity; Vane spacing.

مقدمه

عمر مفید این دستگاه ها می‌شود. این جداکننده‌ها در مقایسه با سایر جداکننده‌ها مانند جداکننده‌های الیاف به هم بافته با افت فشار کمتر، راندمان جداسازی بالاتری ایجاد می‌کند و همچنین برای مواد گرانبه و چسبنده مناسب می‌باشد. وین‌ها می‌توانند عمودی یا افقی باشند. همچنین شکل وین ها می‌تواند گوشه دار یا منحنی وار باشند و قلاب دار یا بدون قلاب باشند. در حال حاضر بسیاری از پژوهشگران پارامترهای مؤثر بر این نوع جداکننده جدید را

در جداکننده‌هایی که شامل صفحه‌های موج‌دار هستند صفحه‌ها بسیار نزدیک به هم می‌باشند تا جریان گاز با قطره‌های مایع موجود در آن با حرکت بین این صفحه‌های جداکننده، تحت تأثیر نیروی اینرسی قطره‌ها و سانتیفریژ و چسبندگی، قطره‌های مایع خود را از دست بدهد. دلیل جدا کردن این قطره‌ها این است که ورود این قطره‌های مایع در گاز به تجهیزات مهم صنعتی هم‌چون پمپ‌ها و کمپرسورها باعث ایجاد خوردگی در پره‌ها و کاهش

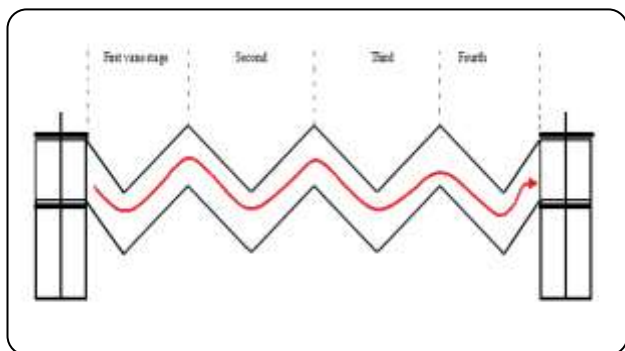
*عهده دار مکاتبات

+E-mail: shahrokh@iust.ac.ir

• نشانی جدید: کانادا، شریوروک، دانشگاه شریوروک، دانشکده مهندسی مکانیک

جدول ۱- ویژگی‌های جریان.

عنوان	داده های تجربی
ترکیب جریان	آب - هوا
نوع جریان	جریان پراکنده
P, Mpa	۰/۱
T, °C	۲۰
$\rho_g, \text{kg} / \text{m}^3$	۱/۲
$\rho_d, \text{kg} / \text{m}^3$	۹۹۸
$\mu_g, \mu\text{Pa} / \text{s}$	۱۸
$\mu_d, \mu\text{Pa} / \text{s}$	۹۹۸
$\sigma, \text{m} \cdot \text{N} / \text{m}$	۷۳



شکل ۱- شمای جداکننده وین.

- ۱- اثر متقابل قطره‌ها با یکدیگر
- ۲- شکست قطره‌ها
- ۳- ریزش قطره‌های برخورد کرده

اثرهای متقابل قطره‌ها با یکدیگر

این حالت در غلظت بالای قطره‌ها اتفاق می‌افتد. در این پژوهش که جزء حجمی قطرات کمتر از ۰/۱ می‌باشد از این اثر صرف نظر می‌شود.

شکست قطرات

شکست قطره‌ها یعنی تبدیل قطره‌ها به قطره‌های ریزتر که در سه مکانیسم اتفاق می‌افتد:

که به دلیل راندمان بالا بسیار ارزشمند می‌باشد؛ در شرایط عملیاتی گوناگون مورد بررسی قرار می‌دهند. از سوی دیگر با پیشرفت سریع در امکانات نرم افزاری و استفاده از فناوری CFD، می‌توان عامل‌های مؤثر بر راندمان این جداکننده را بدون نیاز به تولید مدل‌های پرهزینه صنعتی تحلیل نمود.

راندمان جداسازی در جداکننده وین توسط جیا^(۱) و همکاران با دیدگاه اولرین - لاگرانژین مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. در پژوهش دیگری که توسط بریگادو^(۲) انجام شده است، از دیدگاه اولرین - اولرین برای شبیه سازی این جداکننده استفاده شده است [۲].

در پایان نامه دکتری انجام شده توسط یوسانگ^(۳) راندمان در یک وین اندازه گیری شده است و با شبیه سازی عددی مقایسه شده است [۳].

در مقاله ارایه شده توسط ژائو^(۴) و همکاران یک نوع جداکننده وین مورد شبیه سازی قرار گرفته است و سپس توسط روش پاسخ سطحی یک رابطه ریاضی بین راندمان جداسازی وین و پارامترهای مؤثر بر جداسازی به دست آمده است [۴].

افت فشار و سرعت در جداکننده دارای الیاف به هم بافته شده توسط رحیمی و همکاران به روش اولرین - اولرین شبیه‌سازی شده و با داده‌های تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است [۵].

با توجه به پژوهش‌های انجام شده در این زمینه که بسیار اندک و ناچیز می‌باشد، در این پژوهش یک نوع جداکننده وین بدون قلاب مورد شبیه سازی قرار می‌گیرد. نتیجه‌های شبیه‌سازی با داده های تجربی به دست آمده از مقاله پژوهشی لی جیا مقایسه می‌شود. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر سرعت گاز ورودی، فاصله وین ها و زاویه وین‌ها بر راندمان جداسازی این نوع وین می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از مدل شکست بسته قطره‌ها خطای محاسبات به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

این جداکننده به صورت شمایی در شکل ۱ نشان داده شده است. در کار حاضر جداکننده وین در سرعت های ۳-۸m/s شبیه سازی می‌شود. قطر قطره‌های آب بین ۱۰-۱۱۰ μm می‌باشد. شرایط عملیاتی و ویژگی های جریان در جدول ۱ آورده شده است.

مکانیسم‌های تولید قطره‌های ثانویه

تشکیل قطره‌های جدید با ۳ مکانیسم زیر صورت می‌گیرد [۶، ۲].

(۱) Jia L. et al.

(۳) Josang A.I.

(۲) Brigadeau A..

(۴) Zhao J. et al.

روی دیواره می باشد. این موج‌های باریک از برخورد قطره‌ها، تنش یا اثرهای درهم ایجاد می‌شوند. قطر قطره برخورد کرده برای به دست آوردن اندازه‌های موج باریک به کار می‌رود. اندازه لیگامنت در تعریف بازگشت قطره‌ها به کار می‌رود. شکل ۲ نمای تقریبی تشکیل بازگشت دوباره قطره‌ها را از لیگامنت نشان می‌دهد. این شکل برخورد قطره به فیلم مایع را نشان می‌دهد و باعث تشکیل امواج روی سطح قطره بزرگ می‌شود. اگر برخورد دارای انرژی کافی باشد یک لیگامنت از سطح تشکیل می‌شود. اگر برخورد دارای سرعت بالا باشد لیگامنت جدا خواهد شد. برای مقیاس پایداری لیگامنت جدا شده موازنه انرژی را دور آن می‌نویسند [۲].

$$\pi D_1 \sigma = \frac{\pi}{4} D_1^2 C_D \frac{1}{4} u_g^2 \rho_g \quad (3)$$

سمت چپ معادله بالا نیروهای سطحی می باشد که نیروی درگ هوا بر آن غلبه می نماید. نیروی درگ در سمت راست معادله قرار می گیرد. معادله عدد وبر به شکل زیر است.

$$We = \frac{\lambda}{C_D} \quad (4)$$

در این مدل قانون درگ استوکس مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (5)$$

با قرار دادن مقدار ثابت درگ در فرمول عدد درگ، عدد درگ به شکل زیر به دست می‌آید.

$$We = \frac{Re}{3} = \frac{\rho_g u_g D_1}{3 \mu_g} \quad (6)$$

D_1 در شکل ۲ آمده است. این معادله ممکن است برای توضیح بازگشت دوباره قطره‌ها به کار می‌رود و یک حد برای عدد وبر، لازم می باشد. مقدار عدد وبر بحرانی ۱/۲ می‌باشد. مقدار عدد وبر، بیش‌ترین قطر پایدار قطره را در جریان درهم نشان می‌دهد. جدول ۳ خلاصه ای از آزمون به وجود آمدن بازگشت دوباره قطره‌ها را نشان می‌دهد [۳].

D_1 که در تعریف عدد وبر به کار رفته است، متغیر ضخامت لیگامنت است که ممکن است اساس تشکیل قطره جدید باشد. در ابتدا فرض می‌شود که لیگامنت یا موج تشکیل شده دارای اندازه یکسان با قطره اصلی می‌باشد. این ممکن است یک حد بالایی از قطر پیش بینی شده برای لیگامنت باشد. در کل فرض می‌شود

جدول ۲- مقایسه اعداد وبر بحرانی در کاربردهای گوناگون آن [۶].

توضیح	عدد وبر بحرانی
ریزش آزاد قطرات بزرگ	۲۲
ریزش آزاد قطره‌های بزرگ بر اساس قطر قطره‌ها	۸~۱۷
سقوط ناگهانی قطره‌ها در جریان گاز	$12 \left[1 + \left(\frac{H_g}{\rho_f D_d \sigma} \right)^{1.76} \right]$
مدل بالا به همراه بعضی تصحیحات	$12 + 14 \left(\frac{H_f}{\rho_f D_d \sigma} \right)^{1.4}$
حالت جریان درهم شدید	۱,۲~۲,۵

۱- شکست قطره‌ها به دلیل اثر متقابل با فاز پیوسته

۲- شکست قطره‌ها به علت برخورد با فیلم مایع

۳- شکست قطره‌ها در اثر تنش سطحی بین فازها

در مورد اول شکست قطره‌ها هنگامی اتفاق می‌افتد که عدد وبر قطره با معادله زیر محاسبه شود. این حالت در سرعت‌های بالای گاز اتفاق می‌افتد [۶].

$$We = \rho_g (u_g - u_d)^2 \frac{D_d}{\sigma} \quad (1)$$

مقدار بحرانی این کمیت در مدل‌های گوناگون، متفاوت می‌باشد که در کاربردهای گوناگون این جداکننده به کار می‌رود. این عدد شامل اثرات جریان درهم، اثرات فاز پیوسته و اثرات ژئومتری می‌باشد. فرمول‌های گوناگون به کار رفته به توجه به کاربرد مورد نظر در جدول ۲ آورده شده است.

برای قطره‌هایی که به طور ناگهانی در معرض جریان گاز قرار می‌گیرند یک گروه گرانبه به عدد ۱۲ ضرب می‌شود. عدد وبر در این پژوهش بسیار پایین و نزدیک صفر می‌باشد و فرض می‌شود که سرعت نسبی صفر است. پس از شکست قطره‌های با این مکانیسم صرف نظر می‌شود. در مورد شکست فیلم مایع عدد وبر مایع با توجه به مدل Woodmansee تعریف می‌شود.

$$We_f = \rho_g (u_g - c) \frac{\delta}{\sigma} \quad (2)$$

مدل عدد وبر ثابت، مدلی براساس تشکیل قطره‌های جدید و بازگشت از موج‌های باریک^(۱) ایجاد شده روی فیلم مایع ته نشین شده

(1) Ligament

جدول ۳- تست بازگشت دوباره [۳].

نتیجه لیگامنت	عدد وبر بحرانی
بازگشت دوباره	$We_{critical} > 1,2$
بدون تغییر	$We_{critical} > 1,2$

انرژی برخورد از معادله زیر به دست می آید.

$$E^v = \frac{\rho v_r^2 D_d}{\sigma} \left(\frac{1}{\min\left(\frac{h}{D_d}, 1\right) + \frac{\sigma_{bl}}{D_d}} \right) \quad (8)$$

ρ دانسیته مایع و v_r سرعت نسبی قطره‌ها در قالب دیواره می‌باشد. D_d قطر قطره‌ها و σ کشش سطحی مایع می‌باشد. σ_{bl} ضخامت لایه مرزی می‌باشد.

$$\sigma_{bl} = \frac{D_d}{\sqrt{Re}} \quad (9)$$

$$Re = \rho v_r D_d / \mu \quad (10)$$

رژیم چسبیدن هنگامی اتفاق می‌افتد که $E \leq 16 kJ$ باشد. ریزش فیلم هنگامی به دست می‌آید که انرژی برخورد بالاتر از حالت بحرانی باشد که مقدار آن $57,7$ می‌باشد.

$$E_{cr} = 57,7 \quad (11)$$

در مسئله حاضر انرژی برخورد بین $13-16 kJ$ می‌باشد و در نتیجه از ریزش فیلم صرف نظر شده است. اگر عدد رینولدز هیدرولیک در داخل کانال کمتر از 4000 باشد، جریان آرام خواهد بود.

$$Re = \frac{\rho_g u_g D_h}{\mu_g} \quad (12)$$

مدل درهم به کار رفته مدل $K-\epsilon$ می‌باشد و از حالت Enhanced wall Treatment در نزدیک دیواره استفاده شده است.

معادله‌های حرکت قطره‌ها یا فاز گسسته

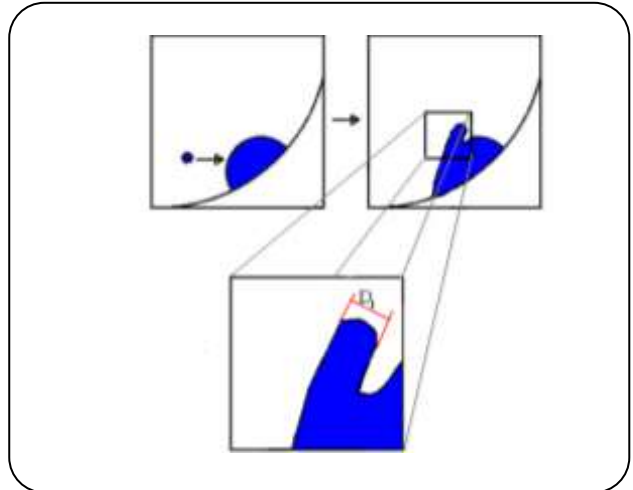
برای ردیابی مسیر ذره‌ها در جریان، موازنه نیرو را برای آن می‌نویسیم که در شکل لاگرانژین خواهد بود.

$$\frac{du_d}{dt} = \frac{3\rho_g C_D}{4\rho_d D_d} |u_g - u_d| (u_g - u_d) \quad (13)$$

C_D ضریب درگ می‌باشد. با انتگرال گیری از معادله (۱۳) سرعت ذره در هر نقطه از طول مسیر به دست می‌آید.

$$\frac{dx}{dt} = u_d \quad (14)$$

به این ترتیب پروفایل جریان و وضعیت قطره هنگامی که قطره‌ها به یک سلول وارد و از آن خارج می‌شوند محاسبه می‌شود.



شکل ۲- برخورد یک قطره به قطره بزرگ‌تر و تشکیل لیگامنت.

که مقدهای بالا برای قطر موج برخوردهای زیاد قطره را تصحیح می‌کند. در مواردی که بازگشت دوباره قطره اتفاق می‌افتد قطر قطره‌ای که مجدد بازگشته است از معادله (۷) به دست می‌آید.

$$D = \frac{3 We_{critical} \mu_g}{\rho_g \mu_g} \quad (7)$$

در این پژوهش مقدار عدد وبر بحرانی براساس این معادله حدود $4-7$ می‌باشد. در نتیجه باید شکست فیلم را نیز در نظر گرفت.

ریزش قطره‌ها برخورد کرده

اثرهای متقابل دیواره روی قطره‌ها براساس کار پژوهشی استنتون و همکاران به چهار رژیم تقسیم بندی می‌شود. اگر دمای قطره‌های مایع زیر دمای جوش مایع باشد، ممکن است چسبیدن^(۱) یا پخش شدن^(۲) یا ریزش فیلم^(۳) اتفاق بیافتد. هنگامی که دمای بالای دمای جوش مایع است، قطره‌ها ممکن است منعکس^(۴) شوند یا ریزش اتفاق بیافتد. این تقسیم بندی‌ها براساس انرژی برخورد و نقطه جوش به دست می‌آید [۶، ۲].

(۱) Stick

(۲) Spread

(۳) Splash

(۴) Rebound

استفاده خواهد شد. در این روش یک بازه کامل از اندازه ذره به یک گروه از بازه‌های سایز ذره‌ها تقسیم می‌شود. رابطه این مدل براساس فرض وجود نسبت توانی بین قطر قطره‌ها d و جزء جرمی قطره‌ها با قطر بزرگ‌تر از d به دست می‌آید [۶].

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d}{d_0}\right)^n} \quad (21)$$

قطر متوسط قطره‌ها $60 \mu\text{m}$ و n که پارامتر پخش می‌باشد برابر با ۴٫۲ خواهد بود.

نتیجه‌ها و بحث

جریان گاز مایع بین صفحه‌های وین مطابق با داده‌های جدول ۱ در سرعت‌های گاز ورودی شبیه‌سازی شده و راندمان جداسازی به دست آمده از این شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مقایسه شده است [۲].

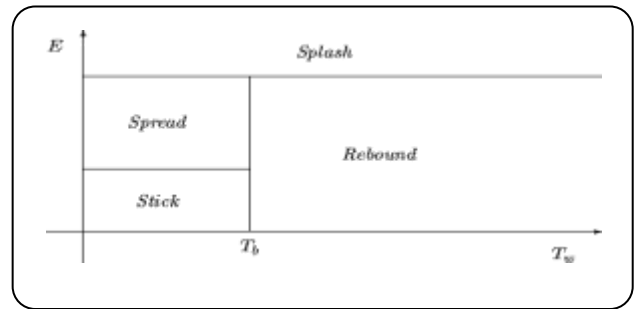
ابتدا شبیه‌سازی در سرعت 3.5 m/s در دو حالت وجود شکست فیلم مایع و عدم شکست فیلم مایع انجام شده است. نتیجه‌های این دو حالت در جدول ۴ در مورد راندمان جدایش قطره‌های مایع بایکدیگر مقایسه شده است. مطابق این شبیه‌سازی خطای شبیه‌سازی برای فرض عدم شکست فیلم 7.6% درصد و فرض شکست فیلم مایع 0.2% درصد می‌باشد. بنابراین مطابق رابطه مدل عدد و بر ثابت در جدول ۲ در این شبیه‌سازی لازم است که شکست فیلم در شبیه‌سازی لحاظ شود.

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام یافته در این پژوهش با افزایش سرعت گاز ورودی میزان شکست قطره‌های مایع افزایش می‌یابد. با انجام چندین شبیه‌سازی در سرعت‌های گوناگون گاز مطابق جدول ۵، بسته‌های شکسته قطره‌های مایع با یک نسبت خطی افزایش می‌یابد. میزان بسته‌های شکسته برای هر سرعت از گاز ورودی با حدس و خطا به دست می‌آید. با انجام برآزش خطی برای این داده‌ها رابطه بین سرعت گاز ورودی و تعداد بسته‌های شکسته به شکل زیر به دست می‌آید.

$$B P = A \times V + B \quad (22)$$

که A و B پارامترهای مدل می‌باشند و مقادیرهای آن‌ها به ترتیب برابر با $1/4163$ و $5/4142$ می‌باشد.

در ادامه عوامل مؤثر بر راندمان وین مورد بررسی قرار می‌گیرند. سه عامل مهم سرعت گاز ورودی، فاصله صفحه‌های وین و زاویه وین‌ها بر راندمان وزن اثر بیشتری دارند که در بر اساس نتیجه‌های شبیه‌سازی بررسی شده‌اند.



شکل ۳- نمودار ناحیه بندی اثرهای متقابل دیواره.

معادله‌های فاز پیوسته

در این پژوهش هوا که دارای قطره‌های آب می‌باشد فاز پیوسته محسوب می‌شود. معادله‌های نویر استوکس و $K-\varepsilon$ برای فاز پیوسته حل می‌شود.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (16)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \varepsilon u_k) = \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{C_1 \varepsilon}{k} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

در این معادله‌ها $C_\mu=0.09$, $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $\sigma_k=1.0$ و $\sigma_\varepsilon=1.3$ و μ_t سرعت درهم می‌باشد که مقدار آن از معادله زیر به دست می‌آید.

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (20)$$

توزیع قطره‌ها

در نسبت شدت‌های جرمی گوناگون قطره‌ها برای هر اندازه، ممکن است توزیع خطی نیاز ما را برآورده نسازد. در این پژوهش از مدل Rosin-Rammler برای مدل نمودن توزیع قطره‌ها

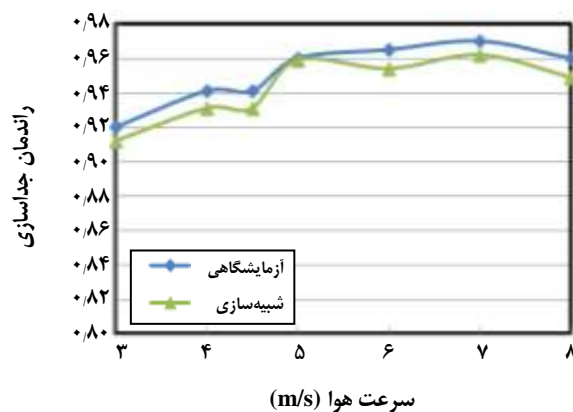
جدول ۴- مقایسه راندمان به دست آمده با حالت آزمایشگاهی.

راندمان جداکننده تجربی	۹۲٪
راندمان حاصل از شبیه سازی با فرض شکست فیلم مایع	۹۲٫۲٪
راندمان حاصل از شبیه سازی با فرض عدم شکست فیلم مایع	٪۹۹

جدول ۵ - نتیجه‌های شبیه‌سازی جداکننده وین در سرعت‌های گوناگون گاز ورودی.

راندمان جداسازی	بسته های شکسته	سرعت گاز ورودی
۰٫۹۱۲	۱۰	۳
۰٫۹۳۱	۱۱	۴
۰٫۹۳۱	۱۱	۴٫۵
۰٫۹۵۹	۱۳	۵
۰٫۹۵۴	۱۴	۶
۰٫۹۶۲	۱۵	۷
۰٫۹۴۹	۱۷	۸

با افزایش سرعت قطره‌ها سریع تر حرکت می‌کنند و سریع تر تغییر جهت می‌دهند که این امر باعث برخورد‌های بیش تر آنها با صفحه‌های وین و افزایش راندمان وین ها می شود. بعد از سرعت 7m/s با افزایش سرعت گاز راندمان وین کاهش می یابد که دلیل این امر افزایش تعداد بسته های قطره‌های شکسته شده در اثر سرعت بالای گاز می باشد. در اثر شکست قطره‌ها، قطره‌های ریزتر و جدید تولید می‌شوند که سبب کاهش راندمان جداسازی وین می گردند. شکل ۴ راندمان جداسازی قطره‌ها توسط وین را در سرعت‌های گوناگون نشان می دهد.



شکل ۴- مقایسه نتیجه‌های شبیه‌سازی با داده‌های تجربی.

اثر فاصله وین ها بر راندمان

یکی دیگر از عوامل موثر بر راندمان صفحه‌های وین فاصله وین ها از یکدیگر می باشد. در شکل ۵ می‌توان اثر افزایش فاصله وین‌ها بر راندمان را به روشنی دید. با افزایش فاصله وین‌ها راندمان ته نشین شدن قطره‌ها کاهش می‌یابد. دلیل این امر افزایش فضای پخش شدن قطره‌ها می باشد که سبب دوری قطره‌ها از دیواره ها می شود. در واقع با افزایش فاصله وین‌ها قطره‌ها انرژی خود را از دست می دهند و در نتیجه انرژی برخورد، تعداد برخورد قطره‌ها و ته نشین شدن آن ها کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۵ در وین با فاصله ۲۰ میلی‌متر کسر جرمی قطره‌ها

اثر سرعت گاز ورودی

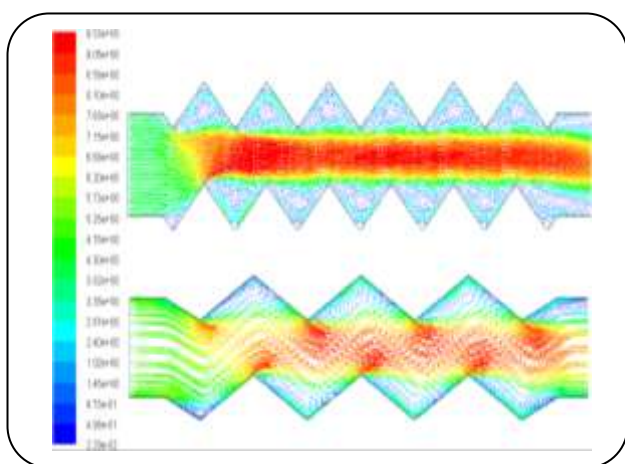
جریان گاز مایع در بین دو صفحه وین در سرعت‌های متفاوت از گاز ورودی شبیه سازی شده است و راندمان جداسازی در این سرعت‌ها مطابق جدول ۵ به دست آمده است. در شکل ۴ نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی برای راندمان جداکننده، با داده های تجربی موجود در مرجع مربوطه مقایسه شده است. با افزایش سرعت گاز ورودی تا سرعت 7 m/s راندمان وین افزایش می‌یابد. دلیل افزایش راندمان با افزایش سرعت گاز ورودی این است که

جدول ۶- مقایسه افت فشار و راندمان در دو فاصله گوناگون وین‌ها از یکدیگر.

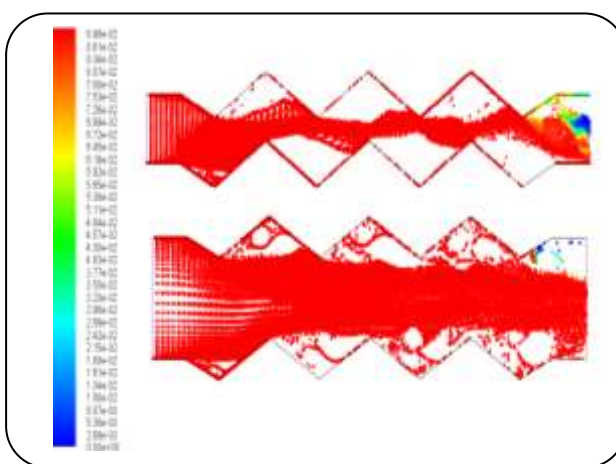
افت فشار (Pa)	فاصله وین
۰٫۰۴۳۴	۲۰
۰٫۰۲۰۷	۳۰
۰٫۰۰۷۵	۴۰

جدول ۶- مقایسه افت فشار در دو زاویه گوناگون وین.

افت فشار (Pa)	فاصله وین
۰٫۰۲۲	۶۰
۰٫۰۱۱	۹۰
۰٫۰۰۴	۱۲۰



شکل ۶- بردارهای سرعت شبیه‌سازی شده در سرعت گاز ورودی ۳ m/s زاویه ۹۰ و ۱۲۰ درجه.



شکل ۵- کسر جرمی قطره‌ها در دو وین با فاصله صفحات ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر.

این امر سبب افزایش راندمان با کاهش زاویه وین‌ها می‌شود. با توجه به این فرض که در این پژوهش با کاهش زاویه وین‌ها تعداد زانویی‌ها افزایش می‌یابد تعداد سطوح نیز افزایش می‌یابد و در اثر افزایش سطح تماس راندمان جداکننده افزایش می‌یابد. شایان گفتن است که با کاهش زاویه وین‌ها افت فشار افزایش می‌یابد این موضوع در جدول ۷ نشان داده شده است.

با توجه به پژوهش‌های انجام شده سه عامل مهم فاصله صفحه‌ها، سرعت گاز ورودی و زاویه در راندمان وین تأثیر بیشتری دارند. در پژوهش‌های گذشته تأثیر این عامل‌ها بر روی راندمان وین با یک زانویی مورد بررسی قرار گرفته است [۳].

نتیجه‌گیری

در این پژوهش صفحه‌های موج‌دار که در داخل جداکننده‌های گاز مایع به عنوان نم‌زدا به کار می‌رود توسط روش CFD و از دیدگاه اولری لاگرانژی شبیه‌سازی شد. راندمان به دست آمده از شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. توافق خوبی بین داده‌های تجربی موجود در مراجع و نتیجه‌های

در بخش عمده‌ای از خروجی به صفر می‌رسد و به تقریب بر روی همه دیواره‌ها قطره‌ها ته نشین شده‌اند. در حالی که در وین با فاصله بین صفحه‌های ۴۰ میلی‌متر قطره‌ها تنها بر روی دیواره بالایی ته نشین شده‌اند و کسر جرمی مایع در هیچ نقطه‌ای از خروجی به صفر نرسیده است. از سوی دیگر با کاهش فاصله صفحه‌های وین مطابق جدول ۶ افت فشار افزایش می‌یابد. این امر سبب استفاده از انرژی بیش‌تر برای پمپ نمودن جریان بین وین‌ها می‌شود.

اثر زاویه وین بر راندمان

با افزایش زاویه وین راندمان ته نشینی قطره‌ها کاهش می‌یابد. دلیل این امر کاهش نیروی سانتریفوژ با افزایش زاویه وین می‌باشد. در شکل ۶ اثر افزایش زاویه در کاهش نیروی سانتریفوژ و جریان گردابی قابل دیدن است. با کاهش زاویه وین‌ها جریان گاز توانایی نفوذ به زانویی‌های وین‌ها را از دست می‌دهد و در نتیجه فیلم تشکیل شده بر دیواره‌های وین‌ها از فرسایش و شکستن در راستای تولید قطره‌های ثانویه در امان می‌ماند که

μ_d	گرانروی قطره	شبیه‌سازی دیده شد. نتیجه‌ها همچنین نشان داد راندمان
σ	کشش سطحی	جداسازی دو صفحه وین با افزایش سرعت گاز ورودی افزایش
D_d	قطر قطره	می‌یابد سرعت بالاتر گاز ورودی سبب می‌شود قطره‌ها
u_g	سرعت گاز	در مسیرهای بیشتر حرکت کنند و احتمال برخورد با دیواره و
u_d	سرعت قطره‌ها	ته نشین شدن قطره‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه خم
δ	ضخامت متوسط فیلم	در صفحه‌های موج‌دار و افزایش فاصله صفحه‌ها راندمان جداسازی
C_D	ضریب درگ	کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش نیروی سانتریفوژ می‌باشد.
D_I	قطر لیگامنت	اما باید توجه نمود که کاهش فاصله صفحه‌ها و کاهش زاویه خم‌ها
We	عدد وبر	سبب افزایش افت فشار و مصرف انرژی بیشتر برای پمپ نمودن
Re	عدد رینولدز	می‌شود. در نتیجه باید در ساخت این صفحه‌ها انرژی مصرفی و
E	انرژی برخورد قطره‌ها	توجیه اقتصادی نیز مد نظر قرار گیرد و فقط بالا بودن راندمان
V_r	سرعت نسبی قطره‌ها	جداسازی مورد توجه قرار نگیرد.
h_o	ارتفاع اولیه فیلم مایع	
σ_{bl}	ضخامت لایه مرزی	
E_{cr}	انرژی برخورد بحرانی قطره‌ها	فهرست نمادها
BP	بسته‌های شکسته	P فشار
		T دما
		ρ_g دانسیته گاز
		ρ_d دانسیته قطره
		μ_g گرانروی گاز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۶/۲۴

مراجع

- [1] Jia L., Suyi H., Xiamo W., Numerical Study of Steam - Water Separators with Wave-Type Vanes, *Chin. J. Chem. Eng.*, **15**(4):492-498 (2007)
- [2] Brigadeau A., "Modeling and Numerical Investigation of High Pressure Gas-Liquid Separation", Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology (2007).
- [3] Josang A. I., "Numerical and Experimental Studies of Droplet Gas Flow", Ph.D. thesis, Dept. of Technology, Telemark University Collage (2002).
- [4] Zhao J., Baosheng J., Zhong Z., Study of the Separation Efficiency of a Demister Vane with Response Surface Methodology, *J. Hazard. Mater.*, **147**(2): 363-369 (2007).
- [5] Rahimi R., Abbaspour D., Determination of Pressure Drop in Mesh Mist Eliminator by CFD, *Chem. Eng. Process*, **47**(10):1504-1508 (2007).
- [6] Fluent document
- [7] Galletti C., Brunazzi E., Tognotti L., A Numerical Model for Gas Flow and Droplet Motion in Wave-Plate Mist Eliminators with Drainage Channels, *Chem. Eng. Sci.*, **63**(23): 5639-5652 (2008).

- [8] Claes J., De Bruyne R., [Demisting with Metal Fibre Webs and Felts Filter](#), *Filtr. Sep.*, **13** (5): 494-501(1976).
- [9] Wang Y., James P.W., [Calculation of Wave-Plate Demister Efficiencies Using Numerical Simulation of the Flow Field and Droplet Motion](#), *Chem. Eng. Res. Design*, **76**(48): 980-985 (1998).
- [10] James P.W., Azzopardi B. J., Wang Y., Hughe J. P., [A Model for Liquid Film Flow and Separation in a Wave-Plate Mist Eliminator](#), *Chem. Eng. Res. Design*, **83**(5): 469-477 (2005).
- [11] Lim S., Zhou Q. L., Xu T.M., Hui S. E., [A Study of the Type Selection of Mist Eliminators with the Help of P – v – dcr Method](#), *J. Eng. Thermal Energy Power*, **19**: 575-578 (2004).