



# Numerical and Experimental Investigation of the Effect of Droplet Collision Regime to Surface on the Performance of the Separation of Water Droplets from Air in a Zigzag Demister

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Karimi M.<sup>1</sup> MSc,  
Kouhikamali R.\*<sup>1</sup> PhD

### How to cite this article

Karimi M, Kouhikamali R. Numerical and Experimental Investigation of the Effect of Droplet Collision Regime to Surface on the Performance of the Separation of Water Droplets from Air in a Zigzag Demister. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(3):549-558.

## ABSTRACT

In the present study, the performance of zigzag demister has been numerically investigated for the separation of dispersed liquid droplets from the gas flow. In general, liquid droplets are dispersed from the gas flow in contact with the vane demister and the formation of the liquid film. Depending on the energy of the droplet collision to the surface, it is likely to occur splash drop into smaller droplets, which will reduce the separation efficiency of the system. In this study, by focusing on the flow collision regime near the surface, it is attempted to investigate the effect of the flow parameters and vane geometry on the separation efficiency and the pressure drop of flow. The Euler-Lagrange is used to simulate the flow and particle motion path. In this research, an experimental model is designed and constructed. Numerical solver results are validated, using the experimental data. The result of this study shows that separation efficiency decreased with increasing gas flow velocity, such that by increasing the 2.5 times of gas velocity, the separation efficiency will lead to a 10% decrease. It was also found that increasing the diameter and increasing the droplet would increase the separation efficiency. On the other hand, choosing the geometry of vane has a significant effect on the amount of the pressure drop of the passing flow. In a way that, by increasing the 50% of the vane angle, the pressure drop will increase 5 times.

**Keywords** Euler- Lagrange; Zigzag demister; Splash; Experimental; Simulation

<sup>1</sup>Energy Conversion Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Guilan, Rasht, Iran

### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, University of Guilan, Rasht, Iran.

Phone: +98 (13) 33690273

Fax: -

kouhikamali@guilan.ac.ir

### Article History

Received: April 30, 2018

Accepted: October 24, 2018

ePublished: March 01, 2019

## CITATION LINKS

[1] A numerical model for gas flow and droplet motion in wave-plate mist eliminators with drainage channels [2] Effects of wavelength and number of bends on the performance of zigzag demisters with drainage channels [3] Optimization of vane mist eliminators [4] Assessment of an eddy-interaction model and its refinements using predictions of droplet deposition in a wave-plate demister [5] A model for liquid film flow and separation in a wave-plate mist eliminator [6] Study of the separation efficiency of a demister vane with response surface methodology [7] Optimal design of drainage channel geometry parameters in vane demister liquid-gas separators [8] Influence of turbulence models on the performance prediction of flow through curved vane demisters [9] Numerical analysis of curved vane demisters in estimating water droplet separation efficiency [10] Design and selection of curved vane demisters using Taguchi based CFD analysis [11] ANSYS Fluent Tutorials Release 16.0 [12] Droplet-wall collisions: Experimental studies of the deformation and breakup process [13] A spray/wall interaction submodel for the KIVA-3 wall film model [14] Implementation and validation of spray/wall interaction models in immersed boundary CFD [15] Numerical study of performance of wire mesh mist eliminator

## بررسی عددی و آزمایشگاهی تاثیر رژیم برخورد قطره با سطح بر عملکرد جداسازی قطره‌های آب از هوا در دمیستر زیگزاگی

معصومه کریمی MSc

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

رامین کوهی کمالی PhD

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

### چکیده

در مطالعه حاضر، عملکرد دمیستر زیگزاگی برای جداسازی قطره‌های پراکنده مایع از جریان گاز، به روش عددی بررسی شده است. به طور کلی قطره‌های مایع در برخورد با پره دمیستر و تشکیل فیلم مایع، از جریان گاز جدا می‌شوند. با توجه به انرژی برخورد قطره به سطح، احتمال رخداد پدیده فروپاشی قطره و تبدیل آن به قطره‌های کوچکتر وجود دارد. این موضوع، کاهش راندمان جداسازی سیستم را به دنبال خواهد داشت. در این پژوهش، با تمرکز بر رژیم برخورد جریان در نزدیک سطح، سعی شده است تا تاثیر پارامترهای جریان و هندسه پره بر راندمان جداسازی و افت فشار جریان بررسی شود. برای شبیه‌سازی جریان و مسیر حرکت ذره از دیدگاه اویلر-لاگرانژ استفاده شده است. در این تحقیق، نمونه آزمایشگاهی دمیستر طراحی و ساخته شده است. نتایج حلگر عددی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی این دمیستر اعتبار سنجی گردید. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد با افزایش سرعت جریان گاز (افزایش انرژی برخورد)، راندمان جداسازی کاهش می‌یابد به گونه‌ای که با افزایش ۲/۵ برابری سرعت جریان گاز، راندمان جداسازی به میزان ۱۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که افزایش قطر و بزرگ شدن قطره‌ها، افزایش راندمان جداسازی را به همراه خواهد داشت. از طرف دیگر انتخاب هندسه پره بر میزان افت فشار جریان عبوری از دمیستر اثر قابل توجهی دارد. به گونه‌ای که با افزایش ۵۰٪ در زاویه راس پره، افت فشار جریان ۵ برابر افزایش می‌یابد.

**کلیدواژه‌ها:** اویلر-لاگرانژ، دمیستر زیگزاگی، فروپاشی، آزمایش تجربی، شبیه‌سازی

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۲

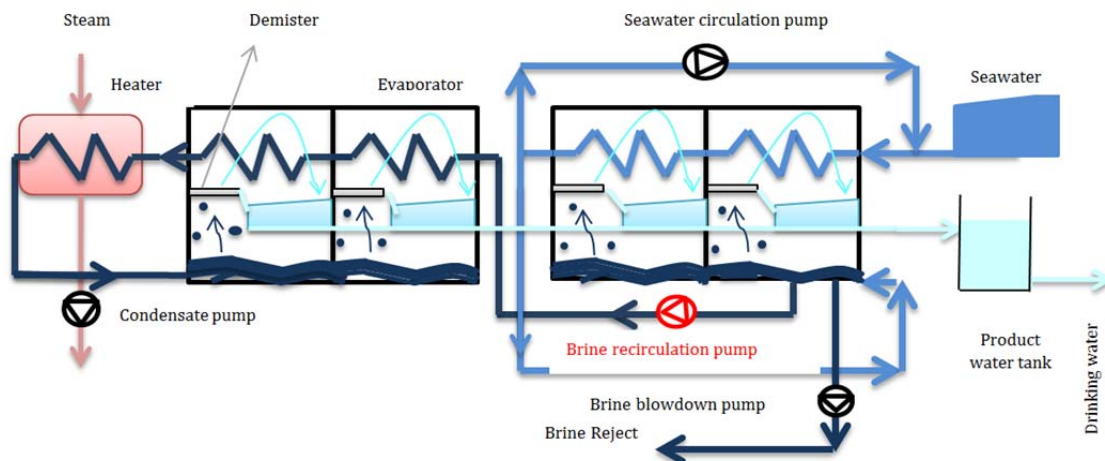
نویسنده مسئول: kouhikamali@guilan.ac.ir

### ۱- مقدمه

وجود حجمی از مایع درون جریان گاز می‌تواند باعث رساندن خسارت به تجهیزات شود، بنابراین جمع‌آوری قطره‌های کوچک مایع از جریان گاز بسیار مهم است. جداسازی ذره‌های معلق در صنایع شیرین‌سازی آب، نفت و گاز و صنایع شیمیایی به چند دلیل دارای اهمیت بوده که از جمله آن جلوگیری از آسیب‌رساندن به تجهیزات، افزایش خلوص بخار خروجی، بازیافت محصول‌های بارزن پراکنده در جریان گاز و کاهش انتشار آلودگی به محیط است [1].

دمیستر به‌عنوان یک گزینه مهم و پُرکاربرد برای جداسازی قطره‌های معلق مایع از جریان گاز در فرآیندهای صنعتی مطرح است. دمیستر سیمی و دمیستر زیگزاگی، دو نوع از ابزارهای شناخته‌شده در این زمینه به حساب می‌آیند. نیاز به کاهش هزینه اولیه ساخت، افزایش راندمان جداسازی و همچنین رفع محدودیت‌هایی که در صنعت برای تهیه تجهیزات برای تامین افت فشار وجود دارد، باعث شده است که در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران به دمیسترهای زیگزاگی معطوف شود. استفاده از دمیستر زیگزاگی تا حدودی معایب مطرح‌شده را به حداقل می‌رساند که از جمله برتری‌های استفاده از این نوع دمیستر است.

دمیستر زیگزاگی یکی از بخش‌های جدایی‌ناپذیر در آب‌شیرین‌کن‌های حرارتی است. در صنعت شیرین‌سازی آب، ابتدا آب شور تبخیر و تبدیل به بخار می‌شود. بخار آب شور به دست‌آمده از این مرحله، در مراحل بعدی، میعان و تبدیل به آب شیرین می‌شود. اما بعد از مرحله تبخیر، همچنان مقداری آب شور به‌صورت قطره‌های ریز، درون بخار باقی می‌ماند. به‌منظور جداسازی قطره‌های آب شور پراکنده در بخار و دستیابی به بخار با خلوص بیشتر، جریان از دمیستر عبور داده می‌شود تا این ذرات از بخار آب جدا شود. شکل ۱، یک واحد شیرین‌سازی آب بوده و موقعیت قرارگیری دمیستر در این شکل نشان داده شده است. در این فرآیندها، جریان گاز-مایع از درون یک کانال عبور داده می‌شود که در میانه کانال، پره‌های دمیستر با زاویه و انحنای مشخص در کنار هم چیده شده‌اند. با عبور جریان از درون کانال و رسیدن به پره دمیستر، تغییر مسیرهای پی در پی در حرکت جریان گاز-مایع ایجاد می‌شود. قطره‌های مایع به‌علت اینرسی زیاد نمی‌توانند این تغییر مسیر را دنبال کنند و در نتیجه از جریان گاز منحرف می‌شوند و به دیوار کانال و پره برخورد می‌کنند. در اثر تجمع و به‌هم‌پیوستن قطره‌های مایع، فیلم مایع نازکی بر دیوار و پره‌ها تشکیل می‌شود. این فیلم تحت تاثیر گرانش حرکت می‌کند و در قسمت پایین کانال جمع‌آوری می‌شود و در نهایت به بیرون از کانال هدایت می‌شود [2]. در صورتی که از پدیده‌هایی همچون شکسته شدن قطره‌ها، جدایش فیلم مایع و تجزیه قطره صرف نظر شود، با افزایش سرعت جریان گاز، راندمان جداسازی افزایش می‌یابد. اما در واقعیت با افزایش سرعت جریان، مکانیزم‌های مذکور حایز اهمیت هستند و به‌واسطه آنها، ذره‌هایی با قطری کوچک‌تر از قطر اولیه تولید می‌شوند که منجر به کاهش راندمان جداسازی می‌شوند [3]. این مکانیزم‌ها به دلیل ایجاد محدودیت در دستیابی به راندمان مورد نظر، دارای اهمیت هستند.



شکل ۱) موقعیت دمیستر زیگزاگی در یک واحد شیرین‌سازی

داد که کانال به همراه زهکش، راندمان موثرتر، اما افت فشار بزرگ‌تری دارد. همچنین با کاهش ارتفاع و زاویه زهکش، راندمان جداسازی افزایش می‌یابد، اما تاثیر منفی بر افت فشار دارد.

ونکاتسن و همکاران<sup>[8]</sup> مطالعه‌ای بر مدل‌های مختلف توربولانسی در دمپر انجام دادند. آنها در تحقیق خود ۱۵ مدل آشفتگی مختلف برای جریان تک‌فازی هوا در دمپر را مورد بررسی قرار دادند و نتایج خود را با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی نمودند. مطالعه آنها نشان داد که در هندسه مورد نظر خود، مدل‌های توربولانسی کی-اِپسیلون و اسپالارت آلمارس نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل توربولانسی کی-امگا پیش‌بینی می‌کنند. همچنین اعلام نمودند نتایج حاصل قابل تعمیم به جریان دوفازی در دمپر است. مطالعه‌ای بر تغییر قطر ذرات قبل و بعد از عبور از دمپر توسط ونکاتسن و همکاران<sup>[9]</sup> انجام شد. آنها با مدل‌سازی یک پره دمپر، قطر ذرات در ورودی و خروجی پره را گزارش نمودند. همچنین اعلام کردند در نظر گرفتن نیروی سافمن بر نتایج حاصل تاثیری ندارد. حامدی/ستخرسر و رفعی<sup>[2]</sup> تاثیر تعداد و طول پره بر راندمان جداسازی و افت فشار جریان عبوری از دمپر را بررسی نمودند. آنها براساس محاسبه رینولدز فیلم مایع و این که سرعت از حد بحرانی کمتر است، از تجزیه فیلم صرف نظر کردند. همچنین براساس عدد وبر بحرانی فرض کردند که قطره‌ها به محض برخورد با دیوار از جریان گاز جدا می‌شوند. یافته‌های آنها نشان داد که با افزایش تعداد پره، سایز جداسازی قطره‌ها کاهش می‌یابد، اما افت فشار افزایش پیدا می‌کند. همچنین مشخص شد، در صورت داشتن پره با طول بی‌بعد کوچک‌تر، افت فشار دمپر و راندمان افزایش می‌یابد. ونکاتسن و همکاران<sup>[10]</sup> به طراحی و انتخاب هندسه پره دمپر پرداختند. آنها با انتخاب یک هندسه پایه، پارامترهای موثر بر راندمان جداسازی را برای رسیدن به حداکثر راندمان مورد ارزیابی قرار دادند. آنها ۲۵ مدل هندسه برای پره طراحی کردند و با استفاده از روش تاگوچی به بهینه‌سازی آنها پرداختند. در نهایت، نتایج حاصل را در جدولی، ارایه و بهترین هندسه بین مدل‌های خود را معرفی کردند.

طبق تحقیق‌های به‌عمل‌آمده، قطره‌های مایع در برخورد با پره دمپر به‌طور کامل به آن می‌چسبند و از جریان گاز جدا می‌شوند. با این حال به‌علت وقوع پدیده‌هایی، احتمال تولید قطره‌های جدید با قطری کوچک‌تر از قطر تزریقی اولیه در جریان گاز وجود دارد. یافتن علت وقوع این پدیده‌ها و تاثیر آن بر راندمان جداسازی از اهمیت خاصی برخوردار است. این مکانیزم‌ها را می‌توان در چهار گروه زیر دسته‌بندی نمود:

- ۱- برهم‌کنش قطره-قطره
- ۲- شکسته شدن قطره
- ۳- فروپاشی قطره در اثر برخورد با سطح
- ۴- ورود مجدد فیلم مایع

تمامی این مکانیزم‌ها سبب پیدایش قطره‌های ریز جدید می‌شوند که از دیوار منعکس و دوباره به جریان گاز وارد می‌شوند<sup>[3]</sup>. ایجاد این ذرات ریز حایز اهمیت است و انتظار می‌رود که کاهش راندمان را در پی داشته باشند. بین مکانیزم‌های اشاره شده، احتمال وقوع فروپاشی قطره بر اثر برخورد با مرز بیشتر است. بنابراین بررسی فیزیک جریان در نزدیکی سطح، تعیین تاثیر نوع رژیم برخورد ذره-سطح و به‌دست‌آوردن شرط مرزی مناسب برای نزدیک شدن مدل‌سازی مساله با واقعیت دارای اهمیت است. بررسی مقاله‌های منتشرشده در زمینه دمپر زیگزاگی، این گونه نشان می‌دهد که در پژوهش‌ها عموماً با توجه به محدودده سرعت مورد بررسی، از تاثیر

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه دمپر زیگزاگی با هدف بهبود عملکرد دمپر صورت گرفته است. وانگ و جیمز<sup>[4]</sup> دمپر زیگزاگی افقی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با لحاظ اثر نیروی درگ بر ذرات و عدم تاثیر فاز گسسته بر فاز پیوسته، به مدل‌سازی مسیر ذرات پرداختند. برای سهولت در انجام محاسبه فرض نمودند، در صورتی که ذره با دیوار برخورد کند، توسط دیوار جمع‌آوری می‌شود و احتمال بازگشت دوباره قطره به درون جریان وجود ندارد، بنابراین ذره از فاز گاز حذف می‌شود. در نهایت کارایی مدل‌های توربولانسی کی-اِپسیلون را مطالعه و بیان نمودند که وجود اختلاف بین نتایج حاصل و داده‌های آزمایشگاهی، ناشی از در نظر گرفتن تاثیر آشفتگی جریان بر حرکت ذره است. جیمز و همکاران<sup>[5]</sup> با تمرکز بر فیلم مایع تشکیل‌شده در دمپر، تاثیر میدان سرعت بر راندمان جداسازی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و بیان نمودند که جدایش فیلم از روی سطح بر اثر سرعت جریان گاز، یک عامل محدودکننده در راندمان جداسازی است. در نهایت یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی زمان جدایش فیلم مایع از سطح ارایه دادند. ژائو و همکاران<sup>[6]</sup> مطالعه‌ای بر پژوهش‌های صورت‌گرفته پیشین در زمینه دیدگاه اویلر-لاگرانژ انجام دادند. آنها در مطالعه خود با در نظر گرفتن نیروی درگ و گرانش بر قطره و فرض به‌دام‌افتادن ذرات در برخورد با دیوار به مدل‌سازی حرکت ذرات پرداختند و دریافتند که علاوه بر سرعت گاز و فضای بین پره‌ها، پارامترهای دیگری همچون زاویه و ارتفاع پره بر عملکرد جداسازی ذرات موثرند. آنها برای رسیدن به کارایی حداکثر دمپر، یک مدل بهینه‌سازی جدید بر پایه متد سطح پاسخ پیشنهاد دادند و با استفاده از آن براساس پارامترهای هندسی و شرایط کاری به بهینه‌سازی هندسه‌های پیشنهادی خود پرداختند و نتایج را ارایه دادند.

گالتی و همکاران<sup>[1]</sup> برای بهبود کارایی جداسازها به مطالعه دسته جدیدی از دمپرهای زیگزاگی پرداختند و این دمپرهای شامل زهکش (کانال تخلیه) بودند. اهمیت قراردادن زهکش، جلوگیری از طغیان مایع جمع‌آوری‌شده توسط پره و عدم بازگشت دوباره آنها به جریان گاز است. آنها طبق فرض‌های خود، محدوده سرعت جریان گاز را کمتر از مقدار بحرانی در نظر گرفتند و از تجزیه و فروپاشی ذرات صرف نظر کردند. در نهایت اهمیت مدل‌های آشفتگی و تاثیر آن بر میدان حرکت ذره را تجزیه و تحلیل نمودند و نشان دادند که مدل‌های برهم‌کنش ادی موجود در کدهای صنعتی، قادر به پیش‌بینی نتایج واقعی برای طیف وسیعی از اندازه ذرات نیست و یک مدل اصلاح‌شده برای آن پیشنهاد دادند. در ادامه، نتایج خود را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و در مقاله‌ای ارایه نمودند. نریمانی و شاه‌حسینی<sup>[3]</sup> راندمان جداسازی دمپر زیگزاگی در محدوده عدد وبر ۴-۷ را مورد مطالعه قرار دادند. در مطالعه آنها عدد وبر بحرانی، مقدار ۱/۲ گزارش شده است. به این مفهوم که در اعداد وبر بزرگ‌تر از مقدار بحرانی، فیلم مایع، شکسته و ذرات جدید وارد جریان گاز می‌شود و در اعداد وبر کمتر از مقدار بحرانی، شکستن فیلم مایع رخ نمی‌دهد و فیلم متصل به سطح باقی می‌ماند. بنابراین در تحقیق خود مکانیزم شکسته شدن فیلم را در نظر گرفتند و به ارزیابی تاثیر سرعت گاز، فاصله و زاویه پره پرداختند. همچنین با استفاده از متد سطح پاسخ به بهینه‌سازی هندسه‌های پیشنهادی خود پرداختند و نتایج را اعلام نمودند. کلاوسی و همکاران<sup>[7]</sup> پارامترهای زهکش شامل طول، ارتفاع و زاویه زهکش را مورد بررسی قرار دادند و به بهینه‌سازی آن پرداختند. در نهایت هندسه مورد نظر خود را پیشنهاد دادند. همچنین مقایسه‌ای بین عملکرد کانال دارای زهکش و فاقد زهکش انجام دادند. نتایج آنها نشان

۲-۲- مدل سازی حرکت قطره

در این مطالعه برای مدل سازی جریان دوفازی گاز- مایع از روش اویلر- لاگرانژ استفاده شد. جریان مایع به صورت فاز گسسته با حل عددی معادله حرکت قطره و جریان گاز به صورت فاز پیوسته با حل عددی معادله پیوستگی و ممنتوم مدل سازی می شود. سرعت فاز گسسته با نوشتن معادله تعادل نیروهایی که بر قطره وارد می شود، مورد پیش بینی قرار می گیرد. نیروهای هیدرودینامیک حایز اهمیت بر قطره شامل درگ و گرانش است. تعادل نیرو بر قطره با معادله ۱ نمایش داده می شود [7].

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (1)$$

در معادله ۱، ترم اول بیانگر نیروی درگ بر واحد جرم ذره است. این نیرو ناشی از حرکت ذرات در فاز پیوسته بوده و از جمله اصلی ترین نیروهای وارد بر قطره است.  $u$  سرعت فاز پیوسته،  $u_p$  سرعت قطره،  $\rho$  چگالی فاز پیوسته،  $\rho_p$  چگالی فاز گسسته و  $F_D$  ضریب نیروی درگ است و توسط معادله ۲ نشان داده می شود.

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re_d}{\rho_p d_p^2} \frac{1}{24} \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $\mu$  ویسکوزیته مولکولی فاز پیوسته،  $d_p$  قطر ذره و  $Re_d$  عدد رینولدز نسبی است و مطابق با معادله ۳ محاسبه می شود.

$$Re_d = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (3)$$

$C_D$  در رابطه ۲ معرف ضریب درگ است. در این مطالعه از ضریب درگ کروی به علت تطابق قابل قبول با فیزیک مساله استفاده شد. ضریب درگ در حالت کروی از معادله ۴ به دست می آید [7].

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_d} + \frac{a_3}{Re_d^2} \quad (4)$$

$a_1$ ،  $a_2$  و  $a_3$  ضرایب ثابتی هستند که برای ذرات کروی صاف در محدوده های مختلفی از عدد رینولدز توسط مرسلی و الکساندر به دست آمده است [7].

ترم دوم در معادله ۱ از دیگر نیروهای وارد بر حرکت قطره، نیروی گرانش بر واحد جرم ذره است.  $F$  سایر نیروهای هیدرودینامیک است که بر ذرات وارد می شود که می توان به نیروی جرم مجازی، سافمن و ترموفورتیک اشاره کرد و هر یک تحت شرایط خاصی دارای اهمیت هستند. در این مطالعه با توجه به چگالی، قطر، رینولدز قطره و عدم وجود گرادیان دما از این نیروها صرف نظر می شود. بعد از محاسبه سرعت قطره، مسیر فاز گسسته با استفاده از سرعت به دست آمده به روش رانگ- کوتا محاسبه می شود.

۲-۳- مدل سازی رژیم برخورد قطره با سطح

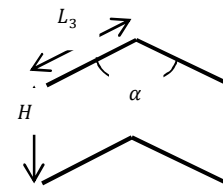
با استفاده از معادله ۱، مسیر حرکت ذرات پیش بینی می شود و امکان برخورد قطره با دیوار طی مسیر وجود دارد. در برخورد ذرات به دیوار و پره، با توجه به انرژی برخورد و دمای دیوار می توان چهار رژیم به دام افتادن، انعکاس (پس زدگی)، پخش و فروپاشی (تجزیه) را در نظر گرفت. شکل ۴ به صورت خلاصه، رژیم برخورد ذرات را براساس انرژی برخورد به دیوار و دمای دیوار نشان می دهد.  $T_b$  دمای جوشش قطره است. براساس این شکل در صورتی که دمای دیوار کمتر از دمای جوشش قطره باشد، ذرات برخوردکننده با دیوار می توانند در رژیم های به دام افتادن، پخش و فروپاشی قرار گیرند و در صورتی که دمای دیوار بالاتر از دمای جوشش باشد، ذرات در برخورد با دیوار می توانند در دو رژیم انعکاس و فروپاشی

رژیم برخورد ذره- سطح صرف نظر می شود و فرض می شود که ذرات به محض برخورد با سطح، از جریان گاز جدا می شوند و احتمال بازگشت دوباره ذرات به جریان گاز وجود ندارد. تعیین مکانیزم غالب در روند برخورد ذرات با دیوار به وسیله مفهوم انرژی برخورد که تابعی از عدد وبر برخورد است، مشخص می شود و سرعت برخورد قطره در آن نقش بسزایی دارد. هدف اصلی و نوآوری پژوهش حاضر، بررسی اثر رژیم فروپاشی ذرات بر راندمان جداسازی بوده که تاکنون در پژوهش های قبل مورد بحث قرار نگرفته است. با تمرکز بر این مکانیزم، اثر سرعت جریان گاز، قطر قطره و هندسه پره بر راندمان جداسازی و افت فشار جریان بررسی می شود.

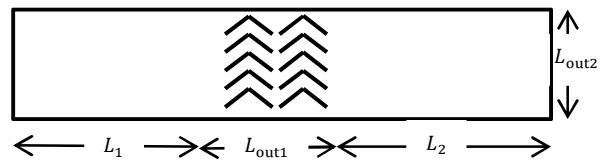
۲- شرح مساله

۲-۱- مدل هندسی

هندسه مورد بررسی، یک کانال مستطیلی است. مخلوط جریان هوا و قطره های مایع، درون کانال به حرکت در آورده می شود. پره دمیستر با هندسه و ابعاد معین در میانه کانال به صورت زیگزاگ در کنار هم چیده شده است. قطره های مایع در برخورد با این پرها به دام می افتند و روی پره باقی می ماند. با گذشت زمان، این قطره ها به یکدیگر می پیوندند و فیلم مایع با ضخامت بسیار کوچک تشکیل می شود. در نهایت بر اثر نیروی گرانش به سمت پایین حرکت می کند. به منظور خارج کردن این مایع، در قسمت پایین دمیستر، خروجی شماره یک تعبیه شده است تا مایع جمع آوری شده به سمت بیرون از کانال هدایت شود. از طرفی جریان گازی که از دمیستر عبور کرده و طی این فرآیند از رطوبت آن کاسته شده است، از خروجی دوم در انتهای کانال خارج می شود. نمای نزدیک از پره در شکل ۲ و شماتیک کانال در شکل ۳ ترسیم شده است. در این شبیه سازی از جریان هوا به عنوان فاز گاز و آب به عنوان فاز مایع استفاده شد. قطره ها به صورت گروهی و با مدل سازی به شکل اسپری نازل در ورودی کانال تزریق می شوند. اطلاعات هندسی دمیستر در جدول ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۲) هندسه پره



شکل ۳) شماتیک کانال دمیستر

جدول ۱) پارامترهای هندسی

پارامتر (واحد)	نماد	محدوده
فاصله خروجی یک از ورودی (m)	$L_1$	۰/۴
فاصله خروجی یک از خروجی دو (m)	$L_2$	۰/۴
طول خروجی یک (m)	$L_{out1}$	۰/۲۵
طول خروجی دو (m)	$L_{out2}$	۰/۲۵
طول پره (m)	$L_3$	۰/۰۲۴
ارتفاع بین پره (m)	$H$	۰/۰۱۵
زاویه بین پره (degree)	$\alpha$	۱۲۰
تعداد پره (-)	-	۳۰

$$f(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{D}\right)^2\right] \quad (9)$$

رابطه ۹، احتمال یافتن ذره‌ای به قطر  $d_i$  در مجموعه ذرات جدید را بیان و مقداری بین صفر و یک اختیار می‌کند.  $D$  توسط رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$d_{\max} = D/\sqrt{2} \quad (10)$$

$d_{\max}$  با استفاده از رابطه ۱۱ به دست می‌آید و بیانگر بزرگ‌ترین قطر ذرات تولیدی بوده و  $d_o$  قطر ذره قبل از برخورد است. طبق رابطه ۱۱ بزرگ‌ترین قطر ذرات تولیدی، تابعی از انرژی برخورد یا عدد ویر برخورد است [13].

$$\frac{d_{\max}}{d_o} = \max\left(\frac{E_{\text{crit}}^2}{E^2}, \frac{6.4}{We}, 0.06\right) \quad (11)$$

همچنین سرعتی که ذرات تولیدی با آن سطح دیوار را ترک می‌کنند با استفاده از تابع توزیع احتمال به دست می‌آید. سرعت نرمال پس از برخورد با رابطه ۱۲ قابل محاسبه است [12].

$$f\left(\frac{u_{ni}}{u_{nd}}\right) = \left[\frac{b_v}{\theta_v} \left(\frac{u_{ni}/u_{nd}}{\theta_v}\right)^{b_v-1}\right] \exp\left[-\left(\frac{u_{ni}/u_{nd}}{\theta_v}\right)^{b_v}\right] \quad (12)$$

در رابطه ۱۲، اندیس  $i$  مربوط به  $i$ امین ذره تولیدشده و اندیس  $d$  مربوط به ذره برخوردکننده به دیوار است.  $b_v$  و  $\theta_v$  تابعی از زاویه برخورد ذره ( $\theta_l$ ) است و با روابط ۱۳- الف و ب بیان می‌شود [12].

$$b_v = \begin{cases} 2.1 & , \theta_l \leq 50 \\ 1.10 + 0.026\theta_l & , \theta_l \geq 50 \end{cases} \quad (13)$$

الف)

$$\theta_v = 0.158e^{0.017\theta_l} \quad (13-b)$$

زاویه انعکاس از سطح، تابعی از زاویه برخورد ذره است و توسط رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$\theta_s = 65.4 + 0.226\theta_l \quad (14)$$

سرعت مماسی که ذره با آن دیوار را ترک می‌کند، از رابطه ۱۵ به دست می‌آید [12].

$$u_{ti} = \frac{u_{ni}}{\tan(\theta_s)} \quad (15)$$

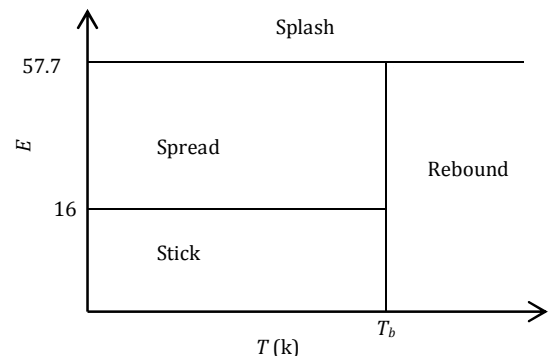
در نهایت به منظور حفظ بقای انرژی بین ذره برخوردکننده با دیوار و ذرات جدید تولیدشده، سرعت انعکاس ذرات جدید توسط ریشه دوم ضریب تصحیح سرعت ( $k$ ) طبق روابط ۱۶- الف و ب تصحیح می‌شود.

$$u'_{ni} = \sqrt{k} u_{ni} \quad (16-a)$$

$$u'_{ti} = \sqrt{k} u_{ti} \quad (16-b)$$

در شکل ۵ شماتیک رفتار قطره در برخورد با سطوح فیزیکی نشان داده شده است [14].

با توجه به رابطه ۵، بدیهی است که سرعت برخورد قطره به مرزها، جنبه مهمی در محاسبه انرژی بی‌بعد برخورد به خود اختصاص می‌دهد. با افزایش سرعت و افزایش عدد ویر برخورد، انرژی افزایش می‌یابد و رژیم غالب در مرز فیزیکی، رژیم فروپاشی قطره است. از این رو احتمال ایجاد قطره‌های جدید با قطر کوچک بالا می‌رود، در حالی که با کاهش سرعت و به واسطه آن کاهش انرژی برخورد، با



شکل ۴ الگوی برخورد ذره در سطح [11]

انرژی بی‌بعد برخورد ذرات با معادله ۵ محاسبه می‌شود [12].

$$E^2 = We_n \left[ \frac{1}{\min\left(\frac{h_o}{d_p}, 1\right) + \frac{1}{\sqrt{Re_n}}} \right] \quad (5)$$

در رابطه ۵،  $h_o$  ضخامت فیلم مایع بوده و انرژی برخورد تابعی از  $We_n$  و  $Re_n$  است که به ترتیب عدد رینولدز برخورد و عدد ویر برخورد هستند و با روابط ۶ و ۷ بیان می‌شوند.

$$Re_n = \frac{\rho_p w_o d_p}{\mu_p} \quad (6)$$

$$We_n = \frac{\rho_p w_o^2 d_p}{\sigma} \quad (7)$$

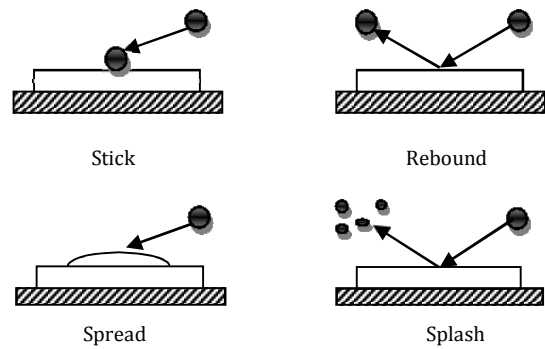
$w_o$  سرعت قطره پیش از برخورد به سطح و  $\sigma$  کشش سطحی مایع است. زمانی که دمای دیوار کمتر از دمای جوشش قطره و انرژی بی‌بعد ذره در برخورد با دیوار کمتر از ۱۶ باشد، رژیم برخورد از نوع اول است و قطره توسط دیوار به دام می‌افتد و با دیوار هم‌سرعت می‌شود [11]. در صورتی که دمای دیوار بالاتر از دمای جوشش و انرژی بی‌بعد کمتر از ۵۷/۷ باشد، ذرات در برخورد با دیوار منعکس می‌شوند. سرعت ذرات بعد از انعکاس از سطح با استفاده از ضریب انعکاس  $e$  قابل محاسبه است. هنگامی که انرژی بی‌بعد برخورد ذره با دیوار بزرگ‌تر از ۵۷/۷ باشد، در هر دمایی از دیوار، برخورد ذرات در رژیم فروپاشی قرار می‌گیرد. در صورت وقوع پدیده فروپاشی، قطره بعد از برخورد با دیوار، درصدی از جرم آن تبدیل به فیلم مایع و مابقی جرم آن تبدیل به چندین ذره با قطر کوچک‌تر می‌شود. سپس این ذرات از دیوار انعکاس می‌یابند و دوباره به جریان گاز وارد می‌شوند. مقدار جرم مایع که در اثر رژیم فروپاشی مجدداً وارد جریان گاز می‌شود، با استفاده از تابع ۸ محاسبه می‌شود [12].

$$\gamma_s = \begin{cases} \frac{1.8}{10000} [E^2 - E_{\text{crit}}^2], & E_{\text{crit}}^2 < E^2 < 7500 \\ 0.7, & E^2 > 7500 \end{cases} \quad (8)$$

$E_{\text{crit}}$  برابر با ۵۷/۷ است. رابطه ۸ بیان می‌کند که در رژیم فروپاشی، در صورتی که ذره با جرم  $M_o$  به دیوار برخورد کند، مقدار  $(1 - \gamma_s)M_o$  تبدیل به فیلم مایع روی دیوار می‌شود و مقدار  $\gamma_s M_o$  مجدداً وارد جریان گاز می‌شود.

قطر، سرعت و جهت ذرات جدید تولیدشده توسط الگوهای تصادفی با استفاده از تابع توزیع احتمال محاسبه می‌شود. هر ذره تولیدشده دارای قطر جدید بوده و با استفاده از تابع توزیع احتمال قطر از

تغییر رژیم غالب، ذرات در برخورد با دیوار به آن متصل می‌شوند و بازگشت دوباره قطره‌ها امکان‌پذیر نیست.



شکل ۵) رژیم‌های برخورد به دیوار [14]

### ۳-۳- استقلال از شبکه‌بندی محاسباتی و گام زمانی

در این پژوهش، مساله به صورت دو بُعدی و گذرا مدل‌سازی شده است. برای در نظر گرفتن اثر لایه مرزی و به منظور بالا بردن دقت شبیه‌سازی، تراکم شبکه در نزدیک دیوار و پره افزایش یافته است. در بررسی استقلال از شبکه، چندین شبکه‌بندی مختلف با تعداد مش متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. با هر بار ریز کردن شبکه محاسباتی، میزان راندمان جداسازی در مدل‌سازی عددی محاسبه شده و با میزان راندمان تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. در جدول ۲ مشخصات این شبکه‌ها و میزان خطای نسبی آرایه و با توجه به همگرایی حل و حداقل کردن حجم محاسبه، شبکه‌بندی با تعداد سلول ۲۶۲۵۰۰ به عنوان شبکه پایه انتخاب شده است.

همچنین با توجه به گذرابودن مساله، استقلال از گام زمانی بررسی شده است. در این راستا میزان راندمان جداسازی با گام‌های زمانی مختلف، محاسبه و با مقدار راندمان تجربی، مقایسه و نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است. سرانجام با توجه به همگرایی میزان راندمان جداسازی، گام زمانی ۰/۰۰۱ ثانیه برای حل مساله انتخاب شده است.

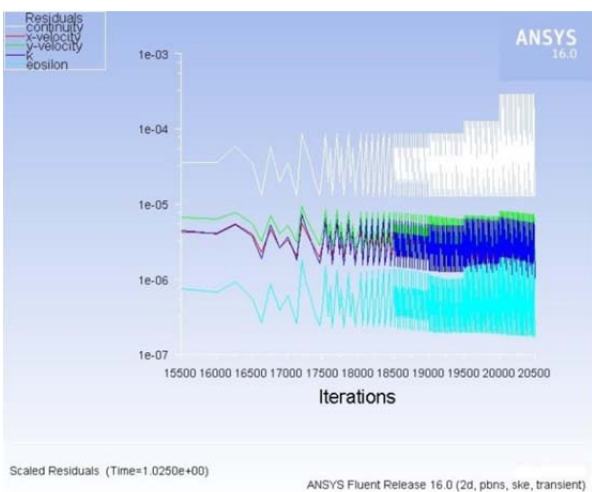
نمودار باقیمانده‌ها در نمودار ۱ آورده شده است. همچنین مجموع دبی هوا در ورودی و خروجی‌ها، عددی بسیار کوچک است و به سمت صفر میل می‌کند و به نوعی پیوستگی جریان هوا را تایید می‌نماید.

جدول ۲) استقلال از شبکه

تعداد سلول	راندمان عددی (%)	راندمان تجربی (%)	خطای نسبی (%)
۱۰۵۰۰	۸۶/۱۷	۹۷/۱۶	۱۱/۳۱
۶۵۶۲۵	۸۹/۱۶	۹۷/۱۶	۸/۲۳
۲۶۲۵۰۰	۹۱/۳۳	۹۷/۱۶	۶/۰۰
۱۰۵۰۰۰۰	۹۲/۱۲	۹۷/۱۶	۵/۱۸
۴۲۰۰۰۰۰	۹۲/۶۳	۹۷/۱۶	۴/۶۲

جدول ۳) انتخاب گام زمانی

گام زمانی (s)	راندمان عددی (%)	راندمان تجربی (%)	خطای نسبی (%)
۰/۱	۷۰/۱۲	۹۷/۱۶	۲۷/۸۳
۰/۰۱	۸۷/۳۳	۹۷/۱۶	۱۰/۱۱
۰/۰۰۱	۹۱/۳۳	۹۷/۱۶	۶/۰۰
۰/۰۰۰۱	۹۲/۱۳	۹۷/۱۶	۵/۱۷
۰/۰۰۰۰۱	۹۲/۵۶	۹۷/۱۶	۴/۷۳
۰/۰۰۰۰۰۱	۹۲/۵۸	۹۷/۱۶	۴/۷۲



نمودار ۱) نمودار باقیمانده‌ها

### ۲-۴- مدل‌سازی جریان هوا

برای فاز پیوسته، روابط بقای جرم و ممنتوم به صورت معادله‌های ۱۷ و ۱۸ از طرفی با توجه به محدوده سرعت مورد مطالعه، جریان آشفتنه است [15].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (18)$$

در رابطه ۱۸،  $\tau_{ij}$  تنسور تنش است و متناسب با مدل آشفتگی بیان می‌شود. در این گزارش از مدل توربولانسی کی-اِپسیلون، مطابق با یک پژوهش [15] برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان هوا استفاده شده است.

### ۳-۳- روش حل و اعتبارسنجی

#### ۳-۱- شرط مرزی

شرط مرزی برای فاز پیوسته و گسسته به صورت جدا تعیین می‌شود. در ورودی کانال از شرط مرزی سرعت برای جریان هوا استفاده شده است. در هر دو خروجی کانال، جریان هوا به اتمسفر وارد می‌شود، بنابراین از شرط مرزی فشار در خروجی‌ها استفاده شده است.

در ورودی برای ذره‌ها، شرط مرزی سرعت در نظر گرفته شده است. قطره‌های مایع که توسط اسپری نازل به درون کانال تزریق می‌شوند، توسط جریان هوا در طول کانال حمل می‌شوند، به همین دلیل، سرعت قطره‌های مایع برابر با سرعت جریان هوا فرض شده است. شرط مرزی برای برخورد ذره به دیوار و پره دمیستر با توجه به محدوده سرعت مورد بررسی، فروپاشی قطره در نظر گرفته شده است.

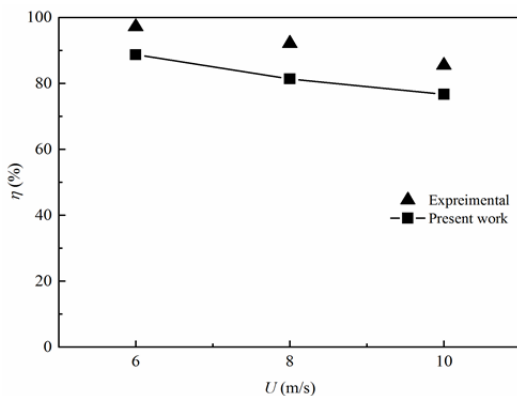
#### ۳-۲- مشخصات حلگر عددی

در این مطالعه از نرم‌افزار ANSYS fluent برای مدل‌سازی استفاده شده است. برای حل معادله‌های گسسته‌شده پیوستگی و اندازه حرکت، الگوریتم SIMPLE به کار برده شده است. گسسته‌سازی معادله اندازه حرکت به روش بالادست مرتبه دوم انجام شده است. همچنین حل معادله‌های فاز گسسته و پیوسته به صورت کوپل صورت گرفته و برای حل معادله حرکت ذره از روش رانگ-کوتا استفاده شده است.

پایا، نتایج ثبت می‌شود. هر یک از آزمایش‌ها چندین مرتبه تکرار شد تا از صحت اندازه‌گیری‌ها اطمینان حاصل شود.

### ۳-۵- اعتبارسنجی مدل عددی

به منظور بررسی درستی و کارآمدی مدل‌سازی انجام شده، مقایسه‌ای بین نتایج مطالعه عددی و مطالعه آزمایشگاهی صورت پذیرفت. این اعتبارسنجی براساس راندمان جداسازی دمیستر آزمایشگاهی و به‌ازای سرعت‌های مختلف جریان هوا در ورودی انجام شده است. در نمودار ۲، نتایج عددی راندمان جداسازی مساله حاضر با داده‌های آزمایشگاهی ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار راندمان در آزمایش تجربی بیشتر از مقادیر حاصل از حل عددی است. بزرگ‌ترین میزان انحراف از نتایج تجربی در حدود ۱۰/۵۶٪ است که درصد خطای نسبتاً قابل قبولی را آرایه می‌دهد و نشان‌دهنده معتبر بودن حل عددی در پیش‌بینی عملکرد دمیستر است. بررسی نمودار ۲ و همچنین مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت جریان، راندمان جداسازی کاهش می‌یابد و این ناشی از مکانیزم فروپاشی قطره‌ها است. با توجه به این مشاهده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که فرض فروپاشی قطره در سرعت‌های بالا، فرض قابل قبولی به نظر می‌رسد.



نمودار ۲) مقایسه بین راندمان مدل‌سازی و آزمایشگاهی

### ۴- نتایج مدل‌سازی

#### ۴-۱- بررسی تاثیر سرعت جریان گاز بر راندمان جداسازی

در ابتدا به بررسی تاثیر سرعت جریان هوا بر راندمان دمیستر پرداخته شده است. در نمودار ۳، نتایج تغییرات راندمان جداسازی در سرعت‌های ۴، ۶، ۸ و ۱۰ متر بر ثانیه آرایه شده است. در نمودار ۳ مشاهده می‌شود که راندمان در سرعت‌های بالا کم است و کاهش سرعت، افزایش راندمان را به همراه دارد. علت را بدین صورت می‌توان توضیح داد که در سرعت‌های بالا، انرژی برخورد قطره (که تابعی از عدد و بر برخورد و سرعت برخورد است) با دیوار و پره دمیستر زیاد است، در نتیجه وقتی قطره‌ها به سطح برخورد می‌کنند، درصد بیشتری از جرم ذره به چندین قطره با قطر کوچک تجزیه می‌شود. این قطره‌های کوچک دوباره وارد جریان گاز می‌شوند و به علت داشتن قطری کوچک‌تر از قطر اولیه، به راحتی بدون به‌دام افتادن از بین پره دمیستر عبور می‌کنند و در نتیجه از خروجی انتهای کانال به همراه جریان گاز خارج می‌شوند. این عامل باعث کاهش راندمان جداسازی می‌شود. در سرعت‌های پایین‌تر، ذرات دارای انرژی برخورد کم هستند و هنگام اصابت با سطح فیزیکی به آن می‌چسبند. در نتیجه با تشکیل فیلم مایع و تاثیر نیروی گرانش، از خروجی شماره یک خارج می‌شود. بنابراین در سرعت‌های پایین، راندمان جداسازی افزایش می‌یابد.

### ۳-۴- دستگاه آزمایش و روش انجام کار

در این تحقیق نمونه آزمایشگاهی دمیستر برای انجام تست، طراحی و ساخته شده است. این نمونه یک کانال مستطیل شکل بوده و در قسمت میانی آن دو ردیف پره از جنس پلاستیک به صورت ۸۸ در کنار هم قرار داده شده است. این پره‌ها عمود بر جهت حرکت جریان هوا قرار دارند. اطلاعات مربوط به پره در جدول ۱ آورده شده است. برای به جریان درآوردن هوای درون کانال از یک پمپ استفاده شده است و تنظیم سرعت‌های مختلف جریان توسط همین پمپ کنترل می‌شود. سرعت جریان هوا توسط یک بادسنج که در مسیر حرکت جریان قرار دارد، اندازه‌گیری می‌شود. برای مشاهده دقیق‌تر الگوی جریان در برخورد قطره به سطح، در ساخت دیوار کانال دمیستر از شیشه به کار گرفته شده است. در مرکز ورودی کانال، یک اسپری نازل با زاویه پاشش ۹۰ درجه، برای تزریق قطره‌های مایع به درون کانال قرار دارد. جریان آب توسط یک پمپ جداگانه به درون این اسپری نازل تزریق می‌شود. همچنین در این آزمایش، افت فشار جریان عبوری از دمیستر توسط یک فشارسنج اندازه‌گیری شد. نتایج گزارش شده از افت فشار براساس اختلاف فشار اندازه‌گیری شده در پشت و جلوی پره‌های دمیستر است. یک مخزن اندازه‌گیری در خروجی انتهای کانال قرار داده شده است. قطره‌های مایعی که بدون به‌دام افتادن توانستند از دمیستر عبور کنند، همراه با جریان گاز از خروجی انتهای کانال خارج می‌شوند و به درون این مخزن سقوط می‌کنند. با اندازه‌گیری جرم مایع این مخزن می‌توان راندمان جداسازی را محاسبه نمود. شکل ۶، نمایی از دمیستر مورد استفاده در آزمایش تجربی را نشان می‌دهد.



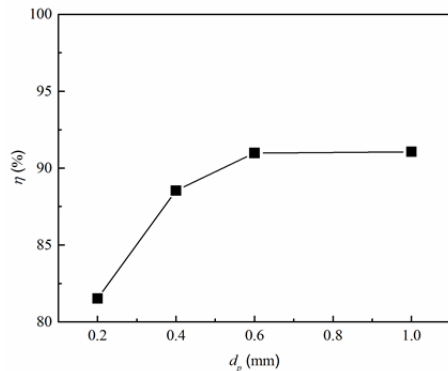
شکل ۶) شماتیک تجهیزات مورد استفاده در آزمایش تجربی

راندمان جداسازی با استفاده از رابطه ۱۹ محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{M_{out} - M_{in}}{M_{in}} \quad (19)$$

در رابطه ۱۹،  $M_{in}$  جرم مایع تزریق شده در ورودی و  $M_{out}$  جرم مایع جمع‌آوری شده در مخزن انتهای کانال است. تفاضل این دو مقدار، میزان مایع جمع‌آوری شده توسط دیوار و پره را نشان می‌دهد. برای انجام آزمایش، پمپ هوا، روشن و هوا وارد کانال می‌شود. پس از گذشت زمان معین، تزریق قطره‌ها آغاز می‌شود. آزمایش در سه سرعت ۴، ۶، ۸ و ۱۰ متر بر ثانیه انجام شده است. آزمایش‌ها در هر سرعت پس از تنظیم‌های لازم تا رسیدن به حالت پایا انجام می‌شود. رسیدن به حالت پایا زمانی است که تغییر قابل توجهی در مقادیر اندازه‌گیری شده نتایج صورت نگیرد. پس از رسیدن به حالت

راندمان را به دنبال دارد. بنابراین ذرات کوچک به علت تاثیرپذیری ناچیز از نیروی گرانش و همچنین عبور آسان از لایه‌های مختلف دمیستر، موجب روند نزولی در راندمان می‌شوند. با توجه به نمودار ۴، افزایش قطر قطره از ۰/۲ به یک میلی‌متر، افزایش ۱۰ درصدی راندمان را در پی دارد.

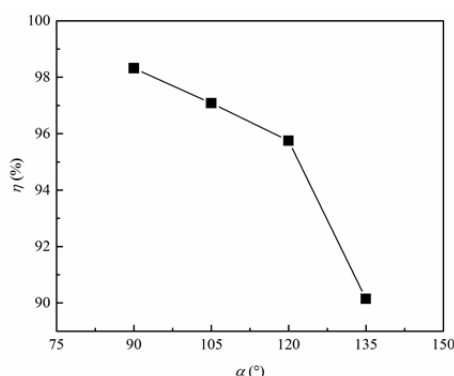


نمودار ۴) تاثیر قطر قطره بر راندمان جداسازی

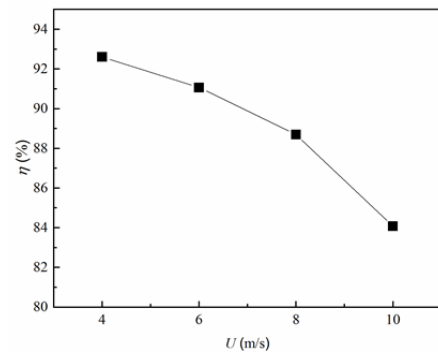
### ۳-۴- بررسی تاثیر زاویه پره بر راندمان جداسازی و افت فشار جریان

در این بخش، اثرگذاری تغییرات هندسه پره بر راندمان جداسازی و افت فشار جریان عبوری از دمیستر بررسی شده است (نمودارهای ۵ و ۶). نتایج حاصل از تاثیر پارامتر زاویه بین پره ( $\alpha$ ) بر راندمان جداسازی در چهار مدل با زاویه رأس ۹۰، ۱۰۵، ۱۲۰ و ۱۳۵ درجه در نمودار ۵ ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، راندمان با کاهش زاویه رأس پره افزایش می‌یابد. این امر ناشی از آن است که با کاهش زاویه، انحنای مسیر عبور قطره افزایش می‌یابد و به واسطه آن، نیروی گریز از مرکز بزرگی به ذرات، حین حرکت از بین پره‌ها وارد می‌شود. در نتیجه تعداد قطره‌های بیشتری به سمت دیوار و پره، منحرف و از جریان گاز جدا می‌شوند. همچنین زاویه‌های بزرگ، تغییر در مسیر حرکت ذرات کمتر است، در نتیجه قطره‌ها به همراه جریان گاز از بین پره‌های دمیستر عبور می‌کنند و برخورد کمتری صورت می‌گیرد. در نتیجه با افزایش زاویه، افت راندمان مشاهده می‌شود.

نتایج حاصل از تغییر زاویه بر افت فشار در نمودار ۶ ارایه شده است. کاهش زاویه رأس، افزایش افت فشار جریان عبوری از دمیستر را به دنبال دارد. با کاهش زاویه بین پره، سطح پره به سمت سطحی عمود بر مسیر جریان گاز میل می‌کند که موجب کاهش ناگهانی سرعت در نزدیکی سطح دمیستر می‌شود و این امر، عامل ایجاد افت فشار بزرگ در زاویه‌های کوچک است.



نمودار ۵) تاثیر زاویه پره بر راندمان جداسازی



نمودار ۳) تاثیر سرعت هوا بر راندمان جداسازی

به طور خاص با ردیابی قطره‌هایی که با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه به درون کانال تزریق شده و استفاده از مولفه شمال سرعت برخورد این قطره‌ها به سطح دمیستر، انرژی بی‌بعد محاسبه شده در حدود ۳۲۴/۱۹ است. با توجه به انرژی به دست آمده و استفاده از شکل ۴، مشخص می‌شود که ذره در رژیم فروپاشی قرار دارد. بنابراین در این سرعت، رژیم فروپاشی، مکانیزم غالب در برخورد قطره به سطح است. از سوی دیگر در این سرعت، قطره‌ها با قطر یک میلی‌متر به درون کانال تزریق شده‌اند، اما در خروجی انت‌های کانال، قطره‌های کوچک‌تر و در حدود ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۱ میلی‌متر یافت می‌شود که کوچک‌تر از قطر اولیه هستند. بنابراین احتمال می‌رود این قطره‌ها همان ذرات کوچک تولید شده در اثر مکانیزم فروپاشی باشند که بعد از تجزیه توانستند از لایه‌های دمیستر فرار کنند و از دسترس جداسازی خارج شوند.

به منظور تعیین دقیق‌تر تاثیر سرعت و انرژی برخورد در فروپاشی ذرات، دو سرعت ۴ و ۱۰ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، حدود ۴۳٪ قطره‌های تزریقی در رژیم فروپاشی قرار می‌گیرند و بعد از برخورد با مرزها تجزیه می‌شوند. در حالی که در سرعت ۴ متر بر ثانیه، تنها حدود ۸٪ قطره‌های تزریقی شامل این رژیم می‌شوند. بر اساس این شواهد، احتمال وقوع پدیده فروپاشی در سرعت‌های بالا واضح است. به این ترتیب رژیم فروپاشی از عوامل افت راندمان در سرعت‌های بالا بوده، به صورتی که با افزایش سرعت از ۴ به ۱۰ متر بر ثانیه، افت ۱۰ درصدی در راندمان جداسازی مشاهده شده است.

### ۲-۴- بررسی تاثیر قطر قطره بر راندمان جداسازی

راندمان جداسازی برای قطره‌های مختلف ذرات تزریقی محاسبه شده است. نمودار ۴ تغییر راندمان جداسازی به ازای قطره‌های مختلف بین ۰/۲ تا یک میلی‌متر را بیان می‌کند. نتایج نشان داد که راندمان با افزایش قطر و بزرگ‌تر شدن قطره افزایش می‌یابد. علت را بدین صورت می‌توان توجیه نمود که با افزایش قطر قطره، تاثیر نیروی گرانش بر قطره‌ها بیشتر می‌شود. در نتیجه، تعداد قطره‌های بیشتری روی پره‌ها سقوط می‌کنند. این عامل باعث افزایش میزان فیلم مایع تشکیل شده بر دیوار می‌شود و در نتیجه راندمان جداسازی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر قطره‌های دارای قطر کوچک، توانایی فرار از بین پره‌ها را دارند و بدون به دام افتادن توسط سطوح از دمیستر خارج و باعث افت راندمان می‌شوند.

نکته حایز اهمیت این است که مطالعه تاثیر قطر ذره بر راندمان جداسازی، نتایج به دست آمده از تاثیر سرعت بر راندمان را تصدیق نمود. در بررسی تاثیر سرعت، فروپاشی قطره در سرعت بالا و به موجب آن تولید قطره‌هایی با قطر کوچک، علت کاهش راندمان بود. حال در بررسی اثر قطر، در حالتی که قطره‌ها در همان ابتدا با قطره‌های کوچک به درون کانال تزریق می‌شوند، همان نتایج کاهش



## ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی عددی پارامترهای تاثیرگذار بر راندمان جداسازی ذرات، در دمیستر زیگزاگی پرداخته شده است. مشاهده‌های آزمایشگاهی و عددی در این پژوهش نشان داد که مدل‌سازی صحیح فیزیک برخورد قطره به سطح و تعیین رژیم برخورد، نقش بسزایی در راندمان جداسازی ایفا می‌کند. با انتخاب شرط مرزی مناسب و حل معادله حاکم در دیدگاه اویلر-لاگرانژ اثر سرعت جریان گاز، قطر قطره تزریقی، زاویه و ارتفاع بین پره بر راندمان جداسازی و افت فشار جریان مورد مطالعه قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج این پژوهش به‌طور خلاصه عبارت از موارد زیر است:

۱- انرژی برخورد ذرات به سطوح، تاثیر قابل توجهی در میزان راندمان جداسازی دارد. به‌واسطه این انرژی، رژیم برخورد ذرات معین می‌شود و میزان قطره‌های جمع‌آوری‌شده توسط دمیستر تحت تاثیر این رژیم است.

۲- سرعت جریان گاز یکی از عوامل موثر بر راندمان جداسازی دمیستر است. با افزایش سرعت گاز و افزایش عدد وبر، انرژی برخورد ذرات افزایش می‌یابد. رژیم غالب در مرزها، رژیم فروپاشی قطره است. بنابراین افزایش سرعت گاز موجب کاهش راندمان جداسازی می‌شود و قرارگرفتن در رژیم فروپاشی از جمله عوامل افت راندمان در این سرعت‌ها است. زیرا بعد از برخورد ذره با دیوار و تجزیه آن، قطره تبدیل به چندین ذره با قطر کوچک‌تر می‌شود. این ذرات کوچک‌تر در ادامه مسیر به‌راحتی از فضای بین پرها بدون برخورد با سطوح عبور می‌کنند و راندمان کاهش می‌یابد، به‌طوری که با افزایش سرعت از ۴ به ۱۰ متر بر ثانیه، راندمان جداسازی ۱۰٪ کاهش پیدا می‌کند.

۳- در سرعت ورودی یکسان با افزایش میزان قطر ذرات، تاثیر نیروی گرانش روی ذرات بیشتر شده و در نتیجه راندمان جداسازی افزایش یافته است. بنابراین در قطر بزرگ، نیروی گرانش نقش عمده‌ای در راندمان جداسازی دارد، به‌طوری که با افزایش قطر از ۰/۲ به یک میلی‌متر، راندمان جداسازی ۱۰٪ افزایش می‌یابد.

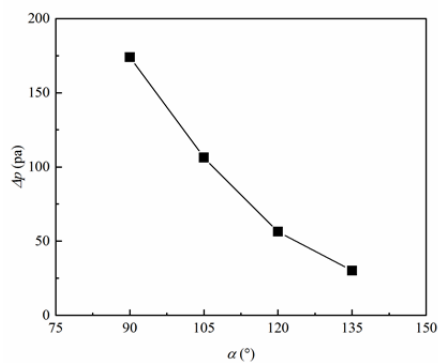
۴- هندسه مورد استفاده در چیدمان دمیستر یکی از عوامل بسیار تاثیرگذار بر میزان افت فشار جریان گاز و راندمان جداسازی است. در حالت کلی، چیدمان متراکم پرها باعث افزایش راندمان دمیستر می‌شود، اما از سوی دیگر میزان افت فشار افزایش می‌یابد.

۵- بررسی‌ها نشان داد که با کاهش فاصله عمودی بین پرها می‌توان به میزان راندمان بزرگ‌تری دست یافت، به‌طوری که با ۱/۲ برابرشدن فاصله، افزایش ۲۰ درصدی در راندمان جداسازی اتفاق خواهد افتاد، اما تاثیر منفی بر افت فشار ایجاد می‌شود. زیرا کاهش فاصله موجب افزایش سرعت در سطح پره می‌شود که افت فشار جریان عبوری را در پی دارد.

۶- نتایج نشان داد که با کاهش زاویه بین پره، میزان راندمان و افت فشار جریان افزایش می‌یابد. این افزایش راندمان ناشی از شتاب جانب مرکزی است که به ذرات طی عبور از بین پرها وارد می‌شود.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان از دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه گیلان که امکان انجام این پژوهش را فراهم نمود و همچنین از خدمات ارزشمند مرکز پردازش‌های سریع دانشگاه شهید چمران اهواز، کمال قدردانی می‌نمایند.

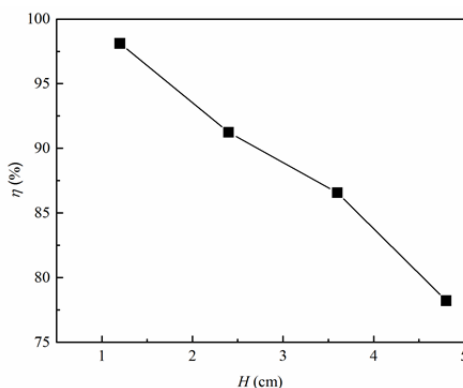
**تاییدیه اخلاقی:** محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان است.



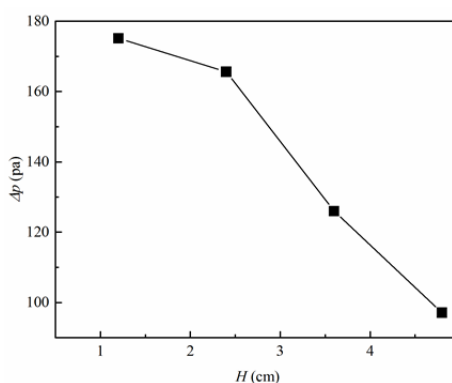
نمودار ۶) تاثیر زاویه پره بر افت فشار

## ۴-۴- بررسی تاثیر ارتفاع بین پرها بر راندمان جداسازی و افت فشار جریان

در این بخش تاثیر پارامتر ارتفاع بین پره ( $H$ ) مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه بر چهار مدل صورت پذیرفت، به‌طوری که فاصله عمودی بین پرها به ترتیب برابر با ۱/۲، ۲/۴، ۳/۶ و ۴/۸ سانتی‌متر است. نمودارهای ۷ و ۸، به ترتیب نتایج حاصل برای راندمان و افت فشار را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج، در دمیستر با ارتفاع کوچک‌تر، راندمان جداسازی و افت فشار بزرگ‌تری مشاهده شده است. بدین علت که با کاهش فاصله بین پره، گذرگاه جریان باریک‌تر می‌شود و به‌واسطه آن، سرعت جریان عبوری از بین پرها افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت از یک سو عامل ایجاد افت فشار بزرگ‌تر در هر مرحله است و از سوی دیگر باعث می‌شود تا تعداد ذرات بیشتری به سمت پره منحرف شود. از طرفی با کاهش ارتفاع، ذرات، فضای محدودتری برای پیمایش مسیر بین دو پره دارند و احتمال برخورد ذرات با دیوار دمیستر افزایش می‌یابد. در نتیجه این عوامل باعث می‌شوند که کاهش فاصله بین پره، راندمان جداسازی بزرگ‌تری در پی داشته باشد.



نمودار ۷) تاثیر فاصله پره بر راندمان جداسازی



نمودار ۸) تاثیر فاصله پره بر افت فشار

**تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص ندارد.  
**سهم نویسندگان:** معصومه کریمی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روشن شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ رامین کوهی کمالی (نویسنده دوم)، روشن شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۵۰٪)  
**منابع مالی:** منابع مالی خاصی برای انجام این تحقیق استفاده نشده است

**منابع**

1- Galletti C, Brunazzi E, Tognotti L. A numerical model for gas flow and droplet motion in wave-plate mist eliminators with drainage channels. *Chemical Engineering Science*. 2008;63(23):5639-5652.  
 2- Hamed Estakharsar MH, Rafee R. Effects of wavelength and number of bends on the performance of zigzag demisters with drainage channels. *Applied Mathematical Modelling*. 2016;40(2):685-699.  
 3- Narimani E, Shahhoseini S. Optimization of vane mist eliminators. *Applied Thermal Engineering*. 2011;31(2):188-193.  
 4- Wang VI, James PW. Assessment of an eddy-interaction model and its refinements using predictions of droplet deposition in a wave-plate demister. *Chemical Engineering Research and Design*. 1999;77(8):692-698.  
 5- James PW, Azzopardi BJ, Wang Y, Hughes JP. A model for liquid film flow and separation in a wave-plate mist eliminator. *Chemical Engineering Research and Design*. 2005;83(5):469-477.  
 6- Zhao J, Jin B, Zhong Z. Study of the separation efficiency of a demister vane with response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials*. 2007;147(1-2):363-369.  
 7- Kavousi F, Behjat Y, Shahhosseini S. Optimal design of drainage channel geometry parameters in vane demister liquid-gas separators. *Chemical Engineering Research and Design*. 2013;91(7):1212-1222.  
 8- Venkatesan G, Kulasekharan N, Iniyan S. Influence of turbulence models on the performance prediction of flow through curved vane demisters. *Desalination*. 2013;329:19-28.  
 9- Venkatesan G, Kulasekharan N, Iniyan S. Numerical analysis of curved vane demisters in estimating water droplet separation efficiency. *Desalination*. 2014;339:40-53.  
 10- Venkatesan G, Kulasekharan N, Iniyan S. Design and selection of curved vane demisters using Taguchi based CFD analysis. *Desalination*. 2014;354:39-52.  
 11- ANSYS. ANSYS Fluent Tutorials Release 16.0. [Internet]. Canonsburg: ANSYS; 2014 [cited 2017 September 23]. Available from: <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node262.htm>  
 12- Mundo C, Sommerfeld M, Tropea C. Droplet-wall collisions: Experimental studies of the deformation and breakup process. *International Journal of Multiphase Flow*. 1995;21(2):151-173.  
 13- O'Rourke PJ, Amsden AA. A spray/wall interaction submodel for the KIVA-3 wall film model. *SAE International*. 2000;109:281-298.  
 14- Liang L, Shelburn A, Wang C, Hodgson D, Meeks E. Implementation and validation of spray/wall interaction models in immersed boundary CFD. *International Multidimensional Engine Modeling User's Group Meeting*. Detroit: Reaction Design Company; 2013.  
 15- Kouhikamali R, Noori Rahim Abadi SM, Hassani M. Numerical study of performance of wire mesh mist eliminator. *Applied Thermal Engineering*. 2014;67(1):214-222.

**۶- پی‌نوشت**

شرح	علامه اختصاری
ثابت تجربی در معادله ضریب درگ	$a_1, a_2, a_3$
پارامتر سرعت انعکاسی	$b_v$
ضریب درگ	$C_D$
پارامتر قطر (m)	$D$
قطر ذره (m)	$d_p$
ضریب انعکاس	$e$
انرژی بی‌بعد برخورد	$E$
نیروی شتاب اضافی بر واحد جرم ذره ( $Nkg^{-1}$ )	$F$
پارامتر نیروی درگ ( $s^{-1}$ )	$F_D$
شتاب گرانش ( $ms^{-2}$ )	$g$
ضخامت فیلم مایع (m)	$h_o$
ضریب تصحیح سرعت	$K$
طول (m)	$L$
جرم مایع در ورودی ( $kgs^{-1}$ )	$M_{in}$
جرم ذره قبل از برخورد (kg)	$M_o$
جرم مایع در خروجی ( $kgs^{-1}$ )	$M_{out}$
ارتفاع بین پره (m)	$H$
فشار (pa)	$P$
عدد رینولدز نسبی	$Re_d$
عدد رینولدز برخورد	$Re_n$
دمای جوشش (k)	$T_b$
زمان (s)	$t$
سرعت فاز پیوسته ( $ms^{-1}$ )	$u$
سرعت ذره ( $ms^{-1}$ )	$u_p$
سرعت نرمال برخورد ذره ( $ms^{-1}$ )	$W_o$
عدد وبر برخورد	$We_n$
محور مختصات (m)	$x_i$
ضریب جرم	$y_s$
	<b>علامه یونانی</b>
زاویه بین پره (degree)	$\alpha$
راندمان جداسازی	$\eta$
دلتای کرانیکر	$\delta_{ij}$
تنسور تنش ( $Nm^{-2}$ )	$\tau_{ij}$
زاویه برخورد ذره (degree)	$\theta_l$
زاویه انعکاس ذره (degree)	$\theta_s$
پارامتر سرعت انعکاسی	$\theta_v$
لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )	$\mu$
چگالی فاز پیوسته ( $kgm^{-3}$ )	$\rho$
چگالی فاز گسسته ( $kgm^{-3}$ )	$\rho_p$
کشش سطحی ( $Nm^{-1}$ )	$\sigma$
	<b>زیرنویس‌ها</b>
اندیس جهت مختصات	$i, j$
نرمال سطح	$n$
قبل از برخورد به سطح	$o$
ذره	$p$
مماس سطح	$t$