



Experimental and Numerical Investigation of Droplet Flow in Plastic and Metallic Wire Mesh Demisters

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hosseinnejad F.¹ MSc,
Kouhikamali R.^{*1} PhD

How to cite this article

Hosseinnejad F, Kouhikamali R. Experimental and Numerical Investigation of Droplet Flow in Plastic and Metallic Wire Mesh Demisters. Modares Mechanical Engineering. 2020; 20(8):2029-2043.

ABSTRACT

In the current study, experimental and numerical methods have been used to investigate the pressure drop and the separation efficiency of wire mesh demisters in an air-water system. Using the designed and manufactured experimental model, various parameters such as air velocity, packing density, and wire diameter in plastic and metallic demisters have been studied. Numerical simulation was carried out in two-dimensional and transient form using K-epsilon (k- ϵ) turbulence model in commercial software ANSYS Fluent and validated against experimental results. The Eulerian-Lagrangian discrete phase model was also used to simulate the water droplet trajectory at diameters of 0.2 and 0.05mm. The numerical simulation results are sufficiently accurate compared to the experimental data. The numerical solver predicts separation efficiency with error of about 20% and pressure drop with error of less than 20% compared to experimental data. The numerical simulation results show that increasing the diameter of water droplets at higher air velocities and higher packing densities is more effective and increases the separation efficiency up to 36%. Also, increasing the packing density increases the separation efficiency for droplets with a diameter of 0.2mm and decreases the separation efficiency for droplets with a diameter of 0.05mm. The results show that the separation efficiency of plastic demister is more than the separation efficiency of metallic demister and in lower packing densities, the use of plastic demister is advisable.

Keywords Wire Mesh Demister; Packing Density; Wire Diameter; Diameter of Water Droplets; Separation Efficiency; Pressure Drop

¹Energy Conversion Department, Mechanical Engineering Faculty, University of Guilan, Rasht, Iran

*Correspondence

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

Phone: +98 (13) 33690484

Fax: +98 (13) 33690271

kouhikamali@guilan.ac.ir

Article History

Received: October 05, 2019

Accepted: May 15, 2020

ePublished: August 15, 2020

CITATION LINKS

[1] Applied process design for chemical and petrochemical plants [2] Performance of wire mesh mist eliminator [3] Operation and dynamic behavior of wire mesh pads [4] Numerical simulation of vapor flow and pressure drop across the demister [5] Numerical study of performance of wire mesh mist eliminator [6] Experimental and numerical evaluation of the performance of a novel compound demister [7] Effects of layers and holes on performance of wire mesh packing [8] Eulerian-lagrangian modeling and computational fluid dynamics simulation of wire mesh demisters in MSF plants [9] Effects of wave length and number of bends on the performance of zigzag demisters with drainage channels [10] Study of the separation efficiency of a demister vane with response surface methodology [11] Optimization of vane mist eliminators [12] Numerical analysis of curved vane demisters in estimating water droplet separation efficiency [13] Regression analysis of a curved vane demister with Taguchi based optimization [14] Numerical study on the penetration of droplets in a zigzag demister [15] An analytical model for droplet separation in vane separators and measurements of grade efficiency and pressure drop [16] 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 [17] ANSYS FLUENT Theory Guide

مطالعه عددی و آزمایشگاهی جریان قطره‌ای در دمیسترهای شبکه سیمی فلزی و پلاستیکی

فرهاد حسین‌نژاد 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 با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی به بررسی اُفت فشار و بازده جداسازی دمیسترهای شبکه سیمی در یک سیستم آب- هوا پرداخته شده است. با استفاده از مدل آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده، پارامترهایی نظیر سرعت هوا، چگالی فشرده‌گی و قطر سیم شبکه در دمیسترهایی از جنس فلزی و پلاستیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه‌سازی عددی به‌صورت دوبعدی و حالت گذرا با استفاده از مدل آشفتگی کی-اِپسیلون در نرم‌افزار انسیس فلوئنت انجام و با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. همچنین از مدل فاز گسسته با دیدگاه اوپلری- لاگرانژی برای شبیه‌سازی مسیر حرکت قطرات آب در قطرهای ۲/ و ۵/ میلی‌متر استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی از دقت قابل قبولی برخوردار است. حلگر عددی، بازده جداسازی را با خطای حدود ۲۰٪ و اُفت فشار را با خطایی کمتر از ۲۰٪، نسبت به داده‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد افزایش قطر قطرات آب در سرعت‌های بالاتر و چگالی‌های فشرده‌گی بیشتر، موثرتر بوده و موجب افزایش بازده جداسازی تا حدود ۳۶٪ می‌شود. همچنین افزایش چگالی فشرده‌گی برای قطراتی با قطر ۲/ میلی‌متر باعث افزایش بازده جداسازی و برای قطراتی با قطر ۵/ میلی‌متر موجب کاهش بازده جداسازی می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که بازده جداسازی دمیستر پلاستیکی بیشتر از دمیستر فلزی است و در چگالی‌های فشرده‌گی پایین‌تر، استفاده از آن توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: دمیستر شبکه سیمی، چگالی فشرده‌گی، قطر سیم، قطر قطرات آب، بازده جداسازی، اُفت فشار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۶

*نویسنده مسئول: kouhikamali@guilan.ac.ir

مقدمه

جداسازی موثر گاز و مایع یکی از نیازهای اصلی در فرآیندهای صنعتی است. وسیله حذف قطرات که دمیستر (Demister) نامیده می‌شود، در بسیاری از کاربردهای صنعتی جهت به‌دام‌انداختن قطرات مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو نوع اصلی حذف‌کننده‌های قطرات، دمیسترهای شبکه سیمی و زیگزآگی هستند. تفاوت عمده میان این دو نوع در دامنه قطر قطراتی است که هر کدام می‌توانند به‌نحو مناسبی جمع‌آوری کنند. شبکه‌های سیمی می‌توانند از مواد مختلفی نظیر فلز، فایبرگلاس و پلاستیک‌ها ساخته شوند. پلیمرهای جدیدی مانند پلی‌پروپیلین یا پلی‌اتیلن می‌توانند به شکل سیم ساخته شوند. دمیسترهای شبکه سیمی قابلیت نصب به‌صورت افقی برای جریان گاز عمودی و نصب به‌صورت عمودی برای جریان گاز افقی را دارا هستند.

دمیستر شبکه سیمی، یک محیط متخلخل از جنس سیم‌های فلزی یا پلاستیکی است که قطرات مایعی را که به‌وسیله فاز گازی در حرکت هستند، جمع‌آوری می‌کند. دمیسترها اجزای مهمی در فرآیند آب‌شیرین‌سازی حرارتی نظیر تبخیر چندمرحله‌ای هستند. عملکرد دمیسترها با بازده جداسازی قطرات و اُفت فشار گاز ارزیابی می‌شود. مشخصه اصلی دمیسترهای شبکه سیمی، اُفت فشار پایین، راندمان جداسازی بالا، داشتن هزینه سرمایه منطقی، ظرفیت بالا، سایز کوچک و عمر سرویس طولانی آنها است [1]. مطالعات پیشین روی دمیسترها را می‌توان به دو حوزه اصلی کارهای آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی تقسیم نمود. //دسوک و همکاران [2]، مطالعه آزمایشگاهی جامعی را جهت ارزیابی عملکرد دمیسترهای شبکه سیمی انجام دادند. کارایی دمیستر با فاکتورهایی نظیر راندمان جداسازی قطرات مایع، اُفت فشار بخار دمیستر در حالت مرطوب و سرعت‌های بارگذاری و سیلابی‌شدن ارزیابی شد. این متغیرها به‌عنوان تابعی از سرعت بخار (۹۸/۰ تا ۷۵/۷ متر بر ثانیه)، چگالی فشرده‌گی (۸۰/۳۱ تا ۲۰۸/۱۶ کیلوگرم بر متر مکعب)، ضخامت لایه‌ها (۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر)، قطر سیم (۲/ تا ۳۲/۰ میلی‌متر) و قطر قطرات به‌دام‌افتاده (۱ تا ۵ میلی‌متر) اندازه‌گیری شدند. ستکیو و همکاران [3]، توزیع به‌دام‌افتادن مایع، اُفت فشار، راندمان جداسازی و مشخصات جدایش قطرات را در شش نوع مختلف از دمیسترهای شبکه سیمی به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. وضعیت به‌دام‌افتادن مایع حداقل در پنج نقطه از درون شبکه ثبت شد. توزیع به‌دام‌افتادن قطرات مایع درون صفحات شبکه نسبت به زمان مورد بررسی قرار گرفت. همچنین آنها راندمان جداسازی و توزیع اندازه قطرات را نیز مورد مطالعه قرار دادند. جاناجره و همکاران [4]، جریان بخار آب را در یک اتاقک تبخیر از تبخیرکننده چندمرحله‌ای به‌صورت عددی شبیه‌سازی نمودند و اُفت فشار در جریان گذرا از دمیستر را با روش‌های عددی به‌دست آوردند. آنها سرعت اولیه بخار در مرز ورودی را یکنواخت در نظر گرفتند. همچنین دمیستر به‌عنوان یک محیط متخلخل و جریان بخار آب به‌صورت تک‌فاز در بررسی آنها در نظر گرفته شد. کوهی کمالی و همکاران [5]، اثرات هندسه و شرایط عملکردی را بر اُفت فشار و راندمان جداسازی دمیسترهای شبکه سیمی، به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. اثرات متغیرهای گوناگونی مثل سرعت بخار (۱ تا ۲۰ متر بر ثانیه)، چگالی فشرده‌گی (۱۰۰ تا ۲۵۰ متر مکعب بر ثانیه)، ضخامت دمیستر (۲۰۰ تا ۳۰۰ سانتی‌متر)، قطر سیم (۱/ تا ۳/۰ میلی‌متر)، قطر قطرات به‌دام‌افتاده (۱ تا ۳ میلی‌متر) و هندسه سیم‌ها روی راندمان جداسازی دمیستر و اُفت فشار جهت ارزیابی کارایی آنها مورد مطالعه قرار گرفت. لیبو و همکاران [6]، یک طرح جدید ترکیبی را که شامل میله‌هایی به‌عنوان دمیستر شبکه سیمی و صفحاتی به‌عنوان دمیستر زیگزآگی جهت استفاده در فرآیند آب‌شیرین‌کن‌سازی چندمرحله‌ای را به‌صورت تجربی و عددی ارزیابی نمودند. در مقایسه با هر یک از

آزمایشگاهی آن در دسترس بود را انتخاب نمودند و قطرات آب را درون کانال به هوا تزریق کردند. گزینه‌های متعددی در حین حل عددی بررسی و پیشنهاد شد و در نهایت ترکیب مناسبی از تنظیمات برای حلگر عددی مورد استفاده قرار گرفت. *ونکاتسان* و همکاران^[13]، به تحلیل رگرسیون با استفاده از روش حداقل مربعات پرداختند تا روابطی برای توابع هدفی چون ضریب اصطکاک و راندمان جداسازی در یک دمیستر زیگزاگی منحنی‌شکل که در شیرین‌سازی آب دریا استفاده می‌شود، ارائه کنند. آنها از الگوریتم تاگوچی همراه با تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی که پیشتر توسط خودشان انجام شده بود، جهت انتخاب پارامترهای هندسی بهینه در یک دمیستر زیگزاگی منحنی استفاده کردند. آنها با استفاده از تقریب‌ها و تکنیک‌های آماری فاکتورهای مهم و کنترل‌کننده ضریب اصطکاک و راندمان جداسازی را تشخیص دادند. *گوان* و همکاران^[14]، یک مدل دمیستر زیگزاگی ساختند تا نحوه پراکندگی قطرات آن را مورد بررسی قرار دهند. نتایج این شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی منتشرشده مقایسه و اعتبارسنجی شد. جریان گاز و قطرات آب به‌صورت کوپل یک‌طرفه بررسی شدند تا حرکت قطرات و اثر سرعت گاز و قطر قطرات روی راندمان جداسازی مطالعه شود. همچنین به‌هم پیوستن قطرات جهت بررسی راندمان کلی جداسازی مدل در نظر گرفته شد. آنها یافتند که هر چه به‌هم پیوستن قطرات بیشتر شود، راندمان جداسازی بهبود خواهد یافت، مخصوصاً برای قطراتی با قطر کوچک که جداسازی آنها به مساله جدی در دمیسترها تبدیل شده است. *کوپمن* و همکاران^[15]، مدل‌های تحلیلی جهت پیش‌بینی راندمان جداسازی در دمیسترهای زیگزاگی را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج آن را با داده‌های آزمایشگاهی دو مدل متفاوت هندسی از دمیسترهای زیگزاگی مقایسه نمودند. توانایی پیش‌بینی راندمان جداسازی، فرآیند طراحی را برای آنها ساده کرد، به‌ویژه اینکه تحقیقات تحلیلی منجر به شناسایی مهم‌ترین پارامترهای هندسی و فیزیکی می‌شود و می‌تواند میزان توزیع آنها را نیز سنجش کند. *کریمی* و *کوهی‌کمالی*^[16]، به بررسی عددی و آزمایشگاهی تاثیر رژیم برخورد قطره با سطح بر عملکرد جداسازی قطره‌های آب از هوا در دمیستر زیگزاگی پرداختند. آنها با تمرکز بر رژیم برخورد جریان در نزدیک سطح، تاثیر پارامترهای جریان و هندسه پره را بر راندمان جداسازی و اُفت فشار بررسی نمودند. همچنین نتایج حلگر عددی با داده‌های آزمایشگاهی را اعتبارسنجی کردند. نتایج نشان داد، با افزایش سرعت جریان گاز راندمان جداسازی کاهش خواهد یافت. همچنین آنها یافتند با افزایش زاویه راس پره، اُفت فشار جریان افزایش خواهد یافت.

این پژوهش نیز به بررسی عملکرد دمیسترهای شبکه سیمی به روش آزمایشگاهی و عددی خواهد پرداخت. تغییرات در هندسه و یا تعویض مواد سازنده دمیسترها عامل مهمی در موضوع کاهش هزینه‌ها است که بررسی خواهد شد. همچنین مطالعات امکان‌سنجی جهت بررسی امکان جایگزینی دمیسترهای پلاستیکی

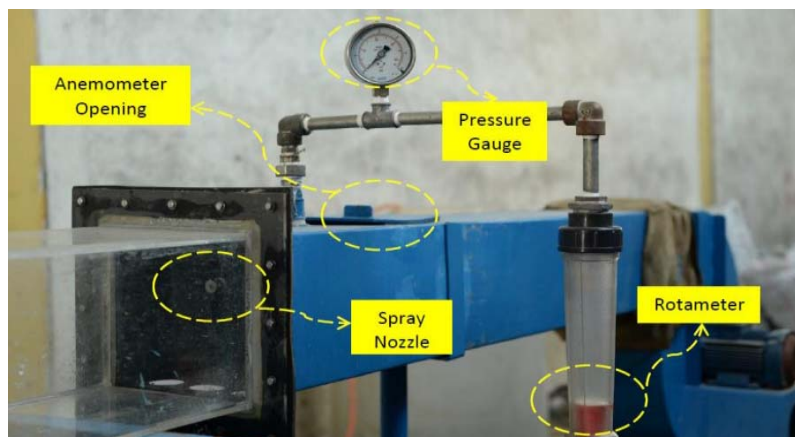
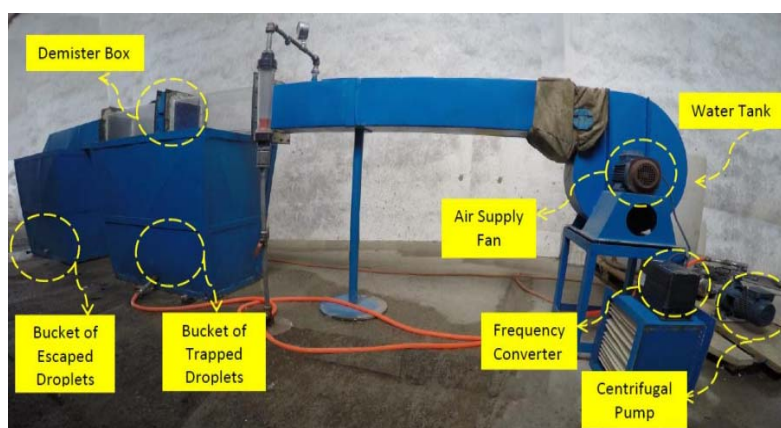
دمیسترهای شبکه سیمی و زیگزاگی به‌طور جداگانه، دمیستر ترکیبی راندمان جداسازی بالاتری داشته و کمترین نوسان را برای دامنه وسیعی از سرعت‌های گاز به‌همراه داشته است. همچنین دمیستر ترکیبی اُفت فشار حالت خشک بیشتری داشته اما در کاربردهای صنعتی این موضوع قابل پذیرش است. *یائو* و همکاران^[7]، به بررسی اثر تعداد لایه‌ها و سوراخ‌ها بر عملکرد دمیسترهای سیمی که به شکل منظمی روی هم قرار گرفته‌اند، پرداختند و اُفت فشار، سرعت سیلابی‌شدن و راندمان انتقال جرم دو نوع دمیستر را بررسی نمودند. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که افزایش تعداد لایه‌های شبکه سیمی می‌تواند راندمان انتقال جرم را در دمیسترهای روی هم قرارگرفته بهبود بخشد اما ظرفیت جذب قطرات آب را کاهش دهد. از طرف دیگر، افزایش اندازه سوراخ‌های روی سطح دمیستر می‌تواند ظرفیت جذب قطرات آب را بهبود ببخشد ولی راندمان انتقال جرم را کاهش دهد. *فولچ* و همکاران^[8]، از مدل اوپلری- لاگرانژی (دوبعدی و پایدار) جهت شبیه‌سازی جریان بخار آب و قطرات آب شور در دمیستر استفاده نمودند. دامنه محاسباتی شامل فضای بخار در پایین دمیستر، فضای بخار در بالای دمیستر، و دمیستر بوده که ناحیه مربوط به دمیستر به‌صورت دسته لوله مدل شد. تحلیل حساسیت مدل آنها نشان داد، سرعت بخار به‌عنوان پارامتر اصلی بر عملکرد دمیستر تاثیر می‌گذارد. مدل ارائه‌شده با داده‌های یک کارخانه واقعی آب‌شیرین‌کن‌سازی و همچنین اطلاعات موجود در تحقیقات پیشین اعتبارسنجی شد. *حامدی/ستخرسر* و همکاران^[10]، به بررسی عددی اثر تعداد خم‌ها و طول مسیر خم‌های موجی‌شکل بر راندمان جداسازی و اُفت فشار در یک دمیستر زیگزاگی با کانال تخلیه پرداختند. ترکیبی از روش اوپلری- لاگرانژی با مدل اثر متقابل جریان‌های گردابی، برای شبیه‌سازی پراکندگی قطرات در جریان گازی آشفته به‌کار گرفته شد. آنها نتایج شبیه‌سازی عددی را با داده‌های آزمایشگاهی موجود، جهت اعتبارسنجی مقایسه نمودند. آنها مدل انتقال تنش رینولدز را جهت شبیه‌سازی جریان آشفته هوا به‌کار گرفتند. *ژائو* و همکاران^[10]، با استفاده از نتایج یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی، رابطه‌ای میان راندمان جداسازی و پنج پارامتر هندسی در شرایط عملیاتی به‌دست آوردند. نتایج نشان داد که نه‌تنها فاصله بین پرها و سرعت جریان گاز، بلکه ارتفاع پرها و زوایای چرخش آن اثر بیشتری بر میزان راندمان جداسازی دمیسترهای زیگزاگی دارند. *نریمانی* و *شاه‌حسینی*^[11]، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، راندمان دمیسترهای زیگزاگی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که وابستگی قابل توجهی میان راندمان جداسازی پرها با سرعت گاز و پارامترهای هندسی آنها وجود دارد. *ونکاتسان* و همکاران^[12]، بررسی‌های عددی روی دمیسترهای زیگزاگی با استفاده از ابزارهای دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند تا روش‌های محاسباتی به‌کارگرفته‌شده اخیر را ارزیابی و اعتبارسنجی نمایند. آنها یک دمیستر زیگزاگی منحنی‌شکل را که داده‌های

آب درون کانال از طریق یک پمپ سانتریفیوژ تامین شده و به‌وسیله یک نازل پاشش‌کننده در سرتاسر کانال تزریق می‌شود. دبی آب به‌وسیله یک روتامتر شناور اندازه‌گیری می‌شود. یک گیج‌فشار برای اندازه‌گیری فشار آب ورودی به دهانه نازل پاشش آب در نظر گرفته شد. صفحات دمیستر همگی درون یک جعبه با عرض ۱۰۰ میلی‌متر قرار گرفتند که این بخش شفاف بوده تا امکان بازرسی دیداری از عملکرد دمیسترها را فراهم آورد. قطرات آبی که از صفحات شبکه سیمی عبور می‌کنند و در پشت جعبه دمیستر روی کانال جاری می‌شوند، در یک سطل مدرج جمع‌آوری شده و بدین ترتیب می‌توان میزان جریان خروجی آب رده‌شده از صفحات دمیسترها را اندازه‌گیری نمود. برای اندازه‌گیری میزان افت فشار، از یک نشان‌گر عقربه‌ای و لوله‌های پیتوت نصب‌شده در منطقه ورودی به جعبه دمیستر و خروجی از آن استفاده می‌شود. در این آزمایشات حالت پایدار، حالتی است که میزان جریان قطرات آب عبورکرده از جعبه دمیستر و راه‌یافته به سطل مدرج جمع‌آوری با زمان تغییر نکند و در حین فرآیند اندازه‌گیری ثابت بماند. پس از رسیدن به حالت پایدار، در مدت‌زمان ۲ دقیقه، میزان جریان آب خروجی رده‌شده از دمیسترها، جهت محاسبه بازده جداسازی قرار می‌گیرد. دو نوع دمیستر فلزی (فولاد زنگ‌نزن) و پلاستیکی (پلی‌اتیلن چگالی بالا)، مورد آزمون واقع شد که در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند.

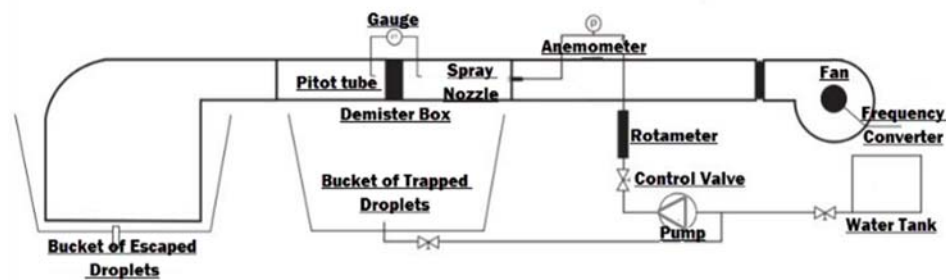
دستگاه آزمایش و روش انجام آزمون‌ها

مدل آزمایشگاهی یک واحد آزمون دمیستر شبکه سیمی، جهت اندازه‌گیری دقیق پارامترها، طراحی و ساخته شد. دستگاه آزمایش جهت آزمون در حالت جریان گاز افقی گذرنده از روی لایه‌های عمودی دمیستر طراحی شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. در سیستم‌های طراحی‌شده، فاز گازی هوا بوده و قطرات آب به‌عنوان فاز مایع به‌دنبال جریان هوا کشیده می‌شوند. شکل ۲ شماتیک کلی دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد که شامل تجهیزات سیستم است. این سیستم شامل یک کانال از جنس کربن‌استیل گالوانیزه‌شده، یک کانال شفاف از جنس پلکسی‌گلاس، یک دمنده تامین هوا، پمپ گردش آب، دمیستر شبکه سیمی، یک نازل جهت توزیع قطرات آب، یک اینورتر (مبدل فرکانس) و یک تانک آب است. بخش شفاف کانال دارای سطح مقطع ۲۵۰×۲۵۰ و طول ۷۰۰ میلی‌متر است.

قطرات آب از طریق یک نازل پاشش‌کننده از بالادست و به شکل مخروطی پراکنده و درون کانال تزریق می‌شود. یک دمنده شعاعی جهت تامین جریان هوای لازم مورد استفاده قرار گرفته که مجهز به یک مبدل فرکانس جهت تغییر و تنظیم دور چرخش است. سرعت جریان هوا به‌وسیله یک بادسنج دستی اندازه‌گیری می‌شود.



شکل (۱) نمایی از دستگاه آزمایشگاهی و اجزای تشکیل‌دهنده سیستم



شکل ۲) شماتیک بستر آزمایشگاهی جهت آزمون در حالت جریان گاز افقی گذرنده از روی لایه‌های عمودی دمیستر



(ب)



(الف)

شکل ۳) انواع دمیسترهای مورد بررسی؛ الف) شبکه سیمی فلزی، ب) شبکه سیمی پلاستیکی

مقادیر، مبنای محاسبات بازده قرار گرفت. کلیه پارامترهای آزمایش، نظیر دبی جریان ورودی و خروجی و اختلاف فشار روی یک فایل اکسل ثبت شده و این فایل به‌صورت اتوماتیک بازده جداسازی و افت فشار را محاسبه نمود. چنان‌چه خطای بیشتر از ۵٪ در نتایج مشاهده می‌شد، اطلاعات به‌دست‌آمده حذف، و آزمایش تکرار می‌شد.

روش حل عددی

معادلات حاکم و شرایط مرزی

شبیه‌سازی عددی جهت مطالعه بازده جداسازی و افت فشار با استفاده از روش حجم محدود در نرم‌افزار انسیس فلوئنت انجام شد. محاسبات شبیه‌سازی بر پایه فرضیات زیر صورت گرفته است:

- ۱- ارتفاع لایه‌های دمیستر بسیار بیشتر از قطر سیم‌ها است و شبیه‌سازی به‌صورت دوبعدی است.
 - ۲- به‌دلیل سرعت جریان هوای پایین، فرض تراکم‌ناپذیر بودن جریان هوا صحیح است.
 - ۳- قطرات آب پس از برخورد با میله‌ها به سرعت جمع شده و از میدان حل خارج می‌شوند.
- مدل فاز گسسته، رویکرد اویلری- لاگرانژی را دنبال می‌کند. هوا به‌عنوان فاز پیوسته با حل معادلات ناویر- استوکس تحلیل می‌شود. در حالی که قطرات آب به‌عنوان فاز گسسته با ردیابی تعداد زیادی از قطرات در میدان جریان، تحلیل و محاسبه می‌شود. فرض پایه‌ای این مدل این است که کسر حجمی فاز گسسته بسیار

خصوصیات هندسی دمیسترهای شبکه سیمی در جدول ۱ مشخص شده است. دمیسترها در فاصله ۹۵۰ میلی‌متری جلوی نازل پاشش آب، درون کانال قرار گرفته‌اند. قطر سیم دمیسترها ۳/۰٪ و ۱/۹ میلی‌متر بود. برای رسیدن به چگالی فشردگی مورد نظر می‌توان هر تعداد از این لایه‌ها را کنار هم قرار داد.

جدول ۱) پارامترهای هندسی و ابعاد دمیستر شبکه سیمی پلاستیکی و فلزی

پارامترها	دمیستر شبکه سیمی	
	فلزی	پلاستیکی
ابعاد شبکه (mm)	۷/۸×۷/۸	۱۷/۵×۱۷/۵
قطر سیم (mm)	۰/۳	۱/۹
وزن صفحه (g)	۳۰	۲۲

چگالی فشردگی به‌عنوان یک پارامتر مهم مورد بررسی قرار گرفت. این پارامتر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(۱) \quad \text{چگالی فشردگی} = \frac{\text{جرم هر لایه شبکه سیمی} \times \text{تعداد لایه ها}}{\text{حجم دمیستر}}$$

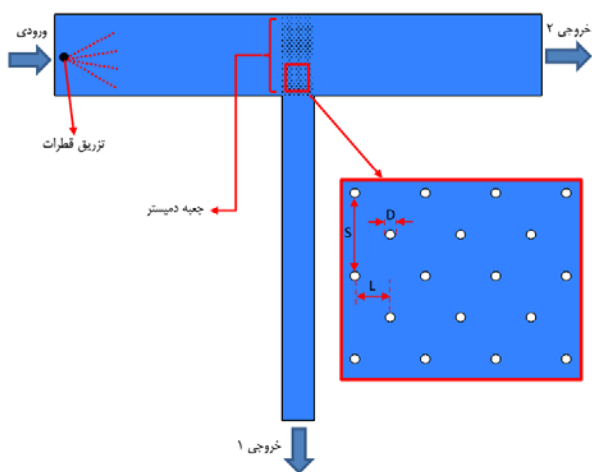
چگالی فشردگی در آزمایشات، ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بود. میزان جریان آب از طریق یک شیر کنترل‌شده و دبی آب پاشش‌شده به درون کانال ۹۵/۰ متر مکعب بر ساعت بوده و در کلیه آزمایشات ثابت است. سرعت جریان هوا به‌عنوان یک متغیر در محدوده ۶ تا ۱۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. آزمایشات در دمای محیط و فشار اتمسفر انجام شد. جمع‌آوری اطلاعات و اندازه‌گیری‌ها برای هر آزمون حداقل سه بار تکرار شد و میانگین

$$f_\mu = 0.09 \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad (13)$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

معادلات جهت رسیدن به همگرایی سریع، با الگوریتم SIMPLE حل شده‌اند. برای گسسته‌سازی معادلات با دقت نسبی بالا از روش تقریب بالادست درجه دوم استفاده شده است. از مدل DRW برای پیش‌بینی پراکندگی ذرات ناشی از آشفتگی فاز پیوسته استفاده شده است. توضیح این مدل و سایر پارامترها در راهنمای نرم‌افزار انسیس فلوئنت موجود است [17]. در ورودی سرعت جریان هوا یکنواخت است و سرعت قطرات آب نیز به همین میزان است. نرخ جریان جرمی مایع ورودی ۲۶۳/۰ کیلوگرم بر ثانیه است. فشار خروجی، فشار اتمسفر است. در مدل دو معادله‌ای $k - \varepsilon$ ، برای افزایش دقت محاسبات از مدل بهبود رفتار دیواره (EWT) جهت بررسی جریان سیال کنار دیواره، استفاده شد. برای استفاده از این مدل باید مش روی دیواره به اندازه کافی ریز باشد و به عبارت دیگر مقدار مناسب y^+ برای این مدل باید از مرتبه ۱ باشد. مدل‌سازی مسیر حرکت قطرات آب با در نظر گرفتن شکست و چسبندگی ذرات در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی شکست ذرات از مدل WAVE که برای اعداد وبر پایین مناسب‌تر است، استفاده شد. ذرات آب به صورت گروهی از یک نقطه به مختصات نازل اسپری در دستگاه آزمایش، به درون دامنه حل تزریق می‌شوند. طبق مشاهدات آزمایشگاهی، قطر قطرات آب، حدود ۵۰٪ تا ۲۰۰ میلی‌متر بوده و قطرات با سرعت مطلق ۶ تا ۱۰ متر بر ثانیه و دامنه ۶۰ درجه تزریق می‌شوند.

شرط مرزی در ورود به صورت سرعت ثابت با توجه به سرعت جریان هوا در نظر گرفته شد و مشابه دستگاه آزمایش دو مرز خروجی مدل شد. دیواره‌های کانال، دیوار با شرط عدم لغزش است که در صورت برخورد قطرات، آنها را بازگشت می‌دهند (Reflect). شبکه‌های سیمی که به صورت دایره‌های دوطبقه در بخش دمیستر به صورت نامنظم پخش شده‌اند، دیوار با شرط (Trap) در نظر گرفته شده‌اند. مدل هندسی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴) دامنه حل و شرایط مرزی

کمتر از فاز پیوسته باشد. میدان جریان به صورت دوطبقه، گذرا و آشفته فرض شده است. شبیه‌سازی به صورت کوپل دوطرفه است چون فاز گسسته بر روی فاز پیوسته تاثیر می‌گذارد. سرعت فاز گسسته با نوشتن معادله تعادل نیروهایی که بر قطره وارد می‌شود، پیش‌بینی می‌شود. معادله حرکت قطرات آب به صورت زیر است:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (2)$$

u سرعت فاز هوا، u_p سرعت ذره، F عبارت نیروی اضافی بر واحد جرم ذره ناشی از گرادیان فشار، نیروی براونین، جرم مجازی و غیره) و $F_D(u - u_p)$ نیروی درگ بر واحد جرم است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \cdot \frac{C_D Re}{24} \quad (3)$$

C_D ضریب درگ، μ گرانروی دینامیکی هوا، ρ چگالی هوا، ρ_p چگالی قطرات آب و d_p قطر قطره آب است. Re عدد رینولدز نسبی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (4)$$

معادلات بقای جرم و ممنتوم به صورت زیر استخراج می‌شوند:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + S_{x_i} \quad (6)$$

$$\tau_{ij} = -\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (7)$$

t زمان، x_i مختصات کارتزین ($i=1, 2$)، u_i مولفه‌های سرعت در جهت x_i ، ρ چگالی، g_i شتاب جاذبه در جهت x_i ، τ_{ij} مولفه‌های تانسور تنش، P فشار، S عبارت چشمه ناشی از تاثیر ذرات (فاز گسسته) روی فاز پیوسته، $\bar{u}_i$ نوسان سرعت حول سرعت متوسط $\bar{u}$ و عبارت $\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j$ به عنوان تنش رینولدز است و با استفاده از سرعت متوسط نسبت به گرانروی گردابی در جریان آشفته تعریف می‌شود:

$$-\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (8)$$

k انرژی جنبشی، ε نرخ اتلاف آشفتگی و μ_t گرانروی آشفتگی است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_t = c_\mu \frac{f_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

f_μ و c_μ ثابت‌های تجربی هستند. معادلات برای انرژی جنبشی و نرخ تلفات جریان آشفته به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + P_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (10)$$

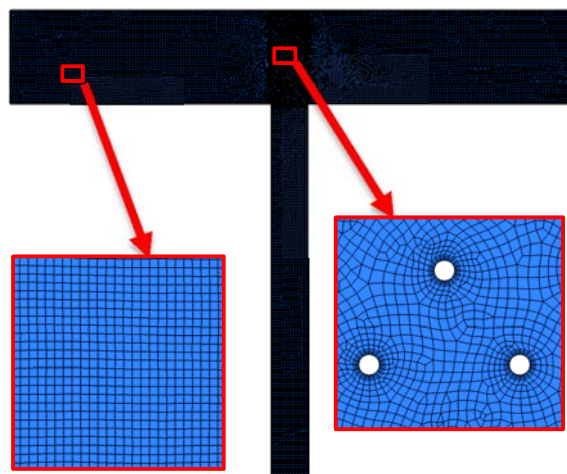
$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_t \frac{\varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (11)$$

S_k و S_ε عبارات چشمه برای انرژی جنبشی و نرخ تلفات جریان آشفته ناشی از تاثیر فاز گسسته روی فاز پیوسته. P_k به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_k = \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (12)$$

مقادیر ثابت تجربی در مدل $k - \varepsilon$ به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

توزیع Y^+ بر روی سیم‌های دمیستر در نمودار ۱- الف نشان داده شد که با توجه به مدل آشفتگی و تابع دیواره انتخاب شده، مقدار مناسبی دارد و از مرتبه ۱ است. این نمودار برای دمیستر با چگالی فشردگی ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه ترسیم شده است که نشان می‌دهد انتخاب ضخامت لایه اول 0.2 میلی‌متر مناسب است. بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی، در چهار اندازه مختلف با ضخامت لایه مرزی برابر و اندازه شبکه متفاوت بر روی سیم‌های دمیستر انجام شده است. نمودار ۱- ب استقلال نتایج از مش را برای میزان افت فشار کانال نشان داده است. همان طور که مشخص است، استفاده از شبکه 0.2 و 0.7 میلی‌متر نتیجه افت فشار یکسانی دارند که برای کاهش حجم محاسبات در ادامه از مش با اندازه 0.2 میلی‌متر بر روی سیم‌های شبکه استفاده خواهد شد.

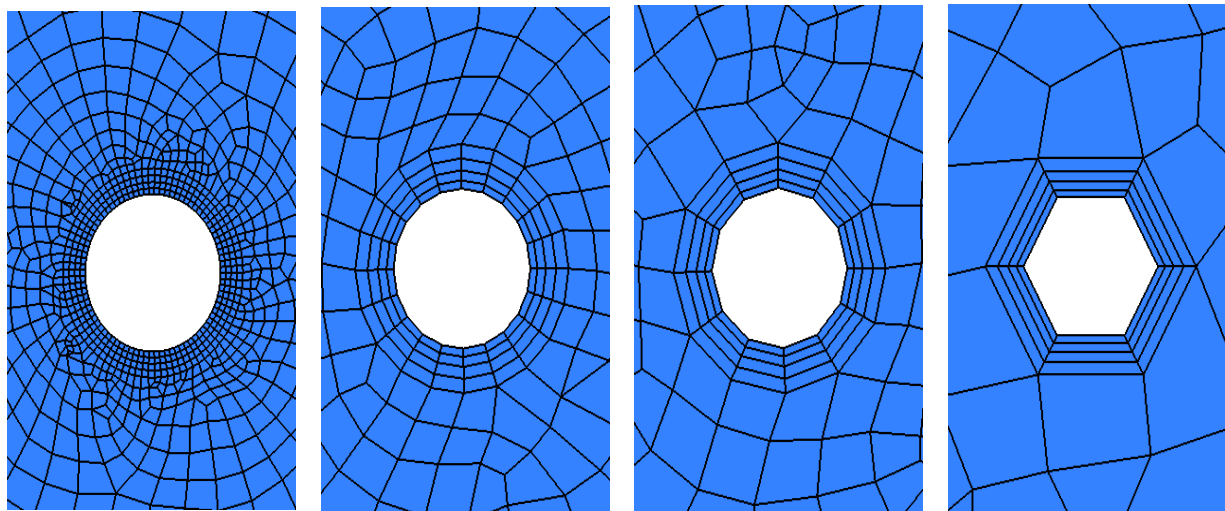


شکل ۵) نمایش شبکه‌بندی میدان محاسباتی

پارامترهای هندسی S ، D و L به ترتیب قطر سیم، اندازه شبکه و فاصله صفحات است که در جدول ۱ براساس جنس ارایه شده است. مقدار L وابسته به چگالی فشردگی است و براساس رابطه ۱ می‌توان تعداد صفحات و فاصله آنها از یکدیگر (L) را تعیین کرد. گام زمانی و تعداد تکرار در هر گام زمانی به ترتیب 0.0005 و 40 در نظر گرفته شد تا مقدار باقی‌مانده برای معادلات مومنتوم، پیوستگی و آشفتگی به ترتیب برابر از مرتبه 10^{-6} ، 10^{-5} و 10^{-6} به دست آید.

با توجه به وجود انحنای زیاد در محل سیم‌ها، دامنه حل نیازمند شبکه‌بندی با اندازه بسیار ریز است. از طرفی به جهت افزایش دقت در حل عددی سعی شد تا اندازه کوچک‌ترین مش شبکه از اندازه بزرگ‌ترین قطر ذره بیشتر نشود. با لحاظ این شرط می‌توان اطمینان حاصل کرد که هر ذره حداقل یک بار در هر سلول شبکه حل خواهد شد. همچنین با توجه به جریان آشفته در مدل‌سازی، جهت افزایش دقت و حساسیت بایستی بر روی سیم‌های دمیستر از مش لایه مرزی استفاده شود. با توجه به فضای موجود بین لایه‌های دمیستر از تعداد چهار لایه با ضخامت لایه اول 0.2 میلی‌متر استفاده شده است تا بتوان از این شبکه برای مدل‌سازی قطرات با حداکثر اندازه 200 میکرون نیز استفاده کرد. در شکل ۵، شبکه‌بندی دامنه حل و استفاده از مش لایه مرزی بر روی سیم‌های دمیستر نشان داده شده است.

همان طور که مشاهده می‌شود تا حد امکان از شبکه چهارضلعی استفاده شده است. در کل چهار اندازه مختلف 1 ، 0.5 ، 0.2 و 0.7 میلی‌متر در نظر گرفته شد که به ترتیب موجب تولید شبکه با 95927 ، 117456 و 247125 عدد مش، می‌شوند. شکل ۶، شبکه‌بندی از نمای نزدیک بر روی سیم را نشان می‌دهد.



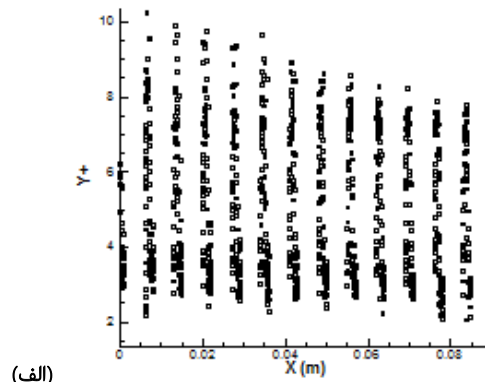
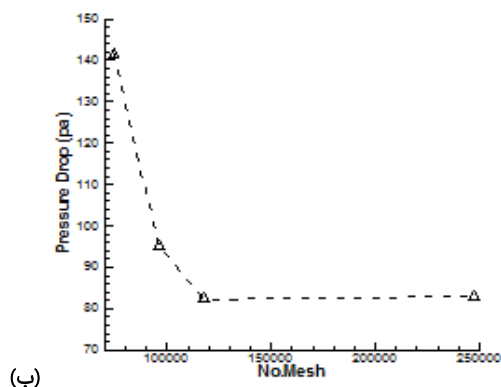
0.7 میلی‌متر

0.2 میلی‌متر

0.5 میلی‌متر

1 میلی‌متر

شکل ۶) نمایش شبکه‌های تولیدشده با اندازه‌های مختلف



نمودار ۱) بررسی کیفیت شبکه‌بندی با استفاده از: الف) پارامتر y^+ ، ب) استقلال نتایج از شبکه

شده و از جریان هوا جداسازی می‌شوند. و این دلیلی برای کاهش بازده جداسازی در سرعت‌های بالا است. نتایج آزمایشات نیز موید کاهش بازده جداسازی در افزایش سرعت هوا از ۶ به ۱۰ متر بر ثانیه هستند. همچنین با افزایش چگالی فشردگی شاهد افزایش بازده جداسازی در هر دو نوع دمیستر خواهیم بود. افزایش چگالی فشردگی با کاهش مساحت فضای آزاد برای عبور جریان متناسب است. کم‌شدن مساحت فضای آزاد برای عبور جریان به منزله افزایش امکان برخورد قطرات به سیم‌ها و در نتیجه به‌دام‌افتادن قطرات بیشتر و افزایش بازده جداسازی است. نتایج آزمایشات نیز موید افزایش بازده جداسازی در افزایش چگالی فشردگی از ۵۰ به ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب هستند. نکته دیگر اینکه بازده جداسازی دمیستر پلاستیکی در چگالی‌های فشردگی پایین‌تر، نسبت به دمیستر فلزی بالاتر است در حالی که در چگالی‌های فشردگی بالاتر، بازده جداسازی در دمیس‌ترهای پلاستیکی و فلزی تقریباً نزدیک به هم هستند.

بررسی اثر سرعت هوا بر میزان اُفت فشار

میزان اُفت فشار در حالت خشک و بدون تزریق قطرات آب در جریان هوا به‌عنوان تابعی از چگالی فشردگی در سرعت‌های مختلف جریان هوا، در نمودارهای ۳- الف، ۳- ب و ۳- ج نشان داده شده است.

نتایج آزمایشات برای هر دو دمیستر نشان می‌دهد که اُفت فشار با افزایش سرعت هوا زیاد خواهد شد. همچنین با افزایش چگالی فشردگی تقریباً به‌طور متناسب، اُفت فشار نیز افزایش می‌یابد. برای دمیستر پلاستیکی، در چگالی فشردگی ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سرعت هوا ۱۰ متر بر ثانیه، ماکزیمم اُفت فشار ۳۶۰ پاسکال به‌دست آمده است. اُفت فشار غالباً به‌دلیل اشغال فضای آزاد جهت عبور جریان یا مانع‌شدن از عبور جریان است. بنابراین با افزایش چگالی فشردگی به‌دلیل اینکه فضای آزاد جهت عبور جریان هوا کاهش می‌یابد، بدیهی است که شاهد اُفت فشار بیشتری باشیم. به همین ترتیب با افزایش سرعت هوا، مقاومت نسبی میان لایه‌های دمیستر با جریان هوا و به‌دنبال آن درگ اصطکاکی و همچنین اُفت انرژی جنبشی در اثر تغییر مسیر جریان بیشتر شده و اُفت فشار نیز افزایش خواهد یافت.

ارایه نتایج آزمایشگاهی

اطلاعات مورد نیاز جهت ارزیابی دمیس‌ترها، شامل بازده جداسازی و اُفت فشار است تا مقایسه دقیقی در شرایط عملیاتی مشابه بین کارایی دمیس‌ترهای فلزی و پلاستیکی صورت پذیرد. بررسی این نتایج، تصمیم‌گیری را جهت به‌کارگیری دمیس‌ترهای پلاستیکی، با صرف هزینه‌های کمتر به‌جای دمیس‌ترهای فلزی آسان می‌نماید. بازده یک دمیستر به‌طور کلی، میزان کارایی دمیستر در به‌دام‌انداختن قطرات آب در حال عبور از آن بوده که این قطرات توسط جریان هوا حمل می‌شوند.

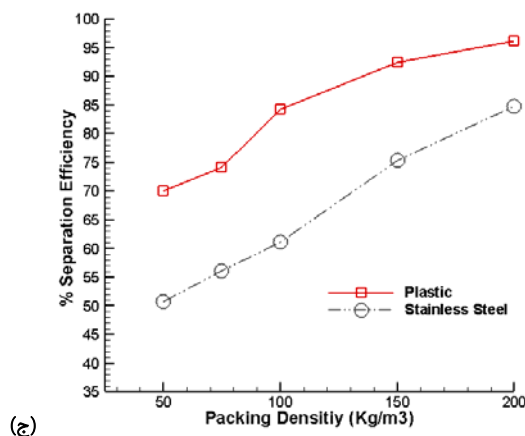
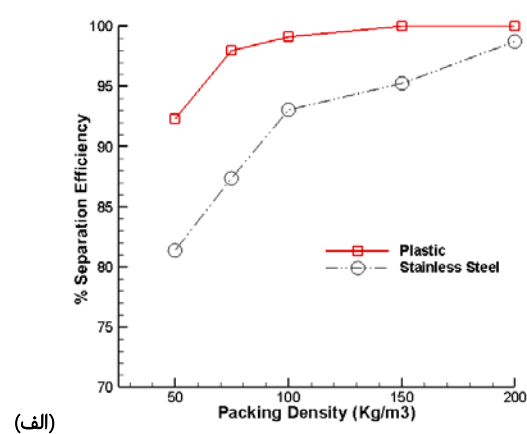
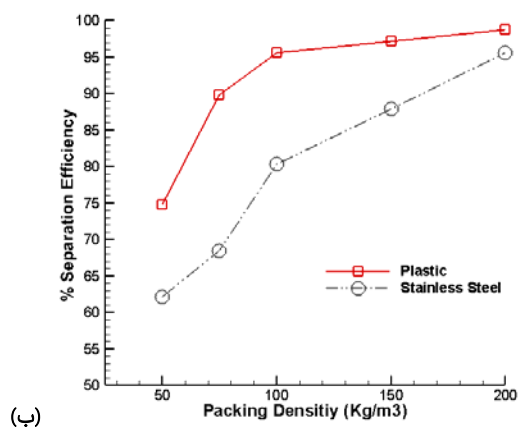
$$\eta = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} \times 100 \quad (۱۴)$$

در این رابطه، Q_{in} و Q_{out} به‌ترتیب میزان دبی حجمی قطرات آب ورودی به کانال و میزان دبی حجمی قطرات آب رده‌شده از جعبه دمیستر است که این اختلاف، بیان‌گر دبی حجمی قطرات آبی است که توسط دمیس‌ترها به‌دام نیفتاده است. همچنین میزان اُفت فشار در حالت خشک، که مجموع تلفات هد جریان گاز در اثر عبور از روی دمیس‌ترها است اندازه‌گیری می‌شود.

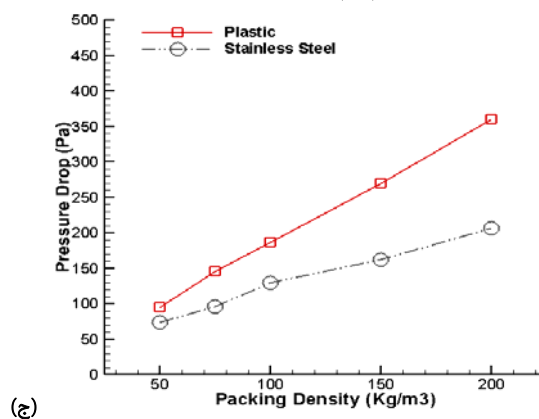
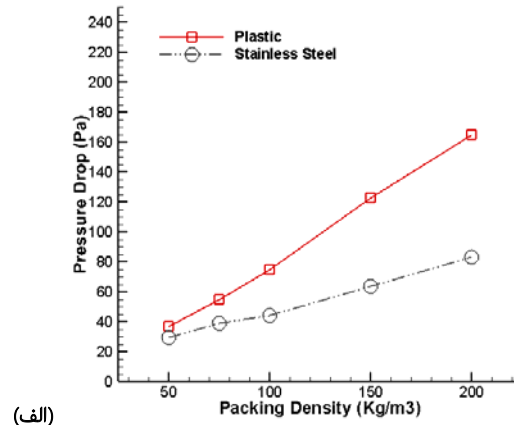
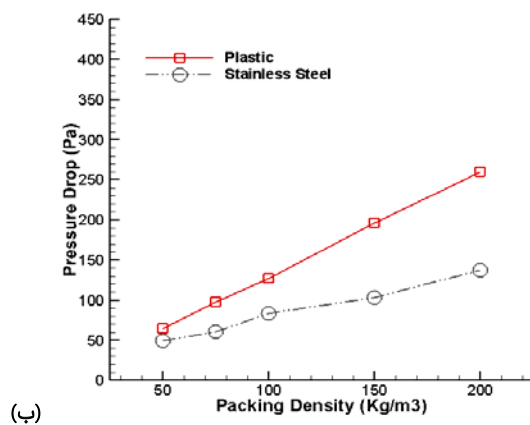
بررسی اثر سرعت هوا بر بازده جداسازی

بازده جداسازی به‌عنوان تابعی از چگالی فشردگی در سرعت‌های مختلف جریان هوا در نمودارهای ۲- الف، ۲- ب و ۲- ج نشان داده شده است. کلیه نتایج برای دو نوع دمیستر بیانگر یک روند مشابه هستند. نتایج حاصله بیشترین بازده جداسازی را در پایین‌ترین سرعت جریان هوا نشان می‌دهند، به‌گونه‌ای که با افزایش سرعت جریان هوا، شاهد کاهش بازده جداسازی خواهیم بود.

علت این پدیده این است که در سرعت‌های پایین‌تر، امکان به‌هم پیوستن قطرات با هم و تشکیل قطرات بزرگ‌تر، بیشتر خواهد بود. نیروی اینرسی قطرات بزرگ‌تر مهم‌ترین عامل کاهش تمایل این قطرات، برای همراهی‌کردن با جریان هوا بوده و منجر به جداشدن آنها و خروج از مسیر جریان اصلی است. وقتی سرعت هوا بیشتر می‌شود، انرژی لازم برای جداکردن قطرات آب از روی سیم‌های دمیستر تامین شده و قطرات آب از روی سیم‌های دمیستر جدا و مجدداً به‌دنبال جریان هوا کشیده شده و از کانال خارج می‌شوند. در این حالت تنها بخشی از قطرات روی سیم‌های دمیستر، تشکیل فیلم مایع داده و در اثر نیروی وزن به پایین صفحه دمیستر جاری



نمودار (۲) اثر سرعت هوا بر راندمان جداسازی به‌عنوان تابعی از چگالی فشردگی در دمپستر پلاستیکی و فلزی؛ الف) ۶، ب) ۸، ج) ۱۰ متر بر ثانیه



نمودار (۳) اثر سرعت هوا بر افت فشار به‌عنوان تابعی از چگالی فشردگی در دمپستر پلاستیکی و فلزی؛ الف) ۶، ب) ۸، ج) ۱۰ متر بر ثانیه

ارایه نتایج شبیه‌سازی عددی

اعتبارسنجی روش حل عددی

مهم‌ترین بخش هر مطالعه عددی، اعتبارسنجی آن است، لذا ابتدا اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی ارایه شده است. اعتبارسنجی برای بازده جداسازی و اُفت فشار دمیستر پلاستیکی انجام شد و نتایج آن در نمودار ۴ ارایه شده است. نتایج به‌دست‌آمده، نشان می‌دهند که شبیه‌سازی عددی در چگالی فشردگی ماکزیمم (۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) دارای دقت قابل قبول و در چگالی فشردگی حداقل (۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب) دارای خطایی است که با افزایش سرعت جریان هوا، درصد این خطا افزایش می‌یابد. به‌طوری که مشاهده می‌شود در بیشترین سرعت جریان هوا، خطای حل عددی تا ۲۰٪ نیز افزایش یافته است (نمودار ۴- الف). همچنین پیش‌بینی شبیه‌سازی عددی برای اُفت فشار در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، در چگالی فشردگی ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب خطایی کمتر از ۲٪ داشته و در چگالی فشردگی ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب خطایی حدود ۲۰٪ خواهد داشت (نمودار ۴- ب). دلیل این خطا در شبیه‌سازی عددی و اختلاف آن با نتایج آزمایشگاهی در پیش‌بینی میزان بازده جداسازی، در شکل ۷ نشان داده شده است.

در چگالی فشردگی حداقل، فیلم قطرات آب تشکیل‌شده روی شبکه دمیستر، به‌دلیل افزایش سرعت جریان هوا، از سطح صفحات دمیستر جدا شده و در اثر برخورد با صفحات بعدی، قطراتی با قطر کوچک‌تری را تشکیل داده که امکان جداسازی این قطرات نبوده و این قطرات مجدداً با جریان هوا همراه شده و از بین صفحات دمیستر خارج می‌شوند و این موضوع موجب کاهش بازده جداسازی می‌شود. در شبیه‌سازی عددی با توجه به عدم امکان مدل‌سازی این پدیده در حالت دوبعدی (تشکیل فیلم مایع روی میله‌های شبکه دمیستر و جدا شدن آن در اثر نیروی گرانش از میدان حل)، این اختلاف با نتایج آزمایشگاهی به‌وجود می‌آید. اما در چگالی فشردگی ماکزیمم، به‌دلیل تراکم بسیار زیاد صفحات، قطرات آب پس از برخورد با لایه‌های بعدی در نهایت به دام افتاده و از میدان حل خارج می‌شوند.

بررسی اثر قطر قطرات آب

با توجه به عدم امکان اندازه‌گیری دقیق قطر قطرات آب در مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی عددی تاثیر این پارامتر بر بازده جداسازی پرداخته شد. با افزایش قطر قطرات آب، امکان برخورد قطرات آب با صفحات دمیستر و به‌دام‌افتادن آنها توسط این صفحات بالاتر می‌رود. با توجه به نمودار ۵، با افزایش قطر قطرات از ۵٪ به ۲۰٪ میلی‌متر، در چگالی فشردگی ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، میزان بازده جداسازی برای دمیستر پلاستیکی، از ۱۴/۶ تا ۲۴/۶٪ افزایش یافته است. همچنین با افزایش قطر قطرات در چگالی فشردگی ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب نیز، بازده جداسازی برای دمیستر پلاستیکی از ۲۳/۲ تا ۳۶/۳٪ افزایش یافته که نشان می‌دهد افزایش قطر قطرات در چگالی‌های فشردگی بالا موثرتر بوده است.

همچنین با افزایش سرعت جریان هوا، درصد بهبود بازده جداسازی، رشد بیشتری خواهد داشت. بنابراین می‌توان گفت افزایش قطر قطرات در سرعت‌های بالاتر و چگالی‌های فشردگی بیشتر، موثرتر بوده و می‌تواند موجب افزایش بازده جداسازی تا میزان ۳۶/۳٪ شود. با توجه به اندازه‌گیری اُفت فشار در حالت خشک و بدون تزریق قطرات آب، بررسی پارامتر قطر قطرات بر میزان اُفت فشار موضوعیت نخواهد داشت.

شکل ۸ جهت نمایش توزیع قطرات آب در چگالی فشردگی ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب با قطرهای ۵٪ و ۲۰٪ میلی‌متر در دامنه حل ارایه شده است. با وجود اینکه در هر دو حالت سرعت جریان هوا یکسان است، قطرات آب با قطر ۵٪ میلی‌متر، در مسیر جریان هوا پخش شده و حرکتشان تابع مسیر جریان هوا بوده و شانس کمتری برای برخورد مستقیم با صفحات دمیستر داشته و بدون به‌دام‌افتادن توسط دمیسترها از میان آنها خارج می‌شوند. اما قطرات آب با قطر ۲۰ میلی‌متر، به‌دلیل داشتن وزن بیشتر و تاثیر بیشتر نیروی گرانش بر آنها، مستقل از مسیر جریان هوا و به‌طور آزادانه در کانال، مسیر خود را طی کرده و پس از برخورد با سیم‌ها به‌دام می‌افتند. بنابراین بازده جداسازی برای قطرات با قطر بیشتر، افزایش خواهد یافت.

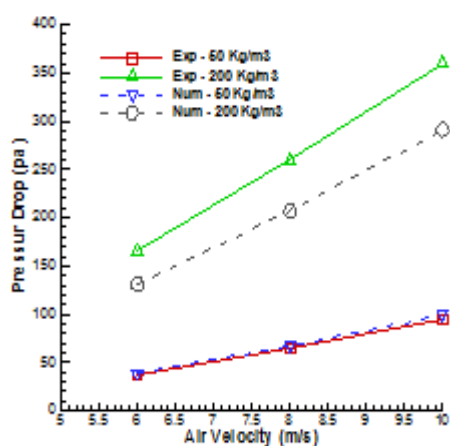
بررسی اثر چگالی فشردگی

در این بخش به‌منظور بررسی تاثیر چگالی فشردگی بر اُفت فشار و بازده جداسازی، دو چگالی فشردگی ۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در سرعت‌های جریان هوای ۶، ۸ و ۱۰ متر بر ثانیه برای دمیستر پلاستیکی و دو قطر قطره ۵٪ و ۲۰ میلی‌متر به‌صورت عددی شبیه‌سازی شده است (نمودار ۶). در بخش آزمایشگاهی، اثر چگالی فشردگی در سرعت‌های مختلف برای قطرات آب با قطر ۲۰ میلی‌متر بررسی شد و مشاهده شد که با افزایش چگالی فشردگی، بازده جداسازی افزایش می‌یابد که نتایج عددی نیز موید همین امر است. همچنین با افزایش سرعت جریان هوا، بازده جداسازی در هر دو چگالی فشردگی، کاهش یافته است که دلایل آن کاهش زمان ماندن قطرات آب در فضای میان دمیسترها و تشکیل‌نشدن فیلم مایع در اثر به‌هم نپیوستن قطرات آب به جهت سرعت بالا در بین لایه‌ها بوده و دلیل دیگر انرژی برخورد بیشتر در این حالت و شکسته‌شدن فیلم مایع و تشکیل قطراتی با قطر کوچک‌تر است که امکان به‌دام‌افتادن این قطرات بسیار کم است و هر دو پدیده منجر به کاهش بازده جداسازی خواهند شد. شبیه‌سازی عددی برای قطرات آب با قطر ۵٪ میلی‌متر نیز انجام شده که نتیجه جالبی به‌دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این حالت، با افزایش چگالی فشردگی، بازده جداسازی کاهش یافته است که این موضوع برخلاف نتیجه به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی قطرات آب با قطر ۲۰ میلی‌متر است.

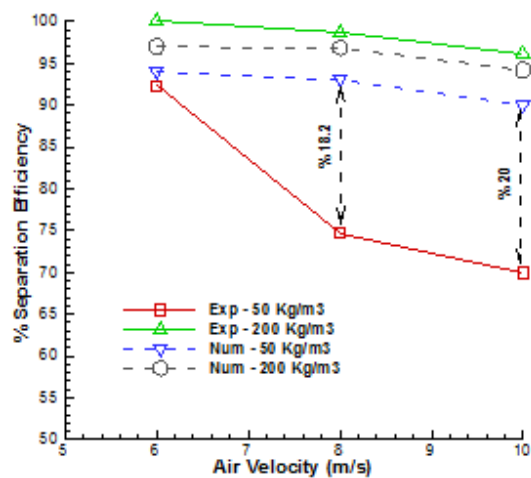
کانتور توزیع سرعت در دو چگالی فشردگی مختلف، در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در چگالی فشردگی ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سرعت در فضای بین

مسیر جریان هوا است و به‌طور مستقل حرکت نمی‌کنند. حال با توجه به این دو موضوع، می‌توان دلیل کاهش بازده جداسازی با افزایش چگالی فشردگی در قطر ۰/۵ میلی‌متر را پی برد.

سیم‌ها به مقدار قابل توجهی نسبت به چگالی فشردگی ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، افزایش یافته است. همچنین با توجه به توضیحات ارائه‌شده دریافتیم که مسیر حرکت قطرات با قطر کمتر، تابعی از



(ب)

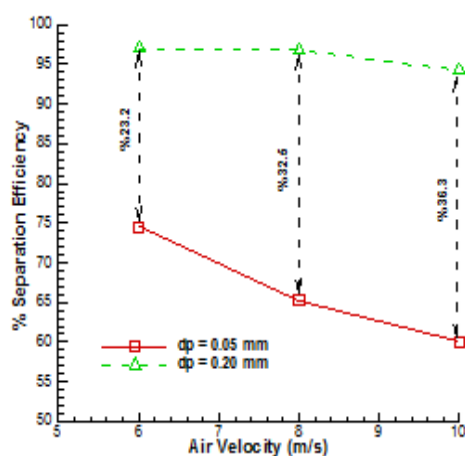


(الف)

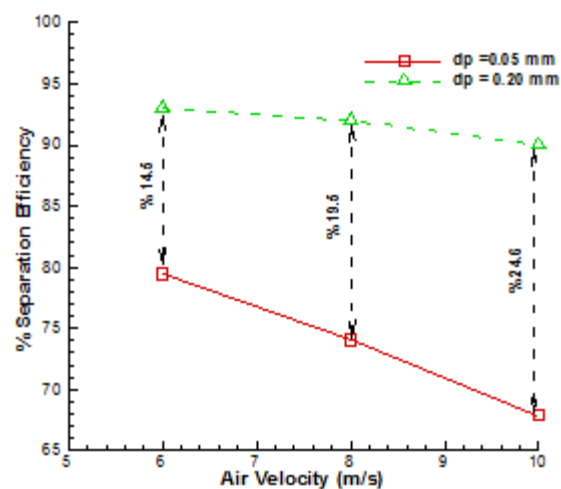
نمودار (۴) اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی: (الف) بازده جداسازی، (ب) افت فشار



شکل (۷) فرار قطرات آب از صفحات دمیستر پلاستیکی و فلزی در چگالی فشردگی پایین و سرعت جریان هوای بالا

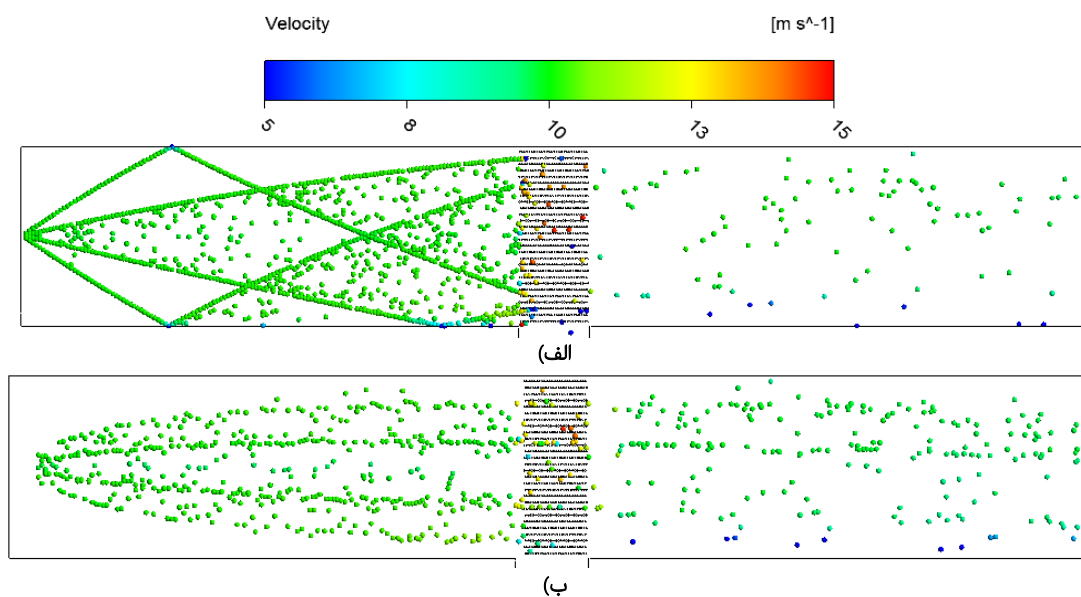


(ب)

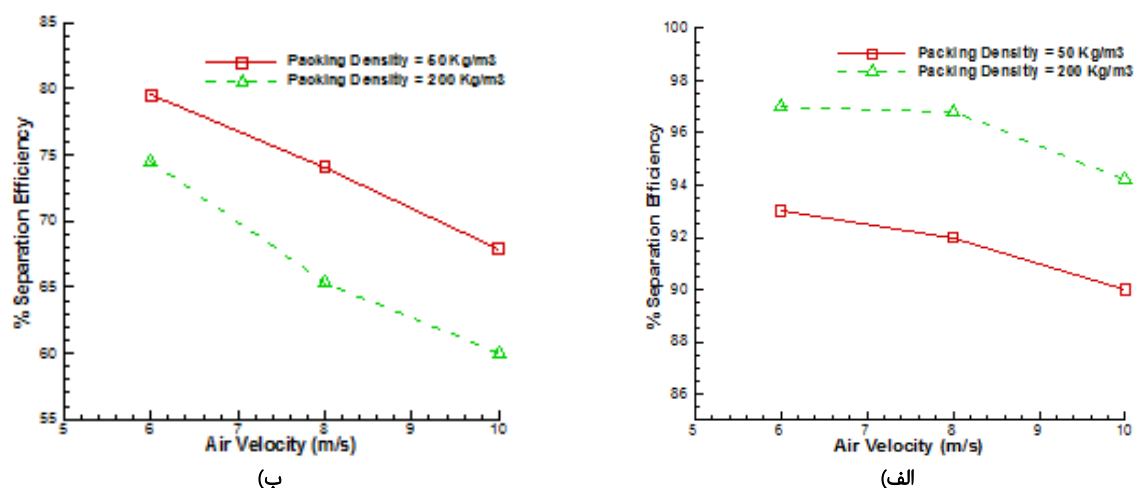


(الف)

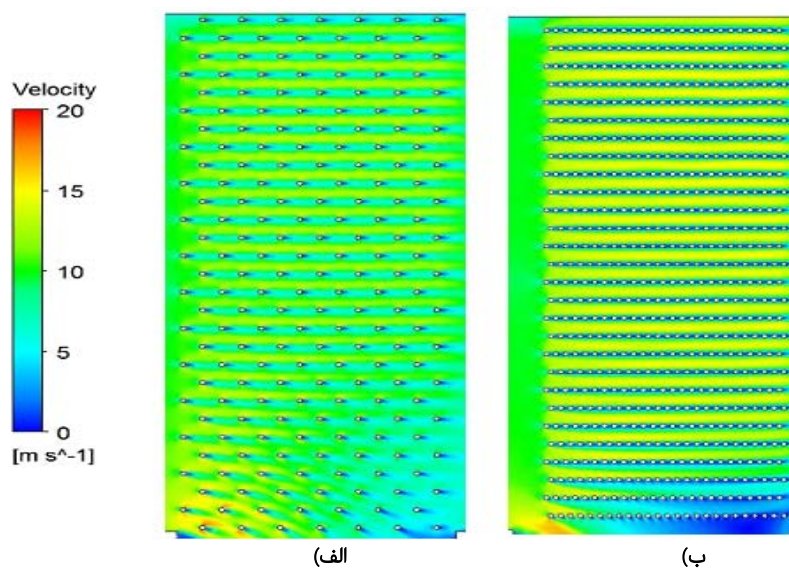
نمودار (۵) اثر قطر قطرات آب بر بازده جداسازی در سرعت‌های مختلف برای دمیستر پلاستیکی: (الف) چگالی فشردگی ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، (ب) چگالی فشردگی ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب



شکل ۸) نمایش توزیع قطرات آب در دامنه حل برای چگالی فشرده ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه قطر قطرات: الف) ۰/۵، ب) ۰/۲ میلی‌متر



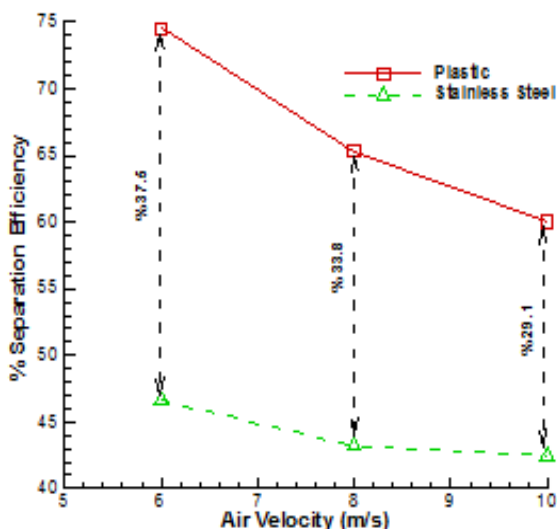
نمودار ۶) بررسی اثر چگالی فشرده بر بازده جداسازی در سرعت‌های مختلف و قطر قطرات آب: الف) ۰/۲، ب) ۰/۵ میلی‌متر



شکل ۹) کانتور توزیع سرعت ۱۰ متر بر ثانیه برای دو چگالی فشرده: الف) ۵۰، ب) ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب

فشار در کانال ایجاد شده است. جریان هوا برای عبور از این مقطع که اُفت بالایی دارد، باید فشار قبل از دمیستر را برای انتقال سیال افزایش دهد.

کانتورهای انرژی جنبشی اغتشاشی و اتلاف گردابی اغتشاشی برای دو دمیستر شبکه فلزی و پلاستیکی، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مقادیر آشفتگی برای دمیستر پلاستیکی بسیار بیشتر از دمیستر فلزی است و هر چه میزان این آشفتگی بیشتر باشد، برخورد قطرات با هم و با دیواره‌ها بیشتر شده و در نتیجه امکان به‌هم پیوستن قطرات و تشکیل فیلم جریان بیشتر شده و همین امر موجب افزایش بازده جداسازی می‌شود.



نمودار ۷) اثر جنس دمیستر بر بازده جداسازی در چگالی فشردگی ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و قطر ذره ۰/۵ میلی‌متر در سرعت‌های مختلف

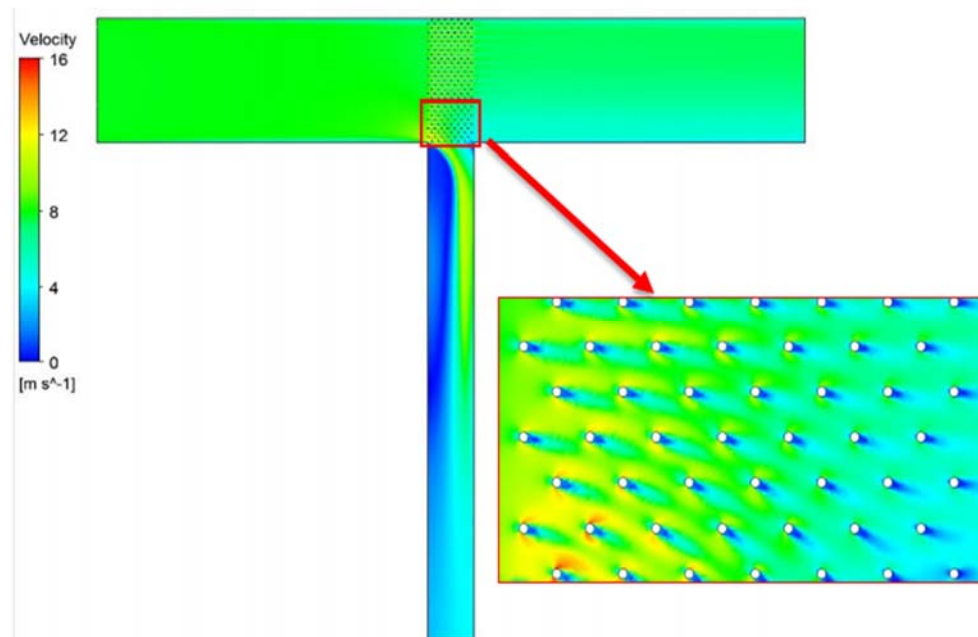
بررسی اثر جنس سیم‌های شبکه

در بخش آزمایشگاهی دو جنس دمیستر شبکه پلاستیکی و فلزی با مشخصات هندسی متفاوت بررسی شدند. به دلیل کوچک بودن قطر سیم‌های دمیستر فلزی و رعایت این نکته که اندازه شبکه‌ها در مش‌بندی بزرگ‌تر از قطر قطرات در میدان حل باشند تا دقت حل عددی افزایش یابد، امکان شبیه‌سازی دمیستر فلزی با دقت حل مورد انتظار در حالتی که قطر قطرات آب برابر ۰/۲ میلی‌متر باشند، وجود نداشت. بنابراین برای مقایسه عملکرد دمیسترهای پلاستیکی و فلزی، شبیه‌سازی برای قطراتی با قطر ۰/۵ میلی‌متر انجام شد. همان طور که در نمودار ۳ مشاهده شد، دمیستر شبکه پلاستیکی، اُفت فشار بیشتری نسبت به دمیستر شبکه فلزی دارد. در نمودار ۷ اثر جنس شبکه بر بازده جداسازی در چگالی فشردگی ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سرعت‌های ۶ تا ۱۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. مشابه نتایج آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی نیز نشان می‌دهد که بازده جداسازی دمیستر شبکه پلاستیکی بیشتر از دمیستر شبکه فلزی است. مطابق نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، بازده جداسازی در سرعت‌های ۶، ۸ و ۱۰ متر بر ثانیه به ترتیب ۳۷/۵، ۳۳/۸ و ۲۹/۱٪ افزایش یافته است.

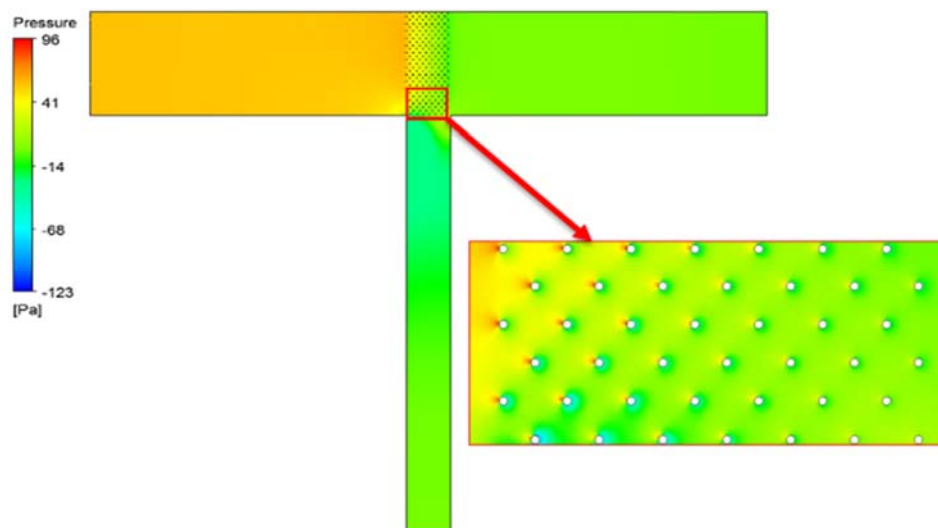
بررسی کانتورهای سرعت و فشار

کانتور سرعت در دمیستر پلاستیکی برای چگالی فشردگی ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سرعت ورودی ۸ متر بر ثانیه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با توجه به کاهش سطح مقطع جریان، بیشینه سرعت در محل میله‌های دمیستر تا حدود دو برابر نیز افزایش یافته است.

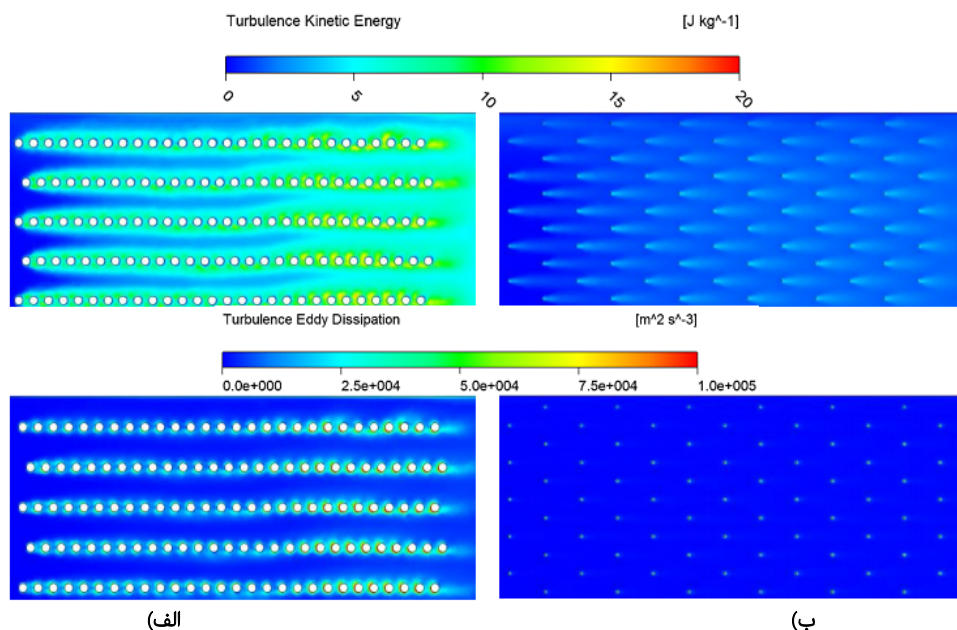
توزیع فشار در دمیستر پلاستیکی، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به تراکم دمیسترها و کاهش سطح مقطع، اُفت



شکل ۱۰) کانتور توزیع سرعت دمیستر پلاستیکی در سرعت ۸ متر بر ثانیه و چگالی فشردگی ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب



شکل ۱۱) کانتور توزیع فشار دمیستر پلاستیکی در سرعت ۸ متر بر ثانیه و چگالی فشردگی ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب



شکل ۱۲) کانتور انرژی جنبشی آشفتگی و اتلاف گردابی آشفتگی در دمیسترهای شبکه سیمی (الف) پلاستیکی، (ب) فلزی

نتیجه‌گیری

به‌جای دمیستر فلزی اقتصادی‌تر است و توصیه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی از دقت قابل قبولی برخوردار است. به‌طوری که حلگر عددی، بازده جداسازی را با خطای حدود ۲۰٪ و افت فشار را با خطایی کمتر از ۲۰٪، نسبت به داده‌های آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌نماید. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد با افزایش قطر قطرات آب از ۰/۵ به ۰/۲ میلی‌متر، بازده جداسازی تا حدود ۳۰٪ افزایش می‌یابد. شایان ذکر است مطابق نتایج به‌دست‌آمده، قطر قطرات آب پارامتر بسیار مهم و موثری در شبیه‌سازی عددی است، طوری که افزایش چگالی فشردگی برای قطراتی با قطر ۰/۲ میلی‌متر باعث افزایش بازده جداسازی و برای قطراتی با قطر ۰/۵ میلی‌متر موجب کاهش بازده جداسازی می‌شود. به‌طور کلی براساس نتایج حاصله می‌توان گفت افزایش سرعت جریان هوا، موجب افزایش افت فشار و

عمده‌ترین هدف این تحقیق، مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی به‌منظور بررسی بازده جداسازی و افت فشار در دمیسترهای شبکه سیمی با دو جنس و مشخصات هندسی و ابعادی متفاوت بوده است. کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی دمیسترهای شبکه سیمی، از مهم‌ترین نکات مورد توجه در صنعت آب‌شیرین‌سازی است. آزمایشات و شبیه‌سازی‌های متعددی انجام شد تا در یابیم آیا می‌توان دمیستر پلاستیکی را جایگزین دمیستر فلزی نمود. می‌دانیم دمیسترهای فلزی به مراتب گران‌تر از دمیسترهای پلاستیکی هستند. همچنین دمیسترهای پلاستیکی دارای مقاومت بیشتری نسبت به خوردگی و استحکام مکانیکی بالاتری هستند. با در نظر گرفتن بازده جداسازی و میزان افت فشار، در چگالی‌های فشردگی پایین‌تر، استفاده از دمیستر پلاستیکی

منابع

- 1- Ludwig EE. Applied process design for chemical and petrochemical plants. Houston: Gulf Publishing Company; 1977.
- 2- El-Dessouky HT, Alatiqi IM, Ettouney HM, Al-Deffeeri NS. Performance of wire mesh mist eliminator. Chemical Engineering Processing: Process Intensification. 2000;39(2):129-139.
- 3- Setekleiv AE, Hølsør T, Svendsen HF. Operation and dynamic behavior of wire mesh pads. Chemical Engineering Science. 2012;68(1):624-639.
- 4- Janajreh I, Hasania A, Fath H. Numerical simulation of vapor flow and pressure drop across the demister. Energy Conversion Management. 2013;65:793-800.
- 5- Kouhikamali R, Noori Rahim Abadi SMA, Hassani M. Numerical study of performance of wire mesh mist eliminator. Applied Thermal Engineering. 2014;67(1-2):214-222.
- 6- Liu Y, Yu D, Jiang J, Yu X, Yao H, Xu M. Experimental and numerical evaluation of the performance of a novel compound demister. Desalination. 2017;409:115-127.
- 7- Yao Y, Pavlenko AN, Volodin OA. Effects of layers and holes on performance of wire mesh packing. Journal of Engineering Thermophysics. 2015;24(3):222-236.
- 8- Al-Fulaij H, Cipollina A, Micale G, Ettouney H, Bogle D. Eulerian-lagrangian modeling and computational fluid dynamics simulation of wire mesh demisters in MSF plants. Desalination. 2016;385:148-157.
- 9- Hamed Estakharsar MH, Rafee R. Effects of wave length and number of bends on the performance of zigzag demisters with drainage channels. Applied Mathematical Modelling. 2016;40(2):685-699.
- 10- Zhao J, Jin B, Zhong Z. Study of the separation efficiency of a demister vane with response surface methodology. Journal of Hazardous Material. 2007;147(1-2):363-369.
- 11- Narimani E, Shahhoseini S. Optimization of vane mist eliminators. Applied Thermal Engineering. 2011;31(2-3):188-193.
- 12- Venkatesan G, Kulasekharan N, Iniyan S. Numerical analysis of curved vane demisters in estimating water droplet separation efficiency. Desalination. 2014;339:40-53.
- 13- Venkatesan G, Kulasekharan N, Muthukumar V, Iniyan S. Regression analysis of a curved vane demister with Taguchi based optimization. Desalination. 2015;370:33-43.
- 14- Guan L, Yuan Z, Yang L, Gu Z. Numerical study on the penetration of droplets in a zigzag demister. Environmental Engineering Science. 2016;33(1):35-43.
- 15- Koopmana HK, Köksoy C, Ertun Ö, Lienhart H, Hedwig H, Delgado A. An analytical model for droplet separation in vane separators and measurements of grade efficiency and pressure drop. Nuclear Engineering Design. 2014;276:98-106.
- 16- 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):594-558. [Persian]
- 17- ANSYS. ANSYS FLUENT Theory Guide [Internet]. Canonsburg: ANSYS; 2015 [Unknown Cited]. Available from: Not found

کاهش راندمان جداسازی می‌شود. به همین ترتیب افزایش چگالی فشرده‌گی نیز باعث افزایش افت فشار و افزایش بازده جداسازی خواهد شد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان مراتب قدردانی خود را نسبت به شرکت فن نیرو به جهت ارایه کمک‌های فراوان در آزمایشات اعلام می‌دارند.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی، حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده آنها است.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص وجود ندارد.

سهم نویسندگان: فرهاد حسین‌نژاد (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ رامین کوهی‌کمالی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪).

منابع مالی: هزینه خاصی استفاده نشده است.

فهرست علائم

C_D	ضریب درگ
D	پارامتر قطر سیم (m)
d_p	قطر قطره آب (m)
F	عبارت نیروی اضافی بر واحد جرم ذره (Nkg^{-1})
F_D	نیروی درگ (N)
g	شتاب جاذبه (ms^{-2})
k	انرژی جنبشی (m^2s^{-2})
L	فاصله صفحات (mm)
P	فشار (Pa)
Q	دبی حجمی قطرات آب (m^3s^{-1})
Re	عدد رینولدز نسبی
S	اندازه شبکه (mm)
t	زمان (s)
u	سرعت فاز پیوسته (ms^{-1})
u_p	سرعت ذره (ms^{-1})
$\bar{u}$	سرعت متوسط (ms^{-1})
$\dot{u}$	نوسان سرعت حول سرعت متوسط (ms^{-1})
x	مختصات کارتزینی

علائم یونانی

η	بازده جداسازی
δ_{ij}	دلتای کرانیکر
τ_{ij}	تانسور تنش (Nm^{-2})
μ	گران‌روی دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی فاز پیوسته (kgm^{-3})
ρ_p	چگالی فاز گسسته (kgm^{-3})
σ	کشش سطحی (Nm^{-1})
ε	نرخ تلفات جریان آشفته (m^2s^{-3})
i, j	اندیس جهت مختصات
in	ورودی
out	خروجی
p	ذره
t	آشفته‌گی