

## ارزیابی تأثیر افزودن زبری بر عملکرد قطره گیرهای صفحه‌ای موجی به روش آزمایشگاهی

کارشناس ارشد، مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران  
استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

فرهاد علمشاهی  
حسن رحیمزاده\*

### چکیده

قطره‌گیرهای صفحه‌ای موجی از بهینه‌ترین تجهیزات صنعتی برای جداسازی قطرات موجود در جریان‌های دوفاز می‌باشند. در این پژوهش تجربی، آزمایش‌هایی جهت اندازه‌گیری میزان افت فشار و راندمان جداسازی قطره‌گیرهای زیگزاگی و همچنین با هدف بهینه‌سازی عملکرد این تجهیز در نظر گرفته شده است. جریان هوای عبوری توسط یک فن مکشی در انتهای کانال در سرعت‌های ۱ تا ۴ متر بر ثانیه ایجاد شده است. قطرات نیز توسط نازل‌های مه پاش در اندازه‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میکرون تحت فشار به درون جریان هوا تزریق می‌شوند. راندمان قطره‌گیری با اندازه‌گیری دبی جرمی خروجی از نازل‌ها و دبی جرمی آب جمع‌آوری شده توسط قطره‌گیر و میزان آب تبخیر شده در کانال به‌وسیله اندازه‌گیری میزان رطوبت و دما در ورودی و خروجی محاسبه شده است. اثرات زبری بر روی دیواره‌های قطره‌گیر بر عملکرد جداسازی قطرات از جریان دوفاز ایجاد شده نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا تمامی آزمایش‌ها برای قطره‌گیر با صفحات صیقلی و سپس برای قطره‌گیر با صفحات همراه با زبری صورت گرفته است. نتایج به‌دست آمده افزایش راندمان در تمامی سرعت‌های اندازه‌گیری شده را بیان می‌نماید و البته درصد افزایش راندمان برای سرعت‌های پایین‌تر میزان بیشتری را تا ۲۰٪ به خود اختصاص می‌دهد. حال آنکه این مقادیر افزایش راندمان در پی افزودن زبری به صفحات، با اندکی افزایش در میزان افت فشار قطره‌گیر همراه بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** قطره‌گیر صفحه‌ای موجی، بررسی آزمایشگاهی، راندمان قطره‌گیری، افت فشار.

## An Experimental Analysis of Effect of Introducing Roughness on the Performance of the Wave-plate Demisters

F. Alamshahi  
H. Rahimzadeh

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of technology, Tehran, Iran  
Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of technology, Tehran, Iran.

### Abstract

Wave plate mist eliminators are one of the most efficient devices in the industrial processes involving gas and vapor flow that can remove droplets from the gas streams. In this article, a set of measurements are brought out to study the essential parameters, pressure drop and removal efficiency of the mist eliminator in order to optimize this device. The air flow is provided by a fan at the outlet of the setup in the velocity range of 1-4 m/s. Droplets with a diameters of 10, 15 and 20 $\mu$ m are injected by means of spray nozzles through the air flow. The removal efficiency of the mist eliminator is determined by measured parameters such as mass flow rate of nozzles and collected water, humidity and temperature of air at inlet and outlet of the channel. The main objective of this article is to evaluate the effect of introducing roughness to the surfaces of the plates in the performance of the mist eliminator. Results show an increase in the value of the removal efficiency for all range of the applied velocities, although the percent of increase was more considerable for smaller velocity magnitudes which percentile was up to 20%. Meanwhile, it will not cause a noticeable increase in the pressure loss.

**Keywords:** Mist eliminator, experimental investigation, collection efficiency, pressure drop.

### ۱- مقدمه

میکروارگانسیم‌ها به محیط‌زیست و بازیابی مایعات با فرمول شیمیایی بارزش پخش‌شده درون جریان هوا به‌عنوان آب جبرانی در عملیات برج خنک‌کن ارزشمند است.

جنبه‌های متفاوت جریان پیوسته و فاز گسسته به‌صورت عددی و آزمایشگاهی توسط تعدادی از محققین مورد بررسی قرار گرفته است. کالورت و همکارانش (۱۹۷۴) [۱] جدایش سیال ورودی را برای چند نوع قطره‌گیر از جمله نوع مانع بافل زیگزاگ را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. وی در این آزمایش پارامترهایی از قبیل راندمان جداسازی، اندازه قطرات و افت فشار را برای ذرات در اندازه‌های  $\mu$ m ۲۰۰-۴۰ به‌صورت تابعی از نرخ دبی گاز و مایع بررسی کرد. آن‌ها برای این هدف پرهایی را با طرح زیگزاگی در مسیر عبور جریان دوفاز قرار دادند. چان و گولی (۱۹۷۷) [۲] میزان راندمان جدایش قطره-گیرهای برج خنک‌کن را به‌عنوان تابعی از اندازه ذرات با استفاده از شبیه‌سازی عددی به دست آوردند و مدلی را برای بررسی‌های

قطره‌گیرهای صفحه‌ای-موجی از جمله کارآمدترین تجهیزات در فرآیندهای صنعتی می‌باشند که قادر به جداسازی قطرات موجود در جریان گاز هستند. در این‌گونه فرآیندها با عبور جریان دوفاز از میان صفحات موازی زیگزاگ شکل، به این دلیل که اینرسی قطرات موجود در جریان بالاتر از اینرسی گاز است، قطرات قادر به دنبال کردن خط جریان گاز را بر سر خم‌ها نداشته و در نتیجه از مسیر جریان جدا شده و به دیواره‌ها برخورد می‌کنند. با انباشته شدن قطرات، فیلم مایع بر روی صفحات قطره‌گیر ایجاد شده و تحت تأثیر گرانش تخلیه می‌شوند. قطره‌گیرهای صفحه‌ای-موجی به‌طور گسترده‌ای در عملیات شیمیایی و صنعتی با کاربری جریان دوفازی حائز اهمیت هستند. جمع‌آوری قطرات به دلایل متفاوتی از جمله جلوگیری از انتشار مواد شیمیایی یا

آزمایشگاهی ارائه دادند. یوشیکی و همکاران (۱۹۸۲) [۳] در بررسی آزمایشگاهی عملکرد و مکانیسم جدایش قطره‌گیرها را در چند طبقه از صفحات باریک و تخت نشان دادند که تأثیر نیروی گرانش در مقابل اثر اینرسی قابل چشم‌پوشی می‌باشد. فیلیپس و دیکین (۱۹۹۰) [۴] مطالعه تجربی بر روی راندمان قطره‌گیرهای متفاوت از جمله قطره‌گیر پره‌ای را انجام دادند. برای اندازه‌گیری دقیق سائز قطرات از فناوری لیزر در بالادست و پایین دست قطره‌گیر می‌توان بهره برد. جوسانگ (۲۰۰۲) [۵] از روش LDA برای مطالعه سرعت دو بعدی و مقادیر آشفتگی بین پره‌های قطره‌گیر استفاده کرده است. او همچنین از روش PDA برای اندازه‌گیری تغییرات سائز قطره در طول قطره‌گیر بهره برده است. وولان (۱۹۹۱) [۶] وجود ناحیه مرده پس از خم‌ها را به صورت تجربی و عددی با استفاده از نرم‌افزار تجاری فونیکس انجام داده بود. بورخولز (۱۹۸۹) [۷] مدل نظری برای پیش‌بینی راندمان جداسازی قطره‌گیر صفحه‌ای- موجی بر اساس راندمان جمع‌آوری قطرات در هر خم ارائه داد. میزان راندمان قطرات جمع‌آوری شده در هر یک از خم‌ها،  $\eta_B$ ، با برقراری تساوی میان نیروهای دراگ وارد بر ذره و نیروهای حاکم بر حرکت قطره به دست آورد. در این معادلات،  $\eta_0$ ، راندمان کلی،  $v$  و  $\mu_g$  سرعت گاز در ورودی و لزجت گاز،  $\rho_d$  و  $d$  چگالی قطره و قطر قطره می‌باشند. همچنین  $S$  پهنای کانال قطره‌گیر و  $\alpha$  زاویه خم (رادیان) می‌باشند.

$$\eta_0 = 1 - (1 - \eta_B)^n \quad (1)$$

$$\eta_B = \frac{\rho_d v d^2}{18 \mu_g S} \alpha \quad (2)$$

ونگ و جیمز (۱۹۹۸) [۸] نقص روش‌های عددی در مورد پیش‌بینی راندمان قطره‌گیری به ویژه در اندازه ذرات کوچک‌تر را متذکر شدند و دریافتند استفاده از مدل برهم‌کنش گردابه‌ها (EIM) دقت پیش‌بینی راندمان قطره‌گیری را بالا می‌برند. آن‌ها در پژوهش بعدی [۹] این مدل لاگراژی را به همراه اصلاحات متفاوت آن مورد بررسی قرار دادند و توانستند نتایج به دست آمده راندمان را به میزان زیادی بهبود ببخشند. علمشاهی و همکاران (۱۳۹۳) [۱۰] نیز با استفاده از مدل توربولانسی SST  $k-\omega$  و مدل برهم‌کنش گردابه‌ها جهت شبیه‌سازی پخش ذرات درون جریان مغشوش، تأثیر زاویه و تعداد خم‌ها بر افت فشار جریان قطره-گاز و راندمان قطره‌گیرهای صفحه‌ای موجی مورد بررسی قرار دادند. رفعی و همکاران [۱۱، ۱۲] از مدل توربولانسی تنش رینولدزی ارتقا یافته، برای مدل‌سازی جریان گاز و مدل برهم‌کنش گردابه برای پیش‌بینی جابجایی قطرات استفاده نمودند و توانستند با استفاده از روش‌های رفتار پیشرفته دیواره دقت پیش‌بینی راندمان قطره‌گیری را برای قطرات کوچک‌تر با راندمان کمتر از ۵۰٪ بالا ببرند. حامدی و رفعی (۲۰۱۳) [۱۳] تأثیر ثابت عمر گردابه ( $C_L$ ) را بر راندمان قطره‌گیرهای صفحه‌ای زیگزاگ همراه کانال تخلیه تحلیل کردند و مناسب‌ترین میزان این ثابت را با مقایسه راندمان قطره‌گیر با نمونه آزمایشگاهی برگزیدند. اطلاعات گزارش شده توسط مدل‌سازی‌های عددی بیانگر افزایش متناوب افت فشار با کمتر شدن فاصله صفحات می‌باشد. بنی‌طیایی و همکاران (۲۰۱۲) افت فشار را برای فاصله صفحات متفاوت و هر یک برای سرعت‌های ۲ تا ۵ متر بر ثانیه را اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که در یک سرعت

ثابت جریان با کاهش فاصله صفحات از ۱۱/۵ تا ۹/۵ میلی‌متر افت فشار کاهش یافته و از ۹/۵ تا ۵/۵ میلی‌متر افت فشار افزایش پیدا می‌کند [۱۴]. علاوه بر این موضوع، هر چه سرعت گاز بیشتر باشد، راندمان قطره‌گیری بالاتر می‌رود، اما از طرف دیگر سرعت‌های بالا موجب جدا شدن برخی قطرات از فیلم مایع ایجاد شده بر روی صفحات می‌گردد. ازوباردی و صنالاله (۲۰۰۲) با طراحی آزمایش‌هایی پدیده بازگشت ذرات سیال به جریان را در قطره‌گیر به صورت بصری بررسی کردند [۱۵]. به منظور جلوگیری از بازگشت مجدد قطرات به درون جریان گاز، استفاده از کانال‌های تخلیه در قطره‌گیرهای زیگزاگ توسط محققین پیشنهاد داده شد (مک نالتی و همکاران، ۱۹۸۷ [۱۶]؛ جیمز و همکاران، ۲۰۰۳ [۱۷]؛ بروناتزی و همکاران، ۲۰۰۴ [۱۸]). استفاده از کانال‌های تخلیه باعث بالا بردن راندمان جداسازی و ظرفیت قطره‌گیر می‌شود، اما افزایش قابل توجه افت فشار را به دنبال خواهد داشت. افت فشار بالا منجر به کاهش نرخ هوا عبوری شده و افزایش قدرت موتور فن‌ها را به دنبال خواهد داشت. این موضوع نیز در مجموع باعث کاهش راندمان کلی سیستم خنک‌کاری می‌شود. در پژوهش حاضر هدف اصلی محققین، ارزیابی روشی جهت بهبود راندمان قطره‌گیری و در عین حال جلوگیری از افزایش بالای افت فشار ایجاد شده توسط قطره‌گیر می‌باشد.

## ۲- دستگاه آزمایشگاهی و روش اندازه‌گیری

برای ایجاد قطرات میکرونی و جریان یکنواخت هوا و تشکیل یک جریان دوفازی به سیستم تولید جریان فاز گازی در سرعت و دبی معلوم و سیستم تولید قطرات در نرخ‌های متفاوت نیازمند است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، جریان ایجاد شده از طریق کانال از جنس شیشه پلکسی شفاف جهت مشاهده جریان که به صورت افقی قرار گرفته است، به سوی صفحات قطره‌گیر هدایت می‌شود. ابعاد سطح مقطع این کانال مربعی شکل به عرض ۳۰۰ میلی‌متر و طول آن ۱۸۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

در مطالعه حاضر، از هندسه مشابه مورد استفاده شده توسط جیمز و همکاران [۱۷] برای بررسی تأثیر افزودن زبری استفاده شده است. صفحات مورد استفاده قرار گرفته از جنس آهن گالوانیزه با ضخامت ۰/۱۵ میلی‌متر می‌باشد. سایر پارامترهای هندسی نشان داده شده در شکل ۲ نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

برای بررسی تأثیر افزودن زبری به صفحات قطره‌گیر، سه رشته سیم مفتولی با قطر ۰/۴ میلی‌متر در فواصل یکسان بر روی هر خم قطره‌گیر قرار داده شده است. در شکل ۳ شماتیک صفحات قطره‌گیر صفحه‌ای موجی به همراه زبری نمایش داده شده است.

جریان هوا درون کانال توسط یک فن با حداکثر توان تولید دبی ۲۹۲۰ متر مکعب بر ساعت با قابلیت تنظیم دبی خروجی توسط یک دیمر تأمین می‌شود. برای ایجاد جریان یکنواخت، یکسو و به دور از عوامل ایجاد کننده اغتشاشات، فن به صورت مکشی در انتهای کانال به همراه یک تبدیل انعطاف‌پذیر قرار گرفته است. همچنین استفاده از صفحات لانه‌زنبوری در ورودی و خروجی کانال، یکنواخت و یکسو شدن بردارهای سرعت در راستای افقی را تضمین می‌کند. با توجه به اینکه کلیه تجهیزات نامبرده باعث افت فشار و کاهش سرعت جریان هوای

شده است. فشار کاری این نازلها توسط یک پمپ پیستونی با قابلیت ایجاد فشار ۱۰۰ بار صورت می‌پذیرد. میزان فشار پشت نازلها نیز توسط شیر هیدرولیکی فشارشکن تنظیم می‌گردد. باینکه دستگاه قابلیت استفاده از هشت نازل به صورت همزمان را نیز فراهم می‌آورد، در هر یک از آزمایشها تنها از یک نازل استفاده شده است. استفاده همزمان از چند نازل باعث به هم پیوستن ذرات تولیدشده توسط نازل‌های مختلف و بزرگ شدن اندازه ذرات و در پی آن ته‌نشینی ذرات درون کانال می‌شود.

داخل کانال می‌شوند، فن در حالت کارگذاری شده درون سیستم حداکثر می‌تواند جریانی با سرعت متوسط ۴ متر بر ثانیه را ایجاد نماید. برای تولید قطرات میکرونی از نازل‌های مه پاش با سیستم تمیزه کننده فشاری استفاده شده است. این نوع از تمیزه کننده‌ها، با گذراندن جریان سیال از درون نازل اوریفیس با تبدیل فشار به انرژی جنبشی و سرعت دادن به مایع باعث تبدیل آن به ذرات میکرونی می‌شود. انواع نازل‌های مه پاش با سایز اوریفیس‌های متفاوت توانایی تولید قطرات میکرونی در اندازه‌های متفاوت را دارند. در مطالعه حاضر از نازل‌هایی با سایز قطرات تولیدی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میکرونی استفاده

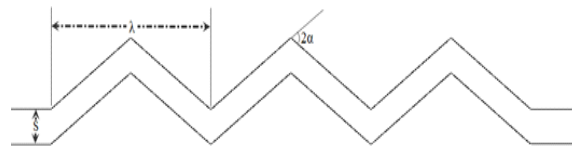


شکل ۱- شمای کلی دستگاه آزمایش

اندازه‌گیری فشار صفر تا ۲۰۰ پاسکال و دقت نمایش فشار ۰٫۱ پاسکال و همچنین دقت نمایش سرعت ۰٫۱ متر بر ثانیه و دقت اندازه‌گیری ۰٫۵٪ مقدار اندازه‌گیری شده، صورت گرفته است. لوله‌های پیتوت یکی در فاصله ۲۵ سانتی‌متری بالادست و دیگری در ۱۵ سانتی‌متری پایین دست قطره‌گیر تعبیه شده است. سر لوله‌های پیتوت در مرکز کانال در مقابل جریان هوا قرار می‌گیرند. اندازه‌گیری سرعت جریان نیز توسط تنها یک لوله پیتوت و با اتصال دو ورودی دستگاه به خروجی‌های فشار سکون و فشار استاتیک لوله پیتوت صورت پذیرفته است. مقادیر سرعت در ۳۶ نقطه از یک چهارم سطح مقطع اندازه‌گیری شده است و در نهایت سرعت متوسط توسط رابطه (۳) محاسبه شده است. شکل ۴ مقادیر سرعت گاز در نقاط مختلف را در مقطع کانال برای حالتی که سرعت متوسط جریان گاز در مقطع کانال ۳ متر بر ثانیه باشد را نشان می‌دهد.

$$V_{bulk} = \frac{\sum V_i A_i}{\sum A_i} \quad (3)$$

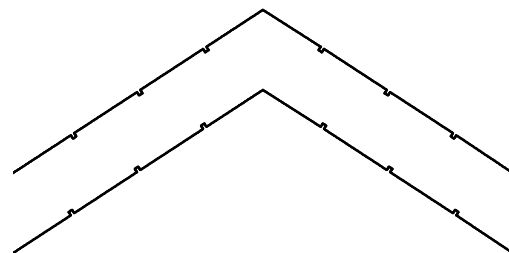
که در این رابطه  $V_{bulk}$  سرعت متوسط جریان کانال،  $V_i$  مقدار سرعت در نقطه  $i$  ام و  $A_i$  سطح اختصاص یافته به نقطه  $i$  ام است. میزان رطوبت و دما در بالادست و پایین دست قطره‌گیر توسط رطوبت‌سنج دیجیتال (تستو مدل ۶۲۵ [۲۰]) با محدوده اندازه‌گیری صفر تا ۱۰۰٪ رطوبت نسبی و دقت نمایش رطوبت نسبی ۰٫۱٪ و دمای ۰٫۱ درجه سانتی‌گراد و دقت اندازه‌گیری  $\pm ۰٫۲۵$ ٪ رطوبت نسبی،



شکل ۲- نمودار شماتیک قطره‌گیر زیگزاگی

جدول ۱- پارامترهای هندسی قطره‌گیر استفاده شده در سیستم

زاویه خم ( $\alpha$ )	طول موج ( $\lambda$ )	عرض صفحات ( $w$ )	تعداد خم در هر صفحه ( $n$ )	فاصله صفحات (S)
$30^\circ$	۴۰ mm	۲۹۹ mm	۶	۱۰ mm

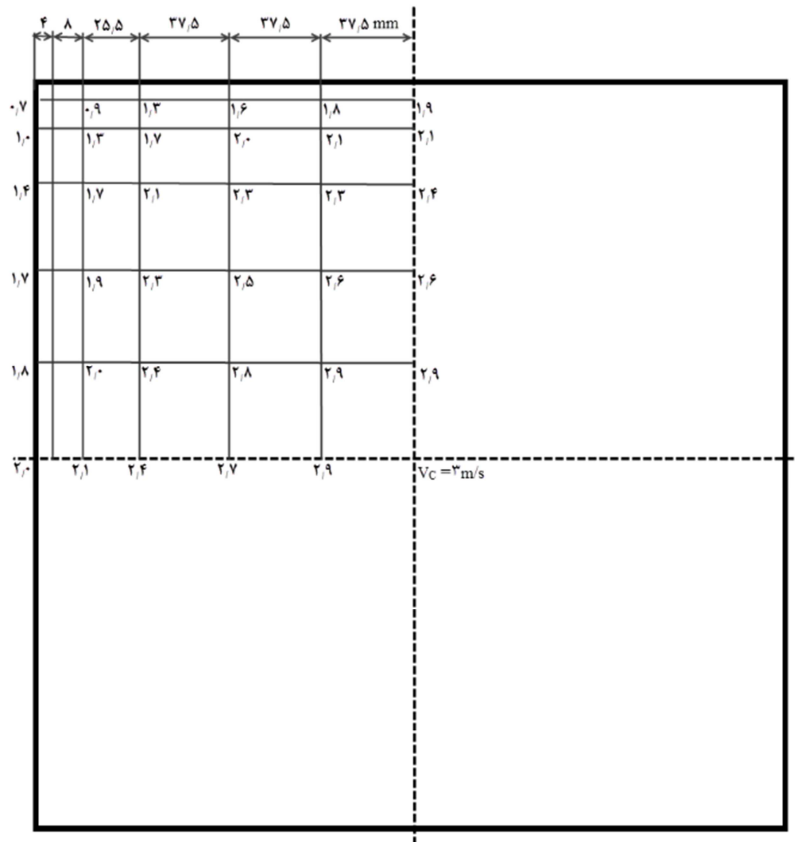


شکل ۳- شماتیک صفحات قطره‌گیر صفحه‌ای موجی با صفحات زیر

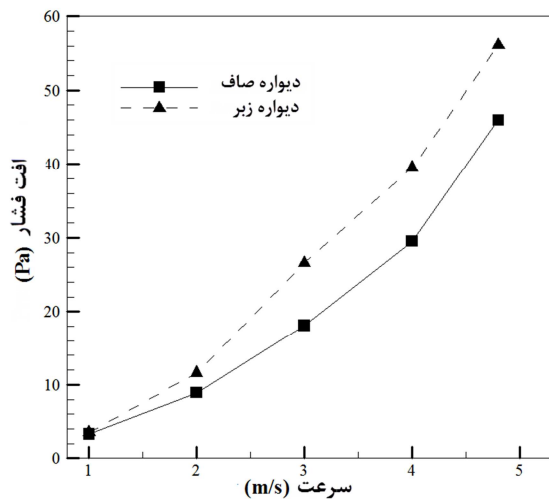
افت فشار و میزان سرعت جریان هوا درون کانال توسط دو لوله پیتوت و یک مانومتر دیجیتال (تستو مدل ۵۱۲ [۱۹]) با محدوده

بالای این نوع قطره‌گیرها، می‌توان از تأثیر قطرات بر رطوبت اندازه‌گیری شده صرف‌نظر کرد.

اندازه‌گیری شده است. برای جلوگیری از ایجاد خطا با برخورد ذرات آب به حس‌گر رطوبت‌سنج، پس از فن کانالی با وظیفه هدایت جریان به‌سوی قطره‌گیر شبکه‌ای سیمی تعبیه شده است. با توجه راندمان



شکل ۴- مقادیر سرعت گاز در نقاط مختلف در مقطع کانال برای سرعت جریان گاز ۳ متر بر ثانیه در مقطع کانال



شکل ۵- افت فشار قطره‌گیر زیگزاگی به ازای سرعت‌های جریان متفاوت برای قطره‌گیر با صفحات صاف و زبر

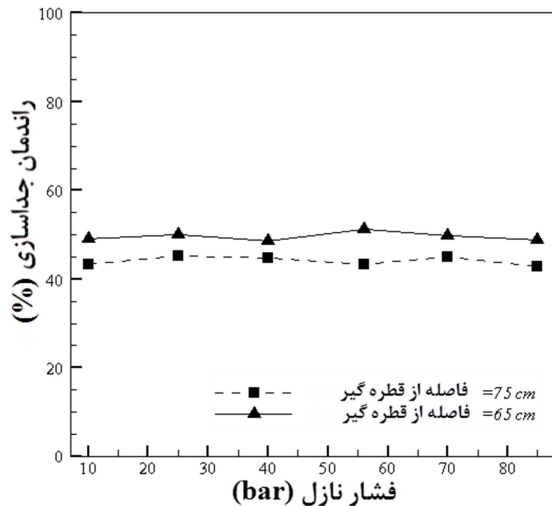
### ۳- نتایج

#### ۳-۱- افت فشار

از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در عملکرد قطره‌گیرها، افت فشار جریان هوا درون قطره‌گیر و راندمان جداسازی قطره‌گیر می‌باشد. با عبور جریان گاز از بین صفحات قطره‌گیر، هنگام برخورد خطوط جریان با خم‌ها یک سری جریان جدایشی و برگشتی به وجود می‌آید که باعث انسداد کانال و کاهش پهنای مفید برای عبور جریان می‌شود. این پدیده باعث شتاب گرفتن جریان گاز هنگام عبور از نزدیکی جریان گردشی و مسبب کاهش فشار استاتیکی خواهد شد. شکل ۵ میزان افت فشار اندازه‌گیری شده در سرعت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. افت فشار از ۶۱۰۶٪ در سرعت ۱ متر بر ثانیه تا ۴۷۱۰٪ در سرعت ۳ متر بر ثانیه افزایش یافته است.

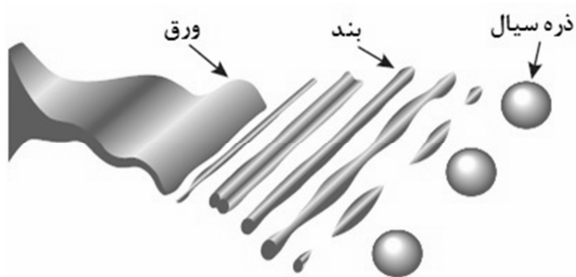
#### ۳-۲- راندمان قطره‌گیری

راندمان در قطره‌گیرهای صفحه موجی شکل با استفاده از رابطه (۴)، ارائه‌شده توسط بورخولز [۷]، قابل محاسبه است. در این رابطه



شکل ۶- مقایسه راندمان جمع‌آوری تجربی قطره‌گیر با دیواره صاف در سرعت ۳٫۹ متر بر ثانیه و در فشارهای ورودی نازل متفاوت برای نازل‌های ۱۵ میکرونی «کار حاضر»

از دیگر نکاتی که بر راندمان سیستم تأثیرگذار می‌باشد، محل قرارگیری نازل‌ها درون کانال است. انرژی پتانسیل سیال که ناشی از فشار برای نازل‌های هیدرولیکی است، همراه با هندسه نازل باعث می‌شوند که سیال به صورت نوارهای<sup>۱</sup> کوچک پدیدار شوند. پس از خروج، این بندها شکسته و به تکه‌های کوچک‌تر با عنوان ذرات سیال تبدیل می‌شوند (شکل ۷). نازل‌ها باید در محلی قرار گیرند که در درجه اول ذرات فرصت کافی برای تقسیم شدن به اندازه‌های کوچک و نزدیک شدن به قطر متوسط ساتر<sup>۲</sup> نازل داشته باشند. قطر متوسط ساتر، قطر قطره‌ای است که نسبت حجم به سطح آن برابر با نسبت حجم کل قطرات به سطح کل قطرات اسپری شده است. در حقیقت این قطر تعیین کننده میزان کروی بودن قطرات اسپری شده است و هر چه مقدار آن به عدد یک نزدیک‌تر باشد به معنای کروی بودن ذرات است.



شکل ۷- مراحل تبدیل شدن یک جریان مایع به قطرات ریز

از طرف دیگر با توجه به اینکه قطرات با سرعت اولیه به درون جریان تزریق می‌شوند باید فاصله کافی برای هم سرعت شدن با جریان گاز را داشته باشد. شکل ۸ به بررسی پارامتر فاصله نازل از قطره‌گیر پرداخته است. با توجه به شکل ۸، با افزایش فاصله نازل و قطره‌گیر، راندمان قطره‌گیری برای هردو نمودار در فشارهای ورودی نازل کاهش می‌یابد. نکته دیگری که از این شکل دریافت می‌شود این است که

جمله  $\dot{M}_{trap}$ ، دبی جرمی آب جمع‌آوری شده توسط قطره‌گیر و  $\dot{M}_{in}$  نیز دبی جرمی نازل‌ها در هر اندازه از قطره می‌باشد.

$$\eta_d = \frac{\dot{M}_{trap}}{\dot{M}_{in}} \times 100 \quad (4)$$

در ابتدا به بررسی تأثیر فشار بالادست نازل بر راندمان قطره‌گیری و انتخاب فشار کاری مناسب برای پاشش قطرات به درون جریان پرداخته شده است. انواع نازل‌ها توانایی عبور مقدار بیشینه‌ای از جریان سیال را از درون خود دارند که این مقدار بیشینه توسط اثرات دیواره‌ها داخلی نازل دستخوش تغییر می‌شود. با افزایش فشار بالادست نازل‌ها، نیروی عکس‌العمل دیواره‌های داخلی آن‌ها در جهت خلاف حرکت جریان نیز افزایش می‌یابد تا جایی که میزان دبی جرمی سیال عبوری از حد معینی تجاوز نمی‌کند. جدول ۲ میزان تغییرات دبی جرمی آب عبوری با افزایش فشار بالادست نازل را نشان می‌دهد. در مورد هیچ یک از نازل‌های به کار برده شده مقادیر دبی جرمی در فشارهای کاری پمپ به میزان دبی بیشینه خود نرسیده‌اند.

شکل ۶ نمودار راندمان قطره‌گیری بدست آمده «کار حاضر» در فشارهای مختلف در بالادست نازل ۱۵ میکرونی را برای دو فاصله مختلف در بالادست قطره‌گیر رسم کرده است. بیشترین اختلاف موجود نسبت به مقدار میانگین برابر با ۰٫۰۹ می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده ثابت ماندن اندازه قطرات ایجاد شده توسط نازل‌های به کار گرفته شده در فشارهای پشت نازل متفاوت است و تنها پارامتری که در فشارهای متفاوت دستخوش تغییر است میزان دبی خروجی نازل‌ها خواهد بود که با قرار دادن فشار کاری در مقادیر بالاتر، با توجه به دبی بالاتر قطرات ایجاد شده، می‌توان دقت اندازه‌گیری را بالا برد؛ بنابراین سایر آزمایش‌ها با فشار کاری ۷۰ بار صورت پذیرفته است.

جدول ۲- دبی جرمی نازل‌های مختلف در فشارهای متفاوت پمپ

فشار نازل (bar)	نازل ۱۰ میکرونی	نازل ۱۵ میکرونی	نازل ۲۰ میکرونی
۴۰	۰٫۵۳	۰٫۵۴	۰٫۷۹
۵۰	۰٫۵۸	۰٫۶۱	۰٫۸۹
۶۰	۰٫۶۲	۰٫۶۸	۱٫۰۱
۷۰	۰٫۶۸	۰٫۷۲	۱٫۱۰
۸۰	۰٫۷۱	۰٫۷۶	۱٫۱۷
۸۶	۰٫۷۴	۰٫۸۱	۱٫۲۳

<sup>۱</sup> Ligament

<sup>۲</sup> SMD: Sauter Mean Diameter

$$P_v = \omega \times P_g \text{ (KPa)} \quad (5)$$

$$P_a = P - P_v \text{ (KPa)} \quad (6)$$

که در آن  $\omega$  میزان درصد رطوبت،  $P$  فشار کلی و مقدار  $P_g$  (KPa) از جدول خواص ترمودینامیکی آب اشباع در دمای اندازه-گیری شده خوانده می‌شود. رطوبت نسبی ( $\omega$ ) و جرم هوا ( $m_a$ ) از روابط زیر محاسبه می‌گردند.

$$\omega = 0.622 \frac{P_v}{P_a} \quad (7)$$

$$m_a = \frac{P_a V}{R_a T} \quad (8)$$

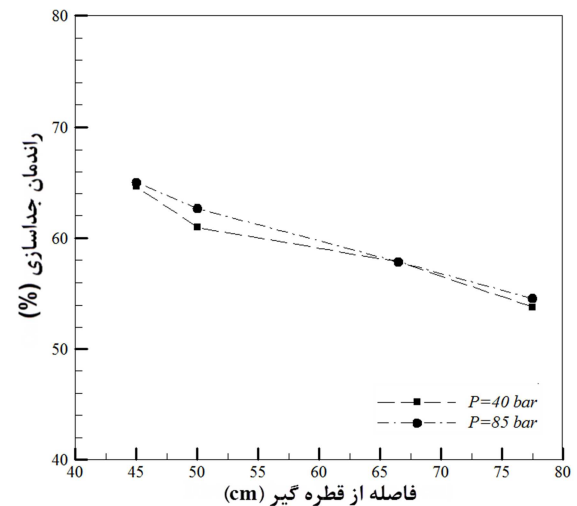
که در این رابطه  $V$  دبی حجمی کانال،  $T$  دمای کانال  $R_a = 0.287$  می‌باشد؛ و در نهایت جرم بخار آب ( $m_v$ ) نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$m_v = \omega m_a \quad (9)$$

شکل ۹ دبی جرمی بخار آب محاسبه شده توسط مقادیر رطوبت ارائه شده در جدول ۳ را به صورت تابعی از دبی جرمی نازل‌های متفاوت نشان داده است. با مقایسه قسمت‌های الف و ب شکل ۹ نازل ۱۵ میکرونی مقادیر دبی جرمی بیشتری از نازل ۱۰ میکرونی را فراهم می‌آورد و به تبع آن دبی جرمی بیشتری از بخار آب موجود در هوا را در بر خواهد داشت. در ادامه، در قسمت ج، نازل ۲۰ میکرونی بیشترین میزان دبی جرمی را تولید می‌کند و همچنین با برقراری نسبت میان میزان دبی جرمی بخار آب ایجاد شده در هوا بر روی دبی جرمی آب تولیدی نازل، کمترین میزان این نسبت مربوط به نازل ۲۰ میکرونی می‌باشد.

راندمان قطره‌گیری با تقسیم دبی جرمی قطرات به دام افتاده بر روی دبی جرمی قطرات تزریق شده به جریان حاصل می‌گردد؛ اما همان‌طور که نشان داده شد، میزان قابل توجهی از قطرات تزریق شده به درون کانال تبخیر می‌شوند. لذا باید میزان دبی جرمی آب تزریق شده توسط نازل که در طول مسیر کانال تبخیر شده است را از میزان آب تزریق شده کاسته شود. به این منظور می‌بایست دبی جرمی بخار

فاصله نازل از قطره‌گیر در فشارهای ۴۰ و ۸۵ بار تأثیری بر راندمان قطره‌گیری ندارد. با توجه به ثابت ماندن راندمان قطره‌گیری در دبی‌های متفاوت نازل و همچنین کاهش راندمان جمع‌آوری قطرات با افزایش فاصله نازل از قطره‌گیر در فشار نازل ثابت، به تبخیر بخشی از آب اسپری شده در فاصله بین نازل و قطره‌گیر می‌توان پی برد.

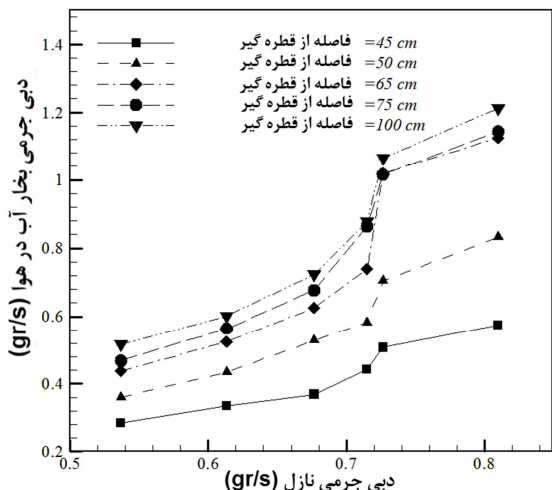


شکل ۸- راندمان جمع‌آوری تجربی قطره‌گیر با دیواره صاف در سرعت  $u=3.9 \text{ m/s}$  و نازل ۱۰ میکرونی در دو فشار ورودی نازل در فواصل مختلف نازل تا قطره‌گیر

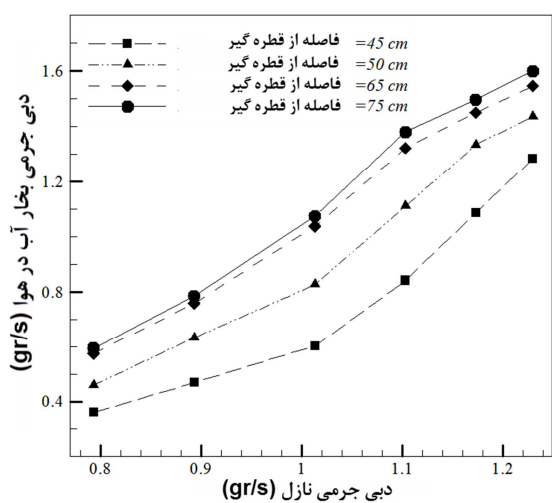
جدول ۳ میزان رطوبت و دمای اندازه‌گیری شده در خروجی کانال را به ازای فواصل مختلف نازل و قطره‌گیر برای نازل ۱۵ میکرونی در سرعت جریان ۱ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. افزایش میزان رطوبت نسبی با افزایش دبی جرمی نازل و افزایش فاصله از قطره‌گیر، نشان از تبخیر و فرار قطرات ریزتر در طول کانال می‌باشد. میزان دبی جرمی قطراتی که دست‌خوش تبخیر شده‌اند توسط پارامترهای دما و رطوبت اندازه‌گیری شده و دبی حجمی جریان عبوری قابل محاسبه است. روش محاسبه دبی جرمی بخار آب به صورت زیر است. فشار جزئی بخار آب ( $P_v$ ) و هوا ( $P_a$ ) از روابط زیر محاسبه می‌گردد.

جدول ۳- رطوبت و دمای مخلوط هوا هنگام استفاده از نازل ۱۵ میکرونی، در خروجی کانال

فاصله از قطره‌گیر (cm)	فشار (bar)					
	۸۵	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰
	۰/۸۱	۰/۷۳	۰/۷۲	۰/۶۸	۰/۶۱	۰/۵۴
۴۵	۴۴,۱	۴۰,۷	۳۷,۰	۳۳,۲	۳۰,۹	۲۷,۳
	۱۳,۳	۱۳,۹	۱۴,۵	۱۵,۶	۱۶,۰	۱۶,۶
۵۰	۵۴,۷	۵۰,۴	۴۴,۷	۴۲,۱	۳۷,۱	۳۲,۶
	۱۱,۴	۱۲,۴	۱۳,۳	۱۳,۸	۱۴,۸	۱۵,۷
۶۵	۶۴,۹	۶۱,۷	۵۲,۴	۴۶,۹	۴۲,۴	۳۷,۶
	۱۰,۰	۱۰,۵	۱۲,۳	۱۳,۰	۱۴,۰	۱۴,۹
۷۵	۶۷,۳	۶۳,۳	۵۷,۳	۵۰,۴	۴۴,۹	۳۹,۵
	۱۰,۲	۱۰,۸	۱۱,۵	۱۲,۹	۱۳,۸	۱۴,۶

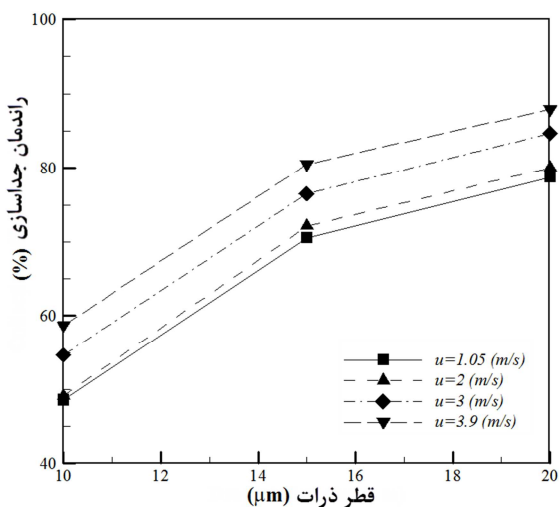


(ب)



(ج)

شکل ۹- دبی جرمی بخار آب خروجی از قطره‌گیر در سرعت ۱ متر بر ثانیه به ازای فاصله و دبی خروجی نازل‌های الف) ۱۰ میکرونی (ب) ۱۵ میکرونی (ج) ۲۰ میکرونی



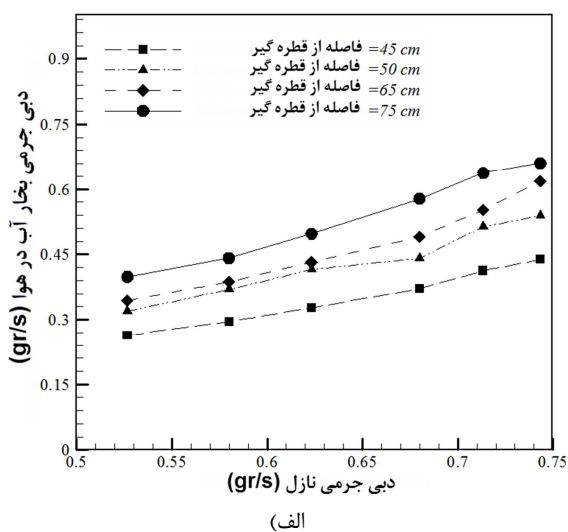
شکل ۱۰- راندمان قطره‌گیری محاسبه شده تجربی برای قطره‌گیر با صفحات صاف به ازای سرعت‌های متفاوت

آب وارد شده به کانال را محاسبه کرده و سپس با برقراری رابطه تفاضل میان دبی بخار آب خروجی و ورودی، میزان آب تبخیر شده حاصل می‌گردد.

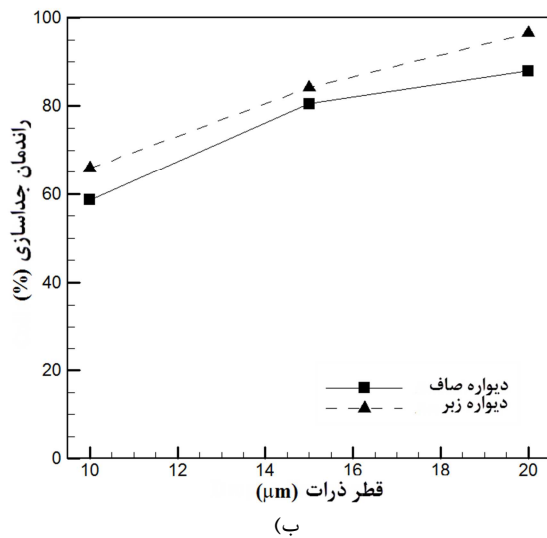
برای محاسبه راندمان قطره‌گیر در حالت صاف و زبر، جایگاه نازل در فاصله ۷۵ سانتی‌متری از قطره‌گیر و فشار کاری سیستم بر روی ۷۰ بار قرار داده شده است که قطرات اسپری شده به درون کانال توزیع منظم‌تری داشته باشند. با در نظر گرفتن رطوبت در محاسبه راندمان قطره‌گیری، رابطه راندمان قطره‌گیری به شکل زیر خواهد شد.

$$\eta_d = \frac{\dot{M}_{trap}}{\dot{M}_{in} - \dot{M}_{vapor}} \times 100 \quad (10)$$

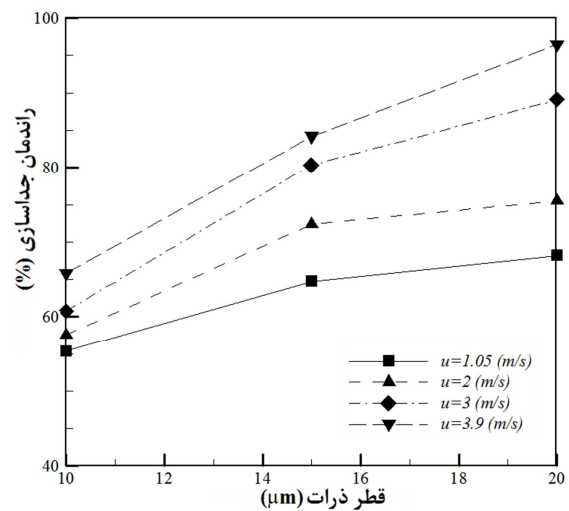
که در این رابطه  $\dot{M}_{vapor}$  دبی جرمی بخار آب ایجاد شده در طول کانال است و از تفاضل دبی جرمی بخار آب خروجی و دبی جرمی بخار آب ورودی کانال به دست می‌آید؛  $\dot{M}_{in}$  دبی جرمی آب تزریق شده توسط نازل‌ها و  $\dot{M}_{trap}$  میزان دبی جرمی آب به دام افتاده توسط صفحات قطره‌گیر می‌باشد. با اعمال مقادیر دبی جرمی بخار آب، حاصل شده از میزان رطوبت نسبی و دمای هوا، راندمان جمع‌آوری قطره‌گیرهای با سطح صاف و زبر در سرعت‌های جریان متفاوت و در اندازه ذرات مختلف در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نشان داده شده است. با افزایش سرعت و افزایش قطر قطرات به دلیل افزایش اینرسی قطرات، از جریان خط جریان هوا منحرف شده و به دیواره‌های قطره‌گیر برخورد کرده و راندمان جداسازی قطرات افزایش می‌یابد.



(الف)



شکل ۱۲- مقایسه راندمان جمع‌آوری قطره‌گیر با دیواره صاف و زبر در سرعت‌های الف (۳ m/s) ب (۳٫۹ m/s)



شکل ۱۱- راندمان قطره‌گیری محاسبه‌شده تجربی برای قطره‌گیر با صفحات با زبری ۳ روزه به ازای سرعت‌های متفاوت

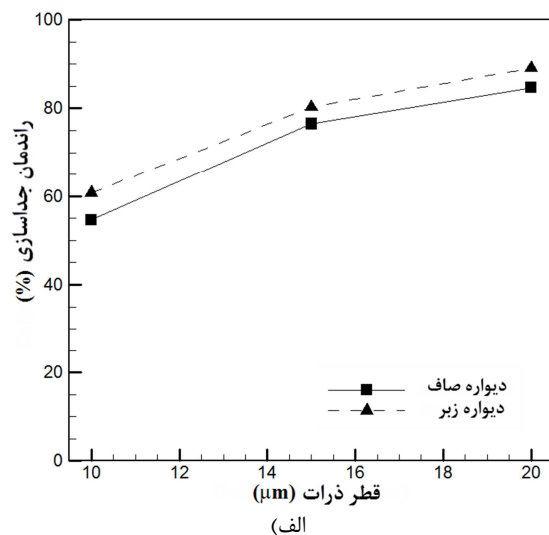
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله راندمان قطره‌گیری و افت فشار قطره‌گیر صفحه‌ای موجی مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر ایجاد زبری بر روی عملکرد این قطره‌گیر صفحه‌ای موجی به صورت آزمایشگاهی ارزیابی شده است. برای ایجاد زبری بر روی صفحات قطره‌گیر از موانع مفتولی به قطر ۰٫۴ میلی‌متر روی دیواره‌ها به صورت موازی استفاده شده است. دقت اندازه‌گیری‌های صورت گرفته با بررسی تأثیر فشار ورودی نازل بر راندمان قطره‌گیری تعیین گردید. در بررسی راندمان قطره‌گیری برای یک نازل در فشارهای در بالادست نازل متفاوت، با توجه به اختلاف ۰٫۰۹ میان مقادیر راندمان، ثابت ماندن اندازه قطرات و در نتیجه راندمان قطره‌گیری در فشارهای متفاوت نشان داده شد. از آنجا که راندمان قطره‌گیری با زیاد شدن فاصله میان صفحات قطره‌گیر و نازل‌های مه‌پاش با کاهش همراه است، این نتیجه حاصل می‌شود که مقادیری از قطرات میکرونی که به صورت اسپری به درون جریان هوا پخش می‌شوند، تبخیر شده و با افزایش فاصله قطره‌گیر و نازل‌ها میزان تبخیر افزایش می‌یابد. لذا با اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی ورودی و خروجی جریان و محاسبه میزان دبی جرمی تبخیر شده در طول مسیر کانال راندمان جمع‌آوری قطرات برای قطره‌گیر با صفحات صاف و زبر به دست آمده است. افزودن زبری به صفحات قطره‌گیر باعث افزایش راندمان به خصوص برای ذرات کوچک‌تر شد، تا حدی که در مورد نازل ۱۰ میکرونی در سرعت‌های ۱-۴ متر بر ثانیه، باعث افزایش ۲۰-۱۰٪ راندمان شد. نتایج به دست آمده از افزایش راندمان در حالی حاصل گردیده است که افزایش چندان در افت فشار استاتیک مشاهده نشده است. لذا با استفاده از افزودن زبری به سطوح می‌توان با احتساب افت فشارهای نه چندان بالاتر، راندمان قطره‌گیر را بهبود بخشید.

#### ۵- فهرست علائم

$d$	قطر قطره (μm)
$m$	جرم (Kg)

همان طور که از مقایسه شکل ۱۰ و شکل ۱۱ استنتاج می‌شود، مقادیر آزمایشگاهی، افزایش راندمان قطره‌گیری با اضافه کردن زبری را نشان می‌دهند. شکل ۱۲ افزایش راندمان قطره‌گیری تجربی را در دو سرعت متوسط جریان ۳ و ۳٫۹ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. بیشترین تأثیر در افزایش راندمان با افزودن زبری به صفحات قطره‌گیر مربوط به نتایج حاصل شده از نازل ۱۰ میکرونی بوده است که در سرعت‌های متوسط جریان ۱-۴ متر بر ثانیه، با ۲۰-۱۰٪ افزایش همراه بوده است. حال آنکه همان طور که در شکل ۵، مقادیر افت فشار برای قطره‌گیر با صفحات صاف و زبر مشاهده شد، افزودن زبری افت فشار قابل ملاحظه‌ای را ایجاد نکرده است که نشان دهنده برتری این روش در مقابل کاربری قطره‌گیرهای زیگزاگی با کانال تخلیه است.





[۱۰] علمشاهی فرهاد، رحیم زاده حسن، خادمی نژاد طه، تأثیر زاویه و تعداد خم‌ها بر عملکرد جریان و راندمان قطره‌گیرهای صفحه‌ای موجی، بیست و دومین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، (ISME2014) اهواز.

[11] Rafee R., Rahimzadeh H., Performance Evaluation of a Curved Type Vane Separator at Different Plate Spacings in the Range of 25 to 35mm Using Numerical Simulation, Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran (NSMSI), 2010.

[12] Rafee R., Rahimzadeh H., Ahmadi G., Numerical simulations of airflow and droplet transport in a wave-plate mist eliminator, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 88, No. 10, pp. 1393-1404, 10//, 2010.

[13] Hamed Estakhrsar M. H., Rafee R., Effect of drainage channel dimensions on the performance of wave-plate mist eliminators, Korean Journal of Chemical Engineering, pp. 1-11, 2013/04/13, 2013. English

[14] Banitabaei S. A., Rahimzadeh H., Rafee R., Determination of minimum pressure drop at different plate spacings and air velocity in a wave-plate mist eliminator, Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, Vol. 7, No. 4, pp. 590-597, 2012.

[15] J. Azzopardi B., S. Sanaullah K., Re-entrainment in wave-plate mist eliminators, Chemical Engineering Science, Vol. 57, No. 17, pp. 3557-3563, 9//, 2002.

[16] McNulty K., Monat J., Hansen O., Performance of commercial chevron mist eliminators, Chemical engineering progress, Vol. 83, No. 5, pp. 48-55, 1987.

[17] James P. W., Wang Y., Azzopardi B. J., Hughes J. P., The Role of Drainage Channels in the Performance of Wave-Plate Mist Eliminators, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 81, No. 6, pp. 639-648, 7//, 2003.

[18] Brunazzi E., Ghetti S., Merello C., Paglianti A., Experimental study of the re-entrainment in wave-plate demisters, Proceedings of Convegno Gricu, Vol. 1, pp. 625-628, 2004.

[19] *testo 512, Pressure and flow velocity measuring instrument 0 to 200 hPa*, Accessed; [http://www.testo.com.cn/product\\_detail/0560+5128/testo-512-Pressure-and-flow-velocity-measuring-instrument-0-to-200-hPa#tab-1](http://www.testo.com.cn/product_detail/0560+5128/testo-512-Pressure-and-flow-velocity-measuring-instrument-0-to-200-hPa#tab-1).

[20] *testo 625, Thermohygrometer*, Accessed; [http://www.testo.com.cn/product\\_detail/0563+6251/testo-625-Thermohygrometer](http://www.testo.com.cn/product_detail/0563+6251/testo-625-Thermohygrometer).

$\dot{M}$  دبی جرمی ( $\text{Kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )

$n$  تعداد خم‌ها (-)

$P$  فشار (kPa)

$Re$  عدد رینولدز (-)

$S$  پهنای کانال قطره‌گیر (mm)

$v$  سرعت گاز در ورودی (m/s)

#### علائم یونانی

$\alpha$  زاویه خم (radian, deg)

$\eta$  راندمان قطره‌گیری (-)

$\mu$  لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )

$\rho$  چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )

$\phi$  رطوبت نسبی (-)

$\omega$  نسبت رطوبت (-)

#### زیر نویس‌ها

$a$  هوا

$B$  خم

$d$  قطره

$g$  گاز

$in$  وارد شده به قطره‌گیر

$trap$  به دام افتاده در قطره‌گیر

$v$  بخار آب

#### ۶- تقدیر و تشکر

محققین در پایان لازم می‌دانند، مراتب سپاسگزاری و قدردانی را نسبت به آزمایشگاه تحقیقات مکانیک سیالات دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر ابراز کنند.

#### ۷- مراجع

- [1] Calvert S., Jashnani I. L., Yung S., Entrainment separators for scrubbers, Journal of the Air Pollution Control Association, Vol. 24, No. 10, pp. 971-975, 1974.
- [2] Chan J. K.-K., Golay M. W., Comparative evaluation of cooling tower drift eliminator performance, 1977.
- [3] Ushiki K., Nishizawa E., Beniko H., Iinoya K., Performance of a droplet separator with multistage rows of flat blades, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 15, No. 4, pp. 292-298, 1982.
- [4] Phillips H., Deakin A., Measurements of the collection efficiency of various demister devices, in Proceedings of the Fourth Annual Meeting of the Aerosol Society, Loughborough, Year, pp.
- [5] Jøsang A. I., Numerical and Experimental Studies of Droplet-Gas Flow, Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2002.
- [6] Verlaan C. C. J., Performance of novel mist eliminators, Ph.D. Thesis, 1991.
- [7] Bürkholz A., Droplet separation: VCH Verlagsgesellschaft, 1989.
- [8] Wang Y., James P., The calculation of wave-plate demister efficiencies using numerical simulation of the flow field and droplet motion, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 76, No. 8, pp. 980-985, 1998.
- [9] Wang Y. I., James P. W., Assessment of an Eddy-Interaction Model and Its Refinements Using Predictions of Droplet Deposition in a Wave-Plate Demister, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 77, No. 8, pp. 692-698, 11//, 1999.