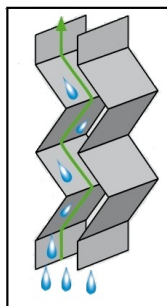


## بررسی عددی پارامترهای مؤثر بر عملکرد مدل برهم کنش ادی و قطره برای کاربرد در قطره گیر زیگزاگی ساده باصفحات موج دار

محمد هادی حامدی استخرسر<sup>۱</sup> و روح اله رفعی<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> شبیه سازی عددی، قطره گیر زیگزاگی ساده، راندمان قطره گیری، ثابت زمانی عمر ادی ها، تعداد خم های قطره گیر.</p>	<p>هدف این مقاله بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد مدل برهم کنش ادی و قطره (EIM) در پیش بینی پخش قطرات در اثر آشفتگی جریان در قطره گیرهای زیگزاگی ساده می باشد. جریان گاز و قطره در قطره گیر، به روش اویلری-لاگرانژی بررسی شده است. حل جریان گاز با استفاده از مدل آشفتگی تنش های رینولدزی دارای توابع بهبود یافته در نزدیکی دیواره انجام گرفته است و میدان جریان گاز در خم های قطره گیر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی ها نشان می دهد که با تعریف یک مقدار ثابت زمانی (<math>C_1</math>) برای تعیین عمر ادی ها در تمامی سرعت های جریان گاز نمی توان به پیش بینی های مناسبی برای پخش قطرات و راندمان قطره گیری رسید و مقدار ثابت زمانی با تغییر عدد رینولدز جریان گاز تغییر می کند. برای اعتبار سنجی، نتایج عددی با مشاهدات تجربی، نتایج تئوریک و شبیه سازی های عددی دیگر محققین مقایسه شده است، که هم خوانی خوبی را نشان می دهد. پس از بررسی اعتبار حل عددی و تعیین ثابت زمانی عمر ادی ها، برای سه قطره گیر زیگزاگی با مشخصات هندسه یکسان و با تعداد خم های متفاوت، بازدهی قطره گیری و افت فشار ایجاد شده با یکدیگر مقایسه شده است.</p>

معمولاً از قطره گیرها استفاده می شود. در خم های یک قطره گیر وقتی که مسیر جریان هوا تغییر می کند، قطرات به علت داشتن اینرسی بیشتر نمی توانند جریان هوا را تعقیب کنند، در نتیجه به دیواره ها برخورد می کنند و از جریان هوا جدا می شوند. چگونگی عملکرد قطره گیرها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- عملکرد قطره گیرهای زیگزاگی با صفحات موج دار

### ۱- مقدمه

واحدهای پتروشیمی، نیروگاه ها و پالایشگاه ها که نیازهای اجتناب ناپذیر جامعه بشری امروز را پاسخگو هستند، در دفع گرمای ناخواسته وجه اشتراک دارند. گرمای ناخواسته در این واحدها توسط آب حذف می گردد. برای استفاده مجدد از آب گرم شده، از برج های خنک کن تبخیری استفاده می شود. در طی این فرآیند مقدار زیادی از قطرات کوچک آب به همراه جریان هوا و بخار آب از برج خنک کن خارج می شوند. برای کاهش مقدار قطرات ریز خروجی

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: rafee@semnan.ac.ir

۱. فارغ التحصیل دوره کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان  
۲. استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

این مقاله، جریان‌های آشفتنه با عدد رینولدز پایین هستند. شبیه‌سازی عددی جریان دو فازی هوا و قطرات مایع می‌تواند به طراحان در افزایش بازدهی این قطره‌گیرها و کاهش افت فشار در آن‌ها کمک کند.

عملکرد و بازدهی قطره‌گیرهای زیگزاگی توسط وانگ و جیمز [۲] با مدل‌های آشفتگی استاندارد  $k-\varepsilon$  و مدل برهم‌کنش ادی و قطره<sup>۴</sup> ( $EIM$ ) مطالعه شده‌است. آن‌ها نشان دادند که نتایج حاصل از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$ ، مطابقت مناسبی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی دارد، و فقط برای قطرات با اندازه‌های کوچک نتایج به‌دست آمده از بازدهی قطره‌گیری با مشاهدات تجربی منطبق نیست.

گالتی و همکاران [۷] به شبیه‌سازی عددی جریان در قطره‌گیرهای دارای قلاب یا کانال تخلیه<sup>۵</sup> پرداختند و نشان دادند که مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد از توانایی لازم برای پیش‌بینی راندمان قطره‌گیری در این نوع قطره‌گیرها برخوردار نیست. آن‌ها از مدل SST  $k-\omega$  در تحلیل عددی خود استفاده کردند.

رفعی و همکاران [۳ و ۴] به کمک مدل‌های آشفتگی تنش رینولدزی استاندارد و بهبود یافته در نزدیکی دیواره، راندمان قطره‌گیری را در قطره‌گیر زیگزاگی ساده مورد بررسی قرار داده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مدل آشفتگی تنش رینولدز با توابع بهبود یافته در نزدیکی دیواره پیش‌بینی بهتری نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی از راندمان قطره‌گیری درون قطره‌گیرها ارائه می‌دهد. همچنین بنی‌طیابی و همکاران [۵]، تأثیر تغییر در فاصله بین صفحات قطره‌گیر را بر افت فشار قطره‌گیرهای منحنی شکل به صورت تجربی و عددی مطالعه نمودند. مطالعات آن‌ها بیانگر این مطلب است که با افزایش فاصله بین صفحات قطره‌گیر افت فشار ایجاد شده ابتدا کاهش می‌یابد ولی پس از یک مقدار معین افزایش خواهد یافت. نریمانی و شاه حسینی نیز [۸] به بهینه‌سازی ابعاد قطره‌گیرهای تیغه‌ای با

این وسیله همچون سایر وسایل صنعتی دارای معایبی در کنار مزایای آن است. قطره‌گیرها علی‌رغم این‌که باعث کاهش هدر رفت آب می‌شوند، در جریان هوا افت فشار ایجاد می‌کنند که این باعث بالا رفتن هزینه‌های فن در برج‌های خنک‌کن می‌شود.

اگر کسر جرمی جریان قطرات نسبت به جریان گاز کمتر از ۰/۱ باشد برای محدوده سرعت متوسط جریان گاز در قطره‌گیرهای مورد مطالعه (۱ تا ۵ متر بر ثانیه) و با توجه به فاصله صفحات قطره‌گیر و محدوده اندازه قطرات و همچنین با توجه به روابطی که کراو و همکاران [۱] برای بررسی صحت کوپلینگ یک‌طرفه<sup>۱</sup> ارائه کرده‌اند می‌توان ثابت کرد که کوپلینگ یک‌طرفه بین جریان گاز و جریان قطرات وجود دارد و از اثر حضور قطره بر جریان گاز چشم‌پوشی کرد و در نتیجه افت فشار جریان درون قطره‌گیر را منحصر به جریان هوا در نظر گرفت. بنابراین، شبیه‌سازی جریان گاز و قطره به روش اویلری-لاگرانژی<sup>۲</sup> با کوپلینگ یک‌طرفه انجام شده‌است. جریان گاز به صورت پایا در نظر گرفته می‌شود و حرکت قطرات با روش لاگرانژی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. لازم به ذکر است که این فرض در تمامی تحقیقات گذشته [۲-۶] به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌است.

با در دست داشتن مدل‌های مناسب برای توصیف پارامترهای فیزیکی جریان به خصوص تغییرات سرعت و فشار می‌توان بهینه‌سازی‌های لازم برای رسیدن به قطره‌گیری با بازدهی بالاتر انجام داد. تعیین نوع جریان در قطره‌گیرها را می‌توان گام اول در مدل‌سازی آن دانست. عدد رینولدز<sup>۳</sup> در جریان گاز با رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$Re_g = \frac{\rho_g \bar{u}_g (2S)}{\mu_g} \quad (1)$$

که در آن  $S$  فاصله صفحات،  $u_g$  سرعت متوسط جریان گاز،  $\rho_g$  و  $\mu_g$  به ترتیب چگالی و ویسکوزیته جریان گاز می‌باشد. با توجه به عدد رینولدز، جریان‌های مورد بحث در

<sup>1</sup> One Way Coupling

<sup>2</sup> Eulerian-Lagrangian

<sup>3</sup> Reynolds Number

<sup>4</sup> Eddy Interaction Model

<sup>5</sup> Drainage Channels

در نظر گرفت. معادلات حاکم بر جریان تراکم ناپذیر گاز در جریان پایا را می‌توان به صورت کلی مطابق رابطه (۲) نشان داد.

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_k}(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_k}) + S_\varphi \quad (2)$$

که در آن، مقادیر  $\varphi$  (متغیر اصلی معادله انتقال)،  $\Gamma_\varphi$  (ضریب نفوذ<sup>۲</sup>) و  $S_\varphi$  (ترم‌های چشمه ای) برای معادلات مختلف (پیوستگی، مومنتوم، تنش‌های رینولدزی و نرخ اضمحلال انرژی) از جدول ۱ به دست می‌آیند. در جدول مذکور تنش رینولدزی با رابطه  $\tau_{ij} = \rho R_{ij}$  داده می‌شود که در آن  $R_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$  بوده و  $u'_i$  و  $u'_j$  نوسانات لحظه‌ای سرعت در جهت‌های  $i$  و  $j$  هستند. برای مدل تنش رینولدز بهبود یافته در نزدیکی دیواره<sup>۳</sup> هر یک از پارامترهای  $P_{ij}$  (تولید آشفتگی توسط کرنش متوسط)،  $\Phi_{ij}$  (همبستگی بین فشار و کرنش آشفتگی)،  $\varepsilon_{ij}$  (اضمحلال انرژی آشفتگی) و  $G_k$  (تولید انرژی جنبشی آشفتگی) و مقادیر ثوابت مختلف معادلات فوق توسط رفعی و همکارانش [۳] به‌طور کامل تشریح شده‌است.

جدول ۱- مقادیر $\varphi$ ، $\Gamma_\varphi$ و $S_\varphi$ در معادله انتقال (۲)			
معادله	$\Gamma_\varphi$	$\varphi$	$S_\varphi$
پیوستگی	۰	۱	۰
مومنتوم	$\mu$	$u_i$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho R_{ij})$
تنش رینولدز	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$R_{ij}$	$P_{ij} + \phi_{ij} - \varepsilon_{ij}$
نرخ اضمحلال انرژی <sup>۴</sup>	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$\varepsilon$	$\frac{\varepsilon}{k}(C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon)$

در مسیر خم‌های قطره‌گیر سرعت گاز تغییر می‌کند و اختلاف سرعت بین جریان گاز و قطرات که دارای اینرسی بیشتری هستند به وجود می‌آید. بر این اساس یک نیروی

استفاده از حل عددی جریان پرداختند و اثر پارمترهایی همچون سرعت گاز، زاویه خم و فاصله صفحات را مورد توجه قرار دادند.

اخیراً زامورا و کایسر [۶] با استفاده از مدل SST k- $\omega$  حل عددی را برای جریان درون چهار نوع قطره‌گیر با هندسه‌های متفاوت بررسی نمودند. تمامی کارهای فوق با نتایج تجربی فیلیپس و دیکین [۹] مقایسه شده‌است. همچنین در پایان‌نامه‌های جوسانگ [۱۰] و ورلان [۱۱] به تفصیل، جریان گاز و قطره در داخل قطره‌گیرهای زیگزاگی ساده و منحنی شکل مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مطالعه میدان جریان گاز در محل خم‌ها و تغییرات سرعت و فشار جریان گاز در این نواحی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. اثرات تغییر ثابت زمانی عمر ادی‌های جریان گاز بر نتایج شبیه‌سازی جریان گاز و قطره بررسی شده‌است. این درحالی است که در اغلب مطالعات قبلی از یک ضریب ثابت برای تعیین عمر ادی‌ها در جریان‌های گاز با عدد رینولدزهای مختلف استفاده شده‌است. همچنین نشان داده خواهد شد که حتی در کمترین عدد رینولدز مورد مطالعه، نمی‌توان جریان را به صورت آرام فرض کرد و پخش قطرات در اثر آشفتگی را ناچیز در نظر گرفت. در پایان تأثیر تغییر تعداد خم‌های قطره‌گیرهای زیگزاگی ساده با صفحات موج‌دار بر عملکرد آن‌ها از جمله بازدهی قطره‌گیری و افت فشار حاصله مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

## ۲- معادلات حاکم بر جریان گاز و قطره

باتوجه به آن‌که عدد ماخ<sup>۱</sup> (نسبت سرعت جریان گاز به سرعت صوت) جریان گاز درون قطره‌گیر با بیشترین سرعت آن (۵ متر بر ثانیه) بسیار کمتر از ۰/۳ است، با دقت قابل قبولی می‌توان این جریان‌ها را تراکم‌ناپذیر

<sup>۱</sup> Mach number

<sup>۲</sup> Diffusion Coefficient

<sup>۳</sup> Reynolds Stress Model with Enhanced Wall Treatment

<sup>۴</sup> Energy Dissipation Rate

$$\text{Re}_r = \frac{\rho_g d_p |\vec{u}_p - \vec{u}_g|}{\mu_g} \quad (۶)$$

مطابق با رابطه ارائه شده توسط مرسی و الکساندر [۱۳] ضریب درگ  $C_D$  از عبارت رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$C_D = a + \frac{b}{\text{Re}_r} + \frac{c}{\text{Re}_r^2} \quad (۷)$$

که در آن  $a$ ،  $b$  و  $c$  اعداد ثابت هستند. پراکندگی قطرات در فاز آشفته سیال، با مدل ردیابی تصادفی<sup>۵</sup> پیش‌بینی می‌شود. در روش عددی، برای پیش‌بینی خط سیر فاز قطرات در جریان آشفته، از سرعت گاز ( $u_g$ ) در معادلات حرکت قطرات استفاده می‌شود. سرعت لحظه‌ای گاز در جریان آشفته از رابطه (۸) تعیین می‌شود.

$$\vec{u}_g = \bar{u}_g + u'_g \quad (۸)$$

در مدل عمر زمانی ادی<sup>۶</sup>، برهم‌کنش پی‌درپی قطره با ادی‌های آشفته فاز سیال شبیه‌سازی می‌شود. در این مدل هر ادی، با سرعت نوسانی ( $w'$ ،  $v'$ ،  $u'$ ) و عمر ادی ( $\tau_e$ ) مشخص می‌شود. مقادیر  $u'$ ،  $v'$  و  $w'$  در توزیع احتمال گاوسی<sup>۷</sup>، وقتی که مدل آشفستگی انتقال تنش‌های رینولدزی<sup>۸</sup> استفاده می‌شود با رابطه‌های (۹-الف) تا (۹-ج) بیان می‌شوند.

$$u'_g = \zeta \sqrt{u'^2_g} \quad (۹-الف)$$

$$v'_g = \zeta \sqrt{v'^2_g} \quad (۹-ب)$$

$$w'_g = \zeta \sqrt{w'^2_g} \quad (۹-ج)$$

که در آن  $\zeta$  یک عدد تصادفی با توزیع نرمال<sup>۹</sup> است.

در مدل برهم‌کنش ادی و قطره فرض می‌شود که قطرات در مسیر حرکت خود در میدان جریان گاز داخل ادی‌هایی با مقیاس طولی<sup>۱۰</sup> مجزا، که با رابطه زیر بیان می‌شوند، قرار می‌گیرند.

درگ به قطرات وارد می‌شود

$$\vec{Drag} = \frac{1}{2} \rho_g V_{rel}^2 A C_D \frac{\vec{V}_{rel}}{V_{rel}}$$

تفاوت سرعت جریان گاز و قطره ( $\vec{V}_{rel} = \vec{u}_g - \vec{u}_p$ ) عامل ایجاد نیروی درگ است. خط سیر فاز قطرات به کمک معادله حرکت قطرات پیش‌بینی می‌شود. با نوشتن رابطه تعادل بین نیروهای مؤثر بر قطره و نیروهای اینرسی می‌توان به معادله (۳) دست یافت.

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D (\vec{u}_g - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho_g)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (۳)$$

که در آن  $F$  شتاب ناشی از نیروهای سافمن<sup>۱</sup>، براونی<sup>۲</sup> و شناوری<sup>۳</sup> می‌باشد و  $F_D (\vec{u}_g - \vec{u}_p)$  نیروی درگ بر واحد جرم قطره می‌باشد که در آن ضریب  $F_D$  با رابطه (۴) بیان می‌شود.

$$F_D = \frac{18\mu_g C_D \text{Re}_r}{\rho_p d_p^2} \quad (۴)$$

جوسانگ [۱۲] در پایان‌نامه دکتری خود ذکر کرده است که به‌علت ناچیز بودن چگالی فاز گازی در برابر فاز قطرات و نیز باتوجه به مطالعات عددی انجام شده، از اثرات سایر نیروها از قبیل نیروی سافمن، نیروی براونی و نیروهای شناوری در مقایسه با نیروی درگ جریان گاز بر قطره، ناچیز و قابل صرف‌نظر هستند و بنابراین می‌توان آن‌ها را نادیده گرفت. دیگر محققین [۲ و ۶] نیز از این فرض در مطالعات خود استفاده کرده‌اند. زمان آرامش قطره<sup>۴</sup> با رابطه (۵) تعریف می‌شود.

$$\tau = \frac{4\rho_p d_p}{3\rho_g C_D |\vec{u}_g - \vec{u}_p|} \quad (۵)$$

که در این رابطه  $u_g$  بیانگر سرعت گاز،  $u_p$  سرعت قطره،  $\mu_g$  ویسکوزیته دینامیکی سیال،  $\rho_g$  چگالی گاز،  $\rho_p$  چگالی قطره و  $d_p$  اندازه قطره می‌باشد. عدد رینولدز نسبی جریان گاز روی قطره از رابطه (۶) به‌دست می‌آید.

<sup>5</sup> Discrete Random Walk Model

<sup>6</sup> Eddy Lifetime Model

<sup>7</sup> Gaussian

<sup>8</sup> Reynolds Stress Transport Model (RSTM)

<sup>9</sup> Normal Distribution

<sup>10</sup> Eddy Length Scale

<sup>1</sup> Saffman's Lift Force

<sup>2</sup> Brownian

<sup>3</sup> Buoyancy

<sup>4</sup> Relaxation Time

معادلات حاکم بر مدل آشفنگی و روابط مربوط به تجزیه معادلات مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های این تحقیق (مدل انتقال تنش‌های رینولدزی با توابع بهبود یافته در نزدیکی دیواره<sup>۲</sup>) توسط رفعی و همکاران [۳] به‌طور کامل تشریح شده‌است.

نرم‌افزار فلونت<sup>۳</sup> برای حل عددی معادلات حاکم مورد استفاده قرار گرفته‌است. روش تجزیه معادلات فاز پیوسته روش حجم محدود<sup>۴</sup> (FVM) بوده که در شبکه رویهم<sup>۵</sup> به‌کار برده می‌شود. در تجزیه ترم‌های جابه‌جایی معادلات انتقال از روش بالادست<sup>۶</sup> استفاده شده‌است. باتوجه به تراکم‌ناپذیر بودن جریان روش فشار مبنای<sup>۷</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای ارتباط بین فشار و سرعت، معادله تصحیح فشار با الگوریتم سیمپل<sup>۸</sup> مورد استفاده قرار گرفته‌است.

### ۳- شرایط مرزی

شرایط مرزی آشفنگی در ورودی جریان معمولاً به‌صورت معین بودن شدت آشفنگی،  $T_i$  و قطر هیدرولیکی  $D_H$  بیان می‌شود. بر این اساس مقادیر  $k$  و  $\varepsilon$  با روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شوند.

$$k_{in} = \frac{3}{2} (U_{inlet} T_i)^2 \quad (14)$$

$$\varepsilon_{in} = \frac{C_\mu^{3/4} (k_{in})^{3/2}}{l} \quad (15)$$

که در آن  $l = 0.07 R_h$  است ( $R_h$  شعاع هیدرولیکی است). مقادیر تنش‌های رینولدز نیز با روابط زیر تخمین زده می‌شوند:

<sup>2</sup> Reynolds Stress Transport Model with Enhanced Wall Treatment

<sup>3</sup> Fluent

<sup>4</sup> Finite Volume Method

<sup>5</sup> Collocated Grids

<sup>6</sup> Upwind

<sup>7</sup> Pressure Based Method

<sup>8</sup> SIMPLE

$$L_e = 0.164 \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

مقیاس زمانی عمر ادی‌ها<sup>۱</sup> به‌طور تقریبی با معادله (۱۱) تعیین می‌شود.

$$T_L = C_L \frac{k}{\varepsilon} \quad (11)$$

$C_L$  مقدار ثابت عمر ادی‌ها است که در وضعیت‌های مختلف، متفاوت است. مطابق با بیان تین و احمدی [۱۴] این پارامتر در شرایط مختلف می‌تواند مقادیری در بازه ۰٫۲ تا ۰٫۹۶ اختیار کند.

در این مقاله نشان داده شده‌است که نتایج شبیه‌سازی‌های عددی به‌شدت مقدار این پارامتر وابسته است. همچنین با تغییر این پارامتر برای جریان‌هایی با اعداد رینولدز مختلف می‌توان به پیش‌بینی‌های بهتری دست یافت.

مدت زمانی که طول می‌کشد قطره از ادی عبور کند با رابطه (۱۲) تعیین می‌شود.

$$t_{cross} = -\tau \ln \left[ 1 - \left( \frac{L_e}{\tau |u_g - u_p|} \right) \right] \quad (12)$$

این عبارت وقتی معتبر است که  $1 < \frac{L_e}{\tau |u_g - u_p|}$  برقرار

باشد. اگر این شرط ارضاء نشود قطره در ادی به دام می‌افتد و زمان عبور قطره از ادی با عمر ادی برابر می‌شود. برای عمر ادی‌ها دو رابطه متفاوت ارائه شده‌است که یکی به‌صورت ثابت و دیگری به‌صورت تصادفی می‌باشد که به‌ترتیب با رابطه‌های (۱۳-الف) و (۱۳-ب) مطرح می‌شوند.

$$\tau_e = 2T_L \quad (13-الف)$$

$$\tau_e = -T_L \log(r) \quad (13-ب)$$

که در این رابطه  $r$  یک عدد تصادفی بین صفر و یک است. در این مقاله در شبیه‌سازی‌ها از روش تصادفی برای تعیین عمر ادی‌ها استفاده شده‌است.

<sup>1</sup> Eddy Life Time

اعداد رینولدز و اوهنسورگ<sup>۱</sup> به دست می‌آید که در رابطه (۱۸) نشان داده شده‌است. عدد اوهنسورگ نیز مطابق رابطه (۱۹) تعریف می‌شود.

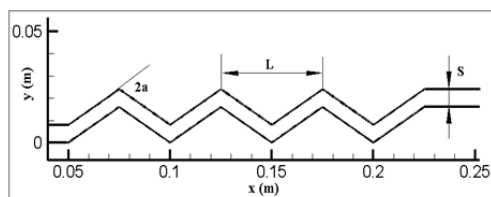
$$k = Oh \cdot Re^{1.25} = \left( \frac{\rho^3 u_n^5 d^3}{\mu \sigma^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (18)$$

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \alpha d}} \quad (19)$$

در این روابط چگالی، ویسکوزیته دینامیکی و کشش سطحی مربوط به قطره می‌باشند. آن‌ها ذکر کرده‌اند که اگر  $k < 57.7$  باشد ذرات بر روی دیواره نشست می‌کنند. برای شرایط ذکر شده در بالا مقدار  $k$ ،  $37/4$  خواهد بود و بنابراین فرض نشست ذرات بر روی دیواره جامد مورد تأیید است. برای شبیه‌سازی نشست قطرات بر روی دیواره، از شرط مرزی دام<sup>۲</sup> در نرم‌افزار استفاده شده‌است. به دلیل این‌که قطرات به دام افتاده روی یکدیگر جمع می‌شوند، قطرات بزرگتر یا فیلم مایع روی دیواره‌های جامد تشکیل می‌شود. این نکته حائز اهمیت است که این شرط مرزی نمی‌تواند پدیده جدایش لایه نازک آب را از روی دیواره‌ها به خوبی شبیه‌سازی کند [۶]، لیکن در سرعت‌های جریان گاز مورد بحث احتمال جدایش قطرات از روی فیلم مایع تشکیل شده بر روی دیواره‌ها وجود ندارد.

#### ۴- تولید شبکه

در شکل ۲ هندسه قطره‌گیر زیگزاگی ساده با صفحات موجدار و پارامترهای هندسی مهم آن آمده و در جدول ۲ جزئیات این ابعاد آن بیان شده‌است.



شکل ۲- هندسه قطره‌گیر زیگزاگی ساده دارای صفحات موجدار

$$\overline{u_1'^2} = k, \quad \overline{u_2'^2} = \overline{u_3'^2} = k \quad (16)$$

$$\overline{u_i' u_j'} = 0, \quad i \neq j$$

در تمامی دیواره‌ها شرط مرزی عدم لغزش برای مؤلفه‌های سرعت در نظر گرفته می‌شود. برای شرایط مرزی سلول مجاور دیواره از توابع دیواره بهبود یافته استفاده می‌شود [۳]. برای شرط مرزی تنش‌های رینولدزی در صورت استفاده از توابع دیواره استاندارد از روابطی استفاده می‌گردد که توسط لاندرو و همکاران [۱۵] ارائه شده‌اند. هنگام استفاده از توابع دیواره بهبود یافته و نیز به دلیل آن‌که بهبودهایی در ترم کرنش فشاری اعمال می‌شود از شرط مرزی گرادیان صفر در جهت عمود بر دیواره برای تنش‌های رینولدزی استفاده می‌گردد.

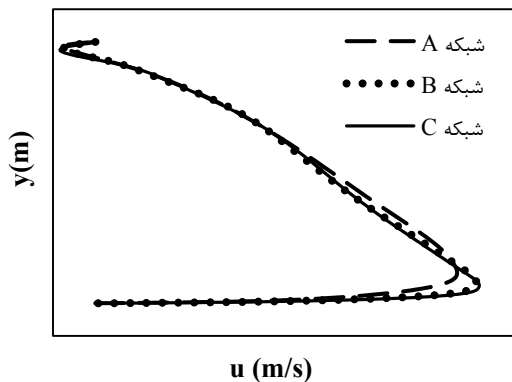
هنگامی که انرژی جنبشی قطرات در برخورد با دیواره به اندازه کافی کم باشد، قطره بر روی دیواره نشست می‌کند و ترشح قطرات یا تولید قطرات ریزتر در اثر برخورد قطره با دیواره وجود نخواهد داشت. در بحث امکان ترشح قطرات یکی از معیارها عدد وبر برخورد عمودی است که با رابطه (۱۷) بیان می‌شود.

$$We_{nb} = \frac{\rho u_n^2 d}{\sigma} \quad (17)$$

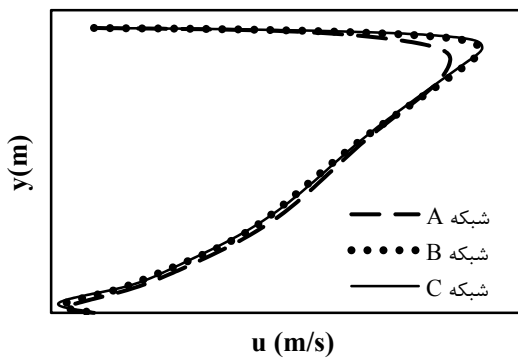
برای بزرگترین قطرات آب با قطر  $d=15\mu\text{m}$  و چگالی  $\rho=1000\text{kg/m}^3$  و کشش سطحی  $\sigma=7.34 \times 10^{-2}\text{N/m}$ ، اگر سرعت عمودی برخورد قطره با دیواره  $u_n=5\text{m/s}$  باشد (بایستی توجه داشت که در عمل هیچ‌گاه برای محدوده سرعت‌های مورد بحث در قطره‌گیرها این اتفاق نمی‌افتد و همواره سرعت عمودی قطرات در برخورد با دیواره کمتر از این مقدار خواهد بود)، عدد وبر برخورد عمودی برابر با  $We_{nb}=5.0$  به دست خواهد آمد. مطالعات استانتون و روتلند [۱۶] نشان داده است که اگر  $We_{nb} \leq 5.0$  باشد ترشح قطرات از روی سطح اتفاق نمی‌افتد و قطرات بر روی سطح جامد نشست می‌کنند. البته موندو و همکاران [۱۷] از معیار دیگری برای تشخیص نشست قطرات استفاده کرده‌اند که از ترکیب

<sup>1</sup> Ohnesorge Number

<sup>2</sup> Trap



(الف)



(ب)

شکل ۳- مقایسه پروفیل سرعت  $u$  (در راستای محور  $x$ ) در مقاطع: الف)  $x=0.175m$  و ب)  $x=0.150m$ .

همان‌طور که از شکل ۳ برمی‌آید نتیجه حاصله از دو شبکه  $B$  و  $C$  کاملاً برهم منطبق می‌باشند که نشان‌دهنده این است که از این اندازه سلول کوچکتر دیگر تأثیری در نتایج به‌دست‌آمده نداشته و حل عددی جریان مستقل از شبکه شده‌است. بنابراین چون شبکه  $B$  با تعداد سلول کمتر می‌تواند پارامترهای فیزیکی جریان را به‌خوبی توصیف کند از این شبکه برای شبیه‌سازی‌های این تحقیق استفاده شده‌است.

شبکه  $B$  در شکل ۴ نشان داده شده‌است، که در آن می‌توان چگونگی ریزتر شدن سلول‌ها در نزدیکی دیواره‌ها در محل خم‌ها را مشاهده کرد.

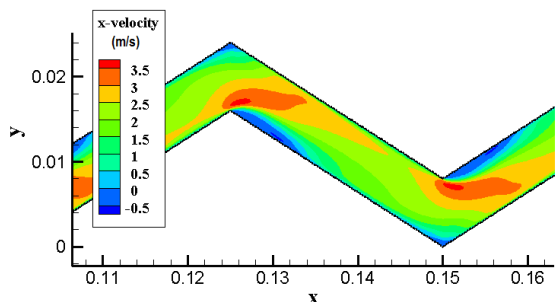
جهت بررسی استقلال شبکه در حل عددی برای هر سه سرعت مورد مطالعه در این تحقیق پس از تحلیل جریان سیال، پروفیل‌های سرعت در چند مقطع مجزا درون کانال، برای چند شبکه‌بندی مختلف با اندازه سلول‌های متفاوت، مقایسه شده‌اند. برای نمونه در شکل ۳-الف و ۳-ب پروفیل سرعت در راستای  $x$  در دو مقطع ( $x=0.175$  و  $x=0.150$ )، یعنی در خم‌های پنجم و ششم قطره‌گیرمورد نظر، برای جریان سیال با سرعت متوسط ۵ متر بر ثانیه با سه شبکه مختلف نشان داده شده‌است.

جدول ۲- جزئیات هندسه قطره‌گیرزنگاری با صفحات

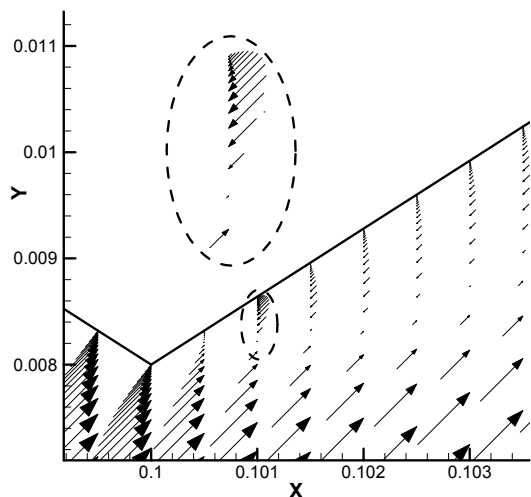
موجدار	
تعداد صفحات	۱۳
تعداد خم‌ها (N)	۷
عمق صفحات (m)	۰.۳۵۳
فاصله صفحات (S)(m)	۰.۰۰۸
فاصله بین دو خم (L)(m)	۰.۱۰۵
زاویه خم (زا)(°)	۶۶.۲
دامنه خم (m)	۰.۱۰۰۷۵

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود تعداد خم‌ها، برابر ۷ خم ذکر شده‌است که از مجموع ۶ خم کامل و دو نیم خم تشکیل شده‌است.

برای نشان دادن استقلال جواب‌ها از شبکه حل، سه شبکه مختلف تولید شده‌است. تعداد سلول‌ها در این شبکه‌ها که با نمادهای  $A$ ،  $B$  و  $C$  نشان داده شده‌اند به‌ترتیب ۲۵۰۰۰، ۱۰۵۰۰۰ و ۱۶۰۰۰۰ سلول چهارضلعی می‌باشد. شبکه‌ها به‌گونه‌ای تولید شده‌اند که سلول‌های نزدیک دیواره ریزتر باشند تا بتوان گرادیان‌های شدید سرعت را به‌درستی پیش‌بینی نمود و در ضمن ملاحظات مربوط به  $y+$  نخستین سلول نزدیک به دیواره نیز رعایت گردد. به‌عنوان مثال سائز شبکه  $B$  در نزدیکی دیواره ۰/۰۶ میلی‌متر انتخاب شده‌است.

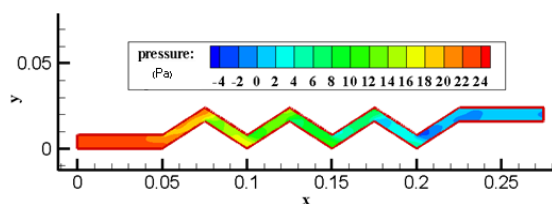


شکل ۵- کانتورهای مولفه  $u$  سرعت سرعت در محل خم‌ها

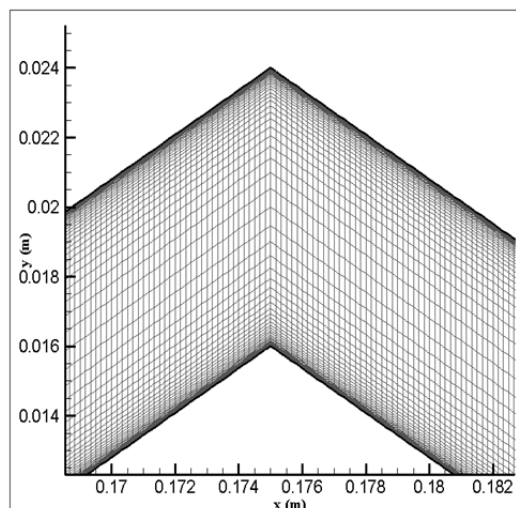


شکل ۶- بردارهای سرعت در محل خم‌ها

در شکل ۷ کانتور فشار در طول قطره‌گیر نشان داده شده‌است که بیانگر این مطلب می‌باشد که افزایش سرعت موجب کاهش فشار استاتیکی در طول کانال قطره‌گیر می‌شود. برای مثال اگر گاز با سرعت ۲ متر بر ثانیه وارد کانال موردنظر شود موجب افت فشار کل معادل با  $22/7$  پاسکال می‌شود که این افت فشار می‌بایست به وسیله فن در یک برج خنک‌کن جبران گردد. طراحی بهینه در هندسه قطره‌گیر مربوط به حالتی است که کمترین افت فشار و بیشترین راندمان وجود داشته باشد.



شکل ۷- کانتورهای فشار استاتیکی در طول قطره‌گیر



شکل ۴- نمایی از شبکه B (دارای  $105,000$  سلول) در محل خم

### ۵- توصیف فیزیکی میدان جریان گاز

یکی از روش‌های بررسی صحت شبیه‌سازی‌ها، تبیین فیزیکی نتایج به‌دست آمده و بررسی مطابقت آن‌ها با قوانین فیزیکی است.

شکل ۵ کانتور<sup>۱</sup> سرعت در راستای  $x$  در محل خم‌ها را نشان می‌دهد که بعد از هر خم، روی دیواره لایه مرزی ایجاد شده و سبب می‌شود بخشی از جریان از جریان اصلی جدا شده و مسیر عبور جریان اصلی را تنگ‌تر کند و همین امر باعث می‌شود که سرعت جریان اصلی گاز در در این ناحیه افزایش یابد. این کانتور برای سرعت متوسط ۲ متر بر ثانیه ارائه شده‌است. جدایش جریان بعد از هر خم، سبب ایجاد نواحی با سرعت‌های متفاوت می‌شود که برای نمونه در شبیه‌سازی جریان گاز با سرعت ورودی ۲ متر بر ثانیه، دو مقدار کمینه و بیشینه  $0/5$  و  $3/5$  مشاهده می‌شود که اختلاف زیادی با یکدیگر دارند. در شکل ۶ بردار سرعت در راستای  $x$  نشان داده شده‌است. در این شکل به خوبی مشهود است که پس از عبور جریان از هر خم، در نواحی نزدیک دیواره گردابه‌هایی با سرعت‌های ناچیز اما در خلاف جهت حرکت جریان گاز درون کانال تشکیل می‌شود.

<sup>1</sup> Countours



خطای ناشی از حل معادلات تا مرتبه  $10^{-5}$  و همچنین مقایسه دبی جرمی در مقطع ورودی و خروجی تا دقت یک هزارم در نظر گرفته شده است.

تحلیل جریان دوفازی گاز و قطره برای سرعت‌های  $1 \text{ (m/s)}$ ،  $2 \text{ (m/s)}$  و  $5 \text{ (m/s)}$  انجام شده و گاز عبوری هوا فرض شده و عدد رینولدز به ترتیب برابر با مقدار  $1/0.96$ ،  $2/1.92$  و  $5/4.77$  می‌باشد. لازم به ذکر است راندمان قطره‌گیری برابر با جرم قطرات به دام افتاده به جرم کل قطرات ردیابی شده می‌باشد.

در رابطه (۲۰) مدل پیشنهادی بورخولز [۱۸] برای تعیین بازدهی هر خم از قطره‌گیر صفحه موجی ساده (بدون داشتن کانال‌های تخلیه<sup>۲</sup>) که با  $\eta_b$  نمایش داده می‌شود بیان شده است. در این مدل فرض بر این است که نیروی درگ اعمال شده بر قطره با نیروی جانب مرکز مساوی است.

$$\eta_B = \frac{\rho_d u d^2}{18 \mu S} \alpha \quad (10)$$

که در این رابطه  $K$  پهنای کانال در مقطع ورودی،  $\alpha$  زاویه خم،  $u$  سرعت متوسط گاز در مقطع ورودی و  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی گاز می‌باشد. با فرض اختلاط کامل قطرات بعد از هر خم بازدهی کلی قطره‌گیر با  $n$  خم که با  $\eta$  نمایش داده می‌شود در رابطه (۲۱) بیان شده است [۱۶].

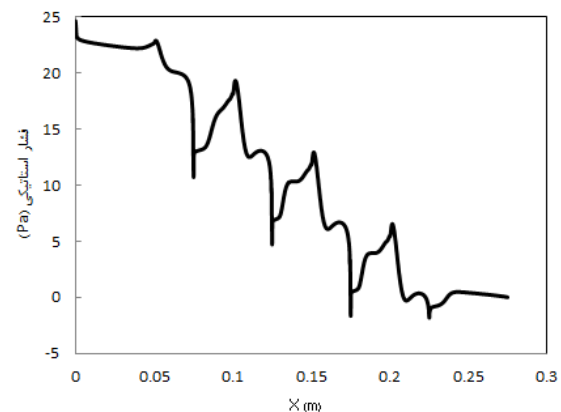
$$\eta = 1 - (1 - \eta_B)^n \quad (21)$$

در شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده، راندمان قطره‌گیری با تقسیم جرم قطرات به دام افتاده در قطره‌گیر بر جرم کل قطرات ورودی محاسبه شده است. یعنی با داشتن جرم قطرات به دام افتاده در قطره‌گیر و جرم قطرات ورودی به آن می‌توان نوشت:

$$\eta = \frac{\text{جرم کل قطرات به دام افتاده}}{\text{جرم کل قطرات ورودی}} \quad (22)$$

البته روابط (۲۰) و (۲۱) روابط تئوری بورخولز بوده و از آن‌ها برای محاسبه راندمان قطره‌گیری تئوری و مقایسه با

برای درک بهتر از نحوه تغییرات فشار در طول قطره‌گیر در شکل ۸ تغییرات فشار استاتیکی بر روی سطح دیواره پایینی کانال نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که بعد از هر خم در ناحیه جدایش فشار کاهش یافته و سپس تا محل خم بعدی افزایش می‌یابد. در ناحیه جدایش به علت تنگ شدن مقطع سرعت زیاد می‌شود (شکل ۵) و فشار کاهش می‌یابد (شکل ۷). پس از ناحیه جدایش جریان دوباره مقطع عبور جریان افزایش می‌یابد و سرعت متوسط جریان گاز کم شده و فشار افزایش می‌یابد. اما آنچه مسلم است به علت افت فشار اصطکاکی به مقدار قبلی خود بر نمی‌گردد. این امر به طور تناوبی تکرار می‌شود تا جایی که در مقطع خروجی به کمترین مقدار خود می‌رسد.



شکل ۸- منحنی تغییرات فشار در سطح دیواره پایینی قطره‌گیر

## ۶- اعتبارسنجی حل عددی

در این بخش عملکرد قطره‌گیرها با ردیابی قطرات تزریق شده در مسیر جریان گاز با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت<sup>۱</sup> بررسی شده است. معادلات میانگین‌گیری شده زمانی جریان، انرژی جنبشی آشفتگی، معادلات نرخ اضمحلال انرژی و تنش‌های رینولدزی درون کانال بر مبنای روش حل مرتبه دوم تحلیل شده و شرط همگرایی، کاهش

<sup>2</sup> Drainage Channel

<sup>1</sup> Fluent

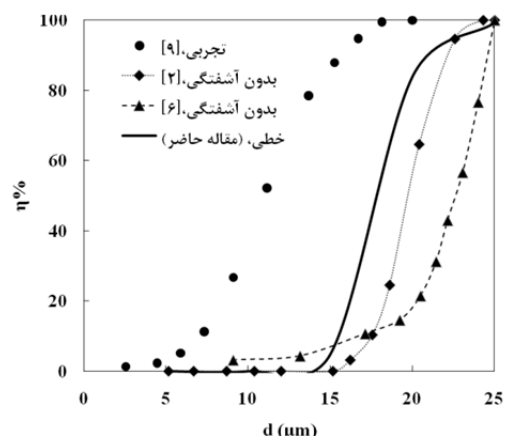
پاسخگو نمی‌باشد. در این حالت معادلات جریان آرام هیچگونه نوسانی را برای سرعت گاز در محل قطره در نظر نمی‌گیرند و همین امر سبب اختلاف نتایج عددی به دست آمده با مقادیر تجربی است.

برای ارزیابی عملکرد قطره‌گیر در سرعت‌های ۲ (m/s) و ۵ (m/s)، به دلیل آشفته بودن رژیم جریان از مدل تنش رینولدز با رفتار توابع بهبودیافته در نزدیکی دیواره استفاده شده است. قطرات مایع با تعداد و اندازه‌های متفاوت با توزیع خطی و با سرعتی برابر با سرعت جریان هوا در درون قطره‌گیر تزریق شده‌اند. تعداد قطرات برای اندازه‌های کوچک، کمتر و برای اندازه‌های بزرگ، بیشتر انتخاب شده‌اند. که به طور کلی کمترین تعداد قطرات تزریقی برابر با ۵۰۰ قطره و بیشترین آن برابر با ۳۰۰۰ قطره می‌باشد. تزریق قطرات به گونه‌ای است که اولین قطره در مختصات (۰، ۰/۱۰۰۰۵) و آخرین قطره در مختصات (۰، ۰/۱۰۰۷۵) به طور یکنواخت و با فاصله‌های برابر به درون کانال تزریق شده‌اند. برای سرعت‌های ۲ (m/s) و ۵ (m/s) جواب‌های به دست آمده نسبت به تغییرات ثابت مقیاس زمانی<sup>۳</sup> حساس بوده و به همین دلیل سه مقدار متفاوت برای ثابت  $C_L$  (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳) در نظر گرفته شده است. حل عددی معادله حرکت قطره با روش رانگ کوتا انجام گرفته است.

راندمان قطره‌گیری پیش‌بینی شده با نتایج تجربی فیلیپس و دیکین و همچنین با نتایج تئوری بورخولز در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، کلیه نتایج به دست آمده از روش پراکندگی آشفته (با در نظر گرفتن نوسانات سرعت گاز)، با ثابت‌های زمانی مختلف، این توانایی را دارند که مشاهدات تجربی و همچنین نتایج تئوری را به خوبی توصیف کنند و نتایجی را به دست دهند که با نتایج تجربی و تئوری مطابقت خوبی داشته باشند. اما در این بین، نتایج به دست آمده با ثابت زمانی ۰/۲ برای سرعت ۲ (m/s) و با ثابت زمانی ۰/۱ برای سرعت ۵ (m/s)، بیش

نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ استفاده شده است (در این شکل‌ها منظور از تئوری، نتایج حاصله از تئوری بورخولز است).

برای بررسی عملکرد قطره‌گیرهای زیگزاگی ساده جریان هوا با سرعت ۱ (m/s) وارد کانال مورد نظر شده و تعداد ۳۰۰۰ قطره آب با اندازه‌های (قطر) متفاوت هم‌سرعت با جریان هوا در درون قطره گیر تزریق شده‌اند. بررسی عملکرد و تعیین بازدهی قطره‌گیری برای جریان هوا با سرعت ۱ (m/s) به دلیل کم بودن عدد رینولدز متوسط جریان با مدل جریان آرام<sup>۱</sup> انجام شده است. در شکل ۹ نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی فیلیپس و دیکین و نتایج ردیابی پخش قطرات بدون در نظر گرفتن سرعت اغتشاشی<sup>۲</sup> وانگ و جیمز و همچنین نتایج به دست آمده توسط زامورا و کایسر با مدل آشفته‌گی  $k - \epsilon$  مقایسه شده است [۲، ۶ و ۷].



شکل ۹- مقایسه نتایج راندمان قطره‌گیری پیش‌بینی شده با نتایج تجربی و تئوری بورخولز برای سرعت ۱ (m/s) و عدد رینولدز ۱۰۹۶

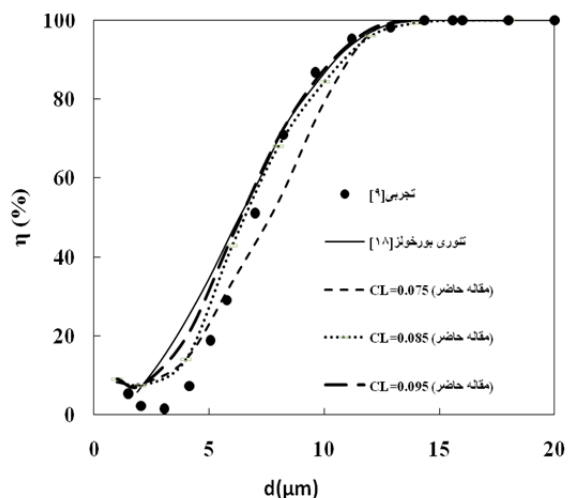
باتوجه به این‌که در این بخش تحلیل جریان با مدل جریان آرام انجام شده تنها عامل اختلاف بین داده‌های تجربی و عددی به دست آمده، وجود رژیم‌های جریان آرام و آشفته در کنار یکدیگر می‌باشد. یعنی جریان به علت وجود لبه‌های تیز در محل خم‌ها حالت گذر از آرام به آشفته پیدا می‌کند و در این حالت معادلات جریان آرام

<sup>1</sup> Laminar Model

<sup>2</sup> No Turbulence Dispersion

<sup>3</sup> Time Scale Constant

برای سرعت  $\Delta(m/s)$ ، بهترین نتیجه به دست آمده از شبیه سازی (با ثابت زمانی ۰/۱) علی رغم مطابقت با مشاهدات تجربی، نسبت به نتایج به دست آمده از روابط تئوری از دقت کمتری برخوردار است به همین دلیل مقادیر ثابت زمانی (۰/۰۷۵، ۰/۰۸۵ و ۰/۰۹۵) انتخاب شد، تا بتوان به نتایجی دست یافت که علاوه بر مطابقت با داده های تجربی، از نتایج تئوری نیز دقیق تر عمل باشند که در شکل ۱۲ نشان داده شده اند.



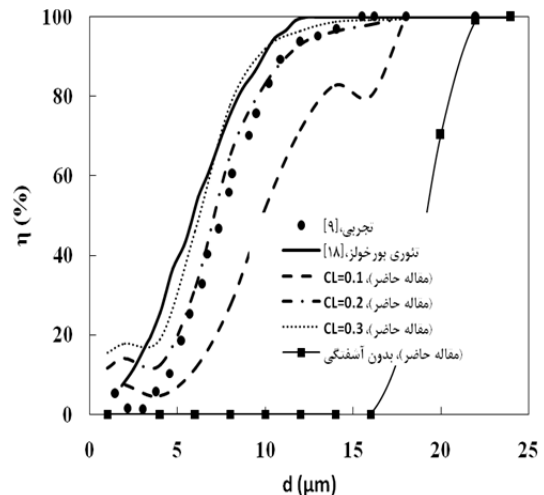
شکل ۱۲- مقایسه نتایج راندمان قطره گیری پیش بینی شده با نتایج تجربی و تئوری بورخولز برای سرعت  $\Delta(m/s)$  برای ثابت های زمانی مختلف

در نتیجه برای جریان گاز با سرعت  $\Delta(m/s)$ ، ثابت زمانی ۰/۰۸۵ بهترین پیش بینی را نسبت به سایر ثوابت زمانی و همچنین مشاهدات تجربی و نتایج تئوری دارد.

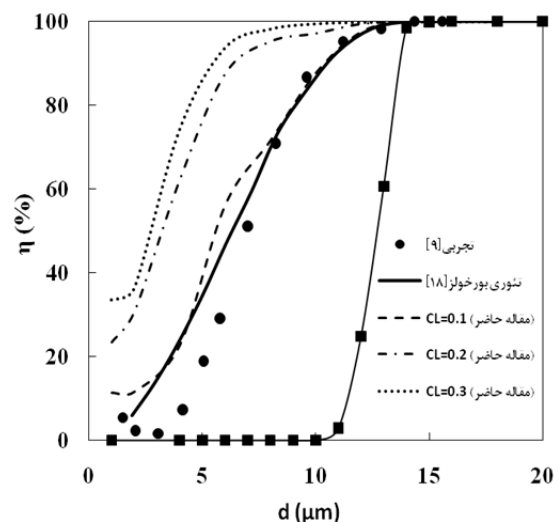
در شکل های ۱۳ و ۱۴ بهترین نتیجه به دست آمده برای بهینه ترین ثابت زمانی عمر ادی ها با نتایج به دست آمده توسط رفعی و رحیم زاده (با مدل های تنش های رینولدز استاندارد و بهبود یافته)، وانگ و جیمز (با مدل  $k-\epsilon$  و EIM متغیر<sup>۱</sup>) و زامورا و کایسر با مدل SST  $k-\omega$  مقایسه شده است.

نکته قابل توجه آن است که جواب های به دست آمده، از تمامی شبیه سازی های قبلی دقیق تر می باشد. این امر

از بقیه نتایج به مقادیر تجربی نزدیک می باشند و بهترین تطابق را با آنها دارند. لازم به ذکر است که عملکرد قطره گیر برای قطرات با محدوده قطر ۲۰-۲ میکرومتر ارزیابی شده است چرا که بازدهی قطره گیری برای قطرات بزرگتر از این محدوده به طور قطع ۱۰۰٪ می باشد.



شکل ۱۰- مقایسه نتایج راندمان قطره گیری پیش بینی شده با نتایج تجربی و تئوری بورخولز برای سرعت  $\Delta(m/s)$  با عدد رینولدز ۲۱۹۲

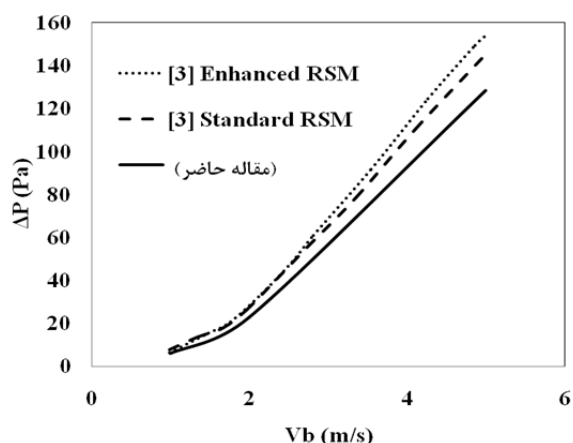


شکل ۱۱- مقایسه نتایج راندمان قطره گیری پیش بینی شده با نتایج تجربی و تئوری برای سرعت  $\Delta(m/s)$  با عدد رینولدز ۵۴۷۷

در شکل ۱۰ به خوبی مشهود است که نتایج حاصله از شبیه سازی با ثابت زمانی ۰/۲ مطابقت بیشتری نسبت به نتایج تئوری، با مشاهدات تجربی دارند. اما در شکل ۱۱

<sup>1</sup> Varied Eddy Interaction Model (EIM)

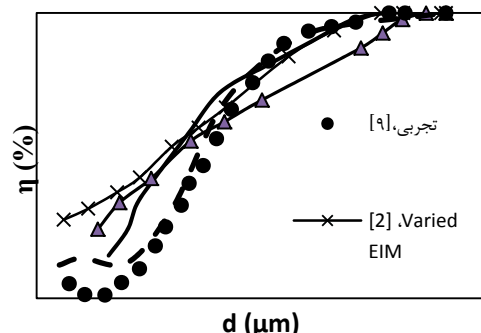
به دلیل انتخاب ثابت مقیاس زمانی مناسب و روش عددی رانگ کوتا برای تجزیه معادلات حرکت قطرات می‌باشد.



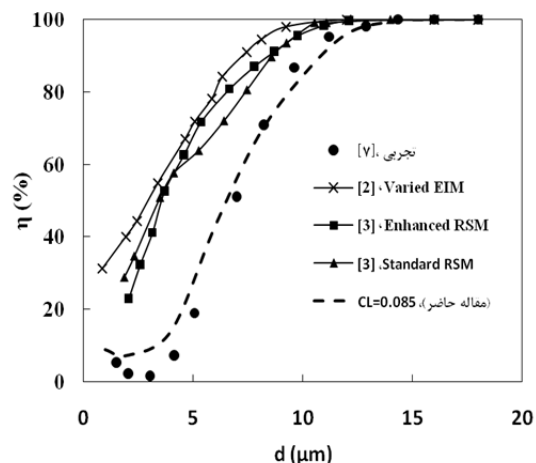
شکل ۱۵- نمودار افت فشار بر حسب سرعت متوسط جریان گاز

### ۷- بررسی تأثیر تعداد خم‌ها

همان‌طور که اشاره شد عبور جریان گاز از میان خم‌های قطره‌گیر سبب ایجاد افت فشار می‌شوند. در این بخش سعی بر آن است که با تغییر تعداد خم‌های قطره‌گیر و سپس تزریق قطره درون آن‌ها، افت فشار و بازدهی قطره‌گیری این نوع قطره‌گیرها بررسی شود. پس از اعتبار سنجی حل عددی جریان گاز و قطره، و مقایسه نتایج به دست آمده با مشاهدات تجربی و مطابقت آن‌ها با هم و همچنین تعیین ثابت زمانی عمر ادی‌ها برای سرعت‌های متفاوت، عملکرد قطره‌گیر مورد مطالعه، با تعداد خم‌های متفاوت ارزیابی شده‌است. به این صورت که چهار قطره‌گیر با ابعاد مشخصه (عرض کانال، ارتفاع صفحات و فاصله بین دو خم) یکسان و با تعداد خم‌های ۳، ۵، ۷ و ۹ عدد شبیه‌سازی شده‌است. لازم به ذکر است که قطره‌گیر با تعداد خم ۷، همان قطره‌گیری است که برای اعتبار سنجی حل عددی استفاده شده‌است. در شکل ۱۶ ردیابی و به دام افتادن ۱۰ قطره با اندازه (قطر) ۸ میکرو متر در جریان گاز با سرعت ۲ متر بر ثانیه برای چهار قطره‌گیر مورد نظر نشان داده شده‌است. در این شکل مشاهده می‌شود که هرچه تعداد خم‌ها افزایش می‌یابد، تعداد قطراتی که توسط دیواره‌های قطره‌گیر به دام می‌افتند

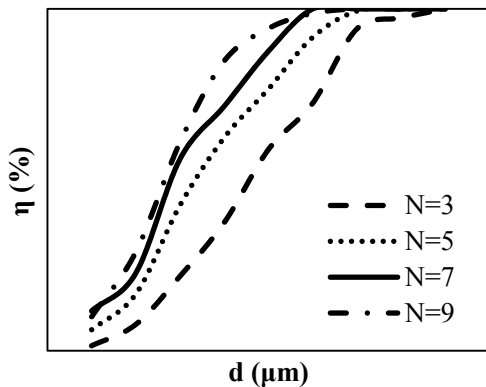


شکل ۱۳- مقایسه راندمان قطره‌گیری به دست آمده از شبیه‌سازی فعلی با نتایج به دست آمده قبلی برای سرعت ۲ (m/s) و عدد رینولدز ۲۱۹۲



شکل ۱۴- مقایسه راندمان قطره‌گیری به دست آمده از شبیه‌سازی فعلی با نتایج به دست آمده قبلی برای سرعت ۵ (m/s) و عدد رینولدز ۵۴۷۷

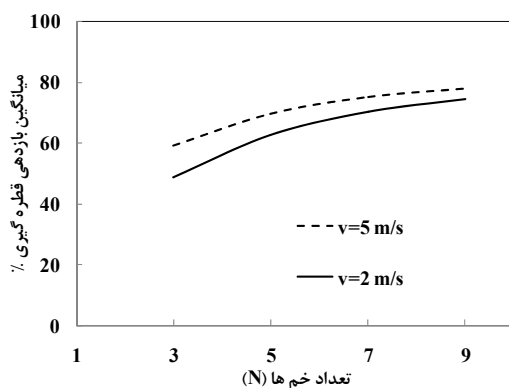
نمودار افت فشار ایجاد شده بر حسب سرعت متوسط جریان گاز در شکل ۱۵ نشان داده شده و همچنین با نتایج عددی به دست آمده از مطالعات رفعی و همکاران [۳] با استفاده از دو مدل آشفتگی استاندارد و بهبود یافته تنش‌های رینولدز مقایسه شده‌است. در این شکل ضمن بررسی صحت نتایج حاصله از شبیه‌سازی نسبت به مطالعات دیگر محققین مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت گاز درون قطره‌گیر افت فشار ایجاد شده نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۸- اثر تغییر تعداد خم‌ها بر منحنی راندمان قطره‌گیری پیش‌بینی شده برحسب سایز قطره برای سرعت ۵(m/s)

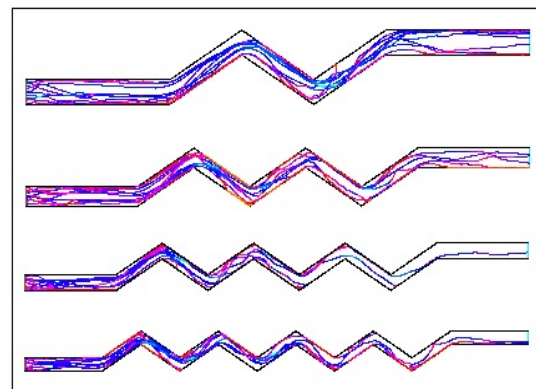
برای مقایسه دقیق‌تر عملکرد قطره‌گیرها، در شکل ۱۹ میانگین بازدهی قطره‌گیری (اندازه قطرات در بازه ۲۰-۲ میکرومتر) برحسب تعداد خم‌ها برای دو سرعت مختلف نشان داده شده‌است. در این شکل به خوبی مشهود است که با تغییر تعداد خم‌ها از ۳ به ۹ حدود ۳۳٪ میانگین بازدهی قطره‌گیری افزایش یافته است.

افت فشار ایجاد شده در جریان گاز توسط خم‌ها در شکل ۲۰ برحسب سرعت متوسط جریان گاز برای چهار قطره‌گیر مورد مطالعه، مقایسه شده‌اند. تأثیر افزایش تعداد خم و سرعت جریان گاز بر افزایش افت فشار ایجاد شده در این شکل نشان داده شده‌است. برای نمونه، در سرعت 4m/s، افت فشار برای تعداد ۳ خم، ۳۳ درصد افت فشار برای تعداد ۹ خم است.



شکل ۱۹- میانگین بازدهی قطره‌گیری برحسب تعداد خم‌های مختلف برای سرعت‌های ۲(m/s) و ۵(m/s)

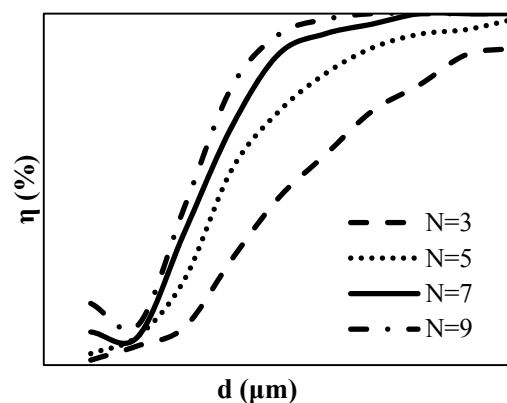
افزایش یافته و تعداد کمتری از قطرات از کانال خارج می‌شوند.



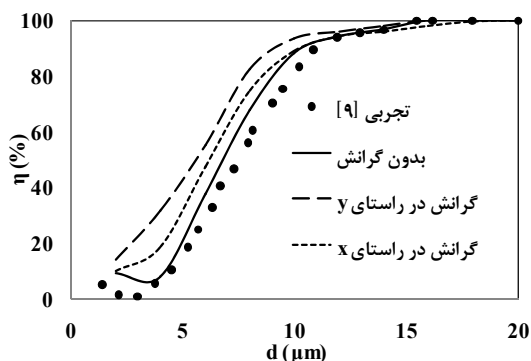
شکل ۱۶- نمایش اثر تعداد خم‌ها بر مسیر قطرات با سایز 8μm در جریان آشفته گاز با سرعت متوسط 2m/s

تحلیل جریان گاز درون این قطره‌گیرها با سرعت‌های ۲(m/s) و ۵(m/s) انجام شده‌است. در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ بازدهی قطره‌گیری به دست آمده از این قطره‌گیرها به ترتیب برای دو سرعت مذکور نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است که در این شکل‌ها، N بیانگر تعداد خم‌ها می‌باشد.

همان‌طور که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود تعداد خم‌های قطره‌گیر عامل مؤثری در عملکرد قطره‌گیرها به شمار می‌آید، چراکه با افزایش تعداد خم‌ها، بازدهی قطره‌گیری افزایش می‌یابد.



شکل ۱۷- اثر تغییر تعداد خم‌ها بر منحنی راندمان قطره‌گیری پیش‌بینی شده برحسب سایز قطره برای سرعت ۲(m/s)



شکل ۲۱- اثر اعمال شتاب جاذبه بر راندمان قطره گیری

### ۸- نتیجه گیری

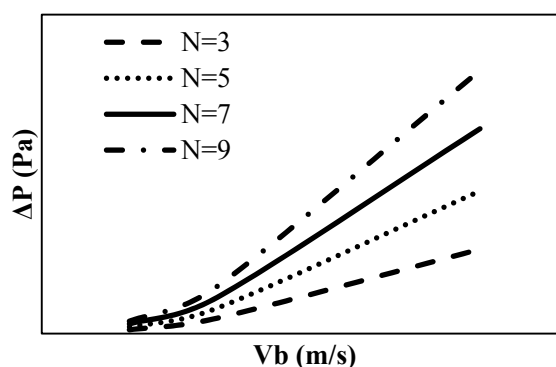
ارزیابی عملکرد و بازدهی قطره گیر زیگزاگی با صفحات موجدار برای سرعت‌های مختلف ورودی برحسب اندازه قطرات تزریق شده بررسی شد. پس از اعتبار سنجی نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی، تأثیر تعداد خم های قطره گیر بر افت فشار و بازدهی قطره گیری مورد بررسی قرار گرفت. مهم ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر می باشد.

نتایج ردیابی پخش قطرات برای جریان هوا با سرعت  $1 \text{ (m/s)}$  (با عدد رینولدز  $1,096$ ) بدون در نظر گرفتن سرعت های اغتشاشی با داده های تجربی اختلاف فاحشی دارند. این امر نشان می دهد که هنگامی که جریان هوا با سرعت  $1 \text{ (m/s)}$  در درون قطره گیر مذکور وارد می شود با عبور از خم های آن یک سری آشفتگی هایی در جریان هوا به وجود می آید که دیگر نمی توان آن را با مدل جریان آرام شبیه سازی کرد.

نتایج بررسی ها نشان می دهد که با تعریف یک مقدار ثابت زمانی ( $C_L$ ) برای تعیین عمر ادی ها در تمامی سرعت های جریان گاز نمی توان به پیش بینی های مناسبی برای پخش قطرات و راندمان قطره گیری رسید و مقدار این ثابت زمانی با تغییر عدد رینولدز جریان گاز، تغییر می کند.

نتایج به دست آمده از شبیه سازی جریان هوا با سرعت  $2 \text{ (m/s)}$  و  $5 \text{ (m/s)}$  نشان می دهد که که بهترین مدل

نکته قابل توجه آن است که در شکل ۱۹ هرچه تعداد خم ها بیشتر می شود شیب نمودار کمتر می شود، به عبارت دیگر با افزایش تعداد خم ها، میانگین بازدهی قطره گیری در ابتدا (از ۳ به ۵) افزایش قابل توجهی دارد و سپس هرچه پیش می رود (از ۷ به ۹) از نرخ افزایش بازدهی کاسته می شود. برای نمونه با تغییر تعداد خم ها از ۵ به ۷، برای قطره گیر مورد مطالعه، بازدهی قطره گیری افزایش چندانی پیدا نمی کند اما افزایش افت فشاری حدود ۵۰ درصد با سرعت  $5 \text{ (m/s)}$  ایجاد می کند.



شکل ۲۰- مقایسه افت فشار برحسب سرعت متوسط جریان گاز

جهت بررسی تأثیر شتاب جاذبه بر روی حرکت قطرات و عملکرد قطره گیرها در شکل ۲۱ نتایج به دست آمده از شبیه سازی برای جریان گاز با سرعت  $2 \text{ (m/s)}$  و قطره گیر با تعداد ۷ خم با اعمال شتاب گرانش در دو راستای مختلف نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود نتایج به دست آمده از شبیه سازی بدون در نظر گرفتن شتاب جاذبه به مشاهدات تجربی نزدیک تر می باشد و با اعمال شتاب گرانش در راستای  $\gamma$  اختلاف از داده های آزمایشگاهی افزایش می یابد. این امر به آن دلیل است که شتاب جاذبه در راستای عمود بر صفحه جریان اعمال شده است.

حدود ۶-۸ درصد، افزایش افت فشاری در حدود ۳۰-۵۰ درصد برای سرعت‌های مختلف ایجاد می‌کند. قطره‌گیر زیگزاگی با تعداد ۹ خم افت فشار زیادی ایجاد کرده و راندمان قطره‌گیری را چندان بهبود نمی‌بخشد.

## ۹- فهرست علائم

ضریب درگ	$C_D$
ثابت عمر ادی	$C_L$
انرژی جنبشی جریان آشفته ( $m^2/s^2$ )	$k$
مقیاس طول ادی (m)	$L_e$
تعداد خم های قطره‌گیر	$n$
عدد اوهنسورگ	$Oh$
عدد رینولدز نسبی	$Re_r$
عمر ادی (S)	$T_L$
زمان عبور قطره از ادی (S)	$t_{cross}$
سرعت گاز (m/s)	$u$
سرعت نوسانی (m/s)	$u'$
سرعت متوسط جریان گاز (m/s)	$V_b$
سرعت عمودی برخورد قطره (m/s)	$u_n$
تعداد خم‌های قطره‌گیر	$N$
عدد وبر برخورد عمودی	$We_{nb}$

## علائم یونانی

افت فشار جریان گاز در قطره‌گیر (Pa)	$\Delta P$
زاویه خم قطره‌گیر	$\alpha$
نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته ( $m^2/s^3$ )	$\varepsilon$
بازدهی کلی قطره‌گیر	$\eta$
بازدهی قطره‌گیری یک خم	$\eta_B$
ویسکوزیته گاز (kg/ms)	$\mu_g$
چگالی جریان ( $kg/m^3$ )	$\rho$
عمر مشخصه ادی (S)	$\tau$

آشفته‌گی برای ارزیابی عملکرد و تعیین بازدهی قطره‌گیری برای این سرعت‌ها، مدل تنش‌های رینولدز با رفتار بهبود یافته در نواحی نزدیک دیواره می‌باشد که در بین نتایج به‌دست آمده از این روش، بهترین ثابت مقیاس زمانی عمر ادی‌ها برای سرعت  $2, 0.2$  (m/s) و برای سرعت  $5$  (m/s)،  $0.085$  می‌باشد.

تغییر ثابت زمانی عمر ادی‌ها با تغییر عدد رینولدز جریان گاز، یک نقطه ضعف عمده برای مدل برهم‌کنش ادی و قطره به حساب می‌آید، زیرا در جریان‌های گاز و قطره ناشناخته، تعیین این‌که کدام عدد برای ثابت زمانی عمر ادی‌ها مناسب‌تر است ممکن نیست و همین امر باعث کاهش کارایی این مدل در پیش‌بینی جریان‌هایی که هیچ‌گونه داده تجربی برای آن‌ها در دسترس نیست، می‌شود.

ارزیابی عملکرد قطره‌گیر زیگزاگی در سرعت‌های کمتر از  $2$  (m/s) نشان می‌دهد با تغییر تعداد خم‌ها، تغییر قابل توجهی در افت فشار ایجاد نمی‌شود.

با افزایش تعداد خم‌ها، از کمترین تعداد (۳ خم) تا بیشترین آن (۹ خم)، برای جریان گاز با سرعت  $5$  (m/s) افت فشار تا حدود  $300$  درصد، و میانگین بازدهی قطره‌گیری حدود  $33$  درصد افزایش می‌یابد.

بررسی تأثیر تغییر تعداد خم‌ها نشان می‌دهد که قطره‌گیر زیگزاگی با تعداد ۳ خم از راندمان قطره‌گیری مناسبی برخوردار نیست. اما افزایش تعداد خم از ۵ به ۷ نیز توصیه نمی‌شود چرا که با افزایش میانگین بازدهی قطره‌گیری

## مراجع

- [1] Crowe, C., Sommerfeld, M., Tsuji, Y. (1997). "Multiphase flows with droplet and particle". CRC Press.
- [2] Wang, Y. James, P.W. (1999). "Assessment of an eddy-interaction model and its refinements using predictions of droplet deposition in a wave-plate demister". Trans. IChemE., Vol. 77, Part A, pp. 692-698.
- [3] Rafee, R., Rahimzadeh, H., Ahmadi, G. (2010). "Numerical simulations of airflow and droplet transport in a wave-plate mist eliminator". Chem. Eng. Res. and Des., Vol. 88, , pp.1393-1404.
- [4] Rafee, R., Rahimzadeh, H. (2010). "Performance evaluation of a curved type vane separator different plate spacings in the range of 25 to 35mm, using numerical simulation". Iran. J. Chem. Chem. Eng., Vol. 29, No. 3, pp. 98-108.

- [5] Banitabaei, S.A., Rahimzadeh, H., Rafee, R. (2012) "Determination of minimum pressure drop at different plate spacings and air velocity in a wave-plate mist eliminator". *Asia-Pac. J. Chem. Eng.*, Vol. 7, pp. 590-597.
- [6] Zamora, B., Kaiser, A.S. (2011). "Comparative efficiency evaluation of four types of cooling tower drift eliminator, by numerical investigation". *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 66, pp. 1232-1245.
- [7] Galletti C, Brunazzi E, Tognotti, L. (2008). "A numerical model for gas flow and droplet motion in wave-plate mist eliminators with drainage channels". *Chem. Eng. Sci.* Vol. 63, pp. 5639-5652.
- [8] Narimani E., Shahhoseini, S. (2011). "Optimization of vane mist eliminators". *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 31, pp. 188-193.
- [9] Phillips, H., Deakin, A.W. (1990). "Measurements of the collection efficiency of various demister devices". *Proceedings of the 4<sup>th</sup> Annual Meeting of the Aerosol Society, Loughborough, U.K.*
- [10] Josang, A.I., Melaaen, M.Chr. (2001). "Fluid flow simulation of vane separator". *Proceedings of the 42<sup>nd</sup> Scandinavian Conference on Simulation and Modeling Porsgrunn, Norway, October 8-9.*
- [11] Verlaan, C.C.J. (1991). "Performance of novel mist eliminator". Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- [12] Josang, A.I. (2002). "Numerical and experimental studies of droplet gas flow". Ph.D. Thesis Department of Technology (HIT-TF), Telmark University College, Norway.
- [13] Morsi, S.A., Alexander, A.J. (1972). "An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems". *J. Fluid Mech.*, Vol. 55, No. 2, pp.193-208.
- [14] Tian, L., Ahmadi, G. (2007). "Particle deposition in turbulent duct flows—comparisons of different model predictions". *J. Aerosol Sci.*, Vol. 38, pp. 377-397.
- [15] Launder, B.E., Reece, G.J. Rodi, W. (1975). "Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure". *J. Fluid Mech.*, Vol. 68, part 3, pp. 537-566.
- [16] Stanton, D.W., Rutland, C.J. (1998). "Multidimensional modeling of thin liquid films and spray". *Int.J. Heat Transfer*, Vol. 41, pp. 3037-3054.
- [17] Mundo, C., Sommerfeld, M., Tropea, C. (1995). "Droplet wall collisions experimental studies of the deformation and breakup process". *Int.J. Multiphase Flows*, Vol. 21, No. 2, pp. 151-173.
- [18] Burkholz, A. (1989). "Droplet separation", VCH Publishers, New York, USA.