

مدلسازی ریاضی پیش‌بینی افت فشار در شوینده‌های ونتوری

براساس مدل جریان‌های دوفازی حلقوی

سعیده ناصح، علی محبی*، امیر صرافی

دانشگاه شهید باهنر کرمان، بخش مهندسی شیمی

پست الکترونیکی: amohebbi2002@yahoo.com

چکیده

شوینده‌های ونتوری یکی از مؤثرترین دستگاه‌های کنترل آلودگی هوا بشمار می‌روند. یکی از مشکلات این نوع شوینده‌ها افت فشار بالا می‌باشد. بنابراین کاهش این افت فشار می‌تواند در گسترش به کارگیری این دستگاه‌ها مؤثر واقع شود، در این راه داشتن مدلی که با دقت کافی بتواند افت فشار را پیش‌بینی کند ضروری است. مدل‌های مختلفی برای محاسبه افت فشار در شوینده‌های ونتوری ارائه شده است، از جمله مدل ویسواناتان که بر مبنای جریان‌های دوفازی حلقوی می‌باشد، جریان‌های دوفازی حلقوی شامل جریان یک لایه فیلم مایع روی دیواره دستگاه و یک جریان گاز محتوی قطرات مایع در مرکز می‌باشد. به دلیل شباهت جریان‌های دوفازی حلقوی با جریان گاز و قطرات در شوینده‌های ونتوری، این مدل می‌تواند در پیش‌بینی افت فشار در این دستگاه‌ها کارایی خوبی داشته باشد. مدل پیشنهاد شده توسط ویسواناتان دارای ابهاماتی است که در این پژوهش سعی در اصلاح مدل ویسواناتان در جهت رفع این ابهامات و افزایش کارایی مدل شده است. توافق بهتر نتایج مدل پیشنهادی با داده‌های تجربی نشان‌دهنده قابلیت این مدل در پیش‌بینی افت فشار در شوینده‌های ونتوری می‌باشد.

کلمات کلیدی: افت فشار، شوینده ونتوری، مدلسازی، جریان‌های دوفازی حلقوی، آلودگی هوا

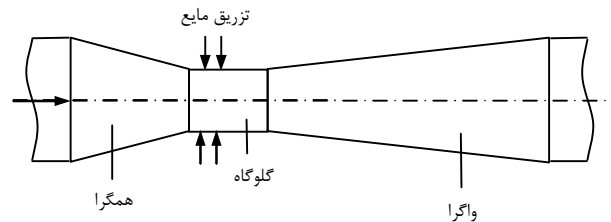
مقدمه

کنترل آلودگی هوا در حال حاضر یکی از دغدغه‌های کشورهای صنعتی می‌باشد. شوینده‌های ونتوری به خاطر بازده بالا برای جذب ذرات ریز و آلاینده‌های گازی از جریان گاز، بسیار مورد توجه است. یک شوینده ونتوری از بخش‌های همگرا، گلوگاه و واگرا تشکیل شده است (شکل ۱).

مایع شوینده یا از ابتدای گلوگاه تزریق می‌شود و یا به صورت یک لایه

فیلم روی دیواره دستگاه از بخش همگرا وارد می‌شود. در هر دو صورت مایع در مواجهه با گازی که با عبور از بخش همگرا در ابتدای گلوگاه سرعت زیادی پیدا کرده است، تبدیل به قطرات بسیار ریز می‌شود. این قطرات توسط مکانیسم‌های برخورد^۱ و تماس^۲ آلاینده‌ها را از گاز حذف می‌کنند. افزایش سرعت گاز در بخش همگرا، اصطکاک گاز با

1. Impaction
2. Interception



شکل ۱- شوینده و نتوری

این مدل تطابق بیشتری نسبت به مدل‌های پیشین با داده‌های تجربی نشان می‌دهد، اما کاربرد آن نیاز به حل معادلات بسیار زیاد و الگوریتم‌های پیچیده دارد. ویسواناتان و همکاران [۱۹] ایده‌آزوپاردی و گوان را دنبال نمودند و جریان درون شوینده و نتوری را مشابه با یک جریان دوفازی حلقوی در نظر گرفتند. محبی و همکاران [۱۵] یک مدل جریان توربالنت در شوینده اریفیسیتی جهت محاسبه افت فشار بکار بردند که جهت پیدا کردن غلظت قطرات در شوینده از مدل^۱ PSI-CELL استفاده کردند. اخیراً ناصح و همکاران [۱۶] از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی افت فشار در شوینده‌های ونتوری استفاده کرده و نتایج قابل قبولی را ارائه دادند.

در مدل ویسواناتان و همکاران وجود لایه مایع در دیواره‌ها و قطرات در مرکز ونتوری لحاظ شده اما هیچ رابطه‌ای برای تخمین مقدار فیلم مایع ارائه نشده و اثر وجود لایه مایع با استفاده از داده‌های تجربی منظور گردیده است. در نتیجه بجز در حالت‌هایی که امکان اندازه‌گیری تجربی مقدار فیلم مایع وجود داشته باشد، امکان استفاده از این مدل بطور دقیق میسر نیست. در این پژوهش، مدل ویسواناتان جهت افزایش کارایی آن اصلاح شده و نتایج مدل با داده‌های تجربی مقایسه می‌شود. موارد اصلاح شده به صورت زیر می‌باشد:

- ۱- افت فشار گرانشی برای افزایش دقت مدل در ونتوری‌های عمودی به معادلات مدل اضافه شده است.
- ۲- ضریب اصطکاک دوفازی هسته و لایه مایع که طریقه محاسبه آنها در مدل ویسواناتان ذکر نشده است، در اینجا با استفاده از روابط مناسب به دست آمده‌اند.
- ۳- دبی لایه مایع نیز توسط دو رابطه، محاسبه و در مدل استفاده شده است.

دیواره و لایه فیلم مایع و همینطور انرژی انتقالی از گاز به قطرات که موجب افزایش ممنوم آنها می‌شود، عوامل مهم در مقدار افت فشار در شوینده‌های ونتوری است. افت فشار در این دستگاه‌ها در مقایسه با دیگر دستگاه‌های کنترل آلودگی هوا بسیار بالاست. هزینه عملیاتی بالا در نتیجه این افت فشار در شوینده‌های ونتوری، تا حدی مزایای بسیار این دستگاه‌ها را کم‌رنگ می‌کند. از این رو افت فشار عامل مهمی در طراحی شوینده‌های ونتوری می‌باشد.

تاکنون تحقیقات مختلفی برای پیش‌بینی افت فشار در این دستگاه‌ها انجام گرفته است. مدل کالورت [۶] اولین مدلی بود که برای این منظور ارائه شد. این مدل به خاطر سادگی مورد توجه زیادی بوده و هست. کالورت فرض کرد تمامی مایعات به قطرات ریز تبدیل می‌شوند، قطرات شتاب گرفته و در انتهای گلوگاه به سرعت گاز می‌رسند. در این مدل، اصطکاک گاز با دیواره و بازیابی فشار در بخش واگرا نادیده گرفته شده است. یانگ و همکاران [۲۱] با این فرض که قطرات در گلوگاه به سرعت گاز نمی‌رسند، مدل کالورت را بهبود بخشیدند. لیت و همکاران [۱۴] بازیابی فشار در حین کاهش سرعت قطرات در بخش واگرا را در مدل یانگ گنجانده‌اند. بول [۵] یک مدل ریاضی بر پایه موازنه ممنوم در طول شوینده ارائه داد که شامل سه عامل ایجاد افت فشار شامل شتاب گاز، شتاب قطرات و اصطکاک می‌باشد. در این مدل نیز فرض شده است کل مایع تزریقی به قطره تبدیل می‌شود. آزوپاردی و گوان [۳] برای اولین بار جریان‌های دوفازی حلقوی را با عملکرد ونتوری تطبیق داده و مدلی ارائه کردند که مشخصه اصلی آن مبادله قطرات بین فاز گاز و فیلم مایع است. این مدل تا انتهای گلوگاه نتایج خوبی می‌دهد، اما در بخش واگرا بازیابی فشار را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. از این رو آزوپاردی و همکاران [۴] این مدل را توسعه دادند تا اثرات رشد لایه مرزی در بخش واگرا منظور شود و در نتیجه آن، بازیابی فشار تخمینی در بخش واگرا کاهش یابد. نتایج

1. Particle-source-in-cell

مدل ویسواناتان

همانطور که ذکر شد مدل ویسواناتان بر مبنای الگوی جریان دوفازی حلقوی پایه‌ریزی شده است. در این الگوی جریان، گاز شامل قطرات مایع در مرکز و یک لایه مایع روی دیواره و نتوری جریان پیدا می‌کند. فرضیات مدل عبارتند از:

- ۱- یک سیال همگن در هسته جریان وجود دارد که هم‌جهت با لایه فیلم مایع روی دیواره، جریان دارد.
 - ۲- سرعت‌های سیال هسته و لایه مایع در سطح مقطع جریان ثابت‌اند اما لزوماً برابر نیستند.
 - ۳- بین فازها تعادل ترمودینامیکی برقرار است.
 - ۴- قطرات تشکیل شده در هسته هم‌اندازه‌اند.
 - ۵- فشار استاتیکی بر هر دو سیال هسته و فیلم مایع برابر است.
 - ۶- الگوی جریان دوفازی در طول شوینده و نتوری تغییر نمی‌کند.
- با صرف نظر نمودن از نیروهای گرانشی، موازنه ممنتوم یک بعدی پایا برای طول دیفرانسیلی dz از شوینده و نتوری به صورت زیر است:

$$AdP + W_g dV_g + W_d dV_d + W_f dV_f + AdP_{TP} = 0 \quad (1)$$

افت فشار اصطکاکی دوفازی، dP_{TP} ، برحسب گرادیان فشار همگن طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$dP_{TP} = \left(\frac{dP}{dz} \right)_c \Phi_c^2 dz \quad (2)$$

ضریب اصطکاک دوفازی Φ_c^2 طبق رابطه لاکارت و مارتینلی [۱۳] به این صورت است:

$$\begin{cases} \Phi_c^2 = 1 + 12x + x^2 & \text{for } Re_f < 2000 \\ \Phi_c^2 = 1 + 20x + x^2 & \text{for } Re_f > 2000 \end{cases} \quad (3)$$

$$x = \text{Martinelli Parameter} = \sqrt{\frac{(dP/dz)_f}{(dP/dz)_c}} \quad (4)$$

گرادیان فشار هسته برای سیال فرضی با دانسیته ρ_c و ویسکوزیته

μ_c ، به این صورت تعریف می‌شود:

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_c = \frac{2f_c W_c^2}{D_H A^2 \rho_c} \quad (5)$$

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_f = \frac{2f_f W_f^2}{D_H A^2 \rho_f} \quad (6)$$

خواص فیزیکی هسته با توجه به کسر حجمی گاز در هسته تعیین می‌شود. شتاب قطره که از موازنه نیرو به دست می‌آید، طبق تعریف بول [۵] به این صورت است:

$$\frac{dV_d}{dz} = \frac{3\mu_g (V_g - V_d)}{4\rho_l D_d^2 V_d} C_{DN} \quad (7)$$

قطر قطرات از رابطه ناکایاما و تاناساوا [۱۷] به دست می‌آید. در این معادله C_{DN} ضریب دراگ تغییر یافته است که از رابطه $C_{DN} = C_D Re_d$ قابل محاسبه می‌باشد. تلاپی و همکاران [۱۸] رابطه زیر را برای محاسبه ضریب دراگ تغییر یافته پیشنهاد داده‌اند:

$$C_{DN} = 18.65 Re_d^{0.16} \quad (8)$$

$$Re_d = \frac{\rho_g |V_g - V_d| D_d}{\mu_g} \quad (9)$$

دبی‌های جرمی W_g ، W_d و W_f طبق روابط زیر بر حسب α_c و α_g محاسبه می‌شوند:

$$W_g = \alpha_g \alpha_c AV_g \rho_c \quad (10)$$

$$W_d = Cm \alpha_g \alpha_c AV_g \rho_c \quad (11)$$

$$\alpha_c W_f = (1 - C)m \alpha_g \alpha_c AV_g \rho_c \quad (12)$$

α_c از رابطه هویت و تیلور [۱۱] به دست می‌آید:

$$\alpha_c = (1 + x^{0.8})^{-0.378} \quad (۱۳)$$

پس از جایگذاری روابط در معادله (۱) و ساده‌سازی معادله زیر بدست می‌آید.

$$-\frac{dP}{\rho_g} = (\alpha_g \alpha_c V_g dV_g) + (C m \alpha_g \alpha_c V_g dV_d) + ((1-C) m \alpha_g \alpha_c V_g dV_f) + \left(\frac{2f_c W_c^2 \Phi_c^2 dz}{D_H \rho_c A^2 \rho_g} \right) \quad (۱۴)$$

به منظور به دست آوردن افت فشار کل معادلات (۷) و (۱۴) به صورت عددی حل می‌شود. سرعت‌های گاز و فیلم مایع از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$V_g = \frac{W_g}{\rho_g \alpha_c \alpha_g A} \quad (۱۵)$$

$$V_f = \frac{W_f}{\rho_l (1 - \alpha_c) A} \quad (۱۶)$$

اصلاح مدل ویسواناتان

در مدل ویسواناتان [۱۹] ابهاماتی وجود دارد که باعث عدم شفافیت برای استفاده عملی از آن شده است. در اینجا تغییراتی در مدل به منظور رفع ابهامات و افزایش کارایی آن داده شده است. معادله (۱) برای بخش گلوگاه با سطح مقطع ثابت به دست آمده است. این معادله برای استفاده در بخش واگرا به صورت زیر تغییر می‌یابد:

$$d(PA) + W_g dV_g + W_d dV_d + W_f dV_f + d(AP_{TP}) = 0 \quad (۱۷)$$

از آنجایی که مایع از ابتدای بخش گلوگاه وارد می‌شود، در بخش همگرای شوینده و نتوری فقط عوامل شتاب گاز و اصطکاک گاز با

دیواره باعث ایجاد افت فشار می‌شوند، در نتیجه از معادله زیر برای محاسبه افت فشار در این بخش استفاده می‌شود:

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{P}{A} \frac{dA}{dz} + \frac{W_g}{A} \frac{dV_g}{dz} + \tau P_w \quad (۱۸)$$

همچنین تغییراتی به شرح زیر در مدل ویسواناتان داده شده است.

۱- افت فشار گرانشی

به منظور تخمین دقیق‌تر افت فشار، افت فشار ناشی از تغییرات ارتفاع به معادلات مدل اضافه شده است. این عبارت برای بخش‌های گلوگاه و واگرا به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_{ele} = g \left(\frac{L}{L+G} \rho_l + \left(1 - \frac{L}{L+G} \right) \rho_g \right) \quad (۱۹)$$

۲- ضریب اصطکاک دوفازی

ضریب اصطکاک دوفازی هسته و فیلم مایع از پارامترهایی هستند که در محاسبات جریان‌های حلقوی مه آلود اهمیت زیادی دارند ولی در مدل ویسواناتان [۱۹] چگونگی محاسبه آنها ذکر نشده است. در اینجا از روش عزیز و همکاران [۱] برای محاسبه این پارامترها استفاده می‌شود. در این روش ضریب اصطکاک هسته با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$f_c = (0.0014 + 0.125 \text{Re}_c^{-0.32}) \left(1 + \frac{300\delta}{D} \right) \quad (۲۰)$$

$$V_c = \frac{4(G + Q_d)}{\pi(D - 2\delta)^2} \quad (۲۱)$$

δ ضخامت لایه مایع است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\delta = 0.00347 \text{Re}_f^{0.667} \sqrt{\frac{\rho_l}{\tau_i} \left(\frac{\mu_l}{\rho_l} \right)} \quad (۲۲)$$

$$\frac{Q_f}{L} = 1 \quad V_{sl} \leq 0.0304 \quad m/s$$

$$\frac{Q_f}{L} = 0.0042V_{sl}^{-1.5} \quad 0.0304 < V_{sl} < 0.912 \quad m/s$$

$$\frac{Q_f}{L} = 0.005 \quad V_{sl} \geq 0.912 \quad m/s \quad (27)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود، رابطه دبی فیلم مایع ویسواناتان فقط برای ونتوری‌های مستطیلی کاربرد دارد، اما از رابطه گریفیس و والیس برای هر دو نوع ونتوری می‌توان استفاده کرد.

رابطه ناکایاما و تاناساوا [۱۷] فقط برای ونتوریهایی که از سیستم تزریق مایع استفاده می‌کنند به کار می‌رود. در ونتوری‌هایی که ورود مایع به آنها به صورت فیلمی می‌باشد می‌توان از رابطه آزوپاردی [۲] برای محاسبه قطر قطره استفاده کرد:

$$\frac{D_d}{D_{Hth}} = 1.91 \frac{Re_g^{0.1}}{We^{0.6}} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.6} + 0.4 \frac{m_d}{\rho_l V_{gth}} \quad (28)$$

نتایج

معادلات (۱۷) و (۱۸) همزمان با معادله سرعت قطره (۷) به روش رانگ-کاتای درجه چهار و توسط یک برنامه کامپیوتری به کمک نرم‌افزار Matlab حل گردیده‌اند. روابط عزیز و همکاران [۱] برای تعیین ضریب اصطکاک دوفازی، رابطه لاکارت و مارتینلی [۱۳] برای محاسبه Φ_C ، رابطه ناکایاما و تاناساوا [۱۷] برای تعیین قطر قطره و رابطه ویسواناتان [۲۰] برای دبی فیلم مایع به کار گرفته شده است. برای بررسی دقت مدل موجود و مقایسه مدل‌های مختلف پیش‌بینی افت فشار، از داده‌های تجربی ارائه شده توسط ویسواناتان [۱۹] استفاده شده که از یک شوینده ونتوری نیمه صنعتی از نوع Pease-Anthony به دست آمده است. شکل‌های ۲ تا ۶ نتایج مدل پیشنهادی را با داده‌های تجربی ویسواناتان [۱۹] مقایسه می‌کند.

برای محاسبه تنش برشی اعمالی گاز به فیلم مایع τ_i ، از رابطه ارائه شده توسط ایشی و گرولمز [۱۲] استفاده شده است:

$$\tau_i = f_{gi} \frac{\rho_g V_g^2}{2} \quad (23)$$

$$f_{gi} = 0.005 \left(1 + 300 \frac{\delta}{D_H} \right) \quad (24)$$

ضخامت لایه مایع از رابطه (۲۲) به همراه روابط (۲۳) و (۲۴) به روش حدس و خطا محاسبه می‌شود.

همچنین ضریب اصطکاک لایه مایع با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$f_f = \frac{24}{Re_f} \quad Re_f \leq 2100 \quad (25)$$

$$f_f = \frac{0.0913}{Re_f^{0.263}} \quad Re_f > 2100$$

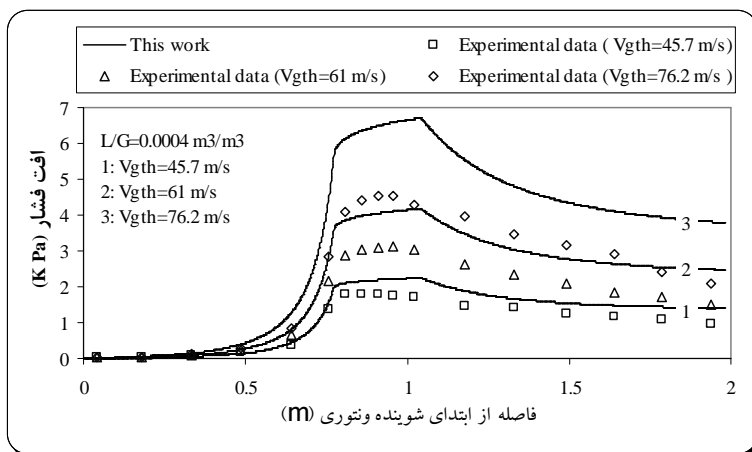
۳- دبی فیلم مایع

در مدل ویسواناتان [۱۹] وجود فیلم مایع در دیواره‌ها در نظر گرفته شده است، اما طریقه محاسبه میزان فیلم مایع در این مدل بطور دقیق اشاره نگردیده است. در این مطالعه از دو رابطه برای محاسبه دبی فیلم مایع استفاده شده است:

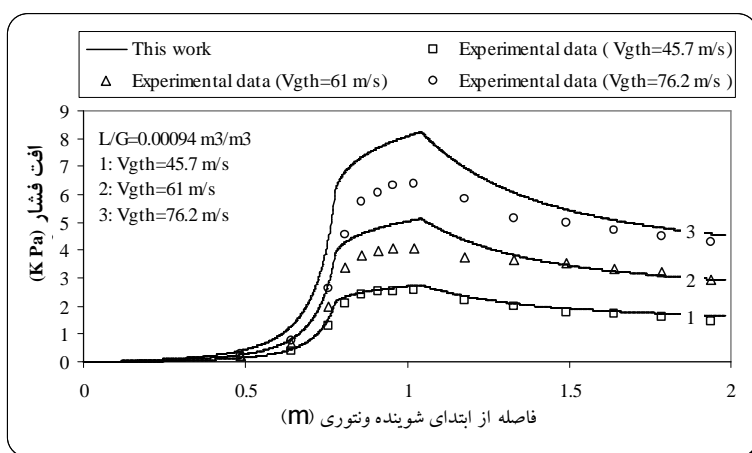
۱- رابطه ویسواناتان [۲۰]

$$\frac{Q_f}{L} = \frac{89.379}{\left(\frac{L}{G} \times 1000 \times \frac{H}{D_o} \right)^{1.007} V_{gth}^{0.888}} \quad (26)$$

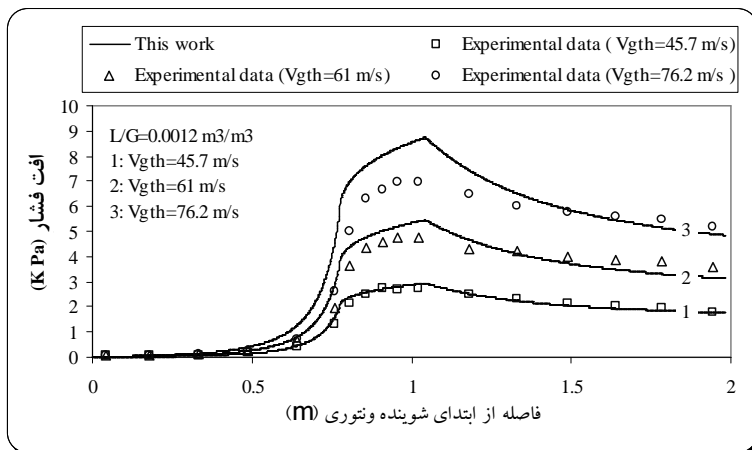
۲- رابطه گریفیس و والیس [۱۰]



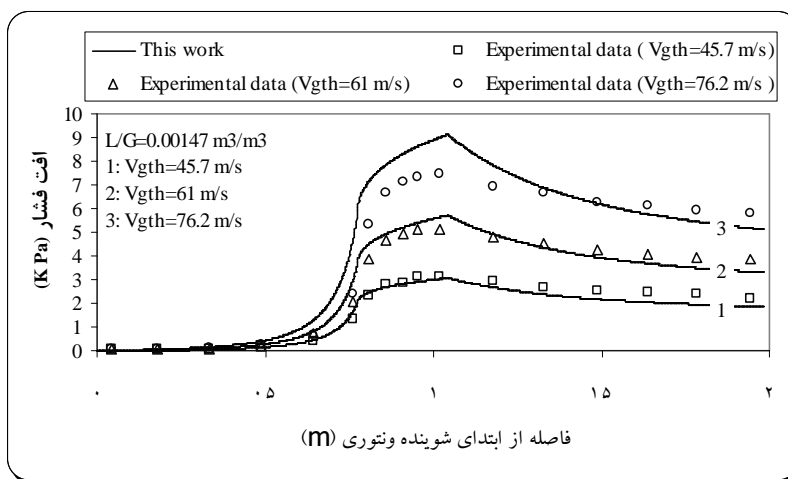
شکل ۲- مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی ویسواناتان [۱۹] برای $L/G = 0.0004 \text{ m}^3/\text{m}^3$



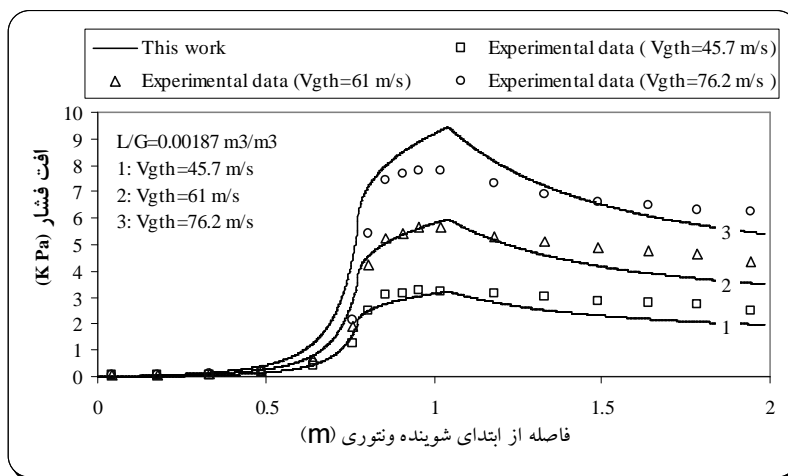
شکل ۳- مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی ویسواناتان [۱۹] برای $L/G = 0.00094 \text{ m}^3/\text{m}^3$



شکل ۴- مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی ویسواناتان [۱۹] برای $L/G = 0.0012 \text{ m}^3/\text{m}^3$



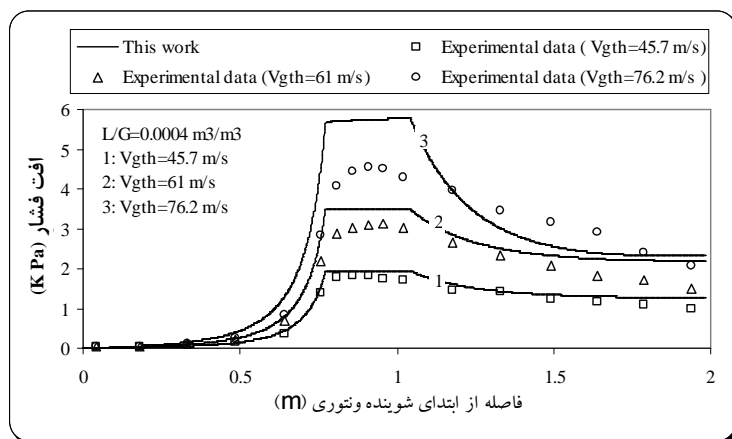
شکل ۵- مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی ویسواناتان [۱۹] برای $L/G = 0.00147 \text{ m}^3/\text{m}^3$



شکل ۶- مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی ویسواناتان [۱۹] برای $L/G = 0.00187 \text{ m}^3/\text{m}^3$

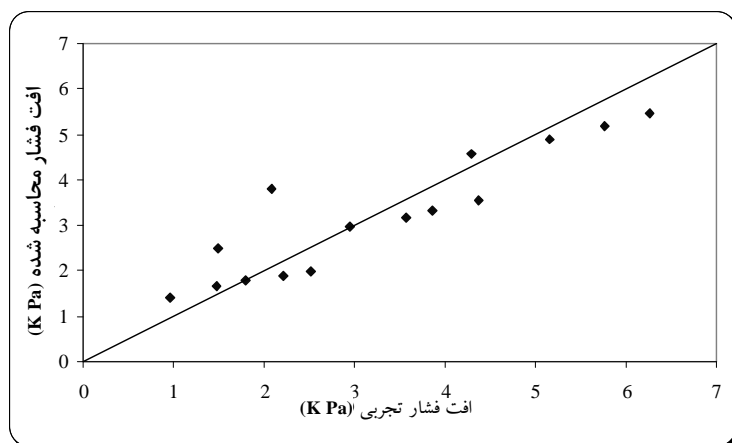
در بررسی دیگری از داده‌های تجربی گانکالوز و همکاران [۸] برای تعیین دقت مدل استفاده شده است. ونتوری مورد استفاده برای به دست آوردن این داده‌ها یک ونتوری کوچک مدور بوده که از مکانیسم فیلمی برای ورود مایع استفاده می‌کند، لذا رابطهٔ آزوپاردی [۲] برای محاسبهٔ قطر قطرات و رابطهٔ گریفیس و والیس [۱۰] برای به دست آوردن دبی فیلم مایع در مدل به کار گرفته شده است. شکل‌های (۱۱) تا (۱۳)، نتایج مقایسهٔ مدل با داده‌های تجربی گانکالوز و همکاران [۸] را نشان می‌دهند. در این نمودارها نیز مشاهده می‌شود که در سرعت‌های کمتر، توافق مدل با داده‌های تجربی بهتر است.

در مقادیر L/G پایین کاربرد رابطهٔ گریفیس و والیس [۱۰] برای محاسبهٔ دبی فیلم مایع و رابطهٔ آزوپاردی [۲] برای قطر قطرات نتایج بهتری می‌دهد که در شکل (۷) نمایان است. همانطور که مشاهده می‌شود، برای سرعت گاز در گلوگاه پایینتر و نسبت مایع به گاز بالاتر توافق مدل با داده‌های تجربی بیشتر می‌شود. در شکل (۸) افت فشار کلی شویندهٔ ونتوری با داده‌های تجربی مقایسه شده است. همچنین نحوهٔ تغییر افت فشار کلی با L/G و V_{gth} در شکل‌های (۹) و (۱۰) نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، توافق خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج مدل وجود دارد.

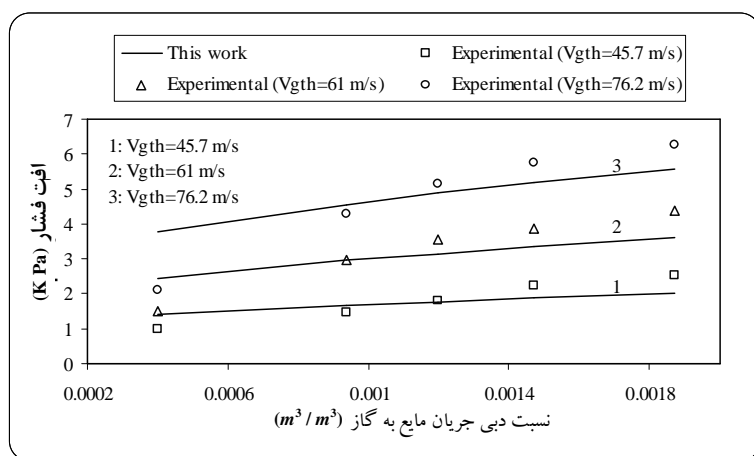


شکل ۷- مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی ویسواناتان [۱۹] برای $L/G=0.0004 \text{ m}^3/\text{m}^3$

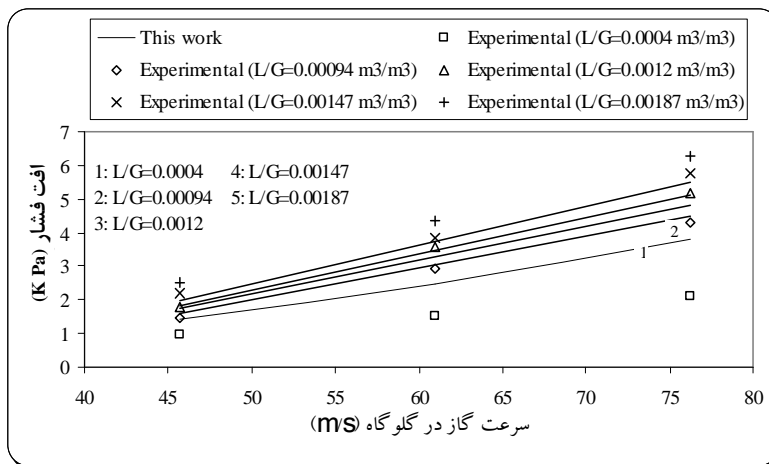
(دبی فیلم مایع گریفیس و والیس [۱۰] و قطر قطره آزوپاردی [۲])



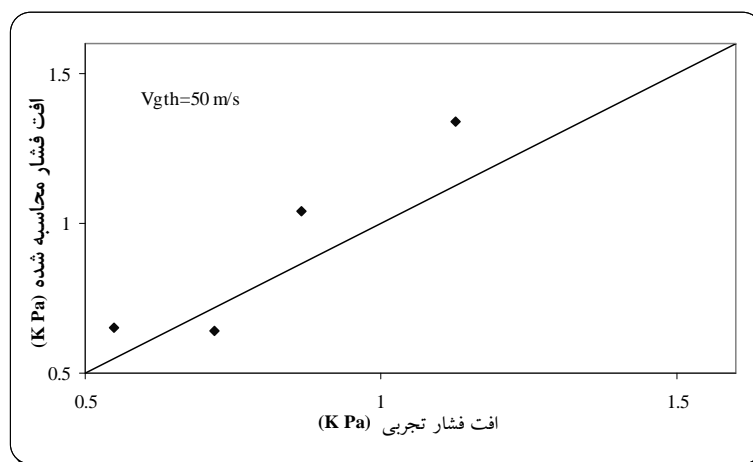
شکل ۸- مقایسه افت فشار کلی با داده‌های تجربی ویسواناتان [۱۹]



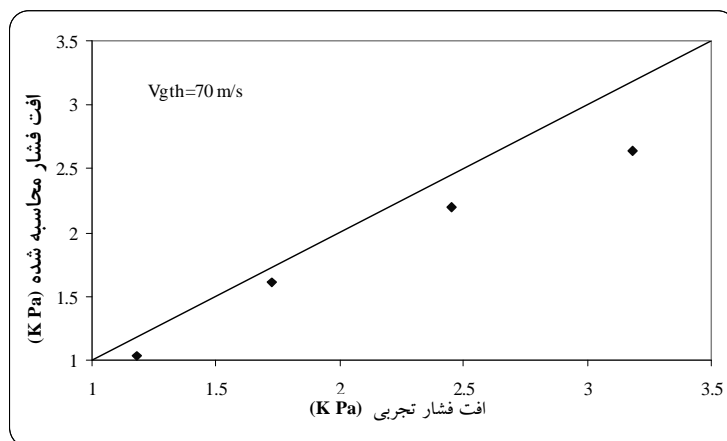
شکل ۹- اثر نسبت دبی جریان مایع به گاز بر افت فشار کلی



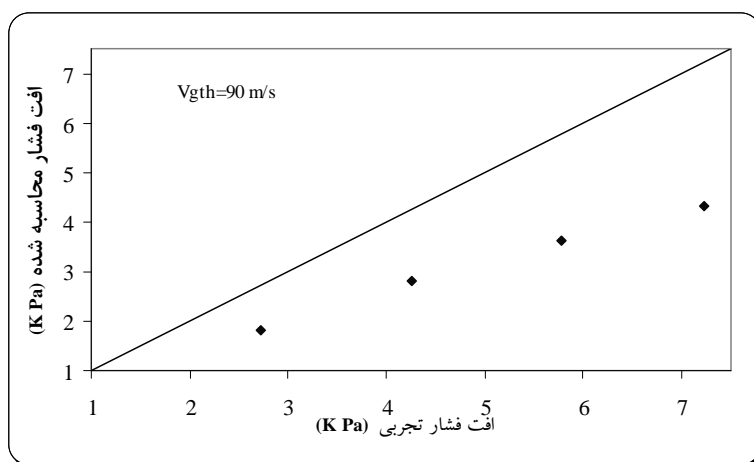
شکل ۱۰- اثر سرعت گاز در گلوگاه بر افت فشار کلی



شکل ۱۱- مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی گانکالوز و همکاران [۸] در $V_{gth} = 50 \text{ m/s}$



شکل ۱۲- مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی گانکالوز و همکاران [۸] در $V_{gth} = 70 \text{ m/s}$



شکل ۱۳- مقایسه نتایج مدل با داده‌های تجربی گانکالوز و همکاران [۸] در $V_{gth} = 90 \text{ m/s}$

شده را می‌توان به این صورت تفسیر کرد که در هر سه مدل وجود فیلم مایع روی دیواره نادیده گرفته شده است و فرض شده کل مایع تزریقی اتمایز می‌شود. علاوه بر این در مدل یانگ از اتلاف در بخش همگرا، اصطکاک گاز با دیواره و بازیابی فشار در بخش واگرا صرف نظر شده است. دو فرض اتمایز شدن کل مایع تزریقی و عدم بازیابی فشار در بخش واگرا افت فشار را افزایش می‌دهد که اثر آن توسط کاهش افت فشار به خاطر در نظر نگرفتن افت اصطکاک و اتلافات در بخش همگرا تحت شرایطی خنثی می‌شود. از این رو مدل یانگ توافق خوبی با داده‌های تجربی نشان می‌دهد [۹]. مدل بول به دلیل در نظر گرفتن افت اصطکاک و مدل لیت به دلیل در نظر گرفتن بازیابی فشار ناشی از کاهش سرعت قطرات در بخش واگرا، انحراف بیشتری را نسبت به مدل یانگ نشان می‌دهند، اما از آنجایی که در ونتوری ویسواناتان [۱۹] که جزء ونتوری‌های بزرگ به حساب می‌آید، اهمیت افت فشار ناشی از تنش برشی در جداره کم است، نتایج مدل بول بسیار نزدیک به مدل یانگ می‌باشد.

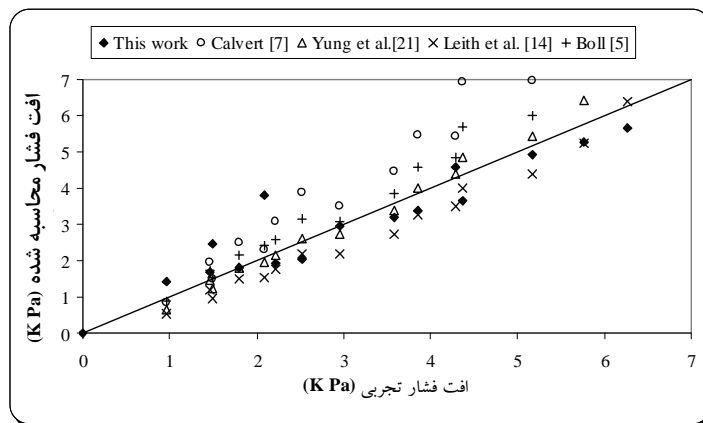
دلایلی که در مورد توافق نتایج مدل‌های یانگ و لیت با داده‌های تجربی در شکل (۱۴) ذکر شد در مورد شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) نیز صدق می‌کند، اما چون افت فشار اصطکاک ناشی از تماس گاز با دیواره یا با لایه مایع در ونتوری‌های کوچک از اهمیت زیادی برخوردار است، در ونتوری گانکالوز و همکاران [۸] که یک ونتوری کوچک است نتایج مدل بول انحراف زیادی با افت فشار واقعی دارد که به دلیل افزایش درصد مایع اتمایز شده با افزایش سرعت گاز در گلوگاه این

بحث و نتیجه‌گیری

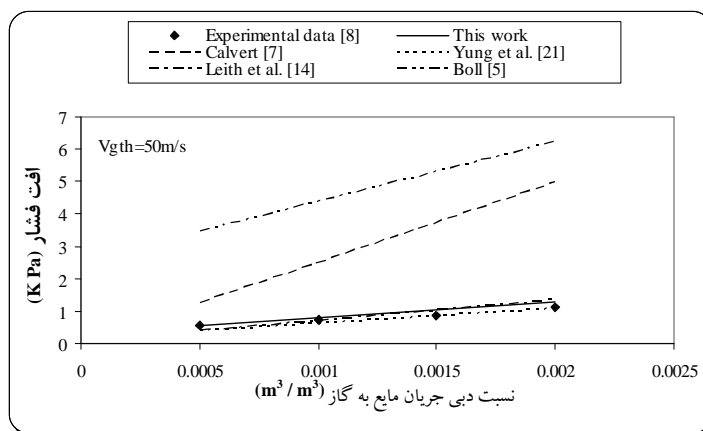
در این تحقیق یک مدل تعمیم یافته از مدل ویسواناتان [۱۹] ارائه شد. در این قسمت به بحث پیرامون این مدل و مقایسه آن با سایر مدل‌ها پرداخته می‌شود. شکل (۱۴) این مدل را با مدل‌های کالورت [۷]، یانگ [۲۱]، لیت [۱۴] و بول [۵] و داده‌های ویسواناتان [۱۹] مقایسه کرده است. در شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) این مقایسه توسط داده‌های گانکالوز و همکاران [۸] صورت گرفته است. لازم به ذکر است برای مقایسه نتایج مدل‌های بول و یانگ با داده‌های تجربی حاصل از ونتوری‌های با مکانیسم فیلمی به جای قطر قطره ناکایاما و تاناساوا [۱۷] از قطر قطره آزوپاردی [۲] استفاده شده است.

ونتوری مورد استفاده توسط ویسواناتان [۱۹] یک ونتوری با مقیاس نیمه صنعتی است که از مکانیسم تزریق برای ورود مایع استفاده می‌کند. داده‌های آن در شکل (۱۴) با مدل‌های موجود مقایسه شده است. در این شکل مشاهده می‌شود مدل کالورت پیش‌بینی ضعیفی برای افت فشار ارائه می‌دهد که این به دلیل فرض‌های ساده‌کننده‌ای است که در این مدل در نظر گرفته شده است. فرض رسیدن سرعت قطرات به سرعت گاز در انتهای گلوگاه در مدل کالورت، باعث می‌شود که این مدل افت فشار را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کند. توافق خوب مدل اصلاح شده ویسواناتان (کار فعلی) با داده‌های تجربی، نشان‌دهنده قابلیت این مدل برای پیش‌بینی افت فشار در این دامنه از شرایط می‌باشد. نتایج خوب مدل‌های بول، یانگ و لیت با وجود فرض‌های ساده‌کننده زیادی که در این مدل‌ها در نظر گرفته

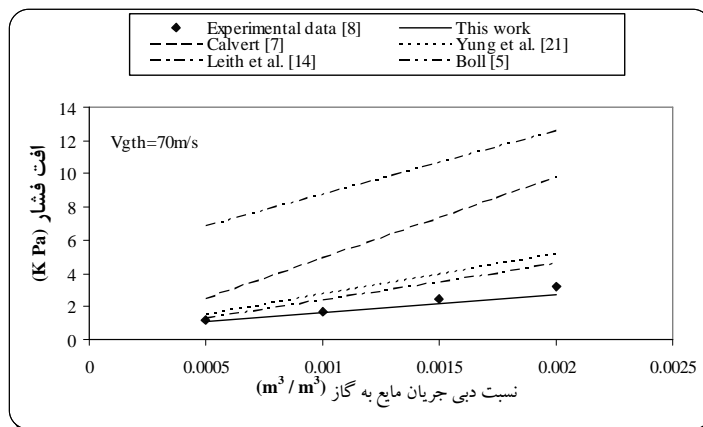
انحراف کمتر می‌شود. همچنین به دلیل کوچکتر بودن طول گلوگاه شوینده و نتوری گانکالوز و همکاران [۸]، مدل کالورت پیش‌بینی ضعیف‌تری نسبت به ونتوری ویسوناتان [۱۹] دارد، زیرا در طول‌های گلوگاه کوتاهتر، قطرات فرصت کمتری برای افزایش سرعت دارند و فرض رسیدن سرعت قطرات به سرعت گاز در انتهای گلوگاه که توسط کالورت مطرح شده انحراف بیشتری ایجاد می‌کند.



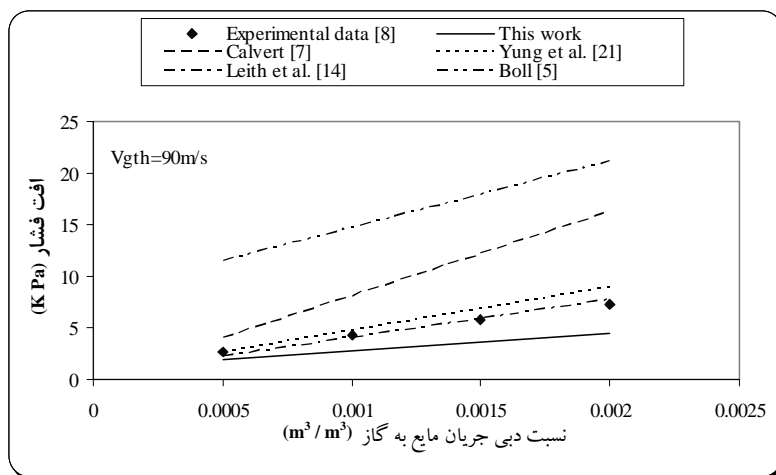
شکل ۱۴- مقایسه مدل‌ها با داده‌های تجربی ویسوناتان [۱۹]



شکل ۱۵- مقایسه مدل‌ها با داده‌های تجربی گانکالوز [۸] در $V_{gth} = 50 \text{ m/s}$



شکل ۱۶- مقایسه مدل‌ها با داده‌های تجربی گانکالوز [۸] در $V_{gth} = 70 \text{ m/s}$



شکل ۱۷- مقایسه مدل‌ها با داده‌های تجربی گانکالوز [۸] در $V_{gth} = 90 \text{ m/s}$

m^3/s دبی حجمی مایع ورودی به ونتوری	L همانطور که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود مدل اصلاح شده
نسبت دبی جرمی مایع به گاز	m ویسواناتان (کار فعلی) بجز در $V_{gth} = 90 \text{ m/s}$ توافق بهتری را با
$Kg/m^2 s$ شار قطرات مایع	m_d داده‌های گانکالوز و همکاران [۸] نشان می‌دهد. در توجیه این موضوع
فشار	P می‌توان گفت چون سیستم ورود مایع در شوینده ونتوری گانکالوز و
محیط تر شده توسط فیلم مایع m	P_w همکاران [۸] به صورت فیلمی می‌باشد، جریان درون این ونتوری
m^3/s دبی حجمی	Q شباهت بیشتری با جریان‌های دوفازی حلقوی دارد، زیرا در جریان‌های
عدد بدون بعد رینولدز	Re دوفازی حلقوی تنها عامل ایجاد قطرات، تنش برشی گاز با لایه فیلم
سرعت m/s	V مایع و جدا شدن قطرات از این لایه می‌باشد. پس مدل اصلاح شده
سرعت ظاهری m/s	V_s ویسواناتان که اساساً بر پایه روابط جریان‌های دوفازی حلقوی بنا شده،
دبی جرمی Kg/s	W افت فشار را در این شوینده ونتوری بهتر پیش‌بینی می‌کند.
عدد بدون بعد وبر	We
فاصله محوری از ابتدای شوینده ونتوری m	z
جزئی از گلوگاه که توسط سیال هسته اشغال شده	α_c
جزء حجمی سیال هسته که توسط گاز اشغال شده	α_g
ضخامت فیلم مایع	δ
دانسیته	ρ
ویسکوزیته	μ
کشش سطحی N/m	σ
تنش برشی	τ
ضریب اصطکاک دوفازی Φ_c^2	Φ_c^2
	فهرست علائم و نشانه‌ها
	A سطح مقطع m^2
	C نسبت دبی جرمی قطرات به دبی جرمی کل مایع
	C_D ضریب دراگ
	D قطر m
	D_H قطر هیدرولیک m
	f ضریب اصطکاک
	f_{gi} ضریب اصطکاک گاز با فیلم مایع
	G دبی حجمی گاز m^3/s
	H نصف عرض ونتوری m

- [14] Leith D., Cooper W., Stephen N., Venturi scrubbers: pressure loss and regain, *Aerosol Science and Technology*, 4, 239-243, (1985).
- [15] Mohebbi A., Taheri M., Fathikaljahi J., Talaie M. R., Prediction of pressure drop in an orifice scrubber based on a Lagrangian approach, *J. Air Waste Manage. Assoc.* 52, 174, (2002).
- [16] Nasseh S., Mohebbi A., Jeirani Z., Sarrafi A., Predicting pressure drop in venture scrubbers with artificial neural networks, *Journal of Hazardous Materials*, 143, 144-149, (2007).
- [17] Nukiyama S., Tanasawa Y., *Trans. Soc. Mech. Eng. Jpn.*, 4, 86, (1938).
- [18] Talaie M.R., Fathikalajahi J., Taheri M., Mathematical modeling of SO₂ absorption in a venturi scrubber, *J. Air & Waste Management Assoc.*, 47, 1211-1215, (1997).
- [19] Viswanathan S., Gnyp A.W., Pierre C.C. St., Annular flow pressure drop model for Pease-Anthony type venturi scrubbers, *AIChE J.* 31, 1947-1958, (1985).
- [20] Viswanathan S., Gnyp W.A., Pierre C.C. St., Estimating film flow in a venturi scrubber, *Particulate Sci. Technol.* 15, 65, (1997).
- [21] Yung S.C., Barbarika H.F., Calvert S., Pressure loss in venturi scrubbers, *J. Air Pollut. Control Assoc.* 27, 348-351, (1977).

[۲۲] وطنی ع، مخاطب س، اصول طراحی هیدرولیکی خطوط لوله انتقال جریانهای دوفازی، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ۲۸۸، (۱۳۸۰).

زیرنویس‌ها

هسته	<i>c</i>
قطره	<i>d</i>
فیلم مایع	<i>f</i>
گاز	<i>g</i>
مایع	<i>l</i>
نازل	<i>o</i>
گلوگاه	<i>th</i>

مراجع

- [1] Aziz K., Govier G.W., Fogarasi M., Pressure drop in wells producing oil and gas, *J.P.T.*, July – September, 38-48, (1972).
- [2] Azzopardi B.J., Drops in annular two phase flow, *Int. J. Multiphase Flow.* 23, 1-55, (1997).
- [3] Azzopardi B.J., Govan A.H., The modeling of venturi scrubbers, *Filtr. Separ.* 23, 196-200, (1984).
- [4] Azzopardi B.J., Teixeira S.F.C.F., Govan A.H., Bott T.R., An improved model for pressure drop in venturi scrubbers, *Trans. Inst. Chem. Engrs.* B69, 55-64, (1991).
- [5] Boll R.H., Particle collection and pressure drop in venturi scrubbers, *Ind. Eng. Chem. Fund.* 12, 40-50, (1973).
- [6] Calvert S., Venturi and other atomizing scrubbers efficiency and pressure drop, *AIChE J.* 16, 392-396, (1970).
- [7] Calvert S., *Scrubbing, Air Pollution*, Vol. IV, 3rd ed., Academic Press, New York, (1982).
- [8] Goncalves J.A.S., Fernandez Alonso D., Azzopardi B.J., Experimental study of hydrodynamics in venturi scrubbers with two different liquid injection arrangements, *Proceedings of the second international symposium on two phase flow modeling and experimentation*, Edizioni ETS, Pisa, 2, 701-707, (1999).
- [9] Goncalves J.A.S., Fernandez Alonso D., Martins Costa M.A., Azzopardi B.J., Coury J.R., Evaluation of the models available for the prediction of pressure drop in venturi scrubbers, *J. Hazard. Mater.* B81, 123-140, (2001).
- [10] Griffith P., Wallis G.B., Two phase slug flow, *J. Heat Transfer, Trans. ASME*, 307, (1961).
- [11] Hewitt G.F., Hall Taylor N.S., *Annular two phase flow*, Pergamon Press, Oxford, 31, (1970).
- [12] Ishii M., Grolmes M.A., Inception criteria for droplet intrainment in two phase concurrent flow, *AIChE. J.*, 21, 308-318, (1975).
- [13] Lackhart R.W., Martinelli R.C., Proposed correlation of data for isothermal two phase, two component flow in pipes, *Chem. Eng. Prog.* 49, 39, (1949).