

حل عددی پدیده جذب گاز با استفاده از فیلم مایع در داخل لوله عمودی

سید محمود خردمند*⁺

تهران، دانشگاه امام حسین (ع)، دانشکده فنی مهندسی، گروه مکانیک، صندوق پستی ۱۳۳۴۶۹۷۳۴۸

اسماعیل اسماعیل زاده

تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده فنی، گروه مهندسی مکانیک

چکیده: ستون‌های جذب گاز که با استفاده از فیلم مایع کار می‌کنند امروزه دارای نقش مهمی در صنایع هستند. در این مقاله حل عددی معادله‌های انتقال مونتگم و جرم برای فیلم مایع از سیستم جریان فیلم مایع و گاز که در داخل لوله‌ای عمودی و به شکل جریان حلقوی در حرکت‌اند صورت پذیرفته است. در این سیستم جریان فیلم مایع به صورت مغشوش و موجی است. برای بررسی اغتشاش‌های فیلم مایع از مدل اصلاح شده Van Driest و همچنین برای بررسی موج‌ها در فیلم مایع از مدل Suzuki استفاده شده است. مقایسه نتیجه‌های به دست آمده از مطالعه عددی انجام شده با نتیجه‌های تجربی ارایه شده توسط دیگران برای جذب گاز CO₂ در آب نیز صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: جریان حلقوی، جذب گاز، فیلم مایع، مغشوش، موجی

KEY WORDS: Annular flow, Gas absorption, Liquid film, Turbulence, Wavy.

مقدمه

هنگام سرازیر شدن از سطح لوله جذب می‌کند [۱]. عمل سولفون‌کردن^(۱) برای محلول دودسیل بنزن^(۲) نیز یکی از مهم‌ترین واکنش‌هایی است که در صنایع پاک‌کننده مورد بهره برداری قرار می‌گیرد. گاز SO₂ به همراه N₂ در مجاورت فیلم مایع دودسیل بنزن که روی دیوارهای لوله ای در حرکت است قرار گرفته و جذب آن می‌شود، در نتیجه این جذب ماده خروجی قابلیت پاک‌کنندگی پیدا می‌کند [۲]. گازهایی که از منابع نفتی و یا صنایع گاز و پتروشیمی حاصل می‌شوند به‌طور عمده دارای مقدارهای متفاوتی از گازهای هیدروژن سولفید (H₂S) و

استفاده از فیلم‌های مایع در صنایع، بسیار گسترده است. در ماشین‌های بزرگ تولید برودت با روش جذبی، صنایع شیمیایی برای پاک‌کننده‌ها، شستشوی گازهای مضر در صنایع گاز از جمله استفاده‌های مکانیسم جذب به‌وسیله فیلم مایع است. یکی از بخش‌های حیاتی سیستم‌های برودتی که به‌روش جذبی کار می‌کنند، بخش جذب‌کننده است. در این بخش نه تنها بررسی انتقال مونتگم، حرارت و جرم دارای اهمیت است، بلکه بررسی جریان، فیلم نیز در حل مسأله مهم می‌باشد. در یک نوع از جذب کننده‌های محلول جاذب، بخارهای مبرد را در فشار پایین و در

⁺E-mail: mahkherad@hotmail.com

*عهده دار مکاتبات

(۱) Sulfonation

(۲) Dodecyl benzene

می شود گاز میعان نمی کند.

(۵) جریان در حال توسعه^(۳) است.

(۶) واکنش شیمیایی بین گاز و مایع انجام نمی گیرد و فیلم مایع هم‌دام است.

معادلات اساسی

مدل فیزیکی مورد استفاده با توجه به شکل ۱ عبارت است از لوله قائمی که کناره دیواره‌های آن فیلم مایع و در وسط لوله جریان گاز به شکل همسو با مایع و رو به پایین در حرکت هستند. مبدا مختصات روی جداره لوله و محور y عمود بر امتداد لوله و محور x در جهت حرکت و در امتداد لوله است.

با توجه به محورهای مختصات در نظر گرفته شده معادله‌های اساسی مشخص خواهند شد.

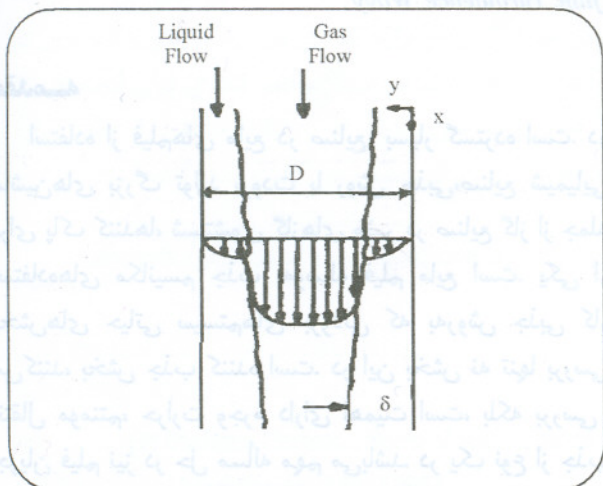
معادله انتقال مومنتم

برای جریان فیلم مایع که ضخامت آن کم است معادله‌ها را می توان با توجه به شباهتشان به معادله‌های حالت دائم مربوط به جریان لایه مرزی به شکل معادله (۱) نوشت [۷].

$$\rho_1 u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + \rho_1 v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} = \rho_1 g + \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + (\mu_{1,eff}) \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right] \quad (1)$$

که در آن

$$\mu_{1,eff} = \mu_1 + \mu_{it} + \tilde{\mu}_1 \quad (2)$$



شکل ۱- مشخصات ستون با جریان حلقوی

(۱) Damping Factor

(۲) Entrainment

کربن دی اکسید (CO_2) هستند. این گازها را در اصطلاح گازهای ترش می نامند، وجود CO_2 به مقدار زیاد و H_2S حتی به مقدار کم باعث اشکال‌های فراوانی می شود. برای مثال هیدروژن سولفید سبب خوردگی لوله‌ها شده و در هنگام سوختن نیز گاز دی اکسید گوگرد تولید می کند که سمی و خورنده است. بنابراین، گازهای مضر باید از جریان گازها حذف شوند. یکی از راه‌های حذف گازهای ترش استفاده از واکنش‌های شیمیایی است. راه دیگر استفاده از روش‌های فیزیکی است که در آن از تماس گاز و مایع استفاده می شود. در بررسی انجام شده روش فیزیکی تماس گاز و فیلم مایع در داخل لوله‌های قائم مورد مطالعه قرار گرفته است.

در صورتی که جریان فیلم مایع به همراه اغتشاش‌ها باشد، باید اثر اغتشاش‌ها نیز در معادله‌های اساسی وارد شود. Liu و Yih [۳] مدل اصلاح یافته Van Driest را که توسط Limberg، Faghri و Seban استفاده شده بود را با وارد کردن اثر تنش فصل مشترک و یک ضریب خفگی^(۱) بهبود بخشیدند. در این مقاله این مدل بهبود یافته مورد استفاده قرار گرفته است.

در صورتی که فصل مشترک فیلم مایع و گاز موجی باشد در این حالت مسأله مشکل تر خواهد شد و باید با مدل کردن تاثیرهای این موج‌ها، اثر آنها در معادلات در نظر گرفته شود [۴]. در این قسمت از مدل Suzuki [۵] برای سطوح موجی استفاده شده است. در این مدل تاثیر موج‌ها بر انتقال مومنتم، حرارت و جرم همانند حرکت جریان مغشوش در نظر گرفته می شود. ویسکوزیته ظاهری امواج همانند ویسکوزیته ظاهری اغتشاش‌ها که توسط Prandel - Kolmogoroff [۶] ارایه شده است، مورد استفاده قرار می گیرد.

فرضیات

حل عددی معادله‌های انتقال جرم و مومنتم براساس فرضیه‌های اصلی زیر صورت پذیرفته است.

- (۱) قطره‌های مایع به داخل گاز^(۲) وارد نمی شوند.
- (۲) در مایع هیچگونه حباب گاز وجود ندارد.
- (۳) با در نظر گرفتن آب در دمای ۳۰۰ درجه کلوین به عنوان مایع فرض می شود که آن تبخیر نمی شود.
- (۴) با توجه به حلالیت گاز دی اکسید کربن در آب فرض

(۳) Developing

(۲) ناحیه دور از دیوار که در آن $\frac{y}{\delta} > 0.6$ است.

در این ناحیه ویسکوزیته ناشی از اغتشاش‌ها برابر با مقدار آن

از معادله (۶) در $\frac{y}{\delta} = 0.6$ منظور می‌شود.

مدل ارایه شده توسط Suzuki و همکاران برای محاسبه ویسکوزیته ناشی از موج‌ها

یک توده از سیال در فیلم مایع با حرکت عمودی به سمت داخل و خارج با انتشار موج در سطح مشترک دو فاز مورد بررسی قرار می‌گیرد. حرکت ناشی از موج با حرکت توده ای از سیال که دارای اغتشاش‌هاست، متفاوت است [۹]. اما می‌توان تاثیر موج‌ها روی انتقال حرارت، جرم و مومنتم را همانند حرکت جریان مغشوش در نظر گرفت و ویسکوزیته ظاهری برای موج را همانند ویسکوزیته ظاهری اغتشاش‌ها که توسط پرناتل کولموگراف^(۱) [۶ و ۱۰] ارایه شده است را به شکل زیر مدل کرد.

$$\mu_1 = C\rho\Lambda u' \quad (10)$$

در این رابطه C یک ثابت تعادلی بوده و مقدار آن در محاسبه‌ها با استفاده از نتیجه‌های تجربی به دست می‌آید. در این رابطه به جای مقیاس طول از Λ و بجای مقیاس سرعت اغتشاش‌ها از u' استفاده شده است. دامنه موج L و فرکانس آن F بوده و مقیاس طول و سرعت با ترکیب L و F قابل ارایه هستند [۱۱].

در اینجا دو نوع موج روی سطح مشترک وجود داشته که برای موج‌های چروکی^(۲) از حرف r و برای موج‌های مضطرب^(۳) از حرف d استفاده می‌شود [۱۲]. بدین ترتیب می‌توان ویسکوزیته مایع موج را به شکل زیر نوشت:

$$\tilde{\mu}_1 = C_d \rho_1 L_d^2 F_d + C_r \rho_1 L_r^2 F_r \quad (11)$$

از آنجایی که موج‌ها در حرکت مایع در روی دیواره مستهلک می‌شوند لذا $\tilde{\mu}_1$ در لایه نازک چسبیده به دیواره برابر صفر و خارج از این لایه $\tilde{\mu}_1$ غیر صفر خواهد بود.

با توجه به بررسی‌های انجام شده توسط Suzuki و همکارانش مقدار C_r و C_d برابر با ۱/۳۴ در نظر گرفته شده است [۱۳].

شرایط مرزی مسأله به صورت زیر است:

$$y = 0 \quad u = 0 \quad (3)$$

$$y = \delta \quad \tau = \tau_i \quad (4)$$

$$x = 0 \quad u = u_{in} \quad (5)$$

همان‌گونه که در معادله (۲) مشاهده می‌شود، ویسکوزیته موثر شامل ویسکوزیته مولکولی سیال، ویسکوزیته ناشی از اغتشاش‌ها و همچنین ویسکوزیته ناشی از موج‌های موجود در فصل مشترک است.

ویسکوزیته مولکولی را می‌توان با توجه به دمای سیال در فیلم مایع از کتب مرجع استخراج کرد. ویسکوزیته اغتشاش‌ها و موج‌ها به روش‌های زیر مدل می‌شوند.

مدل ارایه شده توسط yih و Liu برای محاسبه ویسکوزیته ناشی از اغتشاش‌ها

توزیع ویسکوزیته ناشی از اغتشاش‌ها برای مومنتم به دو ناحیه تقسیم شده است [۳].

(۱) ناحیه نزدیک دیوار که در آن $\frac{y}{\delta} < 0.6$ است.

در این ناحیه ویسکوزیته ناشی از اغتشاش‌ها نسبت به ویسکوزیته مولکولی از معادله (۶) به دست می‌آید.

$$\frac{\mu_{1t}}{\mu} = \quad (6)$$

$$-0.5 + 0.5 \left[1 + 0.6 y^{+2} \frac{\tau}{\tau_w} \left[1 - \exp \left(\frac{-y^+ (\tau/\tau_w)^{1/2}}{A^+} \right) \right]^2 \right]^{1/2} f^2$$

که در آن

$$f = \exp(-1.66 \tau/\tau_w) \quad (7)$$

$$\frac{\tau}{\tau_w} = 1 - S^2 \frac{y^+}{\delta^+} \quad (8)$$

$$S^2 = \frac{\rho g \delta}{\tau_i + \rho g \delta} \quad (9)$$

تفاوت مدل yih و Liu با مدل مورد استفاده Limberg در آن است که ترم‌های تنش برشی برای وارد کردن اثر تنش فصل مشترک بهبود یافته است [۸].

(۱) Prandtl-kolmogoroff

(۲) Ripple

(۳) Disturbance

معادله انتقال جرم

بر اساس فرض‌های قسمت هیدرودینامیک جریان و با فرض آنکه در جهت حرکت مایع می‌توان از نفوذ مولکولی در مقابل نفوذ جابه‌جایی صرف نظر کرد. رابطه موازنه جرم گاز نفوذی در فیلم مایع به شکل معادله (۲۷) نوشته می‌شود [۱۷].

$$u_1 \frac{\partial C_A}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} (D_{\text{eff}}) \frac{\partial C_A}{\partial y} \quad (27)$$

که در آن

$$D_{\text{eff}} = D + D_t + \tilde{D} \quad (28)$$

شرایط مرزی مسأله برای معادله انتقال جرم به شکل زیر است.

$$y = 0 \quad \frac{\partial C_A}{\partial y} = 0 \quad (29)$$

برای شرط مرزی غلظت گاز در فصل مشترک از تعادل دو فاز و قانون هنری می‌توان نوشت [۱۵]

$$y = \delta \quad C_s = \frac{PA}{H} \quad (30)$$

در بررسی انجام شده با توجه به خالص در نظر گرفتن گاز دی اکسید کربن (CO_2) مقدار فشار نسبی آن را می‌توان برابر با فشار گاز در نظر گرفته و ضریب هنری [۱۵] برابر با $\frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kgmol}}$ ۲۹۴ است.

$$x = 0 \quad C_A = C_{\text{in}} = 0 \quad (31)$$

همان‌گونه که در معادله (۲۸) مشاهده می‌شود ضریب نفوذ موثر شامل ضریب نفوذ مولکولی گاز در مایع و ضریب نفوذ ناشی از اغتشاش‌ها و همچنین ضریب نفوذ ناشی از موج‌های موجود در فصل مشترک است.

ضریب نفوذ مولکولی را می‌توان با توجه به دما، از کتب مرجع استخراج کرد. ضریب نفوذ اغتشاش‌ها و موج‌ها به روش‌های زیر مدل می‌شوند.

مدل ارایه شده yih و Liu برای محاسبه ضریب نفوذ ناشی از اغتشاش‌ها

عدد اشمیت مغشوش $\left(\frac{\mu_{1t}}{\rho D_t} = Sc_t \right)$ از مدل اصلاح شده Van Driest توسط yih و Liu [۳] به دست می‌آید. در این مدل Sc_t به شکل معادله (۳۲) است.

همچنین در این مدل مقادیرهای L_d ، F_r ، L_r و F_d برحسب عددهای رینولدز فیلم در دو بخش به شکل زیر ارایه شده است:

الف) برای $Re_f < 4000$

$$L_r = 0.17 \times \Delta \quad (12)$$

$$L_d = -1.55 \times 10^{-9} Re_f^2 + 1.485 \times 10^{-5} Re_f + 1.59 \times 10^{-2} \quad (13)$$

$$F_r = 9.957 Re_s^{0.195} \quad (14)$$

$$F_d = -0.157 \times 10^{-6} Re_f^2 + 1.604 \times 10^{-3} Re_f + 4.309 \quad (15)$$

$$Re_s = 68 \exp(4.718 \times 10^{-4} (Re_f - 1000)) \quad (16)$$

$$\Delta = 6.196 \times 10^{-3} Re_f^{0.239} \quad (17)$$

ب) برای $Re_f > 4000$

$$L_r = 0.17 \times \Delta \quad (18)$$

$$L_d = 3.415 \times 10^{-3} Re_f^{0.375} \quad (19)$$

$$F_r = 9.957 Re_s^{0.195} \quad (20)$$

$$F_d = -3.525 Re_f^2 + 0.588 \times 10^{-3} Re_f + 6.42 \quad (21)$$

$$Re_s = 448 \exp(5.798 \times 10^{-4} (Re_f - 4000)) \quad (22)$$

$$\Delta = 2.811 \times 10^{-5} Re_f^{0.812} \quad (23)$$

با استفاده از رابطه‌های ارایه شده می‌توان $\tilde{\mu}_1$ را برای فیلم‌های موج‌دار به دست آورد و در فاصله‌های متفاوت از دیواره توزیع آن را محاسبه کرد [۱۴] و $\tilde{\mu}_{1,\text{eff}}$ را به دست آورد یعنی:

$$0 \leq y^+ < \delta \quad \mu_{1,\text{eff}} = \mu_1 + \mu_{1t} \quad (24)$$

$$\delta \leq y^+ < 30 \quad \mu_{1,\text{eff}} = \mu_1 + \mu_{1t} + \tilde{\mu}_1 (y^+ - \delta) / 25 \quad (25)$$

$$30 \leq y^+ < \delta^+ \quad \mu_{1,\text{eff}} = \mu_1 + \mu_{1t} + \tilde{\mu}_1 \quad (26)$$

با معلوم شدن $\tilde{\mu}_{1,\text{eff}}$ می‌توان معادله انتقال مومنتم را حل کرد و پروفیل سرعت را برای فاصله دیواره لوله تا فصل مشترک به دست آورد.

کل فیلم مایع موازنه مولی جزء گاز نفوذی را به شکل معادله (۳۷) نوشت.

$$K_L = \left(\frac{\Gamma}{\rho_1 L} \right) \left[\frac{\left(\frac{d}{r} \right)}{\left(\left(\frac{d}{r} \right) - \delta \right)} \right] \ln \left(\frac{C_{i,in} - C_{b,in}}{C_{i,out} - C_{b,out}} \right) \quad (37)$$

که در آن

$$C_b = \frac{\int_0^\delta C_{udy}}{\int_0^\delta udy} \quad (38)$$

نتایج و بحث

حل معادله‌های انتقال مومنتم، جرم و پیوستگی به همراه شرایط مرزی داده شده با روش تفاوت محدود منجر به ماتریس ضریب‌های سه قطری می‌شود که با روش حذفی گوس حل شده است. طول ستون ۱/۸ متر و قطر لوله آن ۱/۵ سانتی‌متر منظور شده است. شبکه ایجاد شده برای حل عددی معادله‌ها در عرض فیلم ۱۲ گره منظور شده و گره‌های در طول ستون را کد محاسباتی مورد استفاده تعیین می‌کنند. محاسبات انتقال مومنتم، جرم و پیوستگی قدم به قدم صورت می‌گیرد (برای محاسبه‌های مومنتم از کد GENMIX استفاده شده است [۱۶]). دمای گاز و آب ورودی ۳۰۰ درجه کلوین و محاسبه‌ها در عدد رینولدز گاز ۷۰۰۰ و برای عددهای رینولدز فیلم ۶۰۰۰، ۴۰۰۰، ۳۶۰۰، ۱۲۰۰ انجام شده است. از مشخصات فیزیکی آب برای فیلم مایع و از مشخصات فیزیکی کربن دی‌اکسید برای گاز استفاده شده است.

با حل معادله‌ها می‌توان پروفیل سرعت و غلظت و ضریب انتقال جرم را به دست آورد.

در شکل ۲ مقادیر سرعت در فصل مشترک بر حسب طول ستون برای عددهای رینولدز فیلم ۶۰۰۰، ۳۶۰۰ رسم شده‌اند. به نظر می‌آید که سرعت در فصل مشترک برای عددهای رینولدز کوچکتر (که دبی‌های کمتری از فیلم مایع عبور می‌کند) کمتر بوده و در کل با توجه به معادله پیوستگی، با افزایش طول که ضخامت فیلم رشد می‌کند، مقدار آن کاهش می‌یابد.

در شکل ۳ مقدارهای تنش برشی در فصل مشترک بر حسب طول ستون برای عددهای رینولدز ۶۰۰۰، ۳۶۰۰ نشان داده شده است. با توجه به تغییرهای سرعت در فصل مشترک انتظار می‌رود که در عددهای رینولدز کمتر، تنش برشی کمتر و تغییرهای آن با افزایش طول ستون کاهش یابد که این‌گونه است.

در شکل‌های ۴ و ۵ نیمرخ سرعت در فیلم مایع برای اعداد

$$Sc_t = \frac{\left\{ 1 - \exp \left[-y + \left(\frac{\tau}{\tau_w} \right)^{1/2} / A^+ \right] \right\}}{\left\{ 1 - \exp \left[-y + \left(\frac{\tau}{\tau_w} \right)^{1/2} / B^+ \right] \right\}} \quad (32)$$

که در آن $A^+ = 25.1$ و B^+ از معادله (۳۳) به دست می‌آید.

$$B^+ = Sc \sum_{i=1}^n C_i (\log Sc)^{i-1} \quad (33)$$

که در آن $C_1 = 34.96$ ، $C_2 = 28.97$ ، $C_3 = 33.95$ ، $C_4 = 6.33$ و $C_5 = -1.186$ است.

بدین ترتیب با محاسبه Sc_t می‌توان مقدار D_t را محاسبه کرده و از آن در معادله انتقال جرم استفاده کرد.

مدل ارزیابی شده برای محاسبه ضریب نفوذ ناشی از موجها

در این قسمت از مدل ارزیابی شده برای محاسبه ویسکوزیته ناشی از امواج استفاده می‌شود. با توجه به قسمت‌های قبلی جهت محاسبه ویسکوزیته ناشی از موجها می‌توان نوشت:

$$\rho_1 \tilde{D} = \frac{\tilde{\mu}_1}{Sc} \quad (34)$$

با فرض $\tilde{Sc} = Sc_t$ [۵] می‌توان \tilde{D} را به دست آورد.

$$\tilde{D} = D_t \left(\frac{\tilde{\mu}_1}{\mu_{1,t}} \right) \quad (35)$$

با معلوم شدن \tilde{D} ، D_t اینک می‌توان معادله انتقال جرم را با توجه به حل معادله انتقال مومنتم حل کرد و پروفیل غلظت را برای فاصله دیواره لوله تا فصل مشترک به دست آورد.

معادله پیوستگی

برای جریان فیلم مایع با توجه به محورهای مختصات در نظر گرفته شده می‌توان معادله پیوستگی را نوشت

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0 \quad (36)$$

معادله پیوستگی نیز باید به همراه معادله‌های انتقال مومنتم و جرم به‌طور همزمان حل شود.

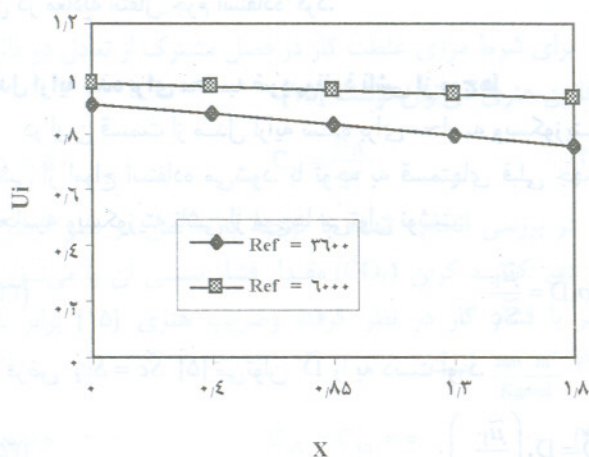
ضریب انتقال جرم

برای محاسبه ضریب انتقال جرم برای فیلم مایع می‌توان حول

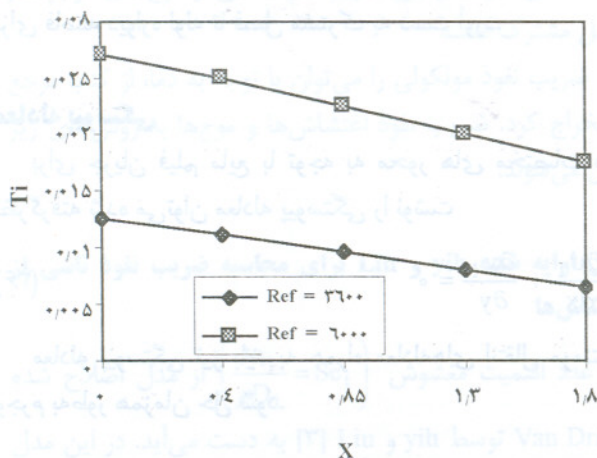
جدول ۱- مقایسه ضریب‌های انتقال جرم

طول ستون	ضریب انتقال جرم عددی $\times 10^{-4}$	ضریب انتقال جرم تجربی $\times 10^{-4}$	خطا %
۰/۱۲۶	۰/۳۸۹	۰/۳۲۵	۱۹/۵
۰/۴۹۰	۹/۹۲۶	۰/۱۶۵	۳۹/۸
۰/۸۹۹	۹/۰۷۲	۰/۱۲۱	۲۴/۷
۱/۴۹	۹/۰۷۲	۰/۹۲۲	۱/۶۳
۱/۸	۹/۰۷۳	۰/۹۲۲	۱/۶۳

$$ER = \left| \frac{K_{L,E} - K_{L,N}}{K_{K,E}} \right|$$



شکل ۲- تغییرهای سرعت در فصل مشترک برحسب طول ستون برای عددهای رینولدز ۳۶۰۰ و ۶۰۰۰



شکل ۳- تغییرهای تنش برشی در فصل مشترک برحسب طول ستون برای عددهای رینولدز ۳۶۰۰ و ۶۰۰۰

رینولدز ۴۰۰۰ در طول‌های ۰/۳، ۰/۲، ۱/۵ متر و ۶۰۰۰ در طول‌های ۰/۳، ۰/۲، ۱/۵ متر رسم شده‌اند. مشاهده می‌شود با افزایش طول که با افزایش ضخامت فیلم همراه است، مقدار سرعت کاهش یافته و تغییرهای آن نیز کمتر شده و توسعه می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز فیلم، بر مقدار سرعت افزوده می‌شود.

در شکل‌های ۶ و ۷ نیمرخ غلظت در فیلم مایع برای عددهای رینولدز ۶۰۰۰، ۳۶۰۰، ۱۲۰۰ در طول‌های ۱/۵، ۰/۲ متر رسم شده است. با افزایش طول، مقدارهای غلظت بیشتر می‌شود چرا که نفوذ با افزایش طول، بیشتر خواهد شد. تغییرهای غلظت با طول ستون نشان می‌دهد که غلظت در این شرایط در امتداد لوله به‌طور سریع توسعه می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، غلظت کاهش یافته چرا که فرصت نفوذ در این حالت کمتر می‌شود.

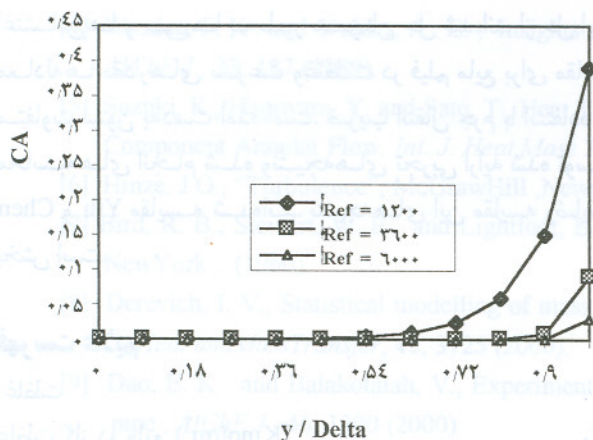
در شکل ۸ تغییرهای ضریب انتقال جرم در فیلم مایع بر حسب طول ستون برای عدد رینولدز فیلم ۳۶۰۰ رسم شده و نتیجه‌های به‌دست آمده با نتیجه‌های تجربی آرایه شده توسط Chen و Yih [۳] مقایسه شده‌اند.

در جدول ۱ ضریب انتقال جرم به‌دست آمده از کار محاسباتی انجام گرفته و نتیجه‌های تجربی آرایه شده در طول‌های مشخص از ستون مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در انتهای ستون، درصد خطا بسیار کم شده و ضریب انتقال جرم محاسباتی به مقدار تجربی آن رسیده است. نتیجه این مقایسه، محاسبات عددی انجام شده را تایید می‌کند.

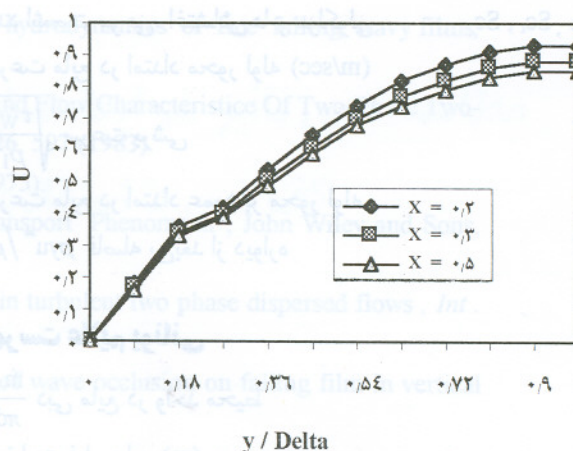
در شکل ۹ ضخامت فیلم مایع بر حسب طول ستون برای اعداد رینولدز ۶۰۰۰، ۳۰۰۰ رسم شده است. به‌طور کلی می‌توان گفت مقدار ضخامت فیلم مایع دارای رشد کمی است و مقدار این رشد با توجه به مقدار سرعت، معادله پیوستگی را ارضا می‌نماید. انتظار می‌رود که با افزایش عدد رینولدز فیلم، مقدار ضخامت فیلم زیاد شود که این افزایش در شکل مشخص می‌باشد.

نتیجه گیری نهایی

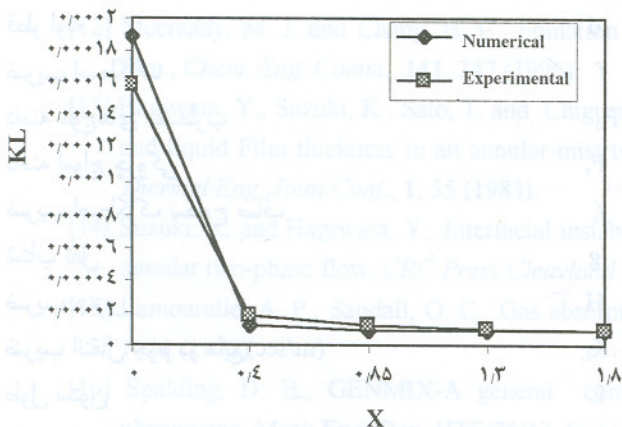
برای بررسی پدیده جذب گاز کربن دی‌اکسید در آب از جریان حلقوی در داخل لوله قائم استفاده شده است. معادله‌های انتقال مومنت، جرم و معادله پیوستگی با در نظر گرفتن اثر



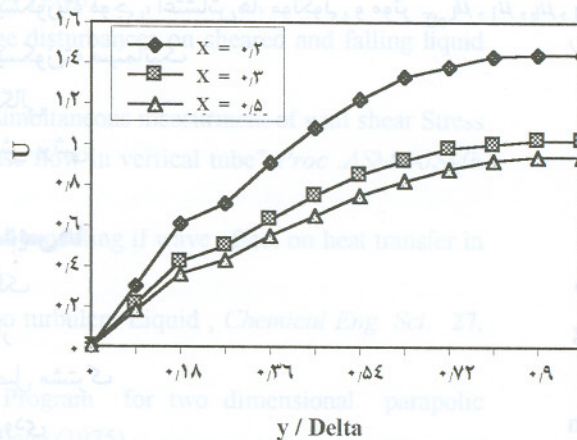
شکل ۷- نیمرخ غلظت در فیلم مایع برای عددهای رینولدز فیلم ۱۲۰۰، ۳۶۰۰ و ۶۰۰۰ در طول ۱/۵ متر



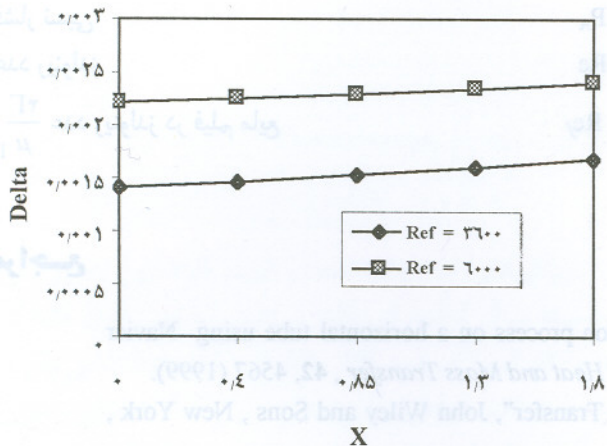
شکل ۴- نیمرخ سرعت در فیلم مایع برای عدد رینولدز فیلم، ۴۰۰۰، در طولهای ۰/۲، ۰/۳ و ۱/۵ متر



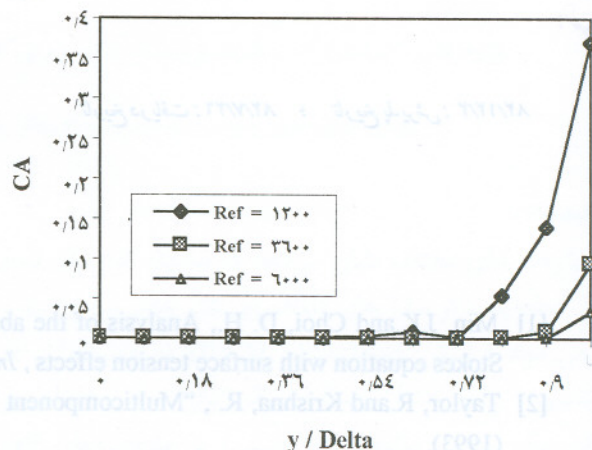
شکل ۸- تغییرهای ضریب انتقال جرم در فیلم مایع برحسب طول ستون برای عدد رینولدز فیلم ۳۶۰۰



شکل ۵- نیمرخ سرعت در فیلم مایع برای عدد رینولدز فیلم، ۶۰۰۰، در طولهای ۰/۲، ۰/۳ و ۱/۵ متر



شکل ۹- تغییرهای ضخامت فیلم مایع بر حسب طول ستون برای عددهای رینولدز فیلم ۳۶۰۰ و ۶۰۰۰



شکل ۶- نیمرخ غلظت در فیلم مایع برای عددهای رینولدز فیلم ۱۲۰۰، ۳۶۰۰ و ۶۰۰۰ در طول ۰/۲ متر

\bar{Sc}, Sc_i, Sc عدد اشمیت موجی، اغتشاش‌ها و مولکولی
 u سرعت مایع در امتداد محور لوله (m/sec)
 u^* سرعت برشی $\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_1}}$
 v سرعت مایع در امتداد عمود بر محور لوله
 y^+ فاصله بی بعد از دیواره $\rho_1 y u^* / \mu$

فهرست علائم یونانی

Γ دبی مایع در واحد محیط $\frac{\dot{m}_l}{\pi d}$
 δ ضخامت فیلم مایع (m)
 δ^+ ضخامت فیلم بی بعد $\frac{\rho_1 \delta u^*}{\mu_1}$
 $\tilde{\mu}_1, \mu_{1t}, \mu_1, \mu_{1,eff}$ ویسکوزیته موجی، اغتشاش‌ها، مولکولی و موثر
 v ویسکوزیته سینماتیک
 ρ چگالی
 τ تنش برشی
اندیس‌ها
 b بالک
 g گاز
 i فصل مشترک
 in ورودی
 l مایع
 out خروجی
 w دیوار

اغتشاش‌ها و موج‌ها به‌طور همزمان حل شده‌اند. از حل این معادله‌ها مقدارهای سرعت و غلظت در فیلم مایع برای مقاطع متفاوت ستون به‌دست آمده است. ضریب انتقال جرم با استفاده از محاسبه‌های انجام شده و نتیجه‌های تجربی ارایه شده توسط Chen و Yih مقایسه شده‌اند. نتیجه‌های این مقایسه رضایت بخش است.

فهرست علائم

C غلظت
 C_A غلظت گاز در مایع (Kmol/m^3)
 C_b غلظت بالک
 C_s غلظت تعادلی
 $\tilde{D}, D_t, D, D_{eff}$ ضریب نفوذ موجی، اغتشاش‌ها، مولکولی و موثر
 d قطر لوله
 f ضریب اصطکاک
 F_d دامنه موج‌های مضطرب
 F_r دامنه امواج چروکی
 f_s ضریب اصطکاک سطوح صاف
 g شتاب ثقل
 H ضریب هنری
 K_L ضریب انتقال جرم در مایع (m/sec)
 L طول ستون
 L_d دامنه موج‌های مضطرب
 L_r دامنه موج‌های چروکی
 P فشار
 P_A فشار نسبی
 Re عدد رینولدز
 Re_f عدد رینولدز در فیلم مایع $\frac{\rho_1 \Gamma}{\mu_1}$

تاریخ دریافت: ۸۲/۷/۲۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۲/۱۲/۲

مراجع

- [1] Min, J.K. and Choi, D. H., Analysis of the absorption process on a horizontal tube using Navier Stokes equation with surface tension effects, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **42**, 4567 (1999).
- [2] Taylor, R. and Krishna, R., "Multicomponent Mass Transfer", John Wiley and Sons, New York, (1993).
- [3] Chermisinoff, N. P., Editor, "Hand book of Heat and Mass Transfer", section 5, Gulf Publishing co, 2, (1986).

- [4] Wasden, F. K. and Dukler, A. E. , Insights into the hydrodynamics of free falling wavy films, *AIChE J.*, **33**, 187 (1989).
- [5] Suzuki, K., Hagiwara, Y. and Sato, T., Heat Transfer And Flow Characteristic Of Two-Phase Two-Component Annular Flow, *Int. J. Heat Mass Transfer* **26**, 597 (1983).
- [6] Hinze, J.O., "Turbulence", McGrawHill ,Newyork , (1975).
- [7] Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N., "Transport Phenomena", John Wiley and Sons, NewYork , (1960).
- [8] Derevich, I. V., Statistical modelling of mass transfer in turbulent two phase dispersed flows , *Int . J. Heat and Mass Transfer*, **43**, 3725 (2000).
- [9] Dao, E. K. and Balakotaiah, V., Experimental study of wave occlusion on falling film in vertical pipe , *AIChE J.*, **46**, 1300 (2000).
- [10] Launder, B. E., and Spalding, D. B., Mathematical model of turbulence , Academic press, London (1972).
- [11] Suzuki, K., Hagiwara, Y., and Izumi, H., A numerical study of forced convective film wise condensation in a vertical tube , *Bulletin JSME* , **33**, 134 (1990).
- [12] Mccready, M. J. and Chang, H. C., Fomation of large disturbances on sheared and falling liquid film , *Chem. Eng. Comm.*, **141**, 347 (1996).
- [13] Hagiwara, Y., Suzuki, K., Sato, T. and Chigusa, N., Simoltaneous measurment of wall shear Stress and liquid Film thickness in an annular-mist two-phase flow in vertical tube" *Proc .ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, **1**, 55 (1983).
- [14] Suzuki, K. and Hagiwara, Y., Interfacial instability and modeling if wave effect on heat transfer in annular two-phase flow, *CRC Press Cleavland* ,(1992).
- [15] Lamourelle, A. P., Sandall, O. C., Gas absorption into turbulent Liquid , *Chemical Eng. Sci.* **27**, 1035 (1972).
- [16] Spalding, D. B., GENMIX-A general computer Program for two dimensional parabolic phenomena, Mech Eng. Dep. HTS/75/17, Imperial College (1975).