

حل عددی جذب گاز با فیلم مایع*

(یادداشت پژوهشی)

سید محمود خردمند^(۱)اسماعیل اسماعیل زاده^(۲)

چکیده ستون‌های جذب گاز که با استفاده از فیلم مایع کار می‌کنند، امروزه دارای نقش مهمی در صنایع می‌باشند. در این مقاله مطالعه عددی برای حل معادلات انتقال مومنتم و جرم برای فیلم مایع از سیستم جریان فیلم مایع و گاز که در داخل لوله به شکل جریان حلقوی در حرکتند، صورت پذیرفته است. در این سیستم جریان فیلم مایع به صورت مغشوش و موجی می‌باشد. برای بررسی اغتشاشات فیلم مایع از مدل اصلاح شده Van Driest و همچنین جهت بررسی امواج در فیلم مایع از تأثیرات ضریب اصطکاک برای سطوح موجی که توسط Hanratty & Henstock ارائه شده، استفاده گردیده است. مقایسه نتایج به دست آمده از مطالعه عددی انجام شده با نتایج تجربی ارائه شده برای جذب گاز CO₂ در آب نیز صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی جذب گاز، فیلم مایع، مغشوش، موجی.

Numerical Study of Gas Absorption with Liquid Film

S.M.Kheradmand

E. Esmailzadeh

Abstract This paper describes a theoretical analysis of combined hydrodynamics and mass transfer, for process taking place in liquid film with absorption of gas for annular regim through a vertical pipe. Effects of liquid film turbulence and wavy were considered. To calculate the eddy viscosity we used modified Van Driest model. For wavy surface in annular flows we used Hanratty & Henstock model about the friction factor. The theoretical results were compared with the experimental data for mass transfer of carbon dioxide in water.

Key Words Gas Absorption , Liquid Film, Turbulence, Wavy.

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۴/۱/۱۵ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۵/۱۱/۱۴ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)

(۲) دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه تبریز

مقدمه

در صنایع، استفاده از فیلم‌های مایع بسیار گسترده است. در صنایع غذایی به منظور گاز دار کردن مایعات و تغلیظ مواد، در صنایع برودتی برای تولید سرما با روش جذبی، در صنایع شیمیایی برای تولید پاک کننده‌ها، در صنایع گاز به منظور شستشوی گازهای مضر، از جمله استفاده‌های مکانیزم جذب توسط فیلم مایع می‌باشد، که در این قسمت به توضیح اجمالی آنها اشاره می‌گردد. گازدار کردن مایعات از جمله شربت و آب و همچنین تغلیظ سیالات توسط تبخیر کننده های صنعتی در تولید قند و شیر خشک با استفاده از فیلم مایع امکان پذیر است [1]. یکی از بخش‌های حیاتی سیستم‌های برودتی که به روش جذبی کار می‌کنند، بخش جذب کننده می‌باشد. در این بخش نه تنها بررسی انتقال مومنت، حرارت و جرم دارای اهمیت است، بلکه بررسی جریان فیلم نیز در حل مسئله مهم می‌باشد. در یک نوع از جذب کننده‌ها محلول جاذب، بخارات مبرد را در فشار پایین و در هنگام سرازیر شدن از سطح لوله جذب می‌نماید [2]. عمل سولفوناسیون (Sulfonation) برای محلول دودسیل بنزن (Dodecyl benzene) نیز یکی از مهمترین واکنش‌هایی است که در صنایع پاک کننده‌ها مورد بهره برداری قرار می‌گیرد. گاز SO_3 به همراه N_2 در مجاورت فیلم مایع دودسیل بنزن که روی دیوارهای لوله ای در حرکت می‌باشد، قرار گرفته و جذب آن می‌گردد؛ در نتیجه این جذب ماده خروجی قابلیت پاک کنندگی پیدا می‌نماید [3]. گازهایی که از منابع نفتی و یا صنایع گاز و پتروشیمی حاصل می‌شوند عمدتاً دارای مقادیر متفاوتی از گازهای سولفید هیدروژن (H_2S) و دی‌اکسید کربن (CO_2) می‌باشند. این گازها را اصطلاحاً گازهای ترش می‌نامند. وجود CO_2 به مقدار زیاد و H_2S حتی به مقدار کم، باعث اشکالات فراوانی می‌گردد. مثلاً سولفید هیدروژن سبب خوردگی لوله‌ها

شده و در هنگام سوختن نیز گاز دی‌اکسید گوگرد تولید می‌نماید که سمی و خورنده است. بنابراین گازهای مضر باید از جریان گازها حذف گردند. یکی از راههای حذف گازهای ترش استفاده از واکنش‌های شیمیایی است. راه دیگر استفاده از روش‌های فیزیکی می‌باشد که در آن از تماس گاز و مایع استفاده می‌شود. 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 همراه با اغتشاشات باشد، باید اثر اغتشاشات نیز در معادلات اساسی وارد گردد. Liu و Yih [4] مدل اصلاح یافته Van Driest را که توسط Limberg (1973)، Seban و Faghri (1976) استفاده شده بود، با وارد نمودن اثر تنش فصل مشترک و یک ضریب خفگی (Damping Factor) 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 مسئله مشکلتر خواهد گردید و باید با مدل نمودن تأثیرات این امواج اثر آنها در معادلات در نظر گرفته شود [5]. در این قسمت از تصحیح ضریب اصطکاک برای سطوح موجی استفاده گردیده است. در این روش با تعریف f_i به عنوان ضریب اصطکاک در فصل مشترک مایع و گاز که به صورت موجی می‌باشد می‌توان تنش برشی در فصل مشترک را به دست آورد و بدین ترتیب تأثیر امواج را مطالعه نمود. این روش توسط Henstock و Hanratty [6] مورد بررسی تئوری و تجربی قرار گرفته و در این مقاله نیز از آن استفاده گردیده است.

فرضیات اصلی

حل عددی معادلات انتقال جرم و مومنت براساس فرضیات اصلی زیر صورت پذیرفته است.

حالت دائم مربوط به جریان لایه مرزی به شکل معادله (۱) نوشت [8,7].

$$\rho_l u_l \frac{\partial u_l}{\partial x} + \rho_l v_l \frac{\partial u_l}{\partial y} \quad (1)$$

$$= \rho_l g + \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + (\mu_{eff}) \frac{\partial^2 u_l}{\partial y^2} \right]$$

که در آن

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t + \tilde{\mu} \quad (2)$$

شرایط مرزی مسئله 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 می شود، ویسکوزیته مؤثر شامل ویسکوزیته مولکولی سیال، ویسکوزیته ناشی از اغتشاشات و همچنین ویسکوزیته ناشی از امواج موجود در فصل مشترک می باشد. ویسکوزیته مولکولی را می توان با توجه به درجه حرارت سیال در فیلم مایع از کتب مرجع استخراج نمود. ویسکوزیته اغتشاشات و امواج به روش های زیر مدل می شوند.

مدل ارائه شده توسط Liu و Yih برای محاسبه ویسکوزیته ناشی از اغتشاشات. توزیع ویسکوزیته ناشی از اغتشاشات برای مومتم به دو ناحیه تقسیم گردیده است.

(۱) ناحیه نزدیک دیوار که در آن $y/\delta \leq 0.6$ می باشد. در این ناحیه ویسکوزیته ناشی از اغتشاشات نسبت به ویسکوزیته مولکولی از معادله (۶) به دست می آید.

(۱) قطرات مایع به داخل گاز Entrainment وارد نمی شوند.

(۲) در مایع هیچگونه حباب گاز وجود ندارد.

(۳) مایع تبخیر نمی شود.

(۴) گاز میعان نمی کند.

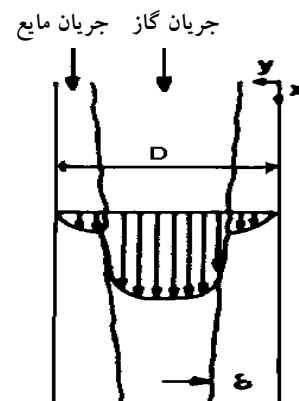
(۵) جریان در حال توسعه (Developing) می باشد.

(۶) واکنش شیمیایی بین گاز و مایع انجام نمی گیرد و فیلم مایع همدمای می باشد.

معادلات اساسی

مدل فیزیکی مورد استفاده، با توجه به شکل (۱)، لوله قائمی است که کناره دیواره های آن فیلم مایع و در وسط لوله جریان گاز به شکل همسو با مایع و رو به پایین در حرکت می باشند. مبدأ مختصات روی جداره لوله و محور y عمود بر لوله و محور x در جهت حرکت و در امتداد لوله است.

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



شکل ۱ مشخصات ستون با جریان حلقوی

معادله انتقال مومتم

برای جریان فیلم مایع که ضخامت آن کم است معادلات را می توان با توجه به شباهتشان به معادلات

حل عددی جذب گاز با فیلم مایع

می باشد، جهت یافتن تنش در فصل مشترک باید از رابطه جدیدی برای f_i استفاده نمود.

Hanratty و Henstock چنین سیستمی را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند و از طریق آزمایشات متعدد بر روی سیستم هوا - آب به روابط تجربی مختلفی برای جریان های افقی و عمودی همسو و غیرهمسو رسیدند [6]. رابطه ارائه شده توسط آنها برای جریان های عمودی همسو که با این بررسی مطابقت دارد به صورت زیر می باشد.

$$\frac{f_i}{f_s} = 1 + 1400F \left[1 - \exp\left(-\left|\frac{\tau_i}{\rho_1 g \delta}\right|\right) \right] \quad (12)$$

که در این رابطه F از معادله (۱۳) به دست می آید.

$$F = \frac{\gamma(Re_f)}{Re_g^{0.90}} \cdot \frac{v_l}{v_g} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \quad (13)$$

که $\gamma(Re_f)$ تابعی برحسب Re_f می باشد و از رابطه (۱۴) به دست می آید.

$$\gamma(Re_f) = \left[\left(0.707 Re_f^{\frac{1}{2}} \right)^{2.5} + \left(0.0379 Re_f^{0.90} \right)^{2.5} \right]^{0.40} \quad (14)$$

برای تخمین عبارت $\frac{\tau_i}{\rho_1 g \delta}$ که برای وارد نمودن اثر ثقل در این حالت خاص از جریان می باشد، رابطه (۱۵) توسط آنها ارائه شده است.

$$\frac{\tau_i}{\rho_1 g \delta} = \frac{1}{G} \frac{(1 + 1400F)^2}{13.2F} \quad (15)$$

که در این رابطه G عبارت است از:

$$G = \frac{\rho_l g d}{\rho_g u_g^2 f_s} \quad (16)$$

$$\frac{\mu_t}{\mu} = -0.5 + 0.5 \left\{ 1 + 0.6y^{+2} \left(\frac{\tau}{\tau_w} \right) \left[1 - \exp\left(\frac{-y^+ \left(\frac{\tau}{\tau_w} \right)^{\frac{1}{2}}}{A^+} \right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

که در آن

$$f = \exp\left(-1.66 \frac{\tau}{\tau_w}\right) \quad (7)$$

$$\frac{\tau}{\tau_w} = 1 - S^3 \frac{y^+}{\delta^+} \quad (8)$$

$$S^3 = \frac{\rho g \delta}{\tau_i + \rho g \delta} \quad (9)$$

تفاوت معادله Yih و Liu با مدل مورد استفاده Limberg در آن است که ترم های تنش برشی برای وارد نمودن اثر تنش فصل مشترک بهبود یافته است [9].
(۲) ناحیه دور از دیوار است که در آن $y/\delta > 0.6$ می باشد.
در این ناحیه ویسکوزیته ناشی از اغتشاشات برابر با مقدار آن در $y/\delta = 0.6$ منظور می گردد.

مدل ارائه شده توسط Henstock و Hanratty برای محاسبه ویسکوزیته ناشی از امواج. رابطه عمومی برای تنش در فصل مشترک فیلم مایع و گاز را می توان به شکل معادله (۱۰) نوشت.

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_g u_g^2 \quad (10)$$

مقدار f_i برای سطوح صاف از رابطه (۱۱) به دست می آید.

$$f_s = 0.046 Re_g^{-0.20} \quad (11)$$

برای سیستم موردنظر که سطح فیلم مایع موج

برای شرط مرزی غلظت گاز در فصل مشترک از تعادل دو فاز و قانون هنری می‌توان نوشت [10].

$$y = \delta \quad C_s = \frac{P_A}{H} \quad (22)$$

در بررسی انجام شده با توجه به خالص در نظر گرفتن گاز دی اکسید کربن، مقدار فشار نسبی آن می‌توان برابر با فشار گاز در نظر گرفت. مقدار ضریب هنری در این حالت برابر با ۲۹۴ $\frac{\text{atm.m}^3}{\text{Kgmol}}$ می‌باشد.

$$x=0 \quad C_A = C_{in} = 0 \quad (23)$$

همانگونه که در معادله (۲۰) مشاهده می‌شود ضریب نفوذ مؤثر شامل ضریب نفوذ مولکولی گاز در مایع و ضریب نفوذ ناشی از اغتشاشات و همچنین ضریب نفوذ ناشی از امواج موجود در فصل مشترک می‌باشد.

ضریب نفوذ مولکولی را می‌توان با توجه به درجه حرارت از کتب مرجع استخراج نمود. ضریب نفوذ اغتشاشات و امواج به روش‌های زیر مدل می‌شوند.

مدل ارائه شده *Liu* و *Yih* برای محاسبه ضریب نفوذ ناشی از اغتشاشات. عدد اشمیت مغشوش $(\frac{\mu_i}{\rho D_t} = Sc_t)$ از مدل اصلاح شده Van Driest توسط *Liu* و *Yih* به دست می‌آید. در این مدل *Sc_t* به شکل معادله (۲۴) می‌باشد.

$$Sc_t = \frac{\left\{ 1 - \exp \left[-y^+ \left(\frac{\tau}{\tau_w} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{A^+} \right] \right\}}{\left\{ 1 - \exp \left[-y^+ \left(\frac{\tau}{\tau_w} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{B^+} \right] \right\}} \quad (24)$$

که در آن $A^+ = 25.1$ و B^+ از معادله (۲۵) قابل حصول است

و نهایتاً رابطه موردنظر پیشنهادی به شکل رابطه (۱۷) در می‌آید.

$$\frac{f_i}{f_s} = 1 + 1400F \left[1 - \exp \left(- \left| \frac{1}{G} \frac{(1+1400F)^{\frac{3}{2}}}{13.2F} \right| \right) \right] \quad (17)$$

بدین ترتیب با تعیین f_i مقدار تنش در فصل مشترک، τ_i ، به دست می‌آید و با نوشتن رابطه:

$$\tilde{\tau}_i = \tilde{\mu} \frac{\partial u}{\partial y} \quad (18)$$

می‌توان $\tilde{\mu}$ را برای فیلم‌های مواج به دست آورد. با معلوم شدن μ_t ، $\tilde{\mu}$ می‌توان معادله انتقال مومتم را حل نمود و پروفیل سرعت را برای فاصله دیواره لوله تا فصل مشترک به دست آورد.

معادله انتقال جرم

براساس مفروضات قسمت هیدرودینامیک جریان و با فرض آنکه در جهت حرکت مایع می‌توان از نفوذ مولکولی در مقابل نفوذ جابه‌جایی چشم پوشی نمود. رابطه موازنه جرم گاز نفوذی در فیلم مایع به شکل معادله (۱۹) نوشته می‌شود [7].

$$u_1 \frac{\partial C_A}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} (D_{eff}) \frac{\partial C_A}{\partial y} \quad (19)$$

که در آن

$$D_{eff} = D + D_t + \tilde{D} \quad (20)$$

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

$$y = 0 \quad \frac{\partial C_A}{\partial y} = 0 \quad (21)$$

ضریب انتقال جرم

برای محاسبه ضریب انتقال جرم برای فیلم مایع می توان حول کل فیلم مایع موازنه مولی جزء گاز نفوذی را نوشت و پس از ساده نمودن به معادله (۲۹) رسید.

$$K_L = \left(\frac{\Gamma}{\rho_l L} \right) \left[\frac{\left(\frac{d}{2} \right)}{\left(\left(\frac{d}{2} \right) - \delta \right)} \right] \ln \left(\frac{C_{iin} - C_{bin}}{C_{iout} - C_{bout}} \right) \quad (29)$$

که در آن

$$C_b = \frac{\int_0^\delta Cudy}{\int_0^\delta udy} \quad (30)$$

حل عددی معادلات حاکم

شکل معادلات دیفرانسیلی حاکم بر مسئله در این بررسی از نوع معادلات با تقارن محوری بوده و در حالت کلی در مختصات $x - \omega$ پاتانکار [12] به شکل معادله (۳۱) می باشد.

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} + (a + b\omega) \frac{\partial \phi}{\partial \omega} = \frac{\partial}{\partial \omega} \left[c_\phi \frac{\partial \phi}{\partial \omega} \right] + d \quad (31)$$

که در آن x و ω دو متغیر مستقل، a و b توابع اختیاری از x ، c و d توابع اختیاری از هر متغیر وابسته و ϕ نماینده متغیر وابسته است که معادله مربوط به آن می باشد، مانند سرعت در معادله مومتم، انرژی جنبشی ناشی از اغتشاشات در معادله انرژی جنبشی اغتشاشات و استهلاك انرژی جنبشی ناشی از اغتشاشات در معادله استهلاك انرژی جنبشی.

متغیر ω به شکل زیر تعریف گردیده است:

$$\omega = \frac{\psi - \psi_I}{\psi_E - \psi_I} \quad (32)$$

$$B^+ = Sc^{-\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^{i=5} C_i (\log Sc)^{i-1} \quad (25)$$

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

بدین ترتیب با محاسبه Sc_t می توان مقدار D_t را محاسبه نموده و از آن در معادله انتقال جرم استفاده نمود.

مدل ارائه شده برای محاسبه ضریب نفوذ ناشی از امواج. در این قسمت از مدل ارائه شده برای محاسبه ویسکوزیته ناشی از امواج استفاده می شود. با توجه به قسمت های قبلی برای محاسبه ویسکوزیته ناشی از امواج می توان نوشت:

$$\rho_1 \tilde{D} = \frac{\tilde{\mu}}{Sc} \quad (26)$$

با فرض $\tilde{Sc} = Sc_t$ [11] می توان \tilde{D} را به دست آورد.

$$\tilde{D} = D_t \left(\frac{\tilde{\mu}}{\mu_t} \right) \quad (27)$$

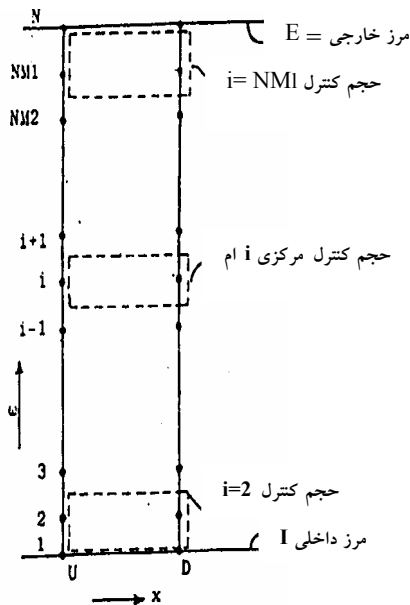
با معلوم شدن \tilde{D} ، D_t می توان معادله انتقال جرم را با توجه به حل معادله انتقال مومتم حل نمود و پروفیل غلظت را برای فاصله دیواره لوله تا فصل مشترک به دست آورد.

معادله پیوستگی

برای جریان فیلم مایع با توجه به محور های مختصات در نظر گرفته شده معادله پیوستگی را می توان به صورت زیر نوشت:

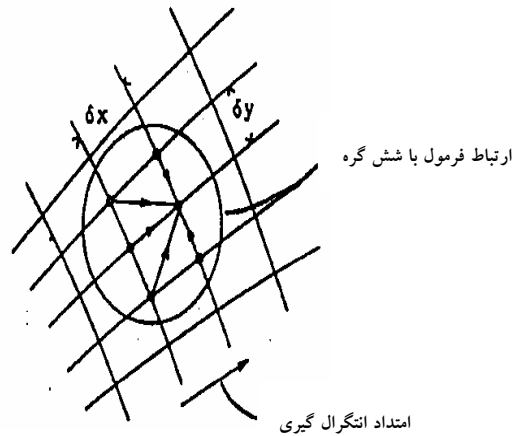
$$\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0 \quad (28)$$

معادله پیوستگی نیز باید به همراه معادلات انتقال مومتم و جرم به طور همزمان حل گردد.



شکل ۳ حجم‌های کنترل مورد استفاده برای به دست آوردن معادلات تفاضل محدود [12]

که در آن ψ تابع جریان بوده و اندیس‌های I و E نماینده مرزهای داخلی و خارجی می‌باشند. در محاسبات انجام شده از روش حجم کنترل استفاده گردیده و محاسبات بر مبنای انتگرال گیری از معادلات حاکم بر جریان در یک حجم کنترل جا به جا شده که شش نقطه شبکه بندی را به هم مرتبط می‌سازد، استفاده شده است، (شکل ۲).



شکل ۲ نقاط شبکه در دستگاه مختصات پاتانکار [12]

با حل انتگرال و مساوی قرار دادن نتیجه آن با معادله خطی (۳۴) ضرائب معادله خطی (A,B,C,D) بدست آمده و ماتریس سه قطری را تشکیل می‌دهند که با روش حذفی گوس قابل حل می‌باشد.

$$D_i \phi_{i,D} = A_i \phi_{i+1,D} + B_i \phi_{i-1,D} + C_i \quad (34)$$

استقلال نتایج از شبکه

برای نشان دادن عدم وابستگی حل به شبکه در نظر گرفته شده، نیمرخ سرعت در عدد رینولدز فیلم ۶۰۰۰ در طول های ۰/۲، ۱ و ۱/۴ متر برای دو شبکه تولیدی که یکی از آنها فیلم مایع رابه ۱۲ گره و جریان گاز را به ۳۶ گره (N12NG36) و در دیگری فیلم مایع به ۲۰ گره و جریان گاز به ۴۰ گره (N20NG40) تقسیم شده و نتایج محاسبات در شکل (۴) ارائه گردیده است. با

به خاطر سهموی بودن معادلات حاکم روند محاسبات انتگرال گیری به طریقه پیشرو خواهد بود. در این معادلات موقعیت‌های پایین دست بر بالادست جریان اثری نداشته و بنا بر این بعد از هر مرحله انتگرال گیری مقادیر نهایی بدست می‌آید.

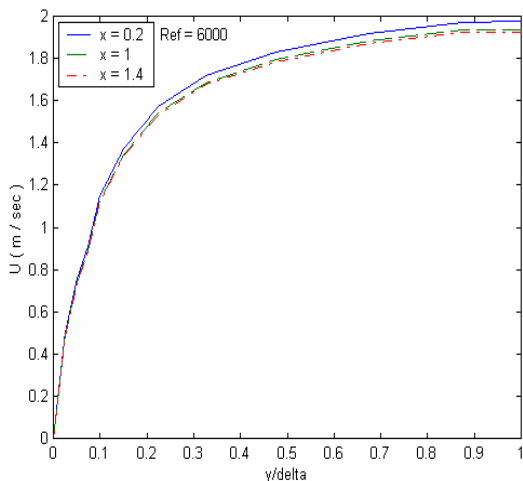
مطابق روش‌های معمول در حجم کنترل از معادله (۳۱) روی حجم کنترل شکل (۳) به صورت زیر انتگرال گیری می‌گردد.

$$\int_x^{x+\Delta x} \int_{i-1/2}^{i+1/2}$$

$$\left[\frac{\partial \phi}{\partial x} + (a + b\omega) \frac{\partial \phi}{\partial \omega} - \frac{\partial}{\partial \omega} \left(c_\phi \frac{\partial \phi}{\partial \omega} \right) - d \right] d\omega dx = 0 \quad (33)$$

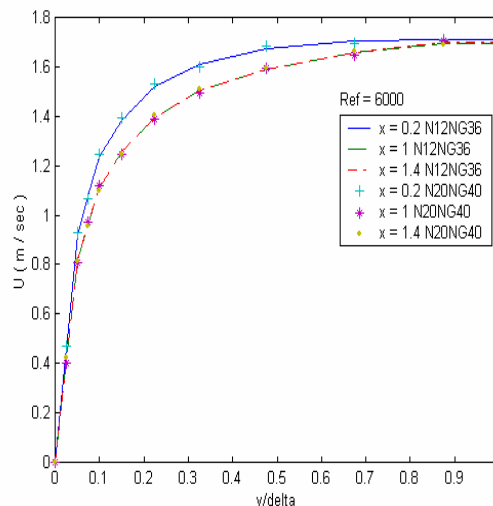
حل عددی جذب گاز با فیلم مایع

با حل معادلات می توان پروفیل سرعت و غلظت و ضریب انتقال جرم را به دست آورد.

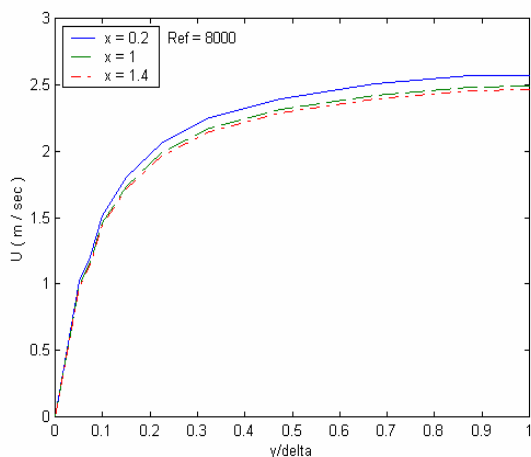


شکل ۵ نیمرخ سرعت در فیلم مایع برای عدد رینولدز ۶۰۰۰ در طولهای ۰٫۲، ۱ و ۱٫۴ متر

توجه به ماکزیمم درصد اختلاف نتایج این دو شبکه که مقدار آن کمتر از ۱/۲٪ می باشد می توان اظهار داشت که نتایج به دست آمده مستقل از شبکه می باشد.



شکل ۴ نیمرخ سرعت در فیلم مایع برای عدد رینولدز ۶۰۰۰ در طولهای ۰٫۲، ۱ و ۱٫۴ متر در دو شبکه (N20NG40) و (N12NG36)



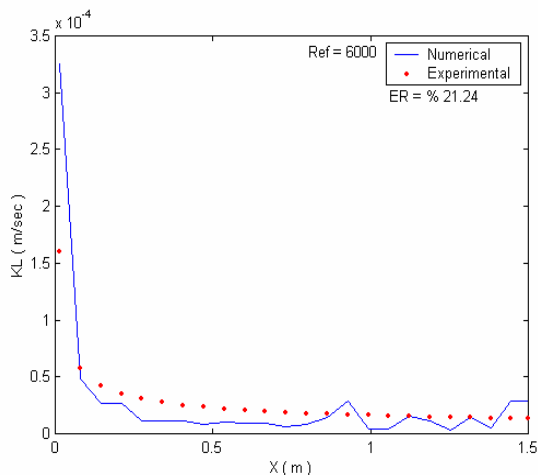
شکل ۶ نیمرخ سرعت در فیلم مایع برای عدد رینولدز ۸۰۰۰ در طولهای ۰٫۲، ۱ و ۱٫۴ متر

در شکل های (۶ و ۵) نیمرخ های سرعت برای اعداد رینولدز ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ رسم گردیده اند. مشاهده می گردد که در کنار دیوار سرعت به شکل خطی افزایش یافته و با دور شدن از آن به تدریج رشد کرده

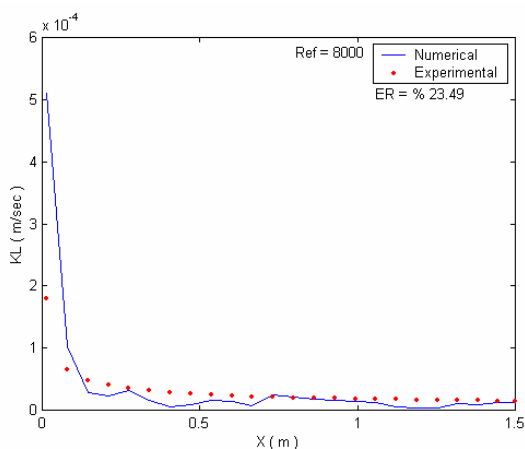
نتایج و جمع بندی

حل معادلات انتقال مومنتم و جرم به همراه شرایط مرزی داده شده با روش اختلاف محدود منجر به ماتریس ضرایب سه قطری می گردد که با روش حذفی گوس حل گردیده است. طول ستون یک و نیم متر و قطر لوله آن سه سانتی متر منظور شده است. برای ضخامت فیلم ۱۲ نقطه جهت محاسبه در نظر گرفته شده و قدم به قدم حل معادلات انتقال مومنتم و جرم به همراه معادله پیوستگی صورت پذیرفته است (برای محاسبات از کد GENMIX استفاده شده است [13]). دمای گاز و آب ورودی (۳۰۰ K) و محاسبات در عدد رینولدز گاز ۲۳۰۰۰ و اعداد رینولدز فیلم ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ انجام شده است. از مشخصات فیزیکی آب برای فیلم مایع و از مشخصات فیزیکی دی اکسید کربن برای گاز استفاده گردیده است.

گردیده است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش طول، میزان غلظت تغییر قابل توجهی نداشته و به سرعت توسعه یافته است. حضور ویسکوزیته مؤثر و ضریب نفوذ مؤثر این تغییرات را قابل توجه مینماید.



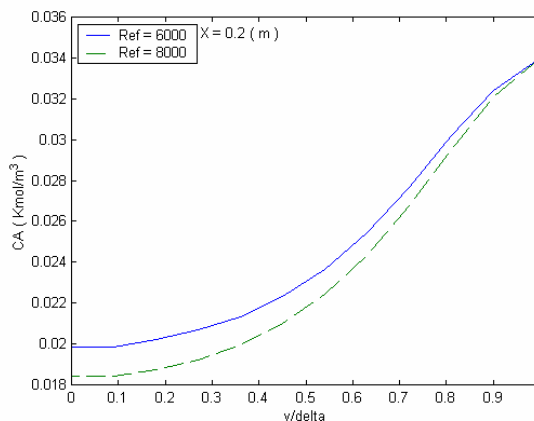
شکل ۹ ضریب انتقال جرم در فیلم مایع برحسب طول ستون برای عدد رینولدز ۶۰۰۰



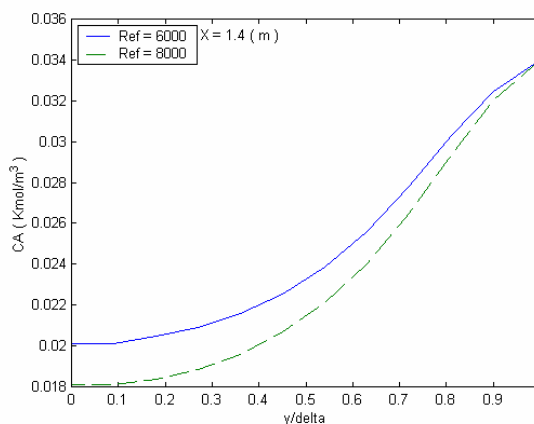
شکل ۱۰ ضریب انتقال جرم در فیلم مایع برحسب طول ستون برای عدد رینولدز ۸۰۰۰

در شکل‌های (۹ و ۱۰) ضریب انتقال جرم برای اعداد رینولدز ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ و باروش محاسباتی و نتایج تجربی ارائه شده توسط Yih & Chen [4] رسم گردیده اند. با محاسبه خطا از رابطه:

و در فصل مشترک به مقدار بیشینه خود می‌رسد. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، مقدار سرعت افزایش یافته و در انتهای ستون این مقادیر به هم نزدیک شده و توسعه یافته می‌گردد.



شکل ۷ نیمرخ غلظت در فیلم مایع برای اعداد رینولدز ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ در طول ۰/۲ متر



شکل ۸ نیمرخ غلظت در فیلم مایع برای اعداد رینولدز ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ در طول ۱/۴ متر

در شکل‌های (۷ و ۸) نیمرخ غلظت برای اعداد رینولدز ۶۰۰۰ و ۸۰۰۰ رسم گردیده‌اند. مشاهده می‌گردد که با افزایش عدد رینولدز، میزان غلظت در فیلم مایع کاهش یافته است؛ چرا که فرصت نفوذ کمتر

حل عددی جذب گاز با فیلم مایع

ضریب اصطکاک سطوح صاف

شتاب ثقل

ضریب هنری

ضریب انتقال جرم در مایع

طول ستون

فشار

فشار نسبی

عدد رینولدز

عدد رینولدز در فیلم مایع $\frac{4\Gamma}{\mu}$

عدد اشمیت مولکولی

عدد اشمیت اغتشاشات

عدد اشمیت امواج $(\frac{\tilde{\mu}}{\rho D})$

سرعت مایع در امتداد محور لوله

سرعت برشی $\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_l}}$

سرعت مایع در امتداد عمود بر محور لوله

فاصله بی بعد از دیواره $\frac{\rho y u^*}{\mu}$

دبی مایع در واحد محیط $\frac{\dot{m}_l}{\pi d}$

ضخامت فیلم مایع

ضخامت فیلم بی بعد $\frac{\rho_l \delta u^*}{\mu_l}$

ویسکوزیته مولکولی

ویسکوزیته اغتشاشات

ویسکوزیته امواج

ویسکوزیته مؤثر

ویسکوزیته سینماتیک

دانسیته

تنش برشی

fs

g

H

KL

L

P

P_A

Re

Re_{ef}

Sc

Sc_t

\tilde{S}_C

u

u*

v

y⁺

Γ

δ

δ⁺

μ

μ_t

$\tilde{\mu}$

μ_{eff}

v

ρ

τ

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

اندیس E نشان دهنده نتیجه تجربی و اندیس N نشان دهنده کار محاسباتی می باشد. در این حالت متوسط خطا برای عدد رینولدز ۶۰۰۰، ۲۱/۲۴٪ و برای عدد رینولدز ۸۰۰۰، ۲۳/۴۹٪ محاسبه گردیده است.

نتیجه گیری

در این پژوهش برای بررسی پدیده جذب گاز دی اکسید کربن در آب از جریان حلقوی در داخل لوله قائم استفاده گردیده است. معادلات انتقال مومتم، جرم و پیوستگی با در نظر گرفتن اثرات اغتشاشات و امواج به طور همزمان حل شده و از حل آنها مقادیر سرعت و غلظت در فیلم مایع برای مقاطع مختلف ستون به دست آورده شده است. ضریب انتقال جرم با استفاده از محاسبات انجام شده به دست آمده و با نتایج تجربی ارائه شده توسط [4] Yih & Chen مقایسه گردیده است. با توجه به این نکته که خطاهای محاسباتی در مسائل انتقال جرم نسبتاً زیاد گزارش شده است [4]، نتایج این محاسبه رضایت بخش می باشد.

فهرست نشانه‌ها

C	غلظت
C _A	غلظت گاز در مایع
C _b	غلظت بالک
D	ضریب نفوذ مولکولی
D _t	ضریب نفوذ اغتشاشات
\tilde{D}	ضریب نفوذ امواج
D _{eff}	ضریب نفوذ مؤثر
d	قطر لوله
f	ضریب اصطکاک

مايع	l	انديس ها	
خروجی	out	بالک	b
اشباع	s	گاز	g
دیوار	w	فصل مشترک	i
		ورودی	in

مراجع

1. Chung, G. C., "Hand book of sugar refining", John Wiley and Sons, New York , (2000) .
2. Min, J.K., 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, Vol. 42, pp. 4567 – 4578, (1999).
3. Taylor, R., Krishna, R., "Multicomponent Mass Transfer", John Wiley and Sons, New York, (1993).
4. Chermisinoff, N. P., "Editor, Hand book of Heat and Mass Transfer", Vol. 2, Gulf Publishing Co., (1986) .
5. Wasden, F. K., Dukler, A. E., "Insights into the hydrodynamics of free falling wavy films", AIChE J. ,Vol 33, pp. 187-195 (1989)
6. Henstock, W. H., Hanratty, T. J., "The Interfacial Drag and the Height of the wall layer in Annular flows", AIChE J., Vol 22, pp.990-999, (1976) .
7. Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N., "Transport Phenomena", John Wiley and Sons, NewYork, (1960).
8. Daniel, O. A., "On kaplan limits and the generalized boundary layer theory", Int. J. Eng. Sci., Vol 40, pp.1879- 1893, (2002).
9. Derevich, I. V., "Statistical modelling of mass transfer in turbulent two phase dispersed flows", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 43, pp 3725 - 3734, (2000) .
10. Lamourelle, A. P., Sandall O. C., "Gas absorption into turbulent Liquid", Chemical Eng. Sci., Vol. 27, pp.1035-1043, (1972).
11. Suzuki, K., Hagiwara, Y., "Interfacial instability and modeling of wave effect on heat transfer in annular two-phase flow", CRC Press Cleavland, (1992).
12. Patankar, S. V., "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere Publishing Corporation, New York, (1980).
13. Spalding, D. B., "GENMIX-A general computer Program for two dimensional parabolic phenomena", Mech Eng. Dep. HTS/75/17, Imperial College, (1975).