



مدلسازی رسوب تشکیل شده در مبدل حرارتی واحد تغلیظ گلایکول یکی از کارخانه‌های گاز و گاز مایع کشور

مرضیه بسطامی، مسعود بهرامی*

دانشکده مهندسی نفت اهواز، دانشگاه صنعت نفت

چکیده

رسوب تشکیل شده در لوله‌های مبدل حرارتی واحد تغلیظ گلایکول در یکی از کارخانه‌های گاز و گاز مایع بوسیله مدلی که شامل دو بخش می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته‌است. بخش اول بر مبنای معادله موازنه جمعیت و برای بدست آوردن توزیع اندازه ذرات در هر نقطه از طول مبدل و بخش دوم برای محاسبه میزان انتقال ذرات به سمت دیواره به کار می‌رود. برای بررسی نحوه انتقال ذرات به سمت دیواره 4 عامل بویانسی، توربولنسی، توربوفورتیک و نیروی وزن در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نیروی وزن نقش اصلی در انتقال ذرات به سمت دیواره را بر عهده دارد. مدل ارائه شده زمان پرشدن لوله‌های مبدل را با دقت قابل قبولی تخمین می‌زند.

کلمات کلیدی

موازنه جمعیت، توزیع اندازه ذرات، بویانسی، توربولنسی، توربوفورتیک، نیروی وزن

نکات برجسته پژوهش

- مدل ارائه شده قادر است زمان پرشدن لوله‌های مبدل حرارتی را با دقت قابل قبولی تخمین بزند.

1- مقدمه

مبدل‌های حرارتی نقش عمده‌ای در صنایع بر عهده دارند و اهمیت آنها به توجه به رشد صنایع، روز به روز در حال افزایش است. در صنایع نفت و گاز، وسایل انتقال حرارت بطور گسترده و با اهداف مختلفی بکار برده میشوند. در کارخانه‌های گاز و گاز مایع، تبادل حرارتی بین گلایکول غنی¹ ورودی به قسمت تغلیظ و گلایکول احیاء شده خروجی از این قسمت که

* m.bahrami@put.ac.ir

¹Rich Glycol



برای تزریق به جریان گاز بکار خواهد رفت، درون دو مبدل حرارتی از نوع پوسته و لوله رخ می دهد. تمیزی لوله ها و پوسته این دو مبدل یک مسئله مهم می باشد: زیرا تجمع ذرات ناخواسته در لوله های مبدل باعث بروز مشکلات عملیاتی از قبیل افزایش افت فشار، گرفتگی تیوب ها و در بدترین حالت باعث خاموشی های ناخواسته واحد و به تبع آن تواتر تعمیرات اساسی را به دنبال خواهد داشت.

در این مقاله رسوب تشکیل شده در لوله های مبدل حرارتی واحد تغلیظ گلایکول یک کارخانه گاز و گاز مایع بر اساس معادله موازنه جمعیت¹ مورد مطالعه و مدلسازی قرار گرفته است.

معادله موازنه جمعیت یک معادله مشتق جزئی-انتگرالی غیرخطی می باشد. این معادله تعداد واحدهای منفصل درون یک سیستم پیوسته را که می توانند ذرات جامد، حباب یا قطره باشند را با در نظر گرفتن تغییراتی که ممکن است در نتیجه فرایندهای مختلف از قبیل تجمع²، شکست³، هسته زایی⁴ و رشد⁵ برای آنها رخ دهد، ردیابی میکند. [1]

معادله موازنه جمعیت بر اساس دانسیته یک متغیر غیر شدتی مناسب که معمولاً تعداد ذرات است نوشته میشود. این معادله در واقع نحوه توزیع اندازه ذرات را در هر زمان در طول فرایند ردیابی کرده و به کمک آن رفتار کلی سیستم که عموماً متأثر از توزیع اندازه ذرات می باشد، شرح داده می شود. [2]

این معادله معمولاً در فضای فازی ذره تعریف می شود. این فضا شامل دو مختص داخلی⁶ و خارجی⁷ می باشد. آن دسته از خواص را که وابسته به موقعیت مکانی ذره می باشند را مختص خارجی و خواص وابسته به حالت درونی ذره می باشند مانند اندازه ذره را مختص درونی می نامند.

فرم کلی معادله موازنه جمعیت به صورت زیر تعریف میشود:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(v_x n) + \frac{\partial}{\partial y}(v_y n) + \frac{\partial}{\partial z}(v_z n) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial}{(\partial x_i)_j} [(v_i)_j n] - B + D = 0 \quad (1)$$

در این رابطه n ، دانسیته تعداد بوده و به صورت

$$n = \frac{dN}{dL} \quad (2)$$

تعریف میشود که در آن dN تعداد ذراتی است که در فاصله L تا $L+dL$ قرار دارند و v_x, v_y, v_z سرعت مختص خارجی و v_i سرعت مختص داخلی می باشد. در معادله 1، B و D به ترتیب نرخ تولد و مرگ ذره می باشد. [3]

برای حل معادله موازنه جمعیت، روش های مختلفی از جمله روش مجزاسازی⁸، روش ممان ها⁹ و روش مونت کارلو وجود دارد. در کار حاضر، معادله مذکور با استفاده از روش مجزاسازی حل شده است. در این روش دامنه اندازه ذرات به تعداد محدود و مشخصی از بازه تقسیم می شود. این تقسیم بندی می تواند به صورت هندسی، یکنواخت و یا شکل های دیگر باشد. در نتیجه این تقسیم بندی معادله موازنه جمعیت به یکسری معادلات دیفرانسیلی تبدیل شده که با حل همزمان این معادلات، توزیع اندازه ذرات به دست می آید.

2- مدل ارائه شده

مدل ارائه شده دارای دو بخش می باشد که در بخش اول با استفاده از مکانیزم پیشنهادی هانسلو و همکارانش در سال 1988 (معادله 1) توزیع اندازه ذرات بدست می آید و در بخش دوم با استفاده از اطلاعات خروجی از بخش اول، انتقال ذرات به سمت دیواره و در نتیجه زمان پرشدن خط لوله محاسبه می شود.

¹ Population Balance

² Aggregation

³ Breakage

⁴ Nucleation

⁶ Internal Coordinate

⁷ External Coordinate

⁸ Discretization

⁹ Moment Method

1-2 بخش اول

در این بخش توزیع اندازه ذرات با استفاده از مدلی که هانسلو و همکارانش در سال 1988 ارائه کردند بدست آمده است. هانسلو و همکارانش با در نظر گرفتن تقسیم بندی هندسی، طول هر بازه را 2 برابر بازه قبلی در نظر گرفتند:

$$\frac{v_{i+1}}{v_i} = 2 \quad (3)$$

آنان هم چنین با در نظر گرفتن 4 مکانیزم برای برخورد دوگانه ذرات، معادله موازنه جمعیت گسسته را به صورت معادله 4 را بدست آورد.

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{j=1}^{i-2} 2^{j-i+1} \times \beta_{i-1,j} N_{i-1} N_j + \frac{1}{2} \beta_{i-1,i-1} N_{i-1}^2 - N_i \sum_{j=1}^{i-1} 2^{j-i} \times \beta_{i,j} N_j - N_i \sum_{j=i}^{\infty} \beta_{i,j} N_j \quad (4)$$

در این معادله $\beta_{i,j}$ کرنل اگلومراسیون می باشد. [4]

اسکین و همکارانش در سال 2011 کرنل اگلومراسیون را به صورت جمع دو کرنل بویانسی و توربولنسی در نظر گرفتند [5]:

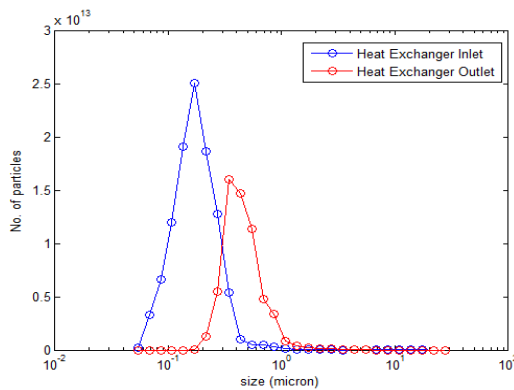
$$\beta_{i,j} = \beta_{i,j}^{Br} + \beta_{i,j}^{Turb} \quad (5)$$

$$\beta_{i,j}^{Br} = \frac{2}{3} \frac{k_B T_f}{\mu_f} \frac{(d_i + d_j)^2}{d_i d_j} \quad (6)$$

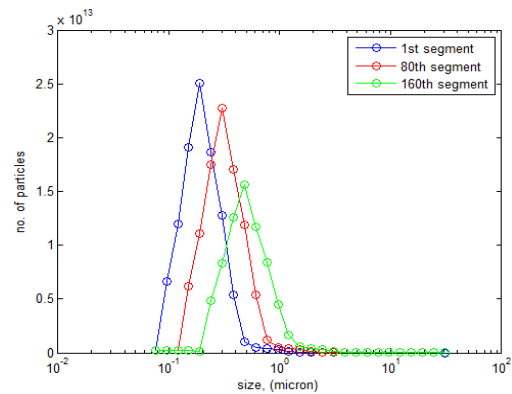
$$\beta_{i,j}^{Turb} = 1.3 G_k (d_i + d_j)^3 \quad (7)$$

که در روابط بالا k_B ثابت بولتزمن و G_k نرخ تنش برشی کولموگروف می باشد.

بر اساس روابط بالا و در نظر گرفتن ذرات منتقل شده به سطح داخلی لوله (بخش دوم) و نیز با تقسیم طول لوله 3/4 اینچی مبدل به 160 قسمت به طول 1 فوت، توزیع اندازه ذرات در طول مبدل مطابق با شکل 1 بدست آمد. همانگونه که در شکل نشان 1(a) داده است در طول مبدل قله نمودار پایین آمده و به سمت ذرات بزرگتر جابه جا شده است نتایج مدل ارائه شده مطابق شکل 1(b) این مشاهده را تصدیق میکند.



(b)



(a)

شکل 1: توزیع اندازه ذرات در طول مبدل: (a) تجربی (b) مدل

2-2 بخش دوم

در سال 2011، Eskin و همکارانش عوامل بویانسی، توربولنسی و توربوفورتیک را به عنوان مکانیزم های انتقال ذره به سمت دیواره مطرح و بر اساس این عوامل فلاکس جرمی ذرات به سمت دیواره را محاسبه نمودند. بر اساس کار اسکین و همکارانش فلاکس جرمی ذرات به واسطه بویانسی به صورت زیر تعریف میشود. در این رابطه γ ضریب چسبندگی ذرات با دیواره و مقدار آن $10^{-5} * 2/2$ می باشد. [5]



$$q_{bi} = \gamma m(d_i) \frac{N_i}{2} \left(\frac{2k_B T_f}{\pi m(d_i)} \right)^{1/2} \quad (8)$$

همچنین فلاکس جرمی بواسطه توربولنسی به صورت

$$q_{ti} = \gamma m(d_i) \frac{N_i}{2} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{0.005 y^{+2}}{1 + 0.002923 y^{+2.128}} \right) \quad (9)$$

بوده که در آن y^+ فاصله نرمال از دیواره می باشد.

اسکین همچنین مکانیزم توربوفورتیک را به عنوان دیگر عامل موثر در انتقال ذرات به سمت دیواره لوله مطرح کرد و با

بیان مفهوم سرعت توربوفورتیک (v_{dtbi}) فلاکس جرمی بواسطه این عامل را به صورت معادله 10 بیان نمود:

$$q_{tbi} = \gamma_i m(d_i) N_i v_{dtbi} \quad (10)$$

$$v_{dtbi} = -\tau_i \frac{d v_i y^2 (d_i/2)}{d y} \quad (11)$$

$$\overline{V_y'^2} = u_*^2 \left(\frac{0.005 y^{+2}}{1 + 0.002923 y^{+2.128}} \right)^2 \quad (12)$$

در سال 2013 میرزایی و همکارانش نقش نیروهای مختلف در انتقال ذرات به سمت دیواره را بررسی کردند. بر اساس

کار آنها و تعریف سرعت ته نشینی به صورت زیر

$$U_p(i) = \frac{8 \times C_c \times (F_g(i) - F_{buoy}(i))}{(\pi \times d_p^2 \times \rho_f \times C_D)^{0.5}} \quad (13)$$

نیروی وزن و بویانسی به عنوان عوامل موثر دیگر در انتقال ذرات به سمت دیواره در نظر گرفته شده اند. در رابطه بالا

F_g نیروی ناشی از وزن ذرات

$$F_g = \rho_p g V_p \quad (14)$$

و F_{buoy} نیروی بویانسی:

$$F_b = \rho_f g V_p \quad (15)$$

و C_c ضریب اصلاح کانینگهام می باشد. [6]

جزیی از حجم قسمت آخر که توسط ذرات اشغال میشود مبنای مقایسه نقش هر یک از این عوامل در انتقال ذرات به

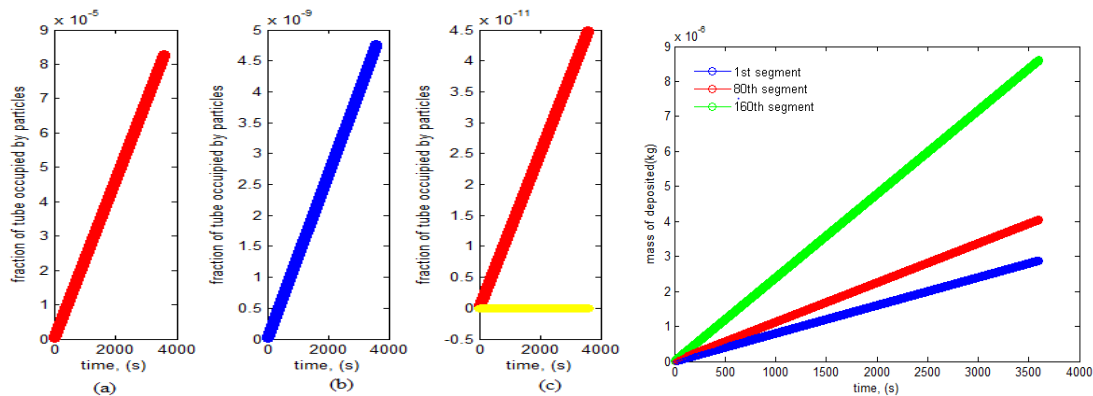
سمت دیواره قرار گرفته و نتیجه در شکل ۲ نشان داده شده است. بر این اساس نیروی وزن عامل اصلی انتقال ذرات به سمت

دیواره می باشد و مرتبه عددی انتقال ذرات به واسطه آن بترتیب 4، 6 و 9 برابر بیشتر از انتقال ذرات به واسطه بویانسی

توربولنسی و توربوفورتیک می باشد.

بر اساس عامل وزن، مقدار جرم رسوب بر جداره داخلی لوله مبدل پس از 1 ساعت مطابق شکل 3 خواهد بود.

محاسبات نشان می دهد که پس از 490 روز قسمت آخر پر خواهد شد.



شکل 3: جرم رسوب داده شده پس از 1 ساعت. شکل 2: عامل های انتقال ذرات به سمت دیواره (a) عامل نیروی وزن (b) بویانسی (c) عامل توربولنسی (قرمز) عامل توربو فور تیک (زرد)

3- نتیجه گیری

توزیع اندازه ذرات با استفاده از معادله موازنه جمعیت مجزا شده تطابق مناسبی با یافته تجربی دارد. از بین عوامل بویانسی، توربولنسی، توربو فور تیک و نیروی وزن، عامل اصلی انتقال ذرات به سمت دیواره نیروی وزن می باشد. بر این اساس قسمت آخر خط لوله پس از 490 روز پر خواهد شد.

سپاسگزاری

از شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب به خاطر در اختیار قرار دادن اطلاعات لازم نهایت تشکر و سپاس را داریم.

مراجع

- [1] Ramkrishna D. , Mahoney A.W., *population balance modelling, promise for future*, chemical Engineering science, vol. 57, 595-606,2002.
- [2] Hjorts M.A *population balances in biomedical engineering –segregation through the distribution of cell states*, McGraw Hill, 2006.
- [3] Randolph A. D, Larson M. A., *Theory of particulate processes analysis and techniques of continuous crystallization*, Academic Press, second edition, 1971.
- [4] Hounslow M.j., *A Discretized population balance for continuous system at steady state*, AIChE, Vol.36, No. 1, 1990.
- [5] Eskin D., Ratulowski j., Akbarzadeh K., Pan . s, *Modelling Asphaltene deposition in turbulent pipeline flows*, the Canadian journal of chemical engineering, Vol. 89, 3, 2011.
- [6] Mirzayi B., mousavi Dehghani S.A., Behrouz- Chakan M., 2013, modelling of Asphaltene deposition in pipelines, Journal of petroleum science & technology, 3(2), 15-23, 2013.