

مدلسازی ریاضی حذف دی اکسید کربن در یک شوینده ونتوری و مطالعه پارامتریک تاثیر تبخیر / میعان قطرات و سرمایش ناشی از تبخیر

امیر رحیمی^{۱*}، تورج توکلی^۱ و امین الله سعادت^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: جذب CO₂، شوینده ونتوری، غیرهمدم، سرمایش ناشی از تبخیر، مدلسازی ریاضی.</p>	<p>در این مطالعه تاثیر پدیده تبخیر یا رشد قطرات و سرمایش گاز ناشی از تبخیر، بر روی راندمان جذب CO₂ در یک شوینده ونتوری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد علی رغم زمان ماند اندک گاز در این نوع از شوینده ها، تاثیر پدیده انتقال حرارت بین گاز و مایع و همچنین تبخیر/رشد قطرات بر پیش بینی راندمان جداسازی گاز CO₂ قابل توجه است. این اثرات قابل توجه به مربوط به دو اثر همسو، شامل بالا بودن ضرایب انتقال جرم و حرارت ناشی از سرعت نسبی بالا بین قطرات و گاز و همچنین سطح تماس بالا ناشی از اتمایز شدن مایع تزریقی اتفاق می افتد. تاثیر پارامترهای عملیاتی بر راندمان جذب در حالت عملکرد غیرهمدم بررسی گردید. نتایج نشان می دهد پایین بودن دمای گاز ورودی به شوینده ونتوری و بالا بودن رطوبت آن می تواند در افزایش راندمان جذب CO₂ موثر باشد. بنابراین نصب یک سیستم سرمایش و مرطوب سازی گاز قبل از شوینده ونتوری توصیه می شود.</p>

۱- مقدمه

طبیعی و انقراض نسل پاره ای از جانداران و ... گردید. در نتیجه سازمان هایی تاسیس و قوانینی وضع شد که تا حد ممکن آلودگی های ناشی از فرایندهای صنعتی تحت کنترل قرار گیرد. در این میان، فعالیت های بسیاری از واحدهای صنعتی از جمله کارخانه های تولید فولاد، نیروگاه ها، واحدهای پخت آهک و ... باعث تولید و انتشار مقادیر زیادی CO₂ می شوند که یکی از عوامل اساسی در بروز پدیده گلخانه ای و گرم شدن زمین است.

تاکنون روش های صنعتی زیادی برای جذب گاز CO₂ و جلوگیری از انتشار آن به اتمسفر مطالعه و توسعه داده شده است. از جمله این روش ها، جذب CO₂ توسط یک محلول قلیایی در یک شوینده ونتوری است. این نوع از شوینده ها از نظر بازده جداسازی، هزینه های اولیه و

بشر در اواسط قرن بیستم تنها در اندیشه تولید هرچه بیشتر با قیمت تمام شده کمتر بود. ولی با گذشت چند دهه و رشد صنعت، رفته رفته اثرات ناگوار فعالیت های صنعتی بر محیط زیست آشکار گردید و باعث بروز مشکلاتی از قبیل تخریب لایه ازن، بارش باران های اسیدی، گرم شدن زمین، از میان رفتن زیستگاه های

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: rahimi@eng.ui.ac.ir

۱. دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان
۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان

نشان دادند در شرایطی که اختلاف دمای بین گاز و مایع تزریقی و/یا رطوبت گاز ورودی بالا است، نادیده گرفتن پدیده‌های انتقال جرم و حرارت موجب بروز خطاهای قابل ملاحظه‌ای در پیش‌بینی افت فشار ونتوری می‌شود. رحیمی و بخشی [۸] اثر پدیده‌های مورد نظر را بر روی راندمان جداسازی ذرات جامد در شوینده‌های ونتوری مورد مطالعه قرار دادند و به نتیجه مشابهی دست یافتند.

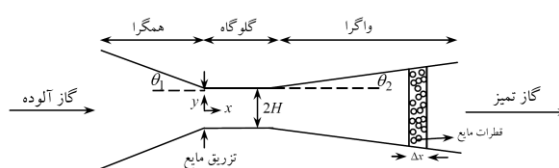
همان‌طور که پیشتر اشاره شد، موضوع مدلسازی جذب گاز در شوینده‌های ونتوری کمتر مورد مطالعه، بررسی و مدلسازی قرار گرفته است. این در حالی است که موضوع تاثیر همزمان انتقال جرم و حرارت بین گاز ورودی و قطرات اتمایز شده بر میزان جداسازی گاز مورد نظر تاکنون مورد توجه پژوهشگران واقع نشده است. اهمیت این مساله زمانی روشن می‌شود که در اغلب کاربردهای صنعتی شوینده‌های ونتوری، گاز ورودی حاوی جزء گازی آلاینده، دمای بیشتری نسبت به مایع تزریقی دارد. به نظر می‌رسد اثر سرمایش ناشی از تبخیر مایع تزریقی علاوه بر کاهش ضرایب انتقال جرم و حرارت باعث کاهش نفوذ جزء جداسونده به سمت قطرات می‌شود که این مساله در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- مدلسازی ریاضی

در این بخش عملکرد یک شوینده ونتوری براساس روابط فیزیکی و معادلات بقاء شامل معادلات بقای ممنتوم، انرژی و جرم و برای حالتی که اختلاف دمای گاز ورودی و مایع اتمایز شده قابل توجه است مورد مدلسازی قرار می‌گیرد. فرضیات به کار رفته عبارتند از:

- توزیع دما، غلظت گاز، رطوبت و غلظت قطرات در شوینده ونتوری یک بعدی و صرفاً در جهت حرکت گاز و قطرات در نظر گرفته شده است.
- اندازه قطرات مایع یکسان بوده و از وجود توزیع اندازه قطرات صرف نظر شده است.

بهره‌برداری، سهولت بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری بسیار مقرون به صرفه هستند. در شکل ۱ نمایی از یک شوینده ونتوری ترسیم شده است. شوینده ونتوری از سه بخش همگرا، گلوگاه و واگرا تشکیل شده است که برحسب مورد استفاده، ورود مایع اتمایزشونده در ابتدای بخش گلوگاه، در طول قسمت همگرا و یا در ابتدای آن صورت می‌گیرد.



شکل ۱- شماتیک یک شوینده ونتوری

اغلب مطالعات صورت گرفته قبلی درخصوص شوینده‌های ونتوری مربوط به پیش‌بینی رفتار و مدلسازی جدایش ذرات جامد معلق در گاز بوده است [۱، ۲] و فرایند جذب گاز در شوینده‌های ونتوری کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ضمن اینکه با توجه به چندان معقول و غیر قابل قبول زمان ماند اندک گاز درون سیستم، موضوع تاثیر پدیده‌های انتقال جرم و حرارت بین مایع تزریقی و گاز بر راندمان جداسازی مورد بررسی قرار نگرفته بود. بول [۱]، برای نخستین بار در مدلسازی فرایند جداسازی ذرات جامد در شوینده‌های ونتوری، پدیده انتقال ممنتوم را مورد توجه قرار داد. پژوهشگران دیگری اثر توزیع غیریکنواخت قطرات را بر راندمان شوینده ونتوری مورد ارزیابی قرار دادند [۳، ۴]. همچنین مطالعاتی در مورد راندمان جداسازی یک شوینده ونتوری با در نظر گرفتن توزیع اندازه قطرات، میزان تشکیل فیلم مایع و عبارت مربوط به تولید قطرات (Source Term) صورت گرفته است [۵، ۶].

رحیمی و همکاران [۷] مسئله تاثیر پدیده‌های همزمان انتقال جرم و حرارت بر روی مدل‌های پیش‌بینی افت فشار در شوینده‌های ونتوری را مورد توجه قرار دادند. آنان

CO₂ (N_{CO2}) است. در ادامه، با توجه به اینکه پدیده‌های انتقال جرم و حرارت بر مقادیر پارامترهای مذکور موثر است سعی می‌شود معادلات مربوط به تغییرات این پارامترها به طور دقیق به دست آید.

۲-۲- موازنه جرم رطوبت در یک قطره مایع

با برقراری موازنه جرم برای رطوبت در یک قطره آب چنین به دست می‌آید،

$$\frac{dm_d}{dt} = -N_A M w_d (\pi d_d^2) \quad (5)$$

که در آن N_A شدت تبخیر یا میعان بخار آب می‌باشد که عامل اصلی تغییر قطر قطرات به شمار می‌آید و از رابطه زیر به دست می‌آید،

$$N_A = k_y (y_A^* - y_A) \quad (6)$$

معادله (5) به صورت زیر ساده می‌شود،

$$\frac{dd_d}{dt} = \frac{-2N_A M w_d}{\rho_d} \quad (7)$$

از طرفی با توجه به اینکه $V_d = dx/dt$ می‌توان نوشت،

$$\frac{dd_d}{dx} = \frac{-2N_A M w_d}{\rho_d V_d} \quad (8)$$

در نتیجه، با ترکیب معادلات (2)، (4) و (8)، معادله تغییرات جزء مولی CO₂ به عنوان معادله هدف به صورت زیر حاصل می‌شود،

$$\frac{dY_{CO_2}}{dx} = \frac{6L d_d^2}{d_{di}^3 V_d} [N_{CO_2} - \frac{Y_{CO_2}}{G_s} N_A] \quad (9)$$

که در آن N_{CO2} شار جرمی CO₂ است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود،

$$N_{CO_2} = \frac{N_A}{N_A + N_{CO_2}} \times \frac{K_y \bar{P}_{AM}}{P} \ln \frac{\frac{N_A}{N_A + N_{CO_2}}}{\frac{N_A}{N_A + N_{CO_2}} - y_{CO_2}} \quad (10)$$

- قطرات در اثر برخورد با یکدیگر شکسته و یا به قطرات بزرگتر تبدیل نمی‌شوند.
- شوینده ونتوری نسبت به محیط بیرون آدیاباتیک است.
- واکنش میان دی‌اکسیدکربن و محلول قلیایی مورد استفاده آنی است.

۲-۱- معادله تغییرات جزء مولی CO₂ در فاز گاز

با توجه به هدف این مطالعه، معادله اصلی مورد نیاز، معادله تغییرات غلظت جزء جداشونده در طول ونتوری است. لذا با در نظر گرفتن یک المان طولی از شوینده و با استفاده از قانون بقای جرم جزئی برای گاز CO₂ می‌توان نوشت،

$$(G' Y_{CO_2})_x - (G' Y_{CO_2})_{x+dx} - N_{CO_2} \frac{L}{(\pi/6) d_{di}^3} (\pi d_d^2) dt = 0 \quad (1)$$

به طوری که، G' دبی مولی گاز فاقد CO₂ است و dt زمان ماند قطرات در المانی به طول dx است ($dt = dx/V_d$) در نتیجه،

$$G' \frac{dY_{CO_2}}{dx} + Y_{CO_2} \frac{dG'}{dx} = \frac{-6L d_d^2 N_{CO_2}}{V_d d_{di}^3} \quad (2)$$

از آنجایی که در اثر تبخیر قطرات میزان رطوبت همراه گاز تغییر می‌کند، مقدار G' ثابت نیست و باید تغییرات آن در نظر گرفته شود. برای یافتن رابطه‌ای برای G' کافی است معادله موازنه جرم رطوبت در شوینده ونتوری نوشته شود. به این ترتیب رابطه زیر قابل استخراج است:

$$G' = G'_i + \frac{L(d_{di}^3 - d_d^3) \rho_d}{d_{di}^3 M w_d} \quad (3)$$

بنابراین، معادله تغییرات G' در طول شوینده به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\frac{dG'}{dx} = \frac{-3L \rho_d d_d^2}{d_{di}^3 M w_d} \left(\frac{dd_d}{dx} \right) \quad (4)$$

با نگاهی به معادلات (2) و (4) می‌توان دریافت که پیش‌بینی Y_{CO2} مستلزم در اختیار داشتن روابطی برای محاسبه قطر قطرات (d_d)، سرعت قطرات (V_d) و شار نفوذ

۲-۳- معادله تغییرات سرعت قطره

$$-n_d N_A M w_d C_v (\pi d_d^2) (T_g - T_0) = \frac{d}{dt} [m_g C_g (T_g - T_0)] \quad (15)$$

که در آن n_d تعداد قطرات مایع ورودی به ازای واحد زمان است که با استفاده از میزان مایع تزریقی و قطر اولیه قطرات به دست می‌آید. با جایگزینی معادلات مربوط به n_d و N_A در معادله فوق، این معادله به فرم نهایی زیر خلاصه می‌شود،

$$\frac{dT_g}{dx} = -\frac{6Ld_d^2}{d_d^3 m_g C_g V_d} \times [h(T_g - T_d) + N_A M w_d C_v (T_g - T_0)] \quad (16)$$

به این ترتیب، در قسمت‌های قبل معادلات مربوط به تغییرات غلظت CO_2 در فاز گاز، دمای مایع، دمای گاز، قطر قطرات و سرعت حرکت قطرات به دست آمد. این معادلات با روش رانگ کاتا مرتبه چهار حل گردید. برای این منظور یک بسته نرم‌افزاری به زبان دلفی تهیه و جهت تحلیل نتایج و بررسی اثر پارامترها مورد استفاده قرار گرفت.

برای محاسبه ضرایب انتقال جرم و حرارت از روابط اصلاح‌شده‌ای که جهت کاربرد در این سیستم‌ها بهینه شده‌اند استفاده می‌شود [۹، ۱۰]. در این معادله اثر رشد لایه مرزی و تغییرات خواص ترموفیزیکی توسط دو ضریب تصحیح α و β اصلاح می‌گردند:

$$Nu = \alpha \beta [2 + 0.6 Re_d^{0.5} Pr^{0.33}] \quad (17)$$

$$Sh = \alpha \beta [2 + 0.6 Re_d^{0.5} Sc^{0.33}] \quad (18)$$

به طوری که:

$$\alpha = 1 - 0.4 \left(\frac{\ln(1+B)}{B} \right), \quad B = \frac{C_v (T_g - T_d)}{\lambda} \quad (19)$$

$$\beta = 1 - 0.4 \left(1 - \frac{T_d}{T_g} \right) \quad (20)$$

برای استفاده از این روابط ضروری است که سرعت گاز در هر نقطه از ونتوری به صورت زیر محاسبه شود:

$$V_g = \frac{Q_g}{A} \quad (21)$$

به طوری که Q_g دبی گاز تزریقی و A سطح مقطع در هر نقطه از شوینده ونتوری است که مقدار آن به صورت زیر قابل تعیین است،

سرعت قطرات در اثر نیروی دراگ ناشی از جریان گاز تغییر می‌کند. بسته به جهت حرکت گاز و نحوه قرارگیری شوینده، نیروهای شناوری و وزن نیز ممکن است حائز اهمیت باشند. در این مطالعه، با توجه به افقی بودن شوینده تنها نیروی مقاومت اعمالی به قطره در حال حرکت نیروی دراگ می‌باشد. با استفاده از قانون دوم نیوتن معادله تغییرات سرعت قطره در جهت محور شوینده ونتوری به صورت زیر به دست می‌آید [۷].

$$\frac{dV_d}{dx} = \frac{3\mu_g (V_g - V_d) C_{DN}}{4\rho_d d_d^2 V_d} \quad (11)$$

به طوری که، C_{DN} ضریب دراگ بی‌بعد اصلاح شده است که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$C_{DN} = C_D \times Re_d \quad (12)$$

که در آن، ضریب دراگ از رابطه زیر محاسبه می‌شود،

$$C_D = 0.22 + \frac{24}{Re_d} (1 + 0.15 Re_d^{0.6}) \quad (13)$$

۲-۴- معادله تغییرات دمای قطره

محتوای انرژی درونی قطره بر اثر انتقال حرارت جابجایی میان قطره و گاز و همچنین تبخیر/میعان قطره دچار تغییر می‌شود. با برقراری موازنه انرژی برای یک قطره چنین نتیجه می‌شود،

$$\frac{dT_d}{dx} = \frac{6h(T_g - T_d)}{\rho_d C_d d_d V_d} - \frac{6N_A M w}{\rho_d C_d d_d V_d} [\lambda - C_d (T_d - T_0)] \quad (14)$$

۲-۵- معادله تغییرات دمای گاز

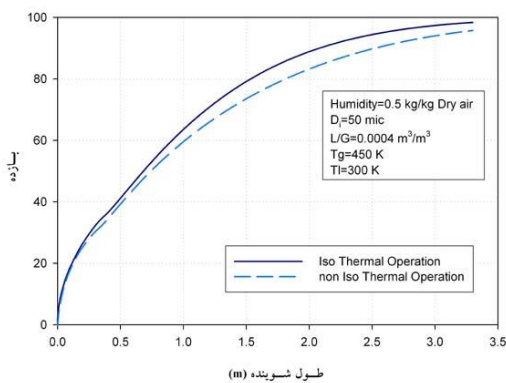
در سیستم‌های پاششی، دمای گاز به واسطه انتقال حرارت میان گاز و قطرات مایع و تبخیر قطرات کاهش می‌یابد. همچنین بخشی از انرژی گاز صرف بالا بردن دمای بخار حاصل از تبخیر قطرات از دمای سطح قطرات تا دمای گاز می‌گردد. با برقراری موازنه انرژی برای فاز گازی می‌توان نوشت،

$$-n_d h (\pi d_d^2) (T_g - T_d)$$

CO₂ را افزایش می‌دهد. این امر نیز به نوبه خود در کاهش راندمان جداسازی CO₂ موثر است.

جدول ۱- شرایط فرایندی و مشخصات فیزیکی یک شوینده ونتوری صنعتی [۱]

مقدار	پارامتر
۲۰	دبی جرمی گاز، kg/s
۰/۰۰۰۴	نسبت مایع به گاز، m ³ /m ³
۱۷۷	دمای گاز ورودی، °C
۲۷	دمای مایع تزریقی، °C
۰/۵	رطوبت گاز ورودی، kg/kg dry air
۰/۱	کسر مولی CO ₂ در گاز ورودی
۰/۳	طول گلوگاه، m
۰/۳۵	عرض شوینده، m
۰/۴۵	ارتفاع گلوگاه، m
۳	طول بخش واگرا، m
۶	زاویه واگرایی، درجه



شکل ۲- تغییرات راندمان جداسازی CO₂ در طول شوینده ونتوری در دو حالت عملیات همدمای و غیرهمدمای

برای درک هرچه بهتر این موضوع روند تغییرات سرعت گاز و قطره در دو حالت عملکرد همدمای و غیرهمدمای در شکل ۳ ترسیم شده است. در هر دو حالت، اختلاف سرعت موضعی گاز و قطره تعیین‌کننده سرعت انتقال جرم است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سرعت نسبی قطره و گاز در حالت عملکرد غیرهمدمای به طور کاملاً محسوس و ناگهانی در مقایسه با حالت عملکرد همدمای کاهش می‌یابد.

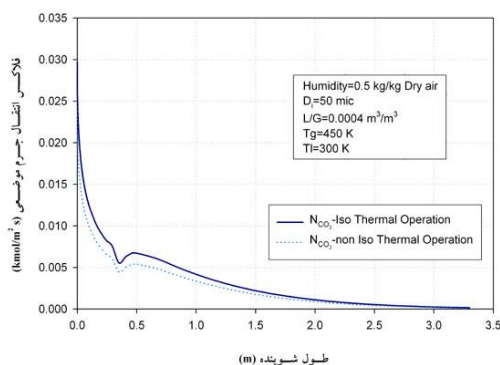
$$A = \begin{cases} 2W(H + (x_c - x) \tan \theta_1) & x \leq x_c \\ 2HW & x_c < x < x_c + x_f \\ 2W(H + (x - x_c - x_f) \tan \theta_2) & x \geq x_c + x_f \end{cases} \quad (22)$$

همچنین از رابطه ارائه شده توسط ویسواناتان [۹] برای محاسبه قطر اولیه قطرات استفاده می‌گردد.

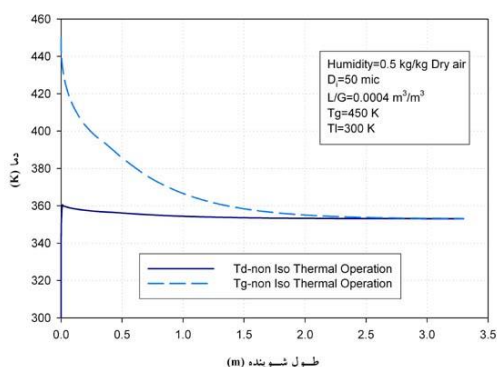
۳- نتایج

در این بخش دو حالت مختلف که در اولی از اثرات انتقال جرم و حرارت بین دو فاز مایع و گاز صرف‌نظر شده (با نام مدل ریاضی همدمای) و در دومی پدیده‌های فوق مورد توجه قرار گرفته‌اند (با نام مدل ریاضی غیرهمدمای) با یکدیگر مقایسه می‌شوند. برای انجام این مقایسه، شرایط فرایندی و مشخصات فیزیکی یک شوینده ونتوری مطابق با جدول ۱ به کار برده شده است.

در شکل ۲ روند تغییرات راندمان جداسازی CO₂ در طول شوینده برای دو حالت همدمای و غیرهمدمای رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مدل همدمای راندمان جذب بیشتر از حالت غیرهمدمای پیش‌بینی می‌شود. در فرایندهای جذب همراه با واکنش، به ویژه در صورتی که سرعت واکنش به حد کافی بالا باشد (نظیر شرایط مورد استفاده در این مطالعه)، کنترل‌کننده اصلی میزان جذب، مقاومت نفوذ بیرونی گاز می‌باشد که این مقاومت به شدت تابع سرعت نسبی بین گاز و قطرات است. از سویی، گاز در اثر تبادل حرارت با قطرات اتمایز شده با کاهش ناگهانی دما روبرو می‌شود و دبی حجمی و در نتیجه سرعت آن به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. اگر این مسئله در مدل لحاظ شود، ضریب انتقال جرم کمتر از حالتی که از فرض همدمایی در طول برج استفاده می‌شود محاسبه می‌گردد. بنابراین راندمان جداسازی در حالت اول (غیرهمدمای) کمتر از حالت دوم (همدمای) پیش‌بینی می‌شود. از سوی دیگر انتقال حرارت صورت گرفته به قطرات که موجب افزایش دمای آن‌ها می‌شود، میزان تبخیر قطرات در خلاف جهت حرکت جذب گاز

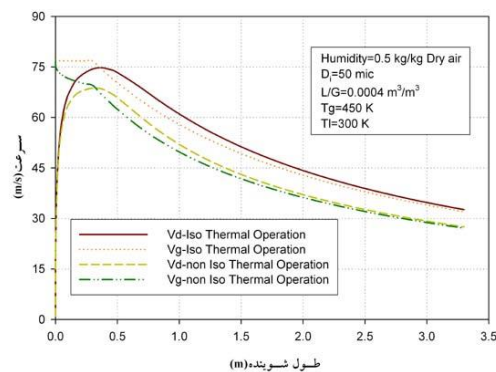


شکل ۴- تغییرات شار انتقال جرم موضعی CO₂ در طول شوینده و نتوری



شکل ۵- تغییرات دمای گاز و قطرات مایع در طول شوینده

در شکل ۶ روند تغییرات قطر قطرات و رطوبت گاز در طول شوینده و نتوری نشان داده شده است. تغییرات این دو پارامتر در طول شوینده عکس یکدیگر است. در ابتدای گلوگاه به علت پایین بودن دمای قطرات و بالا بودن رطوبت گاز، پدیده میعان اتفاق می افتد. بنابراین رطوبت فاز گاز کاهش یافته و قطر قطرات تا اندازه‌ای زیاد می شود. همزمان با بالا رفتن دمای قطرات به واسطه تبادل حرارت با فاز گاز، فشار بخار آب در سطح قطرات نسبت به فشار جزیی بخار آب در فاز گاز زیادتر شده و پدیده تبخیر اتفاق می افتد. از این پس، در طول شوینده رطوبت گاز افزایش و قطر قطرات کم می شود. همچنین شکل ۶ نشان می دهد شیب این تغییرات به تدریج در طول شوینده کاهش می یابد.



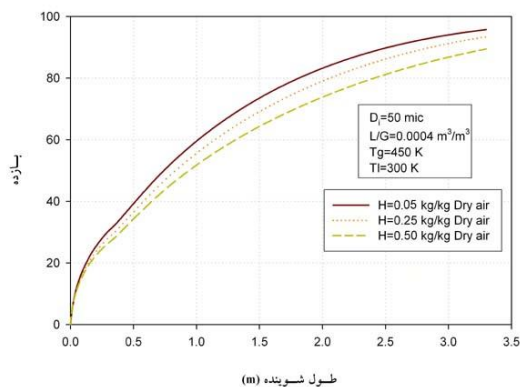
شکل ۳- تغییرات سرعت گاز و قطرات مایع در دو حالت همدمای و غیر همدمای در طول شوینده

در شکل ۴ مقایسه‌ای بین شار انتقال جرم موضعی CO₂ در دو حالت عملکرد همدمای و غیرهمدمای صورت گرفته است. در حالتی که تبخیر قطرات ناشی از افزایش دمای قطرات شدت می یابد، با توجه به معادله (۱۰)، شار انتقال جرم کاهش می یابد. این مساله نیز علاوه بر تاثیر کاهش ضریب انتقال جرم CO₂ به کاهش راندمان کلی جداسازی کمک می کند. بنابراین دو اثر مهم در کمتر پیش بینی شدن راندمان جذب در عملیات غیرهمدمای در مقایسه با عملیات همدمای مشاهده می شود که شامل کاهش سرعت نسبی قطرات و گاز (کاهش ضریب انتقال جرم) و کاهش شار انتقال جرم هستند.

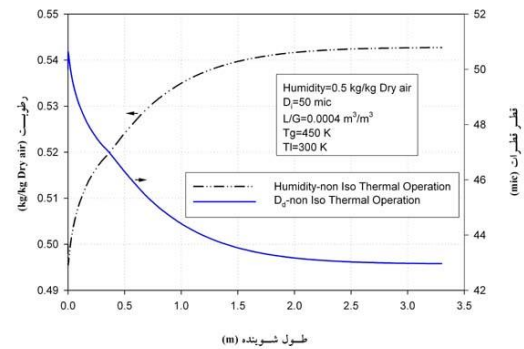
در شکل ۵ روند تغییرات دمای گاز و قطرات مایع در طول شوینده نشان داده شده است. در نقاط ابتدایی شوینده، با توجه به نیروی محرکه بالای انتقال حرارت و سطح بزرگ انتقال حرارت، کاهش ناگهانی دمای گاز و افزایش ناگهانی دمای قطرات مایع مشاهده می شود. دو فاز در طول شوینده با یکدیگر همدمای شده و شوینده را در دمای تر گاز ورودی ترک می کنند. همان طور که در این شکل به خوبی نشان داده شده، فرض عدم تبادل حرارت میان دو فاز که توسط بسیاری از پژوهشگران قبلی به کار برده شده فرض کاملاً نادرستی است. در واقع ضروری است به منظور پیش بینی صحیح رفتار یک شوینده، تاثیر پدیده تبخیر و انتقال حرارت میان دو فاز در مدل ریاضی منظور گردد.

می‌دهد. با توجه به اینکه جهت تبخیر قطرات و جذب CO_2 برخلاف یکدیگر است، مسئله تبخیر قطرات، به عنوان مقاومتی در برابر جذب CO_2 عمل می‌نماید. برای درک بیشتر این موضوع، در شکل ۹ راندمان جداسازی شوینده به ازاء مقادیر مختلف دمای گاز ورودی ترسیم شده است. در این شکل نیز با کاهش دمای گازی ورودی، راندمان شوینده افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت هرچه رطوبت گاز ورودی به حالت اشباع نزدیکتر باشد مقدار تبخیر کمتر، میزان کاهش قطر قطرات کمتر، مقاومت موجود در برابر جذب CO_2 کمتر و در نهایت راندمان جداسازی شوینده بیشتر خواهد بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با نصب یک سیستم خنک‌سازی و مرطوب‌سازی گاز پیش از شوینده و نتوری می‌توان تا حد زیادی راندمان کلی جذب CO_2 را در شوینده و نتوری افزایش داد.

در شکل ۱۰ تغییرات قطر قطرات در طول شوینده به ازاء مقادیر مختلف رطوبت گاز ورودی رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش رطوبت گاز ورودی میزان تبخیر قطرات بیشتر و قطر قطرات خروجی کمتر می‌شود.

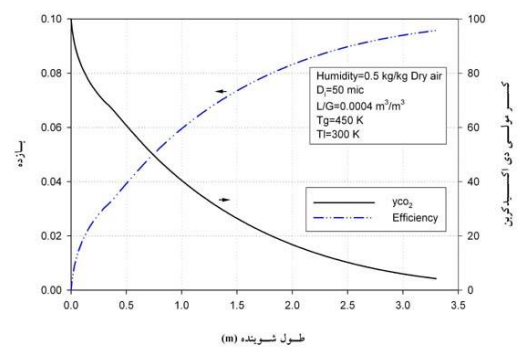


شکل ۸- تغییرات راندمان جداسازی در طول شوینده به ازاء مقادیر مختلف رطوبت گاز ورودی



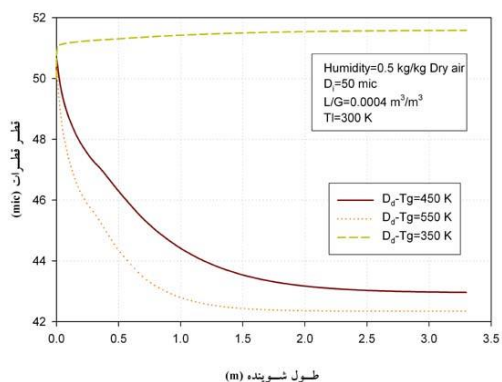
شکل ۶- تغییرات رطوبت گاز و قطر قطرات در طول شوینده

در شکل ۷ نحوه تغییرات کسر مولی CO_2 در فاز گاز و راندمان جداسازی در طول شوینده و نتوری ترسیم داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت، بیشترین میزان جداسازی در ابتدای گلوگاه اتفاق می‌افتد که این امر به دلیل بالا بودن سرعت نسبی قطرات و فاز گاز در ابتدای گلوگاه است. در حقیقت بالا بودن سرعت نسبی گاز و قطرات، برخورد میان قطرات و فاز گاز را تشدید کرده و میزان جداسازی را افزایش می‌دهد.

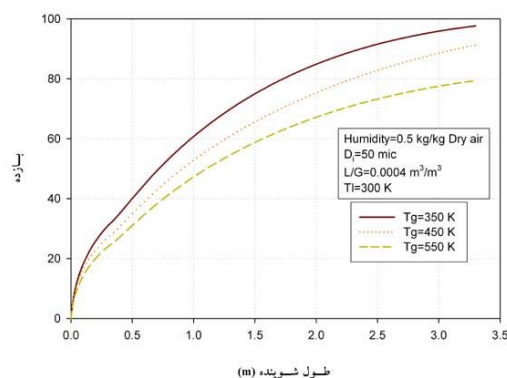


شکل ۷- تغییرات کسر مولی CO_2 و راندمان جداسازی در طول شوینده

در شکل ۸ روند تغییرات راندمان جداسازی در طول شوینده و نتوری به ازاء مقادیر مختلف رطوبت گاز ورودی ترسیم شده است. به طور کلی، هرچه که رطوبت گاز ورودی بالاتر باشد راندمان شوینده بیشتر می‌شود. بالا بودن رطوبت گاز به معنای بالا بودن فشار جزیی بخار آب در فاز گاز است. این مسئله نیروی محرکه تبخیر را کاهش



شکل ۱۱- تغییرات قطر قطرات در طول شوینده به ازاء مقادیر مختلف دمای گاز ورودی

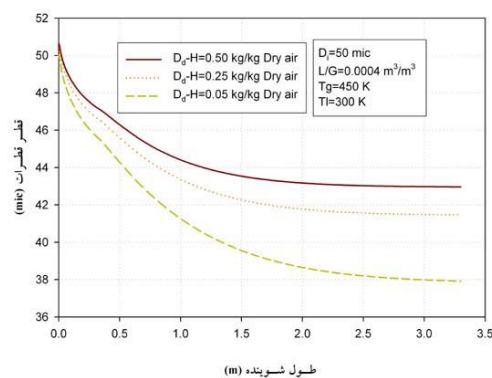


شکل ۹- تغییرات راندمان جداسازی در طول شوینده به ازاء مقادیر مختلف دمای گاز ورودی

۴- نتیجه گیری کلی

مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی ریاضی یک شوینده ونتوری در دو حالت همدمای و غیرهمدمای نشان می‌دهد در صورتی که اختلاف قابل توجهی بین دمای گاز ورودی و مایع تزریقی وجود داشته باشد، تاثیر پدیده تبادل حرارت و سرمایش ناشی از تبخیر قطرات بر عملکرد شوینده ونتوری قابل توجه است. در این شرایط، همدمای فرض نمودن سیستم باعث بروز خطاهای قابل ملاحظه‌ای در پیش‌بینی عملکرد شوینده و راندمان جداسازی گاز CO_2 می‌گردد. همچنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد به منظور کاهش تاثیرات ناشی از تبادل جرم و حرارت بین گاز و قطرات تزریقی نصب یک سیستم خنک‌سازی و مرطوب‌سازی گاز پیش از شوینده ونتوری می‌تواند تا حد زیادی راندمان بالای جذب CO_2 را تضمین نماید. به عبارت دیگر هر چه رطوبت گاز ورودی بالاتر و دمای آن پایین‌تر باشد عملکرد شوینده مناسب‌تر و راندمان آن بالاتر خواهد بود.

در شکل ۱۱ روند تغییرات قطر قطرات در طول شوینده به ازاء مقادیر مختلف دمای گاز ورودی نشان شده است. هرچه دمای گاز ورودی بالاتر باشد، شدت تبخیر بیشتر شده و قطر قطرات خروجی کوچکتر می‌شود. در صورتی که دمای گاز ورودی از حد مشخصی کمتر شود و میزان رطوبت در گاز ورودی به اندازه کافی زیاد باشد، پدیده میعان اتفاق می‌افتد و قطرات رشد می‌کنند. اثر این پدیده در منحنی مربوط به دمای $(T_g = 350\text{ K})$ به خوبی مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰- تغییرات قطر قطرات در طول شوینده به ازاء مقادیر مختلف رطوبت گاز ورودی

- [7] Rahimi, A., A. Niksiar, and M. Mobasheri, *Considering roles of heat and mass transfer for increasing the ability of pressure drop models in venturi scrubbers*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2011. 50(1): p. 104-112.
- [8] Rahimi, A. and A. Bakhshi, *A simple one-dimensional model for investigation of heat and mass transfer effects on removal efficiency of particulate matters in a venturi scrubber*. Iranian Journal of Chemical Engineering, 2009. 6(4): p. 3-14.
- [9] Boll, R.H., *Particle Collection and Pressure Drop in Venturi Scrubbers*. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1973. 12(1): p. 40-50.