

مدل سازی و شبیه سازی فرایندهای انتقال جرم و گرمای همزمان در جابه جایی اجباری

سیدحیدر رجائی شوشتری، اکبر شاهسوند*

مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پیام نگار: shahsavand@um.ac.ir

چکیده

در مقاله حاضر نسبت به مدل سازی فرایندهای مختلف انتقال جرم و گرمای همزمان در جابه جایی اجباری برای یک سیستم آزمایشگاهی اقدام شده است. پس از حل همزمان مجموعه معادلات جبری غیر خطی مربوط به مدل ریاضی سیستم مورد نظر، نتایج به دست آمده حاکی از آن هستند که وجود انتقال جرم نقش به سزایی در میزان کل گرمای منتقل شده دارد و این امر در حضور پدیده های میعان و تبخیر و جذب به شدت تقویت می گردد. همچنین نتایج حاصل از شبیه سازی در خصوص میزان تأثیر فرایند انتقال جرم بر ضریب انتقال گرما و کل گرمای منتقل شده برای سیستم های مختلف مانند میعان آب از هوای مرطوب، تبخیر آب در هوای خشک و تبخیر آب در هوای حاوی آمونیاک همزمان با میعان (جذب) آمونیاک از هوا در آب به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته اند.

کلمات کلیدی: انتقال جرم و گرمای همزمان، میعان بخار آب، تبخیر آب، جذب آمونیاک

۱- مقدمه

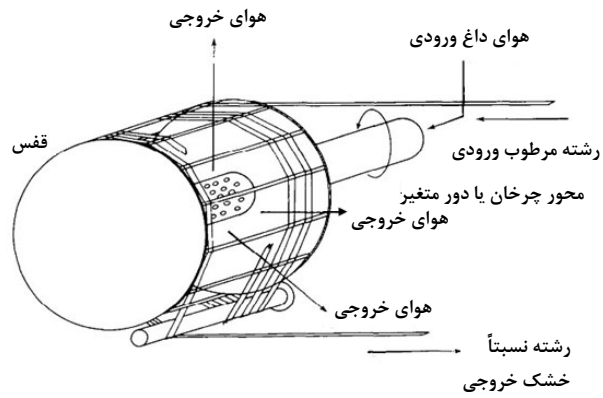
فرایندهای انتقال جرم و گرمای همزمان، کاربرد گسترده ای در علوم مهندسی از جمله تقطیر غشایی [۱]، تولید مواد [۲]، خشک کردن [۳-۵]، فرایندهای صنایع غذایی [۶-۸]، عملکرد پرها [۹-۱۲]، عملکرد مبدل های گرمایی [۱۳] و تولید حباب ها [۱۴-۱۷] دارند. به عنوان مثال در یکی از موارد مطالعه شده در این زمینه توسط کل لند و اسلسر^۱، جهت خشک کردن الیاف مصنوعی چند رشته ای، از طریق سیستم نشان داده شده در شکل (۱)، تأثیر پدیده انتقال جرم بر انتقال گرما مورد بررسی قرار گرفته است [۱۸]. همان گونه که در شکل (۱) مشاهده می گردد، الیاف مرطوب که متشکل از چند رشته مختلف می باشند، به دور قفس دوار پیچانیده

می شوند. ضمناً هوای داغ نیز به درون قفس دمیده شده و به صورت شعاعی از آن خارج می گردد. در نتیجه بر اثر انتقال جرم و گرمای همزمان، الیاف خروجی خشک می شوند. در مقاله مذکور، پس از نوشتن معادلات دیفرانسیلی فرایند و حل آنها، اثر تغییر پارامترها بر میزان رطوبت رشته خروجی، در شرایط پایا مورد بررسی قرار گرفته است و معتبر بودن استفاده از پارامتر چیلتون و کلبورن (فاکتور جی^۲) برای سیستم های چند جزئی اثبات می شود. هم چنین تأثیر عدد اشمیت بر فرایند نیز مورد ارزیابی قرار گرفته و در نهایت معادله جدیدی برای محاسبه فاکتور جی جرمی بر حسب فاکتور جی حرارتی ارائه گردیده است.

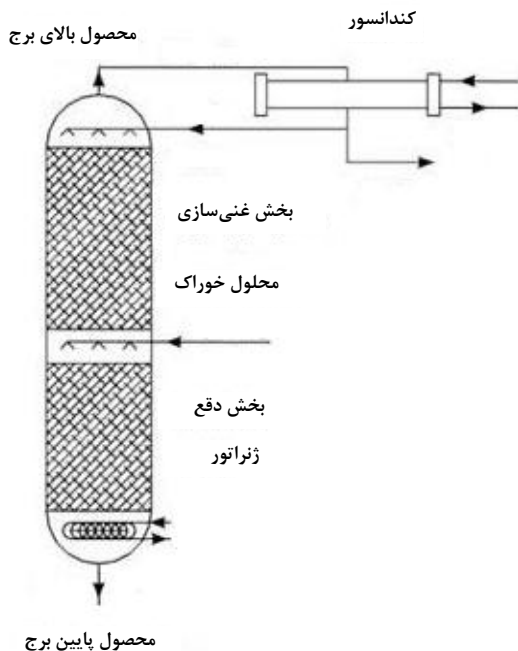
1. Cleland and Slesser

2. J-factor

(آمونیاک- آب) می‌باشد که در شکل (۳) نشان داده شده است [۲۰]. در این سیستم، از آمونیاک به عنوان ماده سردساز و از آب به عنوان ماده جاذب استفاده شده است. همان گونه که در شکل مشخص است، گرمای داده شده به جوش آور (ژنراتور)، آمونیاک حل شده در آب را در اثر انتقال جرم و حرارت تبخیر می‌کند و موجب افزایش فشار آن می‌شود. سپس آمونیاک وارد کندانسور شده و در آن جا تقطیر و مایع می‌گردد. در نهایت مجدداً به نحوی آمونیاک به صورت خوراک وارد برج شده و این حلقه (سیکل) ادامه می‌یابد.



شکل ۱- نمودار بررسی انتقال جرم و گرمای همزمان در حذف رطوبت از الیاف مرطوب [۱۸]

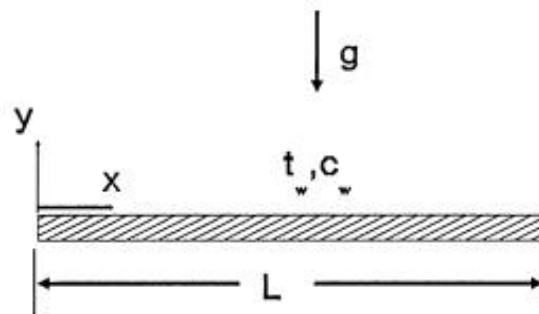


شکل ۳- نمودار اجمالی برج تقطیر مورد ارزیابی توسط سیارا و همکاران [۲۰]

در مقاله مذکور نیز، مدل دیفرانسیلی فرایند بر پایه موازنه‌های جرم و انرژی ارائه گردیده و سپس از طریق آن طول بهینه برای قسمت‌های عریان‌سازی و غنی‌سازی محاسبه شده اند. همچنین تأثیر ضرایب انتقال جرم بر غلظت آمونیاک موجود در محصول بالای برج نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

در سال ۲۰۰۶ میلادی، پیرومپود و همکاران^۳، انتقال جرم و حرارت همزمان در مبدل‌های حرارتی موجی را مورد بررسی قرار دادند [۲۱]. هدف از این مطالعه، یافتن روش کاهشی جدید در محاسبه

در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۰۱ میلادی، انتقال جرم و گرمای همزمان بر روی یک صفحه افقی توسط اسرپادا و آنجیراسا^۱ مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۹]. به طوری که در شکل (۲) مشخص می‌باشد، این صفحه افقی در معرض جریان جابه‌جایی طبیعی واقع گردید. در این پژوهش، سیستم مورد نظر، از حیث فرمول‌بندی و حل عددی مورد توجه قرار گرفت. در نهایت، ماهیت جریان‌های ناپایدار گذرا با جزئیات کافی بررسی شدند و تأثیر نرخ نفوذ بر پراکندگی انرژی گرمایی و گونه نفوذکننده، مورد ارزیابی قرار گرفتند.



شکل ۲- نمودار بررسی انتقال جرم و گرمای همزمان از یک سطح افقی [۱۹]

از دیگر مطالعات انجام شده در این زمینه در سال ۲۰۰۲ میلادی، بررسی انتقال جرم و حرارت همزمان در برج تقطیر پر شده توسط سیارا و همکاران^۲ برای سیستم سردساز جاذبی حاوی

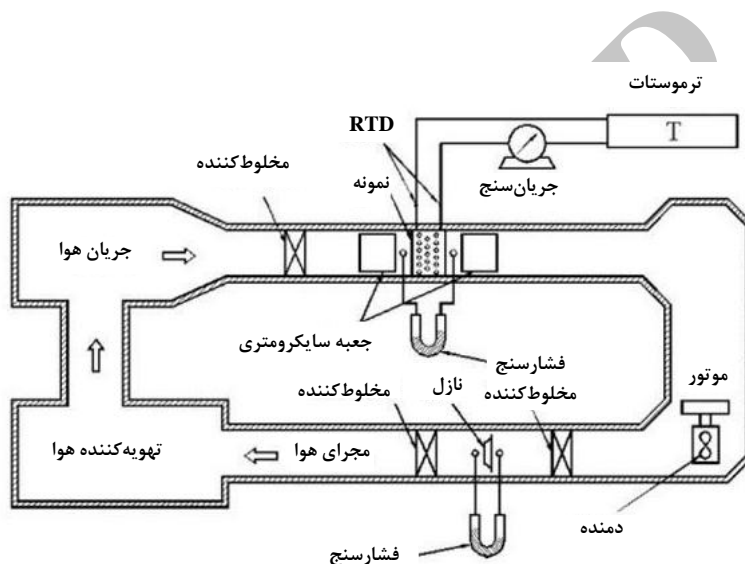
1. Sripada and Angirasa
2. Seara et al.

3. Pirompugd et al.

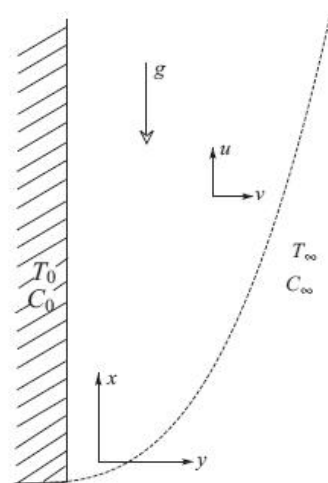
مربوطه بررسی شدند. در مقاله حاضر، ضمن ارائه اجمالی مشخصات فیزیکی سیستم آزمایشگاهی مورد مطالعه، نسبت به مدلسازی فرایندهای مختلف انتقال جرم و گرمای همزمان برای سیستم‌های مختلف (میعان آب از هوای مرطوب، تبخیر آب در هوای خشک و تبخیر آب در هوا همزمان با میعان (جذب) آمونیاک از هوا در آب) اقدام گردیده و در انتها اثرات پارامترهای عملیاتی بسیاری بر عملکرد سیستم مورد توجه قرار گرفته اند.

مشخصات و پارامترهای انتقال جرم و حرارت در این مدل‌ها در شرایط نرم‌زدایی بود. سیستم مورد ارزیابی، در شکل (۴) ارائه شده است. همچنین تأثیر تغییر مشخصات سیستم و تغییر شرایط ورودی بر نحوه انتقال جرم و گرما مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در سیستم دیگری در سال ۲۰۱۰ میلادی، مطابق شکل (۵)، انتقال جرم و گرمای همزمان در جابه‌جایی طبیعی پیرامون صفحه عمودی با دمای ثابت توسط خانی و همکاران^۱ مورد بررسی قرار گرفت [۲۲]. پس از فرمول‌بندی سیستم، تأثیر اعداد بدون بعد پرانتل و اشمیت در توزیعات دما، غلظت و سرعت در لایه‌های مرزی



شکل ۴- نمودار اجمالی set-up آزمایشگاهی در بررسی انتقال جرم و گرمای همزمان در مبدل‌های موجی [۲۱]

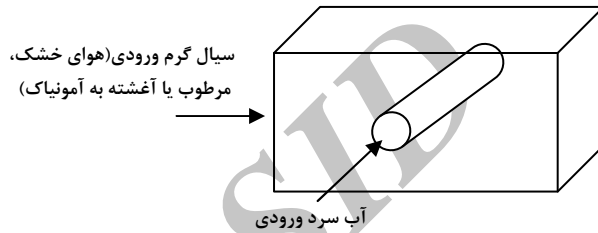


شکل ۵- نمودار بررسی انتقال جرم و گرمای همزمان در جابه‌جایی طبیعی پیرامون صفحه عمودی همدما [۲۲]

1. Khani et al.

۲- مشخصات سیستم آزمایشگاهی مورد مطالعه

برای بررسی انتقال جرم و گرمای همزمان و میزان تأثیر انتقال جرم بر ضریب انتقال گرما و کل گرمای مبادله شده، سیستم نشان داده شده در شکل (۶) در نظر گرفته شده است. سیستم مورد نظر، مجرای افقی با سطح مقطع مربع شکل می‌باشد که در آن سیال گرم (هوای خشک، مرطوب یا آغشته به آمونیاک) وارد می‌شود. از مرکز مجرا و در جهت عمود بر محور آن، لوله ای مسی عبور کرده که در آن آب سرد با دما و سرعت مشخص جریان دارد.



شکل ۶- نمودار سیستم در نظر گرفته شده برای بررسی

انتقال جرم و گرمای همزمان

به منظور بررسی انتقال جرم و گرمای همزمان، حالت‌های زیر در نظر گرفته شده اند که هدف از طراحی آنها مطالعه نحوه تأثیر پدیده‌های میعان، تبخیر و جذب بر کل گرمای مبادله شده و ضریب انتقال گرما و مقایسه آن با حالتی که تنها انتقال گرما وجود داشته باشد، می‌باشد.

۲-۱ حالت اول: عبور هوای مرطوب و میعان بخار آب

در این حالت فرض شده است که هوای اشباع از بخار آب با دمای نسبتاً بالا و سرعت مشخص وارد محفظه می‌شود. به علت وقوع انتقال جرم و گرمای همزمان، مقداری از بخار آب موجود در هوای ورودی مایع شده و روی لوله چکیده می‌شود که این امر علاوه بر انتقال گرما از هوای داغ به آب سرد، باعث افزایش بیشتر دمای سیال درون لوله می‌گردد. در این حالت، فرایندهای انتقال جرم و گرما همسو می‌باشند.

۲-۲ حالت دوم: عبور هوای خشک و تبخیر آب موجود روی

لوله تراوش پذیر

در این حالت به جای هوای سیرشده، هوای خشک با همان دمای

نسبتاً بالا و سرعت مربوطه وارد محفظه می‌شود و سطح لوله نیز تراوش پذیر است، به گونه‌ای که روی سطح آن همواره خیس می‌باشد. در این حالت، آب موجود بر روی لوله تبخیر شده و بر خلاف حالت قبل، انتقال جرم و گرما در خلاف جهت یکدیگر می‌باشند.

۲-۳ حالت سوم: عبور هوای خشک آغشته به آمونیاک و

تبخیر آب موجود روی لوله تراوش پذیر و جذب آمونیاک

این حالت نیز مشابه حالت دوم است با این تفاوت که هوای ورودی آغشته به آمونیاک با کسر مولی مشخص است. ضمناً آمونیاک در اثر انتقال جرم و گرمای همزمان، جذب آب موجود در روی لوله شده و آب نیز از سطح لوله تراوش پذیر تبخیر می‌گردد.

۳- مدل سازی فرایند

با توجه به سیستم مورد اشاره در شکل (۶)، مدل سازی ۳ حالت در نظر گرفته شده فوق به صورت زیر می‌باشد. فرض مشترک در هر ۳ حالت صرف نظر از اتلاف گرما از جداره کانال به محیط اطراف است.

۳-۱ حالت اول: عبور هوای مرطوب و میعان بخار آب

$$q_s = \hat{h}(T_{ava} - T_{lav}) \quad (1)$$

که در این رابطه، q_s گرمای محسوس مبادله شده، T_{ava} متوسط دمای هوای ورودی و خروجی و T_{lav} دمای متوسط آب چکیده شده روی لوله می‌باشد. \hat{h} نیز از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$\hat{h} = \frac{N_A M_A C_{PA}}{1 - e^{-N_A M_A C_{PA} / h_0}} \quad (2)$$

در رابطه فوق M_A و C_{pA} به ترتیب جرم مولکولی و ظرفیت حرارتی بخار آب می‌باشند. h_0 نیز ضریب انتقال گرما برای جابه جایی عمود بر روی استوانه می‌باشد که تابعی از اعداد بدون بعد رینولدز و پرانتل است و از رابطه چرچیل و برن اشتاین [۲۴] نتیجه می‌شود:

در این رابطه پارامتر P_t نشانگر فشار کل، D_{AB} ضریب نفوذ بخار آب در هوا، d_o قطر خارجی لوله و $\bar{P}_{B,M}$ اختلاف فشار لگاریتمی است. مورد اخیر از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\bar{P}_{B,M} = \frac{P_A - P_{A1}}{\ln\left(\frac{P_t - P_{A1}}{P_t - P_A}\right)} \quad (10)$$

اکنون می‌توان دمای هوای خروجی را از رابطه ی زیر محاسبه کرد:

$$T_{oa} = T_{ia} - \frac{q_s}{\rho C_p u L^2} \quad (11)$$

در نتیجه دمای متوسط هوا برابر است با:

$$T_{ava} = \frac{T_{ia} + T_{oa}}{2} \quad (12)$$

مقدار کل گرمای مبادله شده نیز به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$q_t = q_s + N_A \lambda_A \quad (13)$$

در این رابطه، λ_A گرمای نهان تبخیر آب در دمای متوسط آب موجود روی لوله (T_{1av}) می‌باشد. از سوی دیگر، برای به دست آوردن کل گرمای مبادله شده بر مبنای ضریب انتقال گرما برای فیلم آب واقع بر سطح لوله می‌توان از رابطه ارائه شده توسط مک آدامز [۲۶] به صورت زیر استفاده کرد:

$$h_{av} = 1.51 \left(\frac{k^3 \rho^2 g}{\mu^2} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu L}{4w} \right)^{1/3}$$

در این رابطه، w نشانگر شدت میعان بوده و پارامتر L مبین طول لوله می‌باشد. با جایگذاری شدت انتقال جرم در این رابطه نتیجه می‌شود:

$$Nu_0 = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (1-3)$$

$$10^2 < Re_d < 10^7; Pr_d > 0.2$$

$$Nu_0 = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{1/2} \right] \quad (2-3)$$

$$20000 < Re_d < 400000; Pr_d > 0.2$$

که h_o از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$h_o = \frac{Nu_o k}{d_o} \quad (4)$$

در رابطه (۲) پارامتر N_A شار انتقال جرم است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$N_A = k_G (P_A - P_{A1}) \quad (5)$$

در رابطه بالا، متغیر P_A فشار جزئی بخار آب موجود در هوای ورودی بوده و P_{A1} نشانگر فشار بخار آب در دمای T_{1av} است که از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$P_A = RH \cdot P_A^* \Big|_{T_{ia}} \quad (6)$$

$$P_{A1} = P_A^* \Big|_{T_{1av}} \quad (7)$$

همچنین ضریب انتقال جرم (k_G) از رابطه بدینگ فیلد و درو^۱ برای جریان سیال عمود بر یک لوله به دست می‌آید [۲۵]:

$$Sh = 0.281 Re^{0.5} Sc^{0.44} \quad (8)$$

$$400 < Re_d < 25000; 0.6 < Sc < 2.6$$

$$k_G = \frac{Sh P_t D_{AB}}{P_{B,M} R T d_o} \quad (9)$$

1. Bedingfield and Drew

می‌دهد. روابط مورد نیاز برای تمامی حالات به صورت زیر می‌باشند [۲۴]:

انتقال گرمای جابه جایی اجباری:

جریان درهم (۱-۱۹)

$$Nu_i = 0.036 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{d}{L}\right)^{0.055} \quad 10 < \frac{L}{d} < 400$$

جریان آرام (۲-۱۹)

$$Nu_i = 1.86 (Re Pr)^{1/3} \left(\frac{d}{L}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad Re Pr \frac{d}{L} > 10$$

در معادله فوق μ_w گرانیروی در دمای سطح است. در سرعت‌های نسبتاً پایین نیز که انتقال گرمای ترکیبی اجباری و آزاد اتفاق می‌افتد؛ می‌توان نوشت:

جریان آرام (۳-۱۹)

$$Nu_i = 1.75 \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^{0.14} [Gz + 0.0083 (Gr Pr)^{0.75}]^{1/3}$$

جریان آشفته (۴-۱۹)

$$Nu_i = 4.69 Re^{0.27} Pr^{0.21} Gr^{0.07} \left(\frac{d}{L}\right)^{0.36}$$

در معادلات فوق، μ_b گرانیروی در دمای حجمی و Gz نیز عدد گراهنز می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Gz = Re Pr \frac{d}{L} \quad (20)$$

در نهایت:

$$h_i = \frac{Nu_i k_w}{d_i} \quad (21)$$

با توجه به تغییر دمای آب ورودی و خروجی داخل لوله نیز می‌توان نوشت:

$$h_{av} = 1.51 \left(\frac{k^3 \rho^2 g}{4 \times \mu \times N_A \times M_A \times \pi \times d_o} \right)^{1/3} \quad (14)$$

بنابراین کل گرمای مبادله شده از رابطه زیر نیز به دست می‌آید:

$$q_t = h_{av} \times (T_{1av} - T_2) \quad (15)$$

در این رابطه T_2 دمای سطح خارجی لوله است. با توجه به گرمای مبادله شده از طریق هدایت در لوله می‌توان نوشت:

$$q_t = k_p \frac{(T_2 - T_3)}{r_o \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right)} \quad (16)$$

در معادله فوق، T_3 نشانگر دمای سطح داخلی لوله، و پارامترهای d_i ، d_o ، r_o و k_p به ترتیب شعاع خارجی، قطر خارجی، قطر داخلی و ظرفیت گرمایی لوله مسی می‌باشند. با برابر قرار دادن کل گرمای ورودی به داخل لوله با گرمای ناشی از انتقال گرمای جابه‌جایی داخل لوله نتیجه می‌شود:

$$q_t \frac{r_o}{r_i} = h_i \times (T_3 - T_{avw}) \quad (17)$$

در این رابطه پارامتر T_{avw} متوسط دمای ورودی و خروجی آب است:

$$T_{avw} = \frac{T_{iw} + T_{ow}}{2} \quad (18)$$

همچنین، h_i نیز ضریب انتقال گرما در داخل لوله است. از آن جا که نوع انتقال گرما در داخل لوله بسته به سرعت آب می‌تواند به صورت اجباری یا ترکیبی از انتقال گرمای آزاد و اجباری باشد، ابتدا باید نوع انتقال گرما توسط پارامتر (Gr/Re^2) مشخص شود. اگر $(Gr/Re^2) \ll 1$ باشد در نتیجه انتقال گرما از نوع اجباری است و اگر $(Gr/Re^2) \cong 1$ باشد؛ ترکیبی از انتقال گرمای آزاد و اجباری رخ

جزئی آمونیاک روی سطح آب موجود بر روی لوله صفر در نظر گرفته شده و مجدداً از ضخامت لایه آب تشکیل شده بر روی لوله نیز صرف نظر می‌شود.

بدیهی است که اغلب معادلات این حالت نیز مشابه حالت دوم هستند با این تفاوت که با توجه به اضافه شدن آمونیاک به هوای ورودی، برخی معادلات ناگزیر می‌بایست تغییر نمایند. مثلاً، برای محاسبه ضریب نفوذ هر جزء در این سیستم سه جزئی، باید از ضریب نفوذ مربوطه در مخلوط استفاده شود که به صورت زیر می‌باشد [۲۳]:

$$D_{A,m} = \frac{N_A - y_A \sum_{i=A}^n N_i}{\sum_{i=A}^n \frac{1}{D_{A,i}} (y_i N_A - y_A N_i)} \quad (24)$$

همچنین با توجه به اینکه در این حالت، مشابه دو حالت دیگر، مکانیزم انتقال جرم به صورت نفوذ یک جزء در جزء ساکن دیگر نمی‌باشد؛ لذا برای محاسبه ضریب انتقال جرم باید از ضریب F استفاده گردد که وابسته به مکانیزم انتقال جرم نیست [۲۳]:

$$F_A = \frac{Sh c_t D_{AB}}{d_o} \quad (25)$$

در نتیجه، شار انتقال جرم بخار آب از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$N_A = \alpha_A F_A \ln \frac{\alpha_A - y_{A1}}{\alpha_A - y_A} \quad (26)$$

با توجه به این که غلظت بخار آب در جریان هوا برابر صفر در نظر گرفته شده است، بنابراین مقدار $y_A=0$ می‌باشد. پارامتر α_A نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$N_A = \alpha_A F_A \ln \frac{\alpha_A - y_{A1}}{\alpha_A - y_A} \quad (27)$$

$$\alpha_A = \frac{N_A}{N_A + N_B} \quad (28)$$

$$q_t \times 2\pi r_o L = \dot{m} C_{pw} (T_{ow} - T_{iw}) \quad (22)$$

در این رابطه، \dot{m} شدت جریان آب عبوری می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\dot{m} = \frac{\rho u_w \pi d_i^2}{4} \quad (23)$$

با توجه به معلومات بیان شده در قسمت شرح دستگاه، مجهولات به صورت زیر می‌باشند که از حل معادلات (۱) تا (۲۳) تمامی آنها و به ویژه مجهول اصلی یعنی دمای آب خروجی از لوله محاسبه می‌شوند.

$q_s, \hat{h}, T_{ava}, T_{lav}, N_A, Nu_o, h_o, sh, k_G, \bar{P}_{B,M}, T_{oa}, P_A, P_{A1}, q_t, h_{av}, T_2, T_3, T_{avw}, Nu_i, Gz, h_i, T_{ow}, \dot{m}$

۲-۳ حالت دوم: عبور هوای خشک و تبخیر آب موجود روی لوله ی تراوش پذیر

برخلاف حالت قبل که نیاز به هیچ گونه فرض خاصی نبود، در این حالت، به منظور ساده‌سازی معادلات، باید از فرضیات زیر استفاده شود:

- با توجه به سرعت نسبتاً زیاد هوای عبوری و مقدار کم شار تبخیر آب، از فشار جزئی بخار آب در هوا صرف نظر می‌شود ($P_A=0$).
- ضخامت آب موجود بر روی لوله ناچیز فرض می‌گردد. علیرغم فرضیات فوق، معادلات این حالت نیز مشابه حالت قبل می‌باشند با این تفاوت که با توجه به تغییر جهت انتقال جرم، برای شار انتقال جرم آب، مقداری منفی به دست می‌آید. همچنین با توجه به اینکه از ضخامت آب موجود روی لوله صرف نظر شده است نیاز به محاسبه پارامتر h_{av} نیست و مقدار آن برابر صفر در نظر گرفته می‌شود، در نتیجه $T_w=T_i$ می‌گردد.

۳-۳ حالت سوم: عبور هوای خشک آغشته به آمونیاک و تبخیر آب موجود روی لوله ی تراوش پذیر و جذب آمونیاک

در این حالت نیز، به دلیل انحلال پذیری زیاد آمونیاک در آب، فشار

باید در دمای فیلم محاسبه شوند، به همین جهت نسبت به برآزش خواص سیالات موجود در سیستم بر اساس دما اقدام شد. در ذیل، نتایج حاصل و اثر تغییر برخی متغیرهای عملیاتی بر دمای آب خروجی از لوله در حالات مختلف ارائه شده‌اند.

۴-۱ حالت اول: عبور هوای مرطوب و میعان بخار آب

با توجه به مشخصات ارائه شده در جدول (۱)، دمای آب خروجی داخل لوله ۳۳۳/۶۱ کلوین به دست می‌آید. چنانچه محاسبات بدون در نظر گرفتن انتقال جرم انجام شوند، دمای خروجی برابر ۳۰۵/۲۸ کلوین محاسبه می‌گردد که نشان از تأثیر بسیار زیاد انتقال جرم بر انتقال گرما می‌باشد.

جدول ۱- پارامترهای عملیاتی و مشخصات سیستم مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های انجام شده

پارامتر	واحد	مقدار
نوع لوله	-	مسی
قطر داخلی لوله	سانتی‌متر	۱
قطر خارجی لوله	سانتی‌متر	۲
طول لوله	سانتی‌متر	۲۰
دمای هوای ورودی	کلوین	۳۷۰
سرعت هوای ورودی	متر بر ثانیه	۵
رطوبت نسبی هوای ورودی	-	۱
فشار هوای ورودی	اتمسفر	۱
دمای آب ورودی	کلوین	۳۰۳
سرعت آب ورودی	متر بر ثانیه	۰/۰۵

در شکل (۷) نمودارهای تغییرات دمای آب خروجی بر حسب سرعت هوای ورودی در دو حالت انتقال گرما در حضور و غیاب انتقال جرم رسم شده‌اند. به طوری که ملاحظه می‌گردد، با افزایش سرعت هوا، مقدار ضرایب انتقال گرما و جرم افزایش یافته و در نتیجه به دلیل همسو بودن پدیده‌های انتقال جرم و انتقال گرما،

در این رابطه N_B شار انتقال جرم آمونیاک است. محاسبه F_B ، α_B و N_B نیز مشابه بخار آب است با این تفاوت که میزان جزء مولی آمونیاک در جریان ورودی جزء معلومات مسأله است و در طرف دیگر نیز طبق فرض برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. با توجه به ایجاد دو انتقال جرم، \hat{h} و q_t نیز به صورت زیر تغییر می‌کنند:

$$\hat{h} = \frac{N_A M_A C_{PA} + N_B M_B C_{PB}}{1 - e^{-(N_A M_A C_{PA} + N_B M_B C_{PB})/h_0}} \quad (29)$$

$$q_t = q_s + N_A \lambda_A + N_B \lambda_B \quad (30)$$

با توجه به این که تبخیر آب در خلاف جهت انتقال گرما می‌باشد، لذا در این حالت، مقدار شار انتقال جرم آب منفی بوده ولی شار انتقال جرم آمونیاک کماکان مثبت است. به منظور حل دستگاه معادلات ناخطی حاصل در بخش‌های مختلف (که حاوی ۲۱ تا ۳۰ معادله برای تعیین همین تعداد مجهول می‌باشد)، ابتدا نسبت به حدس اولیه مقادیر T_{Iav} ، T_{aav} و نسبت‌های شارهای انتقال جرم آب و آمونیاک اقدام گردیده و سپس تمامی معادلات ناخطی مذکور به صورت متناوب و یکی پس از دیگری به روش تکرار نقطه ثابت^۱ حل شدند. در نهایت و پس از حل تمامی معادلات، مقادیر پارامترهای حدس زده شده بررسی گردیده و در صورت عدم وقوع همگرایی مطلوب، مجدداً همین روش سعی و خطا تکرار می‌گردد. به منظور تسریع در سرعت همگرایی، حدس‌های بعدی در محدوده جواب از روش نصف کردن^۲ محاسبه شده‌اند.

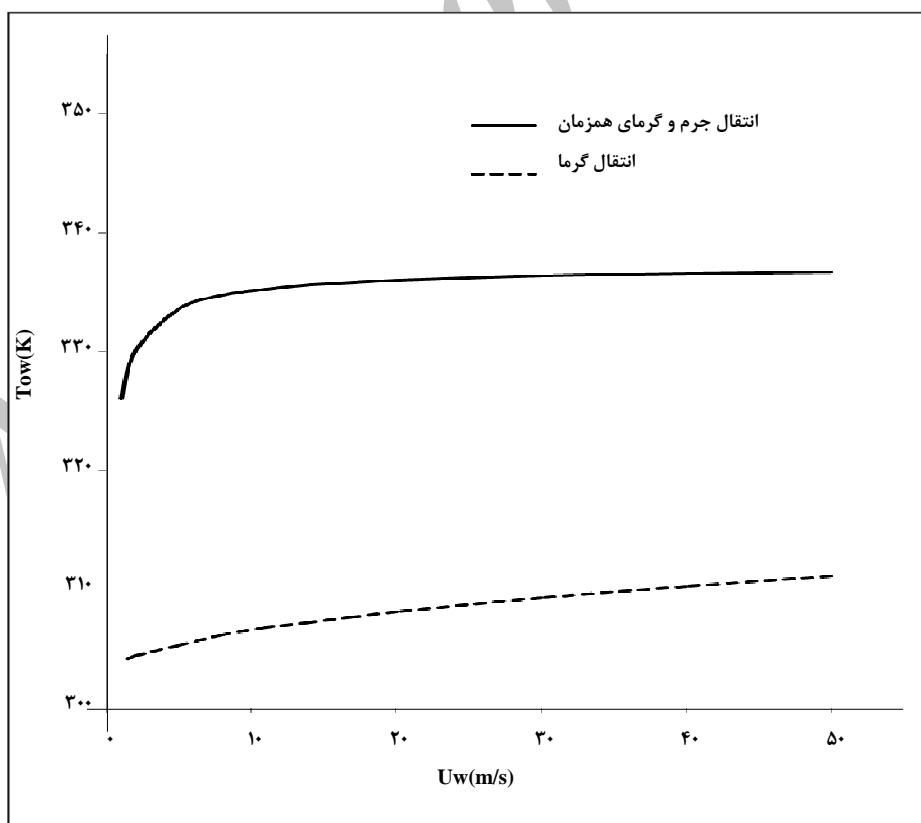
۴- نتایج شبیه‌سازی

همان‌گونه که در قسمت قبل بیان گردید، هدف از نوشتن معادلات و حل آنها به دست آوردن دمای آب خروجی داخل لوله و بررسی نحوه تغییر شرایط بر آن می‌باشد. همچنین هدف از طراحی سه حالت مختلف انتقال جرم و گرمای همزمان، بررسی نحوه تأثیر پدیده‌های میعان، تبخیر و جذب بر ضریب انتقال گرما و کل گرما مبادله شده می‌باشد. از آنجا که در حل معادلات، خواص سیستم

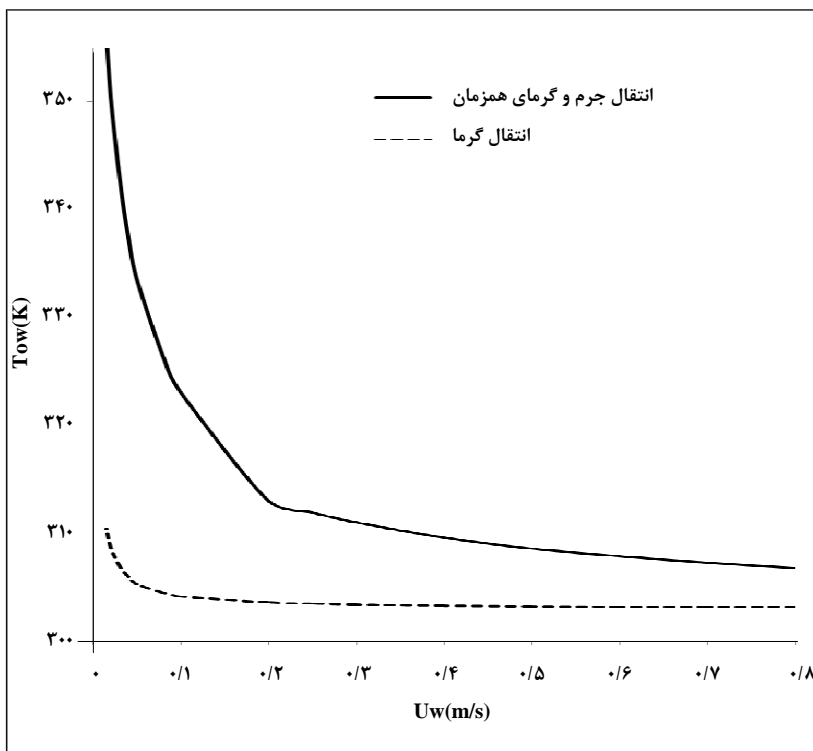
1. Fixed Point Iteration
2. Bisection Method

با افزایش سرعت آب، دمای آب خروجی از لوله کاهش می‌یابد. در شکل (۹) نیز نمودارهای تغییرات دمای آب خروجی بر حسب دمای آب ورودی رسم شده‌اند. با افزایش دمای آب ورودی، اختلاف دمای آب ورودی و خروجی (ΔT) کاهش می‌یابد. علت این پدیده آن است که با افزایش دمای آب ورودی اختلاف دمای کلی بین هوای ورودی و آب ورودی کاهش می‌یابد و در نتیجه میزان انتقال حرارت نیز کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای آب ورودی، دمای آب موجود روی لوله افزایش می‌یابد و در نتیجه فشار جزئی آن افزایش یافته و به تبع آن اختلاف فشار کم و در نتیجه میزان انتقال جرم کاهش می‌یابد که این عامل نیز به کاهش اختلاف دمای آب ورودی و خروجی کمک می‌کند. در حالی که بدون در نظر گرفتن انتقال جرم، افزایش دمای آب ورودی تنها باعث کاهش شیب دمایی می‌گردد.

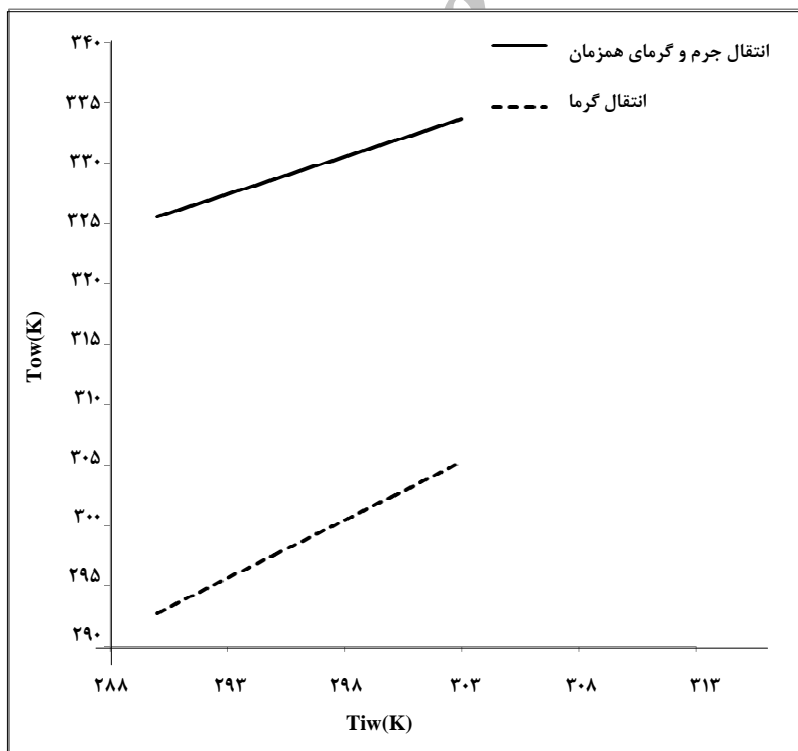
گرمای مبادله شده زیادتر می‌شود و دمای آب خروجی نیز افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده می‌گردد که پدیده انتقال جرم بر انتقال گرما در شدت جریان‌های کمتر هوا به مراتب بیشتر بوده و در شدت جریان‌های بیشتر به دلیل افزایش مقاومت فیلم مایع تشکیل شده بر روی لوله، نرخ افزایش شدت انتقال گرما کاهش می‌یابد. همچنین، شکل (۸) نشانگر تغییرات دمای آب خروجی بر حسب سرعت آب ورودی می‌باشد. با افزایش سرعت آب، دو پدیده بر روی دمای آب خروجی اثر می‌گذارد. اول آنکه مدت اقامت آب داخل لوله کاهش می‌یابد و این عامل باعث کاهش دمای آب خروجی می‌شود. دوم آنکه با افزایش سرعت آب، ضریب انتقال گرما جابه‌جایی داخل لوله افزایش می‌یابد و این عامل باعث افزایش دمای آب خروجی می‌گردد. همان گونه که در شکل (۸) نیز مشخص است، تأثیر مدت اقامت بر دمای آب خروجی بیشتر بوده و به همین دلیل



شکل ۷- نمودار تغییرات دمای آب خروجی بر حسب سرعت هوای ورودی



شکل ۸- نمودار تغییرات دمای آب خروجی بر حسب سرعت آب ورودی



شکل ۹- نمودار تغییرات دمای آب خروجی بر حسب دمای آب ورودی

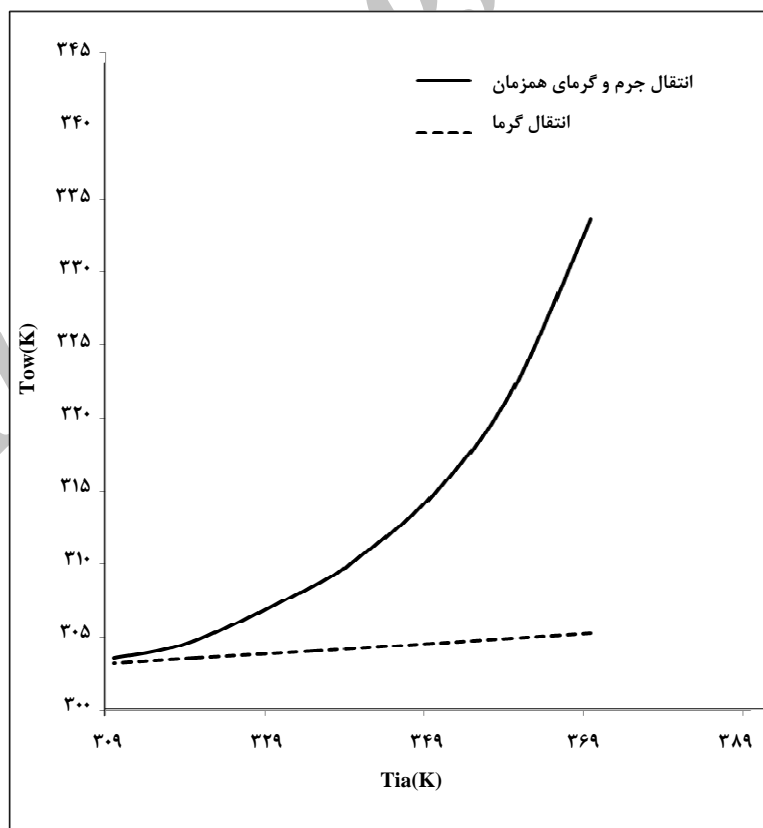
حالت قبل است با این تفاوت که هوای ورودی خشک می‌باشد (رطوبت نسبی صفر). با حل معادلات مربوط به این حالت، دمای آب خروجی از لوله ۳۰۳/۸۷ کلوین (۳۰/۸۷ درجه سلسیوس) به دست می‌آید و نشان دهنده آن است که دمای آب ورودی تغییر چندانی نکرده است. مقایسه دمای آب خروجی در این حالت با حالت قبل به خوبی تأثیر نسبتاً زیاد انتقال جرم بر کل گرمای مبادله شده را نشان می‌دهد. چنانچه محاسبات را بدون در نظر گرفتن انتقال جرم نیز انجام دهیم؛ دمای آب خروجی ۳۰۵/۲۵ کلوین (۳۲/۲۵ درجه سلسیوس) به دست می‌آید. علت کاهش دمای آب خروجی از لوله، متقابل بودن جهات انتقال جرم (تبخیر آب) و انتقال گرما می‌باشد. همچنین به دلیل آن که شدت انتقال جرم در این حالت به مراتب کمتر از حالت قبل است، لذا به جای حدود ۲۸ درجه اختلاف دمای قبلی تنها ۲ درجه کاهش دما مشاهده می‌شود.

در شکل (۱۰) نمودار تغییرات دمای آب خروجی بر حسب دمای هوای ورودی رسم شده است. با کاهش دمای هوای ورودی، دمای آب خروجی نیز کاهش می‌یابد که علت آن مانند حالت قبل، کاهش میزان انتقال جرم و کاهش گرادیان دما می‌باشد.

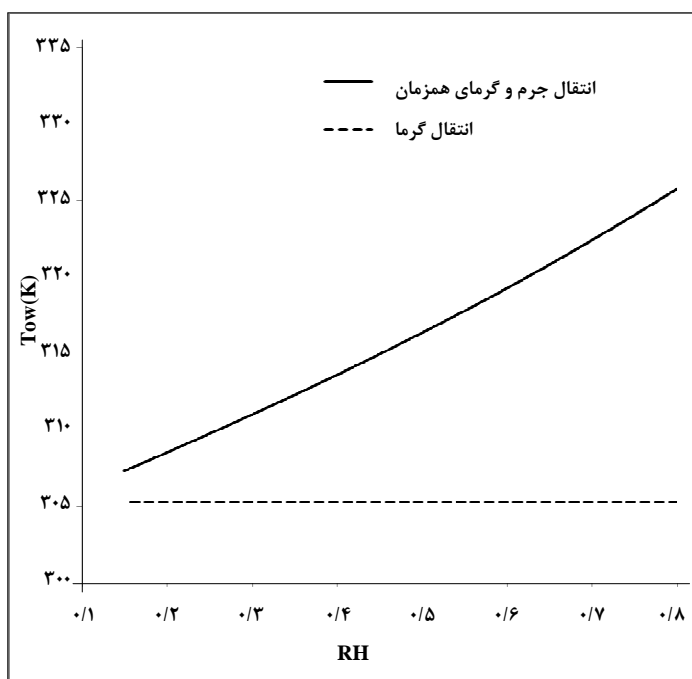
در شکل (۱۱) نمودار تغییرات دمای آب خروجی در مقابل رطوبت نسبی هوای ورودی رسم شده است. با کم شدن رطوبت نسبی، انتقال جرم کمتر می‌شود و بنابراین دمای آب خروجی کاهش می‌یابد. در حالی که برای حالت بدون انتقال جرم، تغییر رطوبت نسبی تنها باعث تغییر خواص سیستم می‌گردد و همان گونه که در شکل مشخص است، تأثیر چندانی بر دمای آب خروجی از لوله ندارد.

۲-۴ حالت دوم: عبور هوای خشک و تبخیر آب موجود روی لوله تراوش پذیر

مشخصات سیستم و پارامترهای عملیاتی در این حالت نیز مشابه



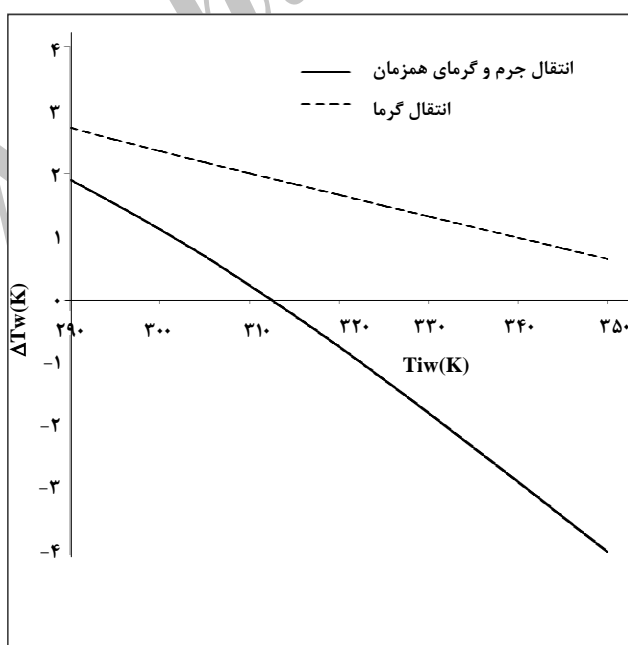
شکل ۱۰- نمودار تغییرات دمای آب خروجی بر حسب دمای هوای ورودی



شکل ۱۱- نمودار تغییرات دمای آب خروجی بر حسب رطوبت نسبی هوای ورودی

آب و در نتیجه کاهش انتقال گرما می‌باشد. در صورتی که برای حالت بدون انتقال جرم، با افزایش دمای آب ورودی تنها گرادیان دمایی کاهش می‌یابد و تا زمانی که دمای آب ورودی از هوای ورودی بیشتر نشود؛ اختلاف دما مقداری مثبت خواهد بود.

در شکل (۱۲) نمودار تغییرات اختلاف دمای آب ورودی و خروجی در مقابل دمای آب ورودی رسم شده است. در این حالت با افزایش دمای آب ورودی، اختلاف دمای آب ورودی و خروجی کاهش می‌یابد. علت این امر افزایش فشار جزئی بخار آب و در نتیجه افزایش انتقال جرم و همچنین کاهش میزان اختلاف دما بین هوا و



شکل ۱۲- نمودار تغییرات اختلاف دمای آب ورودی و خروجی بر حسب دمای آب ورودی

آمونیاک را نشان می‌دهد که در آن میزان انتقال جرم آب و آمونیاک برابرند و تنها گرمای محسوس منتقل شده باعث تغییر دمای آب داخل لوله شده است.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت کاربردی فرایندهای انتقال جرم و گرمای همزمان، در این مقاله نسبت به انجام مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایندهای مذکور در جابه‌جایی اجباری در داخل و خارج لوله اقدام شد. برای بررسی نحوه تأثیر انتقال جرم بر ضریب انتقال گرما و کل گرمای مبادله شده، سه حالت میعان، تبخیر و جذب همراه تبخیر شبیه‌سازی گردیدند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده مذکور حاکی از آن است که در تمامی حالات فوق‌الذکر، انتقال جرم تأثیر قابل توجهی در گرمای مبادله شده دارد و اغماض از آن می‌تواند باعث خطای زیادی در محاسبات شود. در مواردی که انتقال جرم و انتقال گرما همسو باشند، پدیده انتقال جرم موجب افزایش شار حرارتی گردیده و چنانچه انتقال جرم و انتقال گرما در جهات متقابل صورت گیرند، فرایند انتقال جرم موجب کاهش شار حرارتی می‌شود. بدیهی است که در صورت وجود دو فرایند انتقال جرم همسو و متقابل با انتقال گرما، می‌توان انتظار داشت که به دلیل تقابل دو پدیده انتقال جرم با یکدیگر، کمترین تأثیر بر ضریب انتقال گرما اعمال می‌شود.

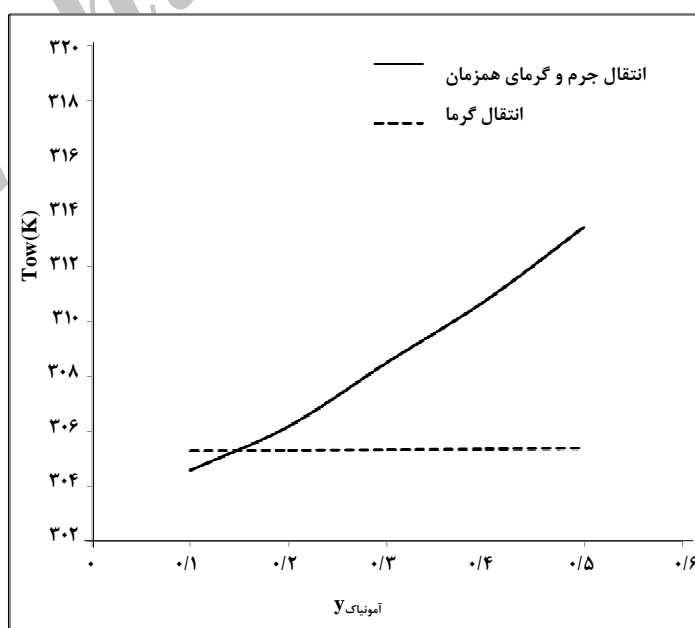
۴-۳ حالت سوم: عبور هوای خشک آغشته به آمونیاک و

تبخیر آب موجود روی لوله تراوش پذیر و جذب آمونیاک

شرایط سیستم و پارامترهای عملیاتی در این حالت نیز مشابه حالت اول است با این تفاوت که هوای ورودی خشک (رطوبت نسبی صفر) و آغشته به آمونیاک با جزء مولی ۰/۳ می‌باشد. با حل معادلات این حالت، دمای آب خروجی ۳۰۸/۵ کلوین به دست می‌آید. این دما نشان‌دهنده آن است که تأثیر انتقال گرما به همراه جذب آمونیاک از شدت تأثیر تبخیر آب بر دمای آب خروجی از لوله بیشتر است. چنانچه محاسبات را بدون در نظر گرفتن انتقال جرم نیز انجام دهیم؛ دمای آب خروجی ۳۰۵/۳۵ کلوین به دست می‌آید.

به عبارت دیگر، متفاوت بودن جهت انتقال جرم و گرما در این حالت موجب می‌شود تا بخشی از گرمای آورده شده توسط انتقال جرم آمونیاک، به وسیله آب تبخیر شده به جریان هوا بازگردد.

در شکل (۱۳) نمودار تغییرات دمای آب خروجی در مقابل جزء مولی آمونیاک رسم شده است. کاهش غلظت آمونیاک برای حالت بدون انتقال جرم، تنها باعث تغییر مقدار خواص سیستم می‌شود که تأثیر چندانی بر دمای آب خروجی ندارد. ولی چنانچه انتقال جرم نیز در نظر گرفته شود، هر چه غلظت آمونیاک کاهش یابد میزان انتقال جرم آن نیز کاهش می‌یابد که این عامل باعث کاهش شدید دمای آب خروجی می‌گردد. نقطه تقاطع دو منحنی، غلظتی از



شکل ۱۳- نمودار تغییرات دمای آب خروجی بر حسب جزء مولی آمونیاک ورودی

- [1] Bui, V. A., Vu, L. T. T., Nguyen, M. H., "Modeling the simultaneous heat and mass transfer of direct contact membrane distillation in hollow fiber modules", *Journal of Membrane Science*, V.353, 85-93(2010).
- [2] Sakin, M., Ertekin, F. K., Ilicali, C., "Simultaneous heat and mass transfer simulation applied to convective oven cup cake baking", *Journal of Food Engineering*, V.83, 463-474, (2007).
- [3] Barati, E., Esfahani, J. A., "A new solution approach for simultaneous heat and mass transfer during convective drying of mango", *Journal of Food Engineering*, V.102, 302-309, (2011).
- [4] Melendez, G. P., Hernandez, J. A., Salgado, M. A., Garcia, M. A., "Dimensionless analysis of the simultaneous heat and mass transfer in food drying", *Journal of Food Engineering*, V.51, 347-353, (2002).
- [5] Nemenyi, M., Czaba, I., Kovacs, A., Jani, T., "Investigation of simultaneous heat and mass transfer within the maize kernels during drying", *Computers and Electronics in Agriculture*, V.26, 123-135, (2000).
- [6] Datta, A. K., "Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations", *Journal of Food Engineering*, V.80, 80-95, (2007).
- [7] Datta, A. K., "Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. II: Property data and representative results", *Journal of Food Engineering*, V.80, 96-110, (2007).
- [8] Simpson, R. J., Almonacid, S. F., Acevedo, C. A., Cortes, C. A., "Simultaneous heat and mass transfer applied to non-respiring foods packed in modified atmosphere", *Journal of Food Engineering*, V.61, 279-286, (2004).
- [9] Sharqawya, M. H., Zubair, S. M., "Performance and optimum geometry of spines with simultaneous heat and mass transfer", *International Journal of Thermal Sciences*, V.48, 2130-2138, (2009).
- [10] Kundu, B., Barman, D., Debnath, S., "An analytical approach for predicting fin performance of triangular fins subject to simultaneous heat and mass transfer", *International journal of refrigeration*, V.31, 1113-1120, (2008).
- [11] Kundu, B., "Performance and optimization analysis of SRC profile fins subject to simultaneous heat and mass transfer", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V.50, 1545-1558, (2007)
- [12] Kundu, B., "Performance and optimum design analysis of longitudinal and pin fins with simultaneous heat and mass transfer: Unified and comparative investigations", *Applied Thermal Engineering*, V.27, 976-987, (2007).
- [13] Xia, Y., Jacobi, A. M., "Air-side data interpretation and performance analysis for heat exchangers with simultaneous heat and mass transfer: Wet and frosted surfaces", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V.48, 5089-2102, (2005).
- [14] Ribeiro, C. P., Borges, C. P., Lage, P. C., "Modeling of direct-contact evaporation using a simultaneous heat and multi-component mass transfer model for superheated bubbles", *Chemical Engineering Science*, V.60, 1761-1772, (2005).
- [15] Elperin, T., Fominykh, A., Orenbakh, Z., "Simultaneous Convective Heat and mass transfer during gas bubble dissolution in an alternating electric field", *Chemical engineering research and design*, V.83, 1237-1245, (2005).
- [16] Elperin, T., Fominykh, A., "Four stages of the simultaneous mass and heat transfer during bubble formation and rise in a bubbly absorber", *Chemical Engineering Science*, V.58, 3555-3564, (2003).
- [17] Campos, F. B., Lage, P. L. C., "Simultaneous heat and mass transfer during the ascension of superheated bubbles", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V.43, 179-189, (2000).
- [18] Slesser, C. G. M., Cleland, D., "surface evaporation by forced convection I. Simultaneous heat and mass transfer", *International Journal of Heat Mass Transfer*, V. 5, 735-749, (1962).
- [19] Sripada, R. K. L., Angirasa, D., "Simultaneous heat and mass transfer by natural convection above upward facing horizontal surfaces", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, V.36, 1019-1029, (2001).
- [20] Seara, J. F., Sieres, J., Vazquez, M., "Simultaneous heat and mass transfer of a packed distillation column for ammonia-water absorption refrigeration systems", *International Journal of Thermal Sciences*, V.41, 927-935, (2002).
- [21] Pirompugd, W., Wongwises, S., Wang, C. C., "Simultaneous heat and mass transfer characteristics for wavy fin-and-tube heat exchangers under dehumidifying conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, V.49, 132-143, (2006).
- [22] Khani, F., Aziz, A., Nezhad, S. H., "Simultaneous heat and mass transfer in natural convection about an isothermal vertical plate", *Journal of King Saud University (Science)* (2010).
- [23] Treybal, R. E., "Mass-transfer operations", 3d ed., McGraw-Hill book company, New York, (1980).
- [24] Holman, J. P., "Heat transfer", 9d ed., McGraw-Hill book company, New York, (2002).
- [25] Welty, J. R., Wicks, Ch. E., Wilson, R. E. Rorrer, G., "Fundamentals of momentum heat & mass transfer", Fourth edition, John Wiley & Sons, (2001).
- [26] Adams, M. C., "Heat transmission", 3d ed., McGraw-Hill book company, New York, (1954).