

یک روش تحلیلی برای حل معادلات رطوبت‌زدایی هوا به وسیله دسیکنت مایع، در رطوبت‌زدا

مرتضی مرتضایی*
مرتضی یاری

دانشجوی دکترا، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی مهندسی
دانشیار، دانشگاه تبریز، دانشکده فنی مهندسی مکانیک

چکیده

سیستم‌های تبرید و رطوبت‌زدای دسیکنت یکی از روشهای نوین برای تبرید و تهویه مطبوع می‌باشد که در این روش بایک سری فعل و انفعالات رطوبت هوا حذف می‌شود و سپس هوا به واحد سرمایش فرستاده می‌شود، که با اینکار بار نهان حذف می‌گردد و در انرژی مصرفی صرفه‌جویی می‌شود. مهمترین قسمت این سیکل رطوبت‌زدای آن می‌باشد. در این مقاله ابتدا معادلات حاکم بر انتقال گرما و جرم نوشته شده‌اند و سپس این معادلات با فرض اینکه کسر مولی آب در هوا در سطح مشترک هوا و مایع دسیکنت ثابت باشد، به روش تحلیلی حل شده‌اند، فرض ثابت بودن کسر مولی آب در هوا، در سطح مشترک هوا و دسیکنت زمانی به واقعیت نزدیک‌تر است که دبی دسیکنت مایع زیاد باشد، که در اکثر کاربردهای عملی نیز اینگونه می‌باشد. نتایج حل تحلیلی با نتایج تجربی موجود در مقالات و نیز با نتایج حل عددی مقایسه شده‌است که این مقایسه نشان می‌دهد که حل تحلیلی صورت گرفته صحیح بوده و این حل می‌تواند جایگزین حل عددی گردد. شایان ذکر است که داده‌های ارائه شده برای دسیکنت LiCl می‌باشد

واژه‌های کلیدی: دسیکنت مایع، انتقال گرما و جرم همزمان، رطوبت‌زدا، کارایی

An Analytical Solution for Air Dehumidification by Liquid Desiccant in a Packed Column

M. Mortazaei

PhD Student, Mohaghegh Ardabili University, Faculty of Technical and Engineering

M. Yari

Associate Professor, University of Tabriz, Faculty of Mechanical Engineering

Abstract

Refrigeration systems and dehumidification by desiccant are a novel method for refrigeration and air conditioning. In this method moist of air removed, and then dehumidified air send to cooling unit, that this process, latent load of vapor is eliminated, and rate of using energy is reduced. The important part of this cycle is dehumidifier of it. In this paper, at the first, the governing equations of coupled heat and mass transfer have been written, then, these equations have been solved analytically with applying some simplifying assumptions such as being constant of molar fraction of the water vapor in the air, in the gas-liquid interface. model and the analytical solution predictions were compared against a reliable set of experimental data available in the literature, with very good agreement. It should be said that, using solution in present study is lithiumchlorid (LiCl).

Keywords: Liquid desiccant, Simultaneously heat and mass transfer, Dehumidifier, Effectiveness

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mortazaei@uma.ac.ir

۱- مقدمه

سیستم‌های رطوبت‌زدای دسیکنت یکی از روش‌های جدید بکار برده شده در رطوبت‌زدایی و سیکل‌های تبرید و تهویه مطبوع است. با توجه به اینکه این روش بازده بالایی دارد و در آن گرمای نهان مربوط به چگالیده شدن آب حذف می‌شود، و همچنین به خاطر اینکه در این روش از انرژی‌های سطح پایین مانند انرژی خورشیدی، انرژی زمین گرمایی، زیست توده و انرژی‌های پسماند صنایع و غیره استفاده می‌شود، لذا محققان بسیاری در این زمینه دست به تحقیق و بررسی و مطالعه زده‌اند. از جمله این محققان فومو و همکاران [۱] می‌باشند. آنها به صورت آزمایشگاهی در یک رطوبت‌زدا براساس دماها و دبی‌های مختلف هوا و همچنین غلظت‌ها و دبی‌های مختلف مایع دسیکنت در ورودی، نتایج را بدست آورده و با نتایج حاصل از حل عددی مقایسه کردند. گاندهیداسان [۲] در عربستان سعودی کارهای مطالعاتی در مورد رطوبت زدا انجام داد. وی قبل از ورود دسیکنت به رطوبت زدا آن را از یک مبادله‌کن گرمایی عبور داد و دمای دسیکنت ورودی به مبادله‌کن را کاهش داد، سپس تاثیرات کارایی مبادله‌کن گرمایی ϵ_{HE} و نیز تاثیرات دمای ورودی سیال خنک مبادله‌کن را بر روی شدت چگالش آب بررسی نمود. یونگا او و همکاران [۳] مدلی را برای رطوبت‌زدا در حالتی که به صورت داخلی سرد می‌شد (یعنی آدیاباتیک نبود)، ارائه کردند و پس از تأیید صحت مدل در مقایسه با نتایج تجربی، به مقایسه آن با حالت آدیاباتیک پرداختند. نتایج نشان داد که در حالت سرمایش در رطوبت‌زدا کارایی افزایش می‌یابد و شدت چگالش آب در رطوبت‌زدا افزایش چشمگیری دارد. دای و همکاران [۴] انتقال گرما و جرم را در رطوبت‌زدهای فشرده‌ی ساخته شده با کاغذهای شانه‌ی عسل (لانه زنبوری) بررسی و تحلیل نمودند. دونگن پنگ و همکاران [۵]، ابتدا یک سیستم بازیاب خورشیدی را که انرژی لازم برای احیا را توسط کلکتورهای خورشیدی می‌گرفت، شبیه‌سازی کردند و سپس به حل معادلات حاکم بر انتقال گرما و جرم کوپل شده، در آن پرداختند. یونس احمد و همکاران [۶]، آنالیز ترمودینامیکی را بر روی دسیکنت مایع انجام دادند، آنها خواص دسیکنت‌ها را با استفاده از ترمودینامیک کلاسیک پیشگویی کردند و نتایج حاصل را برای لیتیم کلراید با نتایج تجربی مقایسه نمودند. چن کین رن [۷]، رطوبت زدا و بازیاب و روابط مربوط به انتقال گرما و جرم آنها را مورد مطالعه قرار داد و در نهایت با استفاده از نتایج حاصله رابطه‌ای را برای کارایی برحسب NTU ارائه نمودند. شهاب عزیزاده و سامان [۸]، در یک مطالعه تحقیقات تجربی گسترده‌ای بر روی احیای دسیکنت مایع انجام دادند. آنها با ساخت یک بازیاب که انرژی خود را از کلکتورهای خورشیدی

دریافت می‌کرد و جریان هوا در این کلکتور از نوع جریان اجباری بود و دسیکنت آن کلرید کلسیم بود، اثر دبی جرمی هوا و دسیکنت و نیز اثر شرایط آب و هوایی را بر روی عملکرد بازیاب مطالعه نمودند آگونگ بختیار و همکاران [۹] در یک مطالعه ضریب عملکرد رطوبت زدا دسیکنت مایع را بررسی نموده و در پایان مطالعات مدعی به ارائه روشی جدید برای محاسبه ضریب عملکرد شدند. فو خیا او و همکاران [۱۰]، به مطالعه عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوعی پرداختند که اساس کار آنها رطوبت زدایی با استفاده از دسیکنت مایع بود. سه ایچی یاماگوچی و همکاران [۱۱]، در توکیو مطالعات تجربی و عددی گسترده‌ای را بر روی سیستم‌های تهویه مطبوع دسیکنت مایع انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که در شهر توکیو ژاپن، با استفاده از سیستم رطوبت زدا دسیکنت مایع، تا سقف (کیلوگرم هوای خشک / g_{H_2O}) ۵.۹، از هوا رطوبت گرفت. مازی و همکاران [۱۲]، سیستم‌های سرمایش دسیکنت هیبریدی را برای کشور ایتالیا از لحاظ هزینه اولیه و راه‌اندازی بررسی و نشان داده‌اند که در سرمایش دسیکنت هزینه‌های جاری در مقایسه با سیستم‌های سرمایش تراکمی کاهش می‌یابد و بیان کرده‌اند که دوره بازپرداخت این سیستم‌ها ۲-۳ سال است.

در این مقاله برآن شدیم که یک حل تحلیلی برای حل معادلات بهم پیوسته انتقال گرما و جرم بنویسیم به گونه‌ای که اولاً نتایج حاصل از این حل قابل قبول باشد و ثانیاً به کمک آن بتوان معادلات انتقال گرما و جرم را جدای از هم حل نمود. به منظور نوشتن چنین حلی فرض را بر آن می‌گیریم که کسر مولی بخار آب در هوا در سطح مشترک هوا و مایع دسیکنت ثابت بماند و نهایتاً نتایج حاصل از این حل را با حل عددی و نتایج تجربی مقایسه می‌کنیم تا صحت این حل مشخص شود.

۲- مدل ریاضی حاکم بر انتقال گرما و جرم بین جریان هوا و مایع دسیکنت در حالت آدیاباتیک

مدل تئوری انتقال گرما و جرم آدیاباتیک از گاز(هوا) توسط تری بال [۱۳] توسعه داده شده است. طرحواره فرایندهای انتقال گرما و جرم بین هوا و محلول (مایع دسیکنت) در شکل ۱ نشان داده شده است.

برای این مدل فرضهای زیر در نظر گرفته شده است.

- اتلاف انرژی گرمایی قابل صرفنظر است.
- مقاومت گرمایی در قسمت مایع نسبت به بخش گاز ناچیز و قابل صرفنظر است.

برای گرمای منتقل شده از جریان هوا به دسیکنت می‌توان نوشت:

$$q_G \cdot a_t \cdot dZ = -h_G' \cdot a_t \cdot (T_L - T_a) \cdot dZ \quad (9)$$

رابطه (۱۰) توسط تری بال ارائه شده است.

$$h_G' \cdot a_t = \frac{-G \cdot c_{pv} \cdot \left(\frac{dY}{dZ} \right)}{1 - \exp \left(\frac{G \cdot c_{pv} \cdot \left(\frac{dY}{dZ} \right)}{H_G \cdot a_t} \right)} \quad (10)$$

با توجه به اینکه آنتالپی هوا تابعی از دمای هوا و نسبت رطوبت آن است داریم:

$$h_a = h_a(T_a, Y) \rightarrow dh_a = \frac{\partial h_a}{\partial T_a} dT_a + \frac{\partial h_a}{\partial Y} dY \quad (11)$$

از روابط (۷) و (۱۱) داریم:

$$dh_a = (c_{pa} + Y \cdot c_{pv}) \cdot dT_a + [c_{pv}(T_a - T_o) + \lambda_o] \cdot dY \quad (12)$$

و از ترکیب روابط (۳) و (۶) و (۸) و (۹) داریم:

$$dh_a = \frac{h_G' \cdot a_t \cdot (T_L - T_a) \cdot dZ}{G} + [c_{pv}(T_a - T_o) + \lambda_o] \cdot dY \quad (13)$$

از مقایسه روابط (۱۲) و (۱۳)، رابطه دیفرانسیلی مربوط به تغییرات دمای هوا در طول رطوبت‌زدا بصورت زیر بدست می‌آید.

$$\frac{dT_a}{dZ} = \frac{h_G' \cdot a_t \cdot (T_L - T_a)}{G \cdot (c_{pa} + Y \cdot c_{pv})} \quad (14)$$

از موازنه انرژی برای کل المان داریم:

$$G \cdot h_a + (L + \delta \cdot dL) \cdot (h_L + \delta \cdot dh_L) = G \cdot (h_a + dh_a) + L \cdot h_L \quad (15)$$

که از آن نتیجه می‌شود:

$$L \cdot dh_L + h_L \cdot dL = \delta \cdot G \cdot dh_a \quad (16)$$

برای آنتالپی مایع دسیکنت داریم:

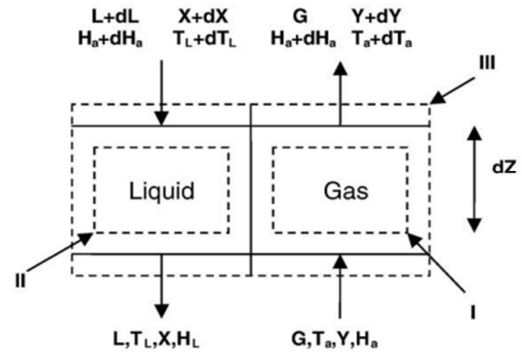
$$dh_L = c_{pL} \cdot dT_L \Rightarrow h_L = c_{pL} \cdot (T_L - T_o) \quad (17)$$

از ترکیب روابط (۲) و (۱۲) و (۱۶) و (۱۷)، رابطه دیفرانسیلی مربوط به تغییرات دمای دسیکنت در طول مبادله‌کن بصورت زیر بدست می‌آید.

$$\frac{dT_L}{dZ} = \frac{\delta \cdot G}{L \cdot c_{pL}} \left\{ \left(c_{pa} + Y \cdot c_{pv} \right) \cdot \frac{dT_a}{dZ} + \left[c_{pv} \cdot (T_a - T_o) + \lambda_o - c_{pL} \cdot (T_L - T_o) \right] \cdot \frac{dY}{dZ} \right\} \quad (18)$$

با توجه به اینکه دبی جرمی نمک دسیکنت (لیتمیم کلراید) موجود در محلول ثابت است داریم:

$$L \cdot X = \text{const.} \rightarrow d(L \cdot X) = 0 \rightarrow L \cdot dX + X \cdot dL = 0 \quad (19)$$



شکل ۱- طرحواره فرایندهای انتقال گرما و جرم در رطوبت‌زدا جریان مخالف

- مساحت انتقال گرما و جرم باهم مساوی و برابر با سطح مخصوص برج رطوبت‌زدا است.
- از تبخیرات دسیکنت صرف نظر شده است.
- از گرمای اختلاط صرف‌نظر می‌شود.
- فرایندهای انتقال گرما و جرم پایا هستند.

در به دست آوردن معادلات حاکم بر انتقال گرما و جرم از ثابت δ استفاده خواهیم کرد، تا معادلات را برای هر دو حالت جریان موافق و جریان موازی تعمیم دهیم، به گونه ای که اگر $\delta = 1$ ، معادلات مربوط به حالت جریان مخالف و اگر $\delta = -1$ ، معادلات مربوط به حالت جریان موازی خواهد بود.

معادله پایستگی جرم برای المان فوق چنین است:

$$L + \delta \cdot dL + G \cdot Y = L + G(Y + dY) \quad (1)$$

که نتیجه می‌شود:

$$\delta \cdot dL = G \cdot dY \quad (2)$$

معادله بقای جرم برای رطوبت موجود در هوا به صورت زیر می‌باشد:

$$N_v \cdot M_v \cdot a_t \cdot dZ + G \cdot (Y + dY) = G \cdot Y \quad (3)$$

که N_v دبی مولی ویژه سطح می‌باشد.

$$N_v = F_G \cdot \text{Ln} \left(\frac{1 - y_i}{1 - y} \right) \quad (4)$$

از روابط (۳) و (۴) نتیجه می‌شود:

$$\frac{dY}{dZ} = - \frac{N_v \cdot F_G \cdot a_t}{G} \text{Ln} \left(\frac{1 - y_i}{1 - y} \right) \quad (5)$$

موازنه انرژی برای جریان هوا به شکل زیر است:

$$q_G \cdot a_t \cdot dZ + N_v \cdot M_v \cdot a_t \cdot h_v \cdot dZ + G \cdot (h_a + dh_a) = G \cdot h_a \quad (6)$$

آنتالپی هوا و بخار آب بصورت زیر می‌باشند، که λ_o گرمای نهان تبخیر آب در دمای T_o می‌باشد.

$$h_a = c_{pa} \cdot (T_a - T_o) + Y \cdot [c_{pv} \cdot (T_a - T_o) + \lambda_o] \quad (7)$$

$$h_v = c_{pv} \cdot (T_a - T_o) + \lambda_o \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{aligned} dNTU &= \frac{M_a \cdot F_G \cdot a_t}{G} dz \\ Le &= \frac{h'_G}{M_a \cdot F_G \cdot c_{pa}} \\ R &= \frac{G \cdot c_{pa}}{Lc_{pL}} \\ M &= \frac{M_v}{M_a} \\ c_{pm} &= c_{pa} + Y \cdot c_{pv} \\ R_c &= \frac{c_{pa}}{c_{pm}} \\ R_m &= \frac{G}{L} \\ \bar{h} &= \frac{c_{pv} \cdot (T_a - T_o) + \lambda_o - c_{pL} \cdot (T_L - T_o)}{c_{pa}} \end{aligned} \right. \quad (29)$$

در تعاریف فوق $dNTU$ ، دیفرانسیل واحد انتقال جرم، Le ، عدد لوئیس، R ، نسبت ظرفیت گرمایی هوا به مایع، M ، نسبت جرم مولی آب به جرم مولی هوا، c_{pm} ، گرمای ویژه هوای مرطوب، R_c ، نسبت گرمای ویژه هوای خشک به هوای مرطوب، R_m ، نسبت ظاهری دبی جرمی هوا به دبی جرمی مایع، $\bar{h}$ ، گرمای نرمال شده جذب آب می‌باشد.

حال با استفاده از تعاریف فوق معادلات دیفرانسیلی نسبت رطوبت، دمای هوا، دمای دسیکنت، غلظت دسیکنت و دبی جرمی دسیکنت بصورت زیر در می‌آیند:

$$\frac{dY}{dNTU} = -M \cdot \ln \left(\frac{1-y_i}{1-y} \right) \quad (30)$$

$$\frac{dT_a}{dNTU} = -Le \cdot R_c \cdot (T_a - T_L) \quad (31)$$

$$\frac{dT_L}{dNTU} = -\delta \cdot R \cdot \left[Le \cdot (T_a - T_L) + \bar{h} \cdot M \cdot \ln \left(\frac{1-y_i}{1-y} \right) \right] \quad (32)$$

$$\frac{dX}{dNTU} = \delta \cdot R_m \cdot X \cdot M \cdot \ln \left(\frac{1-y_i}{1-y} \right) \quad (33)$$

$$\frac{dL}{dNTU} = -\delta \cdot G \cdot M \cdot \ln \left(\frac{1-y_i}{1-y} \right) \quad (34)$$

همانگونه که قبلاً ذکر گردید برای حالت جریان مخالف $\delta = 1$ و برای حلت جریان موازی $\delta = -1$ است.

کارایی در رطوبت زدا به صورت جرم انتقال یافته تقسیم بر مقدار بیشینه انتقال جرمی که می‌تواند صورت دهد تعریف می‌شود. در زیر این رابطه را برای رطوبت‌زدا می‌آوریم:

$$\varepsilon = \frac{Y_{in} - Y_{out}}{Y_{in} - Y_i} \quad (35)$$

$$dX = -\frac{X}{L} \cdot dL \rightarrow dX = -\delta \cdot \frac{X}{L} \cdot G \cdot dY \quad (20)$$

و در نهایت رابطه دیفرانسیلی مربوط به تغییرات غلظت دسیکنت در طول برج به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\frac{dX}{dZ} = -\delta \cdot \frac{G}{L} \cdot X \cdot \frac{dY}{dZ} \quad (21)$$

در روابط فوق F_G به عنوان ضریب انتقال جرم نوع F (F-type) می‌باشد و بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$F_G = K_G \cdot P \quad (22)$$

که در آن P فشار کلی سیستم است که در شرایط معمولی برابر فشار محیط (اتمسفر) می‌باشد، همچنین K_G نیز ضریب انتقال جرم نوع K (K-type) می‌باشد.

گرمای ویژه دسیکنت (c_{pL}) از رابطه ارائه شده توسط پدرو جی ماگو [۱۴] به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\begin{aligned} c_{pL} &= (3.90446 + 0.01743T_L - 0.0002647T_L^2) \\ &+ (-3.57625 - 0.090554T_L + 0.001391T_L^2)x \\ &+ (0.26192 - 0.11345T_L - 0.0017421T_L^2)x^2 \end{aligned} \quad (23)$$

اوندا و همکاران [۱۵]، رابطه تجربی را برای K_G ، بصورت زیر ارائه کردند:

$$K_G = 5.236 \left(\frac{q \cdot D_G}{RT_a} \right) \left(\frac{G}{q \cdot \mu_G} \right)^{0.7} \left(\frac{\mu_G}{\rho_G \cdot D_G} \right)^{1/3} (q \cdot d_p)^{-2} \quad (24)$$

همچنین برای یافتن رابطه ای برای H_G از آنالوژی انتقال گرما و جرم به صورت زیر استفاده می‌کنیم:

$$j_h = \frac{H_G}{G \cdot (c_{pa} + Y \cdot c_{pv})} Pr^{2/3} = j_m = \frac{F_G \cdot M_a}{G} Sc^{2/3} \quad (25)$$

$$H_G = F_G \cdot M_a \cdot (c_{pa} + Y \cdot c_{pv}) \cdot \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (26)$$

که در آن Sc ، عدد اشمیت و Pr عدد پرانتل می‌باشند و بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Sc = \frac{\mu_G}{\rho_G \cdot D_G} \quad (27)$$

$$Pr = \frac{\mu_G \cdot (c_{pa} + Y \cdot c_{pv})}{K} \quad (28)$$

حال برای ساده سازی معادلات تعاریف زیر را مطرح می‌کنیم.

با حل معادله دیفرانسیل فوق به وسیله یک انتگرال گیری ساده داریم:

$$\frac{Y'}{(Y-Y_i)} = -\alpha \rightarrow \ln\left(\frac{Y-Y_i}{C_2}\right) = -\alpha.NTU \quad (42)$$

$$\rightarrow Y = Y_i + C_1 \cdot \exp(-\alpha.NTU)$$

با اعمال شرایط مرزی ثابت C_1 در معادله فوق به دست می آید:

$$NTU = 0 \rightarrow Y = Y_{in} \quad (43)$$

$$C_2 = Y_{in} - Y_i \quad (44)$$

نهایتاً معادله جدید نسبت رطوبت بصورت زیر بدست می آید:

$$Y = Y_i + (Y_{in} - Y_i) \cdot \exp(-\alpha.NTU) \quad (45)$$

برای یافتن پروفیل دمای هوا در طول رطوبت زدا، به دلیل کوپل بودن معادله دمای هوا و دسیکنت از معادله دمای هوا دو بار مشتق می گیریم.

$$T_a'' = -Le.R_c(T_a' - T_L') \quad (46)$$

با استفاده از معادله (۳۳) داریم:

$$T_a'' = -Le.R_c \left\{ T_a' + \delta.R.Le.(T_a - T_L) \right. \\ \left. + \delta.R.h.M.(y - y_i) \right\} \quad (47)$$

با استفاده از معادله (۴۱) و (۴۶) داریم:

$$\begin{cases} T_a'' = -Le.R_c \left\{ T_a' + \delta.R.Le.(T_a - T_L) \right. \\ \left. + \delta.b \cdot \exp(-\alpha.NTU) \right\} \\ b = R.h.M.(Y_{in} - Y_i) \end{cases} \quad (48)$$

در نهایت با ساده سازی داریم:

$$\begin{cases} T_a'' + \theta.T_a' = -\beta \cdot \exp(-\alpha.NTU) \\ \theta = Le.(R_c - \delta.R) \\ \beta = \delta.Le.R_c.b \end{cases} \quad (49)$$

با تشکیل معادله مشخصه جواب معادله دیفرانسیل مرتبه دوم فوق بصورت زیر خواهد بود:

$$T_a = C_2 + C_3 \cdot \exp(-\theta.NTU) + T_{a,s} \quad (50)$$

که $T_{a,s}$ جواب خصوصی معادله است، با فرض $T_{a,s} = B \cdot \exp(-\alpha.NTU)$ و دوبار مشتق گیری از آن و سپس جایگذاری در معادله (۵۰)، ثابت B و به تبع آن $T_{a,s}$ بدست می آید و داریم:

$$B = \frac{-\beta}{\alpha^2 - \alpha.\theta} \quad (51)$$

$$T_a = C_2 + C_3 \cdot \exp(-\theta.NTU) + \frac{-\beta}{\alpha^2 - \alpha.\theta} \exp(-\alpha.NTU) \quad (52)$$

با مشتق گیری از معادله اخیر و جایگذاری آن در معادله (۳۲)، به صورت زیر به دست می آید:

شدت چگالش نیز به صورت دبی جرمی آب خروجی از جریان هوا تعریف می شود:

$$\dot{m}_{cond} = G.A.(Y_{in} - Y_{out}) \quad (36)$$

۲-۱- حل عددی معادلات حاکم بر انتقال گرما و جرم

همزمان در رطوبت زدای جریان مخالف و جریان موازی

با استفاده از معادلات فوق، و با بهره گیری از زبان برنامه نویسی فرترن، دو برنامه جداگانه با استفاده از روش رانگ کوتای کلاسیک مرتبه ۴ برای دستگاه معادلات دیفرانسیل نوشته شده است، به گونه ای که برج رطوبت زدا که ارتفاع آن ۶۰ سانتی متر فرض گردیده به ۱۰۰۰۰ گام تقسیم شده، و به روش گام به گام حل گردیده است. شایان ذکر است که برنامه مربوط به حل معادلات برای رطوبت زدای جریان مخالف کاملاً با برنامه نوشته شده برای حل جریان موازی، متفاوت است، زیرا در رطوبت زدای جریان مخالف گام اول ($NTU = 0$) که ورودی هوا می باشد، خروجی مایع دسیکنت است، بنابراین در گام اول بایستی مقادیر دما، غلظت و دبی جرمی دسیکنت به عنوان فرض اولیه داده شوند و با تکرارهای متمادی به جواب سوق پیدا کند.

۲-۲- حل تحلیلی معادلات حاکم بر انتقال گرما و جرم

به منظور تعمیم حل تحلیلی برای رطوبت زدای جریان مخالف و جریان موازی از متغیری با عنوان σ استفاده می کنیم مقدار این متغیر برای حالت جریان مخالف $\sigma = 1$ ، و برای حالت جریان موازی $\sigma = -1$ است.

برای گازهای رقیق داریم:

$$\ln\left(\frac{1-y_i}{1-y}\right) = y - y_i \quad (37)$$

از معادله (۳۱) و (۳۸) نتیجه می شود:

$$\frac{dY}{dNTU} = -M.(y - y_i) \quad (38)$$

از طرفی داریم:

$$y = \frac{M_a.Y}{M_v + M_a.Y} \rightarrow y = \frac{Y}{M + Y} \quad (39)$$

و با فرض $\alpha = (1-y).(1-y_i)$ ، داریم

$$\frac{1}{1-y} - \frac{1}{1-y_i} = \frac{(Y-Y_i)}{M} \rightarrow M.(y-y_i) = \alpha.(Y-Y_i) \quad (40)$$

نهایتاً معادله (۳۱) بصورت زیر درمی آید:

$$Y' = -\alpha.(Y - Y_i) \quad (41)$$

که Y' همان $\frac{dY}{dNTU}$ است.

با اعمال شرایط مرزی ثابت C_5 به صورت زیر بدست می‌آید:

$$NTU = \sigma.NTU_L \rightarrow L = L_{in} \quad (63)$$

$$C_5 = L_{in} - \delta.G.(Y_{in} - Y_i). \exp(-\alpha.\sigma.NTU_L) \quad (64)$$

با استفاده از معادله (۴۶) برای نسبت رطوبت در خروجی رطوبت‌زدا داریم:

$$Y_{out} = Y_i + (Y_{in} - Y_i). \exp(-\alpha.NTU_L) \quad (65)$$

با استفاده از معادلات (۳۶) و (۶۶) برای کارایی رطوبت‌زدا داریم:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-\alpha.NTU_L) \quad (66)$$

با استفاده از معادلات (۳۷) و (۶۶) برای شدت چگالش آب در رطوبت‌زدا داریم:

$$\dot{m}_{cond} = G.A.(Y_{in} - Y_i).[1 - \exp(-\alpha.NTU_L)] \quad (67)$$

۳-۲- مقایسه و ارزیابی صحت حل تحلیلی

به منظور استفاده از حل تحلیلی نوشته شده، بایستی از صحت آنها مطمئن شویم، بدین منظور نتایج حاصل از این حل را با نتایج تجربی بدست آمده توسط فومو و قوسوامی [۱] و همچنین نتایج حاصل از حل عددی نوشته شده، مقایسه کرده‌ایم. نتایج حاصل از این حل به همراه نتایج تجربی و نتایج حل عددی برای نسبت رطوبت و دمای هوا و دما و غلظت و دبی جرمی دسیکنت و شدت چگالش آب در خروجی رطوبت‌زدا، و کارایی رطوبت‌زدا در جدول ۱ به منظور مقایسه آورده شده است.

همانگونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود نتایج حاصل از حل تحلیلی نوشته شده با نتایج حاصل از کد کامپیوتری نوشته شده، و نیز با نتایج تجربی همخوانی نزدیکی دارد و این نتایج صحت حل تحلیلی نوشته شده موجود را تأیید می‌کند.

در جدول ۲ درصد خطای نتایج بدست آمده از حل تحلیلی و حل عددی نسبت به نتایج تجربی فومو و همکاران [۱] آورده شده است.

لازم به یادآوری است که داده‌های ارائه شده در جداول ۱ و ۲ برای رطوبت‌زدا در حالت جریان مخالف می‌باشد.

$$T_L = C_2 + C_3.\left(1 - \frac{\theta}{Le.R_c}\right).\exp(-\theta.NTU) + \frac{-\beta}{\alpha^2 - \alpha.\theta}\left(1 - \frac{\alpha}{Le.R_c}\right).\exp(-\alpha.NTU) \quad (53)$$

با اعمال شرایط مرزی ثابت‌های C_2 و C_3 را بصورت زیر بدست می‌آوریم:

$$\begin{cases} NTU = 0 \rightarrow T_a = T_{a,in} \\ NTU = \sigma.NTU_L \rightarrow T_L = T_{L,in} \end{cases} \quad (54)$$

$$C_3 = T_{a,in} - C_4 + \frac{\beta}{\alpha^2 - \alpha.\theta} \quad (55)$$

$$C_4 = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{\theta}{Le.R_c}\right).\exp(-\theta.\sigma.NTU_L)} \times$$

$$\left\{ \frac{\beta}{\alpha^2 - \alpha.\theta} \left[1 - \left(1 - \frac{\alpha}{Le.R_c}\right).\exp(-\alpha.\sigma.NTU_L) \right] + (T_{a,in} - T_{L,in}) \right\} \quad (56)$$

خاطر نشان می‌شود که $NTU_L = M_a.F_G.a_t.Z/G$ می‌باشد.

حال به حل و بدست آوردن معادله‌ای برای غلظت دسیکنت می‌پردازیم، برای این منظور، با استفاده از معادلات (۳۴) و (۳۵) داریم:

$$\frac{dX}{X} = \delta.R_m.\alpha.(Y - Y_i).dNTU \quad (57)$$

$$= \delta.R_m.\alpha.(Y_{in} - Y_i).\exp(-\alpha.NTU).dNTU$$

با انتگرال‌گیری از معادله فوق داریم

$$\ln(X) = -\delta.R_m.(Y_{in} - Y_i).\exp(-\alpha.NTU) + C_4 \quad (58)$$

با اعمال شرایط مرزی ثابت C_4 به شکل زیر حاصل می‌شود:

$$NTU = \sigma.NTU_L \rightarrow X = X_{in} \quad (59)$$

$$C_4 = \ln(X_{in}) + \delta.R_m.(Y_{in} - Y_i).\exp(-\alpha.\sigma.NTU_L) \quad (60)$$

حال می‌خواهیم با استفاده از معادلات (۳۵) و (۴۱) معادله مربوط به دبی جرمی دسیکنت را بدست آوریم:

$$\frac{dL}{dNTU} = -\delta.G.\alpha.(Y - Y_i) \quad (61)$$

$$= -\delta.G.\alpha.(Y_{in} - Y_i).\exp(-\alpha.NTU)$$

با انتگرال‌گیری داریم

$$L = \delta.G.(Y_{in} - Y_i).\exp(-\alpha.NTU) + C_5 \quad (62)$$

جدول ۱- مقایسه نتایج شبیه سازی رطوبت زدا با نتایج تجربی

ε	$\dot{m}$	L	X	T_L	T_a	Y_{out}	
(Case ۱), $G=0.89 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=30.1^\circ\text{C}$, $T_L=30.1^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.018 \text{ kg water/kg air}$, $L=6.124 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.346 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$							
۸۳.۵۱	۰.۲۹۸۸	۶.۱۳۱۰	۳۴.۵۶۰	۳۱.۱۹	۳۰.۳۲	۰.۰۱۰۵۸	کار حاضر (تحلیلی)
۸۱.۹۴	۰.۲۹۳۲	۶.۱۳۰۵	۳۴.۵۶۳	۳۱.۴۶	۳۰.۳۸	۰.۰۱۰۷۱	کار حاضر (عددی)
-	۰.۳۲	-	۳۴.۵	۳۲.۳	۳۱.۳	۰.۰۱۰۴	فومو وقوسوامی
(Case ۲), $G=1.18 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=30.1^\circ\text{C}$, $T_L=30.3^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.0181 \text{ kg water/kg air}$, $L=6.227 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.347 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$							
۸۰.۸۹	۰.۳۷۴۹	۶.۲۳۵	۳۴.۶۵	۳۱.۶۳	۳۰.۵۴	۰.۰۱۱۰۸	کار حاضر (تحلیلی)
۷۸.۴۷	۰.۳۶۳۷	۶.۲۳۵	۳۴.۶۵۵	۳۱.۹۴	۳۰.۶۳	۰.۰۱۱۲۸۷	کار حاضر (عددی)
-	۰.۴۰	-	۳۴.۶	۳۲.۶	۳۲.۲	۰.۰۱۰۸	فومو وقوسوامی
(Case ۳), $G=1.513 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=30.2^\circ\text{C}$, $T_L=30.0^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.0181 \text{ kg water/kg air}$, $L=6.113 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.343 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$							
۷۸.۴۲	۰.۵۱۲۹	۶.۱۲۴	۳۴.۲۴	۳۱.۸۵	۳۰.۴۴	۰.۰۱۰۶۱	کار حاضر (تحلیلی)
۷۵.۴۷	۰.۴۹۳۶	۶.۱۲۳۹	۳۴.۲۳۹	۳۱.۹۵	۳۰.۵۶	۰.۰۱۰۸۹	کار حاضر (عددی)
-	۰.۵۲	-	۳۴.۱	۳۲.۷	۳۲.۲	۰.۰۱۰۸	فومو وقوسوامی
(Case ۴), $G=1.189 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=35.5^\circ\text{C}$, $T_L=30.3^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.0188 \text{ kg water/kg air}$, $L=6.290 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.345 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$							
۷۵.۹۶	۰.۳۹۷۳	۶.۲۹۹	۳۴.۴۵	۳۲.۰۱	۳۲.۰۹	۰.۰۱۱۴۱	کار حاضر (تحلیلی)
۷۵.۸۹	۰.۳۹۶۹	۶.۲۹۸۸	۳۴.۴۵۱	۳۲.۵۷	۳۱.۳۵	۰.۰۱۱۴۲	کار حاضر (عددی)
-	۰.۴۲	-	۳۳.۷	۳۲.۶	۳۲.۸	۰.۰۱۱۲	فومو وقوسوامی
(Case ۵), $G=1.183 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=40.1^\circ\text{C}$, $T_L=30.5^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.018 \text{ kg water/kg air}$, $L=6.287 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.344 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$							
۷۲.۳۵	۰.۳۴۷۱	۶.۲۹۵	۳۴.۳۶	۳۲.۲۵	۳۳.۸۶	۰.۰۱۱۵۱	کار حاضر (تحلیلی)
۷۴.۴۴	۰.۳۵۷۱	۶.۲۹۴۹	۳۴.۳۵۶	۳۳.۰۳	۳۱.۷۶	۰.۰۱۱۳۲۸	کار حاضر (عددی)
-	۰.۳۶	-	۳۴.۳	۳۲.۹	۳۳.۱	۰.۰۱۱۵	فومو وقوسوامی
(Case ۶), $G=1.214 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=30.3^\circ\text{C}$, $T_L=30.1^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.0142 \text{ kg water/kg air}$, $L=6.273 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.339 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$							
۸۰.۷۰	۰.۲۷۷۵	۶.۲۷۹	۳۳.۸۷	۳۱.۰۷	۳۰.۳۵	۰.۰۰۹۱۴۸	کار حاضر (تحلیلی)
۷۸.۸۱	۰.۲۷۱۰	۶.۲۷۹۰	۳۳.۸۳۲	۳۱.۳۰	۳۰.۴۰	۰.۰۰۹۲۶۷	کار حاضر (عددی)
-	۰.۲۳	-	۳۳.۸	۳۱.۵	۳۱.۱	۰.۰۱۰۳	فومو وقوسوامی
(Case ۷), $G=1.187 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=29.9^\circ\text{C}$, $T_L=30.3^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.0215 \text{ kg water/kg air}$, $L=6.272 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.339 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$							
۸۰.۹۲	۰.۵۸۴۱	۶.۲۸۵	۳۳.۸۳	۳۲.۳	۳۰.۶۲	۰.۰۱۰۶۲	کار حاضر (تحلیلی)
۷۸.۷۷	۰.۵۶۸۶	۶.۲۸۴۶	۳۳.۸۳۲	۳۲.۷۷	۳۰.۷۶	۰.۰۱۰۹۱۳	کار حاضر (عددی)
-	۰.۵۳	-	۳۳.۷	۳۳.۱	۳۳.۴	۰.۰۱۲۰	فومو وقوسوامی
(Case ۸), $G=1.190 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=30.1^\circ\text{C}$, $T_L=30.2^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.018 \text{ kg water/kg air}$, $L=5.019 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.344 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$							
۸۰.۸۴	۰.۳۹۸۶	۵.۰۲۸	۳۴.۳۴	۳۱.۹۴	۳۰.۵۴	۰.۰۱۰۶۰	کار حاضر (تحلیلی)

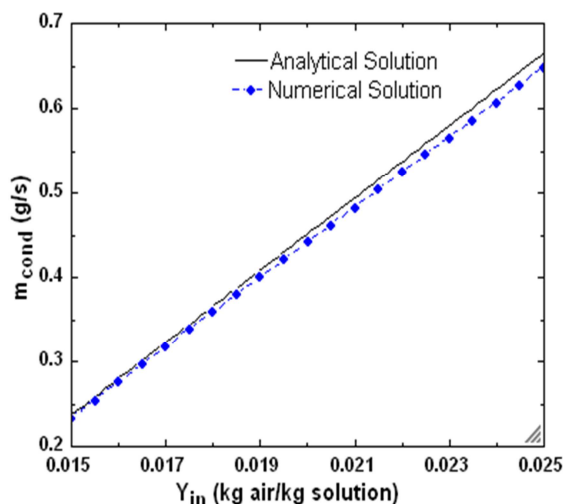
کار حاضر (عددی)	۰/۰۱۰۸۷۴	۳۰/۶۶	۳۲/۳۲	۳۴/۳۴۲	۵/۰۲۷۵	۰/۳۸۳۷	۷۷/۸۲
فومو وقوسوامی	۰/۰۱۱۳	۳۲/۲	۳۲/۷	۳۴/۲	-	۰/۳۸	-
(Case ۹), $G=۱/۱۸۲ \text{ kg / m}^2 \text{ s}$, $T_a=۳۰/۲^\circ\text{C}$, $T_L=۳۰/۲^\circ\text{C}$, $Y_{in}=۰/۰۱۸۱ \text{ kg water /kg air}$, $L=۷/۴۲۰ \text{ kg / m}^2 \text{ s}$, $X=۰/۳۴۴ \text{ kg LiCl /kg solution}$, $Z=۰/۶ \text{ m}$							
کار حاضر (تحلیلی)	۰/۰۱۰۶۲	۳۰/۴۵	۳۱/۳۹	۳۴/۳۶	۷/۴۲۹	۰/۴۰	۸۰/۸۱
کار حاضر (عددی)	۰/۰۱۰۷۷۶	۳۰/۵۲	۳۱/۶۸	۳۴/۳۶۰	۷/۴۲۹	۰/۳۹۱۷	۷۹/۱۱
فومو وقوسوامی	۰/۰۱۱۰	۳۲/۰	۳۲/۵	۳۴/۳	-	۰/۳۹	-
(Case ۱۰), $G=۱/۱۹۸ \text{ kg / m}^2 \text{ s}$, $T_a=۲۹/۹^\circ\text{C}$, $T_L=۲۵/۰^\circ\text{C}$, $Y_{in}=۰/۰۱۷۷ \text{ kg water /kg air}$, $L=۶/۲۶۹ \text{ kg / m}^2 \text{ s}$, $X=۰/۳۴۷ \text{ kg LiCl /kg solution}$, $Z=۰/۶ \text{ m}$							
کار حاضر (تحلیلی)	۰/۰۰۸۲۱۹	۲۶/۵۳	۲۷/۱۷	۳۴/۶۴	۶/۲۸۰	۰/۵۱۳۸	۸۱/۱۲
کار حاضر (عددی)	۰/۰۰۸۲۶۳۸	۲۷/۲۰	۲۷/۴۹	۳۴/۶۳۸	۶/۲۸۰	۰/۵۱۱۵	۸۰/۷۴
فومو وقوسوامی	۰/۰۰۸۸	۲۸/۲	۲۸/۴	۳۳/۵	-	۰/۵۰	-
(Case ۱۱), $G=۱/۱۹۲ \text{ kg / m}^2 \text{ s}$, $T_a=۲۹/۰۹^\circ\text{C}$, $T_L=۳۰/۲^\circ\text{C}$, $Y_{in}=۰/۰۱۷۹ \text{ kg water /kg air}$, $L=۶/۲۶۷ \text{ kg / m}^2 \text{ s}$, $X=۰/۳۳۸ \text{ kg LiCl /kg solution}$, $Z=۰/۶ \text{ m}$							
کار حاضر (تحلیلی)	۰/۰۰۹۷۳۷	۳۰/۴۴	۳۱/۷۰	۳۳/۷۵	۶/۲۷۷	۰/۴۴۰۲	۸۱/۰۷
کار حاضر (عددی)	۰/۰۰۹۹۴۱	۳۰/۵۴	۳۲/۰۵	۳۳/۷۴۹	۶/۲۷۶۵	۰/۴۲۹۳	۷۹/۰۶
فومو وقوسوامی	۰/۰۱۱۲	۳۲/۵	۳۲/۶	۳۳/۷	-	۰/۳۸	-
(Case ۱۲), $G=۱/۱۷۶ \text{ kg / m}^2 \text{ s}$, $T_a=۳۰/۰^\circ\text{C}$, $T_L=۳۰/۲^\circ\text{C}$, $Y_{in}=۰/۰۱۸۱ \text{ kg water /kg air}$, $L=۶/۲۰۶ \text{ kg / m}^2 \text{ s}$, $X=۰/۳۴۸ \text{ kg LiCl /kg solution}$, $Z=۰/۶ \text{ m}$							
کار حاضر (تحلیلی)	۰/۰۱۱۱۵	۳۰/۴۳	۳۱/۵۲	۳۴/۷۵	۶/۲۱۴	۰/۳۶۹۸	۸۱/۰۱
کار حاضر (عددی)	۰/۰۱۱۳۶	۳۰/۵۲	۳۱/۸۳	۳۴/۷۵۵	۶/۲۱۳۹	۰/۳۵۸۶	۷۸/۵۵
فومو وقوسوامی	۰/۰۱۰۷	۳۲/۰	۳۲/۵	۳۴/۷	-	۰/۴۱	-

۳- بحث و نتیجه گیری

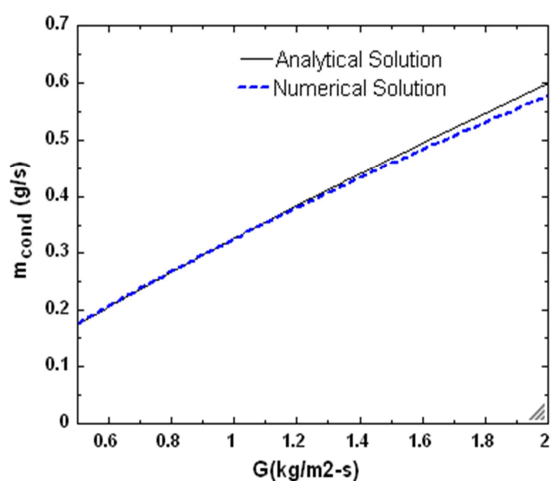
در حالت کلی می توان گفت که حل تحلیلی نوشته شده به خوبی برای مسایل مختلف پاسخگو است چرا که نتایج حاصل از آن با نتایج حل عددی صورت گرفته و همچنین نتایج موجود تجربی مطابقت خوبی دارد.

شکل ۲ تأثیر دمای هوای ورودی بر روی شدت چگالش آب را نشان می دهد، همانگونه که مشاهده می شود با افزایش دمای هوای ورودی به رطوبت زدا، شدت چگالش رطوبت موجود در هوا کاهش می یابد. شکل ۳ تأثیر نسبت رطوبت هوای ورودی بر روی شدت چگالش آب را نمایش می دهد، همانگونه که ملاحظه می شود با افزایش نسبت رطوبت هوای ورودی به رطوبت زدا، شدت چگالش رطوبت موجود در هوا افزایش زیادی دارد. شکل ۴ تأثیر دبی جرمی هوای ورودی بر روی شدت چگالش آب را نشان می دهد، همانگونه که مشاهده می گردد با افزایش دبی جرمی هوای ورودی به رطوبت زدا، شدت چگالش رطوبت موجود در هوا افزایش می یابد.

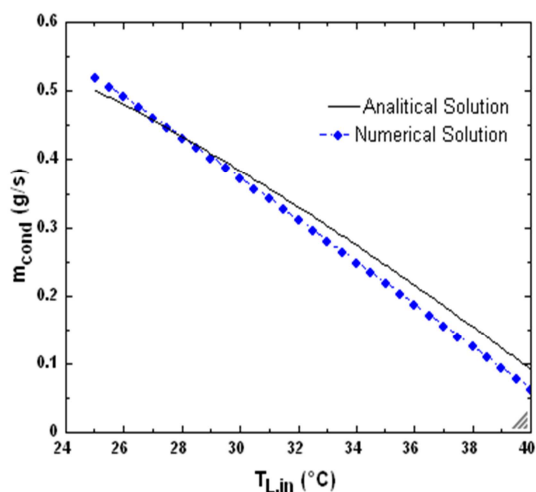
شکل (۵) تأثیر دمای دسیکنت ورودی بر روی شدت چگالش آب را نشان می دهد، همانگونه که مشاهده می شود با افزایش دمای دسیکنت ورودی به رطوبت زدا شدت چگالش رطوبت موجود در هوا کاهش می یابد. شکل ۶ تأثیر غلظت دسیکنت ورودی بر روی شدت چگالش آب را نمایش می دهد، همانگونه که ملاحظه می شود با افزایش غلظت دسیکنت ورودی به رطوبت زدا شدت چگالش رطوبت موجود در هوا افزایش می یابد. شکل ۷ تأثیر دبی جرمی دسیکنت ورودی بر روی شدت چگالش آب را نشان می دهد، همانگونه که مشاهده می گردد با تغییر دبی جرمی دسیکنت ورودی به رطوبت زدا شدت چگالش رطوبت موجود در هوا تغییری نمی کند. مزیتی که حل تحلیلی نسبت به حل عددی دارد این است که علاوه بر سادگی حل، معادلات کوپل شده انتقال گرما و جرم را با تقریب سازی از هم جدا می کند و حل یک معادله مستقل از دیگری را امکان پذیر می سازد.



شکل ۳- تأثیر نسبت رطوبت هوای ورودی بر روی شدت چگالش آب، در رطوبت‌زدا



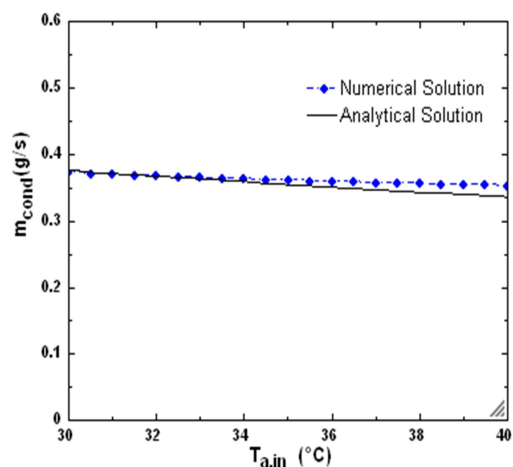
شکل ۴- تأثیر دبی جرمی هوا ورودی بر روی شدت چگالش آب، در رطوبت‌زدا



شکل ۵- تأثیر دمای دسیکنت ورودی بر روی شدت چگالش آب، در رطوبت‌زدا

جدول ۲- مقایسه درصد خطا نتایج شبیه‌سازی رطوبت‌زدا نسبت به نتایج تجربی

مورد	m	X	T_L	T_a	Y_{out}	
۱	۶۶۲	۰٫۱۷	۳٫۴۳	۳٫۱۳	۱٫۷۳	حل تحلیلی
	۸۳۷	۰٫۱۸	۲٫۶۰	۲٫۹۴	۲٫۹۸	حل عددی
۲	۶۲۷	۰٫۱۴	۲٫۹۷	۵٫۱۵	۲٫۵۹	حل تحلیلی
	۹۰۷	۰٫۱۵	۲٫۰۲	۴٫۸۷	۴٫۵۰	حل عددی
۳	۱۳۶	۰٫۴۱	۲٫۵۹	۵٫۴۶	۱٫۷۵	حل تحلیلی
	۵۰۷	۰٫۴۰	۲٫۲۹	۵٫۰۹	۰٫۸۳	حل عددی
۴	۵۴۰	۲٫۲۲	۱٫۸۰	۲٫۱۶	۱٫۸۷	حل تحلیلی
	۵۵۰	۲٫۲۲	۰٫۰۹	۴٫۴۲	۱٫۹۶	حل عددی
۵	۳۵۸	۰٫۱۷	۱٫۹۷	۲٫۲۹	۰٫۰۸	حل تحلیلی
	۰٫۸۰	۰٫۱۶	۰٫۳۹	۴٫۰۴	۱٫۴۹	حل عددی
۶	۲۰۶۵	۰٫۲۰	۱٫۳۶	۲٫۴۱	۱۱٫۱۸	حل تحلیلی
	۱۷۸۲	۰٫۰۹	۰٫۶۳	۲٫۲۵	۱۰٫۰۲	حل عددی
۷	۱۰۲۰	۰٫۳۸	۲٫۴۱	۸٫۳۲	۱۱٫۵۰	حل تحلیلی
	۷۲۸	۰٫۳۹	۰٫۹۹	۷٫۹۰	۹٫۰۵	حل عددی
۸	۴۸۹	۰٫۴۰	۲٫۳۲	۵٫۱۵	۶٫۱۹	حل تحلیلی
	۰٫۹۷	۰٫۴۱	۱٫۱۶	۴٫۷۸	۳٫۷۶	حل عددی
۹	۲۵۶	۰٫۱۷	۳٫۴۱	۴٫۸۴	۳٫۴۵	حل تحلیلی
	۰٫۴۳	۰٫۱۷	۲٫۵۲	۱٫۶۲	۲٫۰۳	حل عددی
۱۰	۲۶۶	۰٫۴۰	۴٫۳۳	۵٫۹۲	۶٫۶۰	حل تحلیلی
	۲۳۰	۰٫۴۰	۳٫۲۰	۳٫۵۴	۶٫۱۰	حل عددی
۱۱	۱۵۸۴	۰٫۱۴	۲٫۷۶	۶٫۳۳	۱۳٫۰۶	حل تحلیلی
	۱۳۰۰	۰٫۱۴	۱٫۶۸	۶٫۰۳	۱۱٫۲۴	حل عددی
۱۲	۹۸۰	۰٫۱۴	۳٫۰۱	۴٫۹۰	۴٫۲۰	حل تحلیلی
	۱۲۵۳	۰٫۱۴	۲٫۰۶	۴٫۶۲	۶٫۱۶	حل عددی



شکل ۲- تأثیر دمای هوای ورودی بر روی شدت چگالش آب، در رطوبت‌زدا

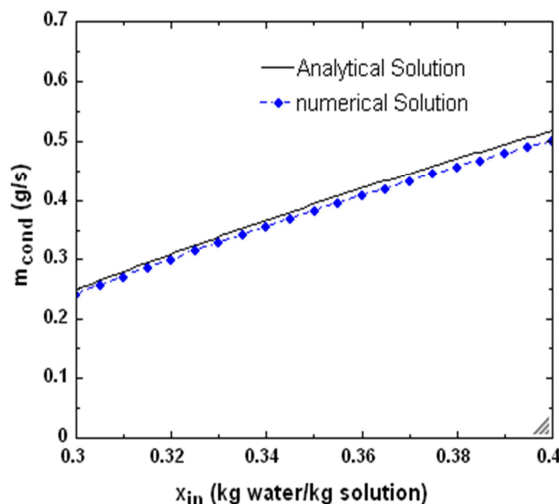
h	گرمای نرمال شده چگالش یا تبخیر ($^{\circ}\text{C}$)
j_h	گروه بی بعد انتقال گرما
j_m	گروه بی بعد انتقال جرم
k	رسانایی گرمایی ($\text{W/m } ^{\circ}\text{C}$)
K_G	ضریب انتقال جرم فاز گازی ($\text{kmol/m}^2\text{sPa}$)
L	دبی جرمی دسیکنت مایع در واحد سطح مقطع برج ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
Le	ضریب لوئیس
M_a	جرم مولی هوا (kg/kmol)
M_v	جرم مولی آب (kg/kmol)
p	فشار (kPa)
q_G	شار انتقال گرما از هوا به دسیکنت (kW/m^2)
$\underline{R}$	ثابت جهانی گازهای ایده‌آل ($\text{J kmol}^{-1}\text{K}^{-1}$)
T	دما ($^{\circ}\text{C}$)
X	کسر جرمی دسیکنت موجود در محلول ($\text{kg LiCl/kg solution}$)
Y	نسبت رطوبت هوا (kg vapor/kg air)
y	کسر مولی بخار آب موجود در هوا
Z	ارتفاع برج (m)
علائم یونانی	
ε	کارایی رطوبت زدا
λ_o	گرمای نهان تبخیر (kJ/kg)
μ	لزجت (kg/m s)
ρ	چگالی (kg/m^3)

زیرنویس

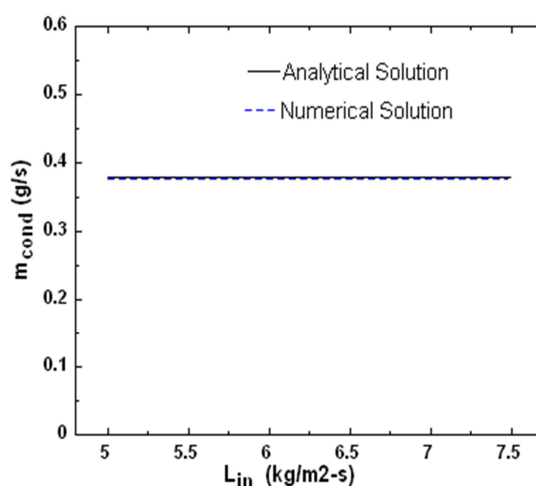
0 حالت مرجع

مراجع

- [1] Fumo N., Goswami D.Y., "Study of an aqueous lithium chloride desiccant system: air dehumidification and desiccant regeneration", Solar Energy, no. 72, pp. 351–361, 2002.
- [2] Gandhidasan P., "A simplified model for air dehumidification with liquid desiccant", Solar Energy, no. 76, pp. 409–416, 2004.
- [3] Yonggao Yin, Xiaosong Zhang, DonggenPeng, Xiuwei Li, "Model validation and case study on internally cooled/heated dehumidifier/regenerator of liquid desiccant



شکل ۶- تأثیر غلظت دسیکنت ورودی بر روی شدت چگالش آب، در رطوبت‌زدا



شکل ۷- تأثیر دبی جرمی دسیکنت ورودی بر روی شدت چگالش آب، در رطوبت‌زدا

نمادها

A	مساحت سطح (m^2)
C_p	گرمای ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
d_n	اندازه اسمی (m)
d_t	قطر برج رطوبت زدا (m)
D	ضریب نفوذ جرم (m^2s^{-1})
F_G	ضریب انتقال جرم فاز گازی ($\text{kmol/m}^2\text{s}$)
G	دبی جرمی هوای خشک در واحد سطح مقطع برج ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
h	آنتالپی ویژه (kJ/kg K)
H_G	ضریب انتقال گرما سمت گاز ($\text{kJ/m}^2\text{s}$)
h'_G	ضریب انتقال گرمای همرفتی ($\text{W/m}^2\text{C}$)

[15] Onda K., Takeuchi H., Olumoto, Y., "Mass transfer coefficient between gas and liquid phase in packed column", Journal of chemical Engineering of Japan. no. 1, pp.56–62, 1968

system", International Journal of Thermal Sciences, no. 48, pp. 1664–1671, 2009.

[4] Dai Y.J., Zhang H.F., "Numerical simulation and theoretical analysis of heat and mass transfer in a cross flow liquid desiccant air dehumidifier packed with honeycomb paper", Energy Conversion And Management, no. 44, pp. 1343–1356, 2004

[5] Donggen Peng, Xiaosong Zhang, "An analytical model for coupled heat and mass transfer processes in solar collector/regenerator using liquid desiccant", Applied Energy, no. 88, pp. 2438–2444, 2011

[6] S. Younus Ahmed, P. Gandhidasan, A. A. Al-Farayedhi, "Thermodynamic analysis of liquid desiccant", Solar Energy, no. 62, pp. 11–18, 1998

[7] Chen Qin Ren, "Effectiveness–NTU relation for packed bed liquid desiccant–air contact system with a double film model for heat and mass transfer", International Journal of Heat and Mass Transfer, no. 51, pp. 1793–1803, 2008

[8] S. Alizadeh, W. Y. Saman, "An experimental study of a forced solar collector/regenerator using liquid desiccant", Solar Energy, no. 73, pp.345–362, 2002.

[9] Agung Bakhtiar, Fatkhur Rokhman, Kwang wan Choi, "A novel method to evaluate the performance of liquid desiccant air dehumidifier system" Energy and Buildings, no. 44, pp. 39–44, 2012

[10] Fu Xiao, Gaoming Ge, Xiaofeng Niu, "Control performance of a dedicated outdoor air system adopting liquid desiccant dehumidification", Applied Energy, no. 88, pp. 143–149, 2001

[11] Seiichi Yamaguchi, Jongsoo Jeong, Kiyoshi Saito, Hikoo Miyauchi, Masatoshi Harada, "Hybrid liquid desiccant air-conditioning system: Experiments and simulations", Applied Thermal Energy, no. 3, pp. 3741–3747, 2001

[12] Mazzei, P., Minichiello, F., Palma, D., "HVAC dehumidification systems for thermal comfort: a critical review", Applied Thermal Engineering, no. 25, pp. 677–707, 2005

[13] Treybal R.E., "Mass transfer operations", 3rd edition, McGraw-Hill, New York, 1969.

[14] Pedro J. Mago, Louary Chamra, Glenn Steele, "A simulation model for the performance of a hybrid liquid desiccant system during cooling and dehumidification", International Journal of Energy Research, no. 30, pp. 51–66, 2006.