

مقایسه عملکرد و آهنگ چگالش آب در رطوبت‌زدای جریان مخالف و جریان موازی، در سیستم‌های رطوبت‌زدایی دسیکنت مایع

دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
دانشیار، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، ایران

مرتضی مرتضایی*
مرتضی یاری

چکیده

سیستم‌های تبرید و رطوبت‌زدای دسیکنت یکی از روش‌های نوین برای تبرید و تهویه مطبوع می‌باشد که در این روش با یک 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 صرفه جویی می‌شود. مهمترین قسمت این سیکل رطوبت‌زدای آن می‌باشد، در این مقاله دو رطوبت‌زدای جریان مخالف و جریان موازی باهم مقایسه شده‌اند، برای این کار ابتدا معادلات حاکم بر انتقال حرارت و جرم نوشته شده‌اند و سپس این معادلات به صورت هم‌زمان حل گردیده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که کارایی رطوبت‌زدا و آهنگ چگالش آب از جریان هوا در رطوبت‌زدای جریان مخالف از رطوبت‌زدای جریان موازی بیشتر است و برای سیزده مورد بررسی شده بیشینه اختلاف کارایی ۶/۴۵٪ و ماکزیمم اختلاف آهنگ چگالش ۰/۰۳۱ گرم بر ثانیه می‌باشد. لازم به ذکر است که محلول به کار رفته به عنوان دسیکنت مایع در این مطالعه لیتیم کلراید می‌باشد.

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

Comparative Study on Effectiveness and Condensation Rate in Parallel and Counterflow Dehumidifier in Air Dehumidification by Liquid Desiccant

M. Mortazaei

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

M. Yari

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

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, consequently, latent load of vapor is eliminated, and rate of usage energy is decreased. The important part of this cycle is dehumidifier of it. In this paper, parallel flow dehumidifier is compared counter flow dehumidifier. In this work, at the first, the governing equations of coupled heat and mass transfer have been written, then, these equations have solved simultaneously. Results of this study shows that, effectiveness and condensation rate in counter flow dehumidifier is more than parallel flow dehumidifier. For thirteen studied cases in this paper, the maximum difference of effectiveness is 6.45%, and the maximum of condensation rate is 0.031 g/s. It should be said that, using solution in present study is lithium chlorid (LiCl).

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

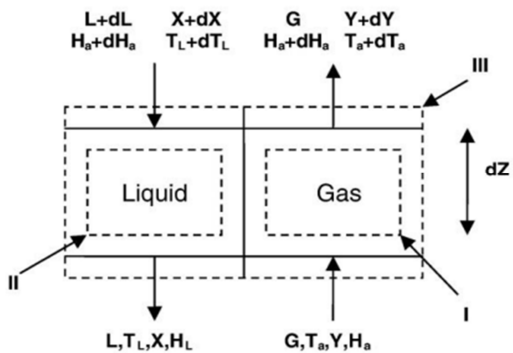
آن را از یک مبادله‌کن گرما عبور داد ودمای دسیکنت ورودی به مبادله‌کن را کاهش داد، سپس تاثیرات کارایی مبادله‌کن گرما ϵ_{HE} و نیز تاثیرات دمای ورودی سیال خنک مبادله‌کن را بر روی آهنگ چگالش آب بررسی نمود. یونگا او و همکاران [۳] مدلی را برای رطوبت‌زدا در حالتی که به صورت داخلی سرد می‌شد، ارائه کردند و پس از تأیید صحت مدل در مقایسه باننایج 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 حرارت و جرم را در رطوبت‌زدهای فشرده‌ی ساخته شده با کاغذهای شانه‌ی عسلی (لانه زنبوری) بررسی و تحلیل نمودند. دونگن پنگ و همکاران [۵]، ابتدا یک سیستم بازیاب خورشیدی را که انرژی لازم برای احیا را توسط گردآورنده خورشیدی می‌گرفت، شبیه‌سازی کردند و سپس به حل معادلات حاکم بر انتقال گرما و جرم کوپل شده، در آن پرداختند.

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 چگالی‌شدن 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. گانهیداسان [۲] در عربستان سعودی کارهای مطالعاتی در مورد رطوبت‌زدا انجام داد. وی قبل از ورود دسیکنت به رطوبت‌زدا

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

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



شکل ۱- طرحواره فرایندهای انتقال گرما و جرم در رطوبت‌زای 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.
- فرآیندهای 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 گونه‌ای 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:

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

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.

$$N_V = F_G \ln\left(\frac{1 - y_1}{1 - y}\right) \quad (4)$$

از روابط (۳) و (۴) نتیجه می‌شود:

$$\frac{dY}{dZ} = -\frac{N_V \cdot M_V \cdot a_t}{G} \ln\left(\frac{1 - y_1}{1 - y}\right) \quad (5)$$

موازنه انرژی برای جریان هوا به شکل زیر است:

$$q_G \cdot a_a \cdot dZ + N_V \cdot M_V \cdot a_t \cdot h_V \cdot dZ + G(h_a + dh_a) = G \cdot h_a \quad (6)$$

آنتالپی هوا و بخار آب بصورت زیر می‌باشند، که λ_0 گرمای نهان تبخیر آب در دمای T_0 می‌باشد.

$$h_a = c_{pa}(T_a - T_0) + Y [c_{pv}(T_a - T_0) + \lambda_0] \quad (7)$$

$$h_V = c_{pv}(T_a - T_0) + \lambda_0 \quad (8)$$

برای گرمای انتقالی از جریان هوا به دسیکنت می‌توان نوشت:

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

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 علیزاده 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 گردآورنده خورشیدی دریافت می‌کرد و جریان هوا در این گردآورنده 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 زدای 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 توجیه 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 زدای دسیکنت مایع، تا سقف (کیلوگرم هوای خشک /gt) ۵.۹، از هوا رطوبت گرفت. مازی و همکاران [۱۲]، سیستم‌های سرمایه‌گذاری دسیکنت هیبریدی را برای کشور ایتالیا از لحاظ هزینه اولیه و راه‌اندازی بررسی و نشان داده‌اند که در سرمایه‌گذاری دسیکنت هزینه‌های جاری در مقایسه با سیستم‌های سرمایه‌گذاری 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 باحل عددی و نتایج تجربی مقایسه می‌کنیم تا صحت این حل مشخص شود.

۲- مدل ریاضی حاکم بر انتقال حرارت 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 گرما قابل صرفنظر است.

رابطه (۱۰) توسط تری بال ارائه شده است. اوندا و همکاران [۱۵]، رابطه تجربی را برای K_G ، بصورت زیر ارائه کردند:

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

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

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

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

که در آن Sc عدد اشمیت و Pr عدد پرانتل می باشند و بصورت

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

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

حال برای ساده سازی معادلات تعاریف زیر را مطرح می کنیم.

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

در تعاریف فوق $dNTU$ ، دیفرانسیل واحد انتقال جرم، Le ، عدد لویس، R ، نسبت ظرفیت گرمایی هوا به مایع دسیکنت، 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 دسیکنت و \bar{h} گرمای نرمال شده جذب آب می باشد.

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

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

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

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

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

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

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:

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

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 رطوبت زدا بصورت زیر بدست می آید.

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

از موازنه انرژی برای کل المان داریم:

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

که از آن نتیجه می شود:

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

برای آنتالپی مایع دسیکنت داریم:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

به ۱۰۰۰۰ گام تقسیم شده، و به روش گام به گام حل گردیده است. شایان ذکر است که برنامه مربوط به حل معادلات برای رطوبت‌زدای جریان مخالف کاملاً با برنامه نوشته شده برای حل جریان موازی، متفاوت است، زیرا در رطوبت‌زدای جریان مخالف گام اول ($NTU=0$) که ورودی هوا می‌باشد، 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- ارزیابی صحت مدل و کد کامپیوتری نوشته شده

به منظور استفاده از برنامه های کامپیوتری نوشته شده، بایستی از صحت آنها مطمئن شویم، بدین منظور نتایج حاصل از این برنامه را با نتایج تجربی به دست آمده توسط فومو و قوسوامی [۱] مقایسه کرده ایم نتایج حاصل از این حل به همراه نتایج تجربی برای دمای هوا و دما و غلظت دسیکنت و نسبت رطوبت خروجی و شدت کندانس آب در خروجی رطوبت زدا، و کارایی رطوبت زدا در جدول ۱ به منظور مقایسه آورده شده است.

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

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:

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

آهنگ چگالش نیز به صورت دبی جرمی آب خروجی از جریان هوا تعریف می‌شود:

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

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

همزمان در رطوبت‌زدای جریان مخالف و جریان موازی

با استفاده از معادلات فوق، و با بهره‌گیری از زبان برنامه‌نویسی فرترن، دو برنامه جداگانه با استفاده از روش رانگ‌کوتای کلاسیک مرتبه ۴ برای دستگاه معادلات دیفرانسیل نوشته شده است، به گونه‌ای که برج رطوبت‌زدا که ارتفاع آن ۶۰ سانتی متر فرض گردیده

جدول ۱- نتایج شبیه‌سازی رطوبت‌زدا و نتایج تجربی

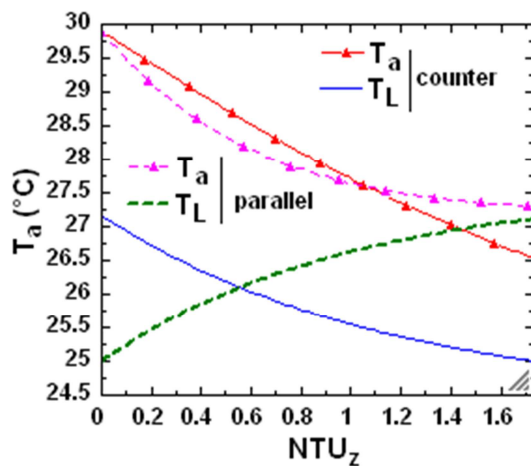
ε	L	X	T_L	T_a	Y_{out}	
(Case 1): $G=0.89 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=30.1^\circ\text{C}$, $T_L=30.1^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.018 \text{ kg water/kg air}$, $L=6.124 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.346 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$						
۸۱٫۹۴	۰٫۲۹۲۲	۶٫۱۳۰۵	۳۴٫۵۶۳	۳۱٫۴۶	۳۰٫۳۸	۰٫۱۰۷۱ (کار حاضر(عددی)
-	۰٫۳۲	-	۳۴٫۵	۳۲٫۳	۳۱٫۳	۰٫۱۰۴ (فومو و قوسوامی)
(Case 2): $G=1.18 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=30.1^\circ\text{C}$, $T_L=30.3^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.0181 \text{ kg water/kg air}$, $L=6.227 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.347 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$						
۷۸٫۴۷	۰٫۳۶۲۷	۶٫۲۳۵	۳۴٫۶۵۵	۳۱٫۹۴	۳۰٫۶۳	۰٫۱۱۲۸۷ (کار حاضر(عددی)
-	۰٫۴۰	-	۳۴٫۶	۳۲٫۶	۳۲٫۲	۰٫۱۰۸ (فومو و قوسوامی)
(Case 3): $G=1.513 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=30.3^\circ\text{C}$, $T_L=30.0^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.0181 \text{ kg water/kg air}$, $L=6.113 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.343 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$						
۷۵٫۴۷	۰٫۴۹۳۶	۶٫۱۲۳۹	۳۴٫۲۳۹	۳۱٫۹۵	۳۰٫۵۶	۰٫۱۰۸۹ (کار حاضر(عددی)
-	۰٫۵۲	-	۳۴٫۱	۳۲٫۷	۳۲٫۲	۰٫۱۰۸ (فومو و قوسوامی)
(Case 4): $G=1.189 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=35.5^\circ\text{C}$, $T_L=30.3^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.0188 \text{ kg water/kg air}$, $L=6.29 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.345 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$						
۷۵٫۸۹	۰٫۳۹۶۹	۶٫۲۹۸۸	۳۴٫۴۵۱	۳۲٫۵۷	۳۱٫۳۵	۰٫۱۱۴۲ (کار حاضر(عددی)
-	۰٫۴۲	-	۳۳٫۷	۳۲٫۶	۳۲٫۸	۰٫۱۱۲ (فومو و قوسوامی)
(Case 5): $G=1.182 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=40.1^\circ\text{C}$, $T_L=30.5^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.018 \text{ kg water/kg air}$, $L=6.287 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.344 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$						
۷۴٫۴۴	۰٫۳۵۷۱	۶٫۲۹۴۹	۳۴٫۳۵۶	۳۳٫۰۳	۳۱٫۷۶	۰٫۱۱۳۲۸ (کار حاضر(عددی)
-	۰٫۳۶	-	۳۴٫۳	۳۲٫۹	۳۳٫۱	۰٫۱۱۵ (فومو و قوسوامی)
(Case 6): $G=1.214 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=30.3^\circ\text{C}$, $T_L=30.1^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.0142 \text{ kg water/kg air}$, $L=6.273 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.339 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$						
۷۸٫۸۱	۰٫۲۷۱۰	۶٫۲۷۹۰	۳۳٫۸۳۲	۳۱٫۳۰	۳۰٫۴۰	۰٫۰۹۲۶۷ (کار حاضر(عددی)
-	۰٫۲۳	-	۳۳٫۸	۳۱٫۵	۳۱٫۱	۰٫۱۰۳ (فومو و قوسوامی)
(Case 7): $G=1.187 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=29.9^\circ\text{C}$, $T_L=30.3^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.0215 \text{ kg water/kg air}$, $L=6.272 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.339 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$						
۷۸٫۷۷	۰٫۵۶۸۶	۶٫۲۸۴۶	۳۳٫۸۳۲	۳۲٫۷۷	۳۰٫۷۶	۰٫۱۰۹۱۳ (کار حاضر(عددی)

-	۰.۵۳	-	۳۳.۷	۳۳.۱	۳۳.۴	۰.۱۲۰	فومو وقوسوامی
(Case ۸): $G=1,190 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=30.1 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_L=30.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.180 \text{ kg water/kg air}$, $L=5,019 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.344 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$							
۷۷.۸۲	۰.۳۸۳۷	۵.۰۲۷۵	۳۴.۳۴۲	۳۲.۳۲	۳۰.۶۶	۰.۱۰۸۷۴	کار حاضر (عددی)
-	۰.۳۸	-	۳۴.۲	۳۲.۷	۳۲.۲	۰.۱۱۳	فومو وقوسوامی
(Case ۹): $G=1,182 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=30.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_L=30.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.181 \text{ kg water/kg air}$, $L=7,420 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.344 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$							
۷۹.۱۱	۰.۳۹۱۷	۷.۴۲۹	۳۴.۳۶۰	۳۱.۶۸	۳۰.۵۲	۰.۱۰۷۷۶	کار حاضر (عددی)
-	۰.۳۹	-	۳۴.۳	۳۲.۵	۳۲.۰	۰.۱۱۰	فومو وقوسوامی
(Case ۱۰): $G=1,198 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=29.9 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_L=25.0 \text{ }^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.177 \text{ kg water/kg air}$, $L=6,269 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.347 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$							
۸۰.۷۴	۰.۵۱۱۵	۶.۲۸۰	۳۴.۶۳۸	۲۷.۴۹	۲۷.۲۰	۰.۰۸۲۶۲۸	کار حاضر (عددی)
-	۰.۵۰	-	۳۳.۵	۲۸.۴	۲۸.۲	۰.۰۸۸	فومو وقوسوامی
(Case ۱۱): $G=1,192 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=29.9 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_L=30.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.179 \text{ kg water/kg air}$, $L=6,267 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.338 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$							
۷۹.۰۶	۰.۴۲۹۳	۶.۲۷۶۵	۳۳.۷۴۹	۳۲.۰۵	۳۰.۵۴	۰.۰۹۹۴۱	کار حاضر (عددی)
-	۰.۳۸	-	۳۳.۷	۳۲.۶	۳۲.۵	۰.۱۱۲	فومو وقوسوامی
(Case ۱۲): $G=1,176 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $T_a=30.0 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_L=30.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $Y_{in}=0.181 \text{ kg water/kg air}$, $L=6,206 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, $X=0.348 \text{ kg LiCl/kg solution}$, $Z=0.6 \text{ m}$							
۷۸.۵۵	۰.۳۵۸۶	۶.۲۱۳۹	۳۴.۷۵۵	۳۱.۸۳	۳۰.۵۲	۰.۱۱۳۶	کار حاضر (عددی)
-	۰.۴۱	-	۳۴.۷	۳۲.۵	۳۲.۰	۰.۱۰۷	فومو وقوسوامی

همانگونه که در جدول ۱ مشاهده می شود نتایج حاصل از کد کامپیوتری نوشته شده، با داده های تجربی هم خوانی نزدیکی دارد و این نتایج صحت کد نوشته شده موجود را تایید می کند. لازم به یادآوری است که داده های ارائه شده در جدول های ۱ برای رطوبت زدا در حالت جریان مخالف می باشد.

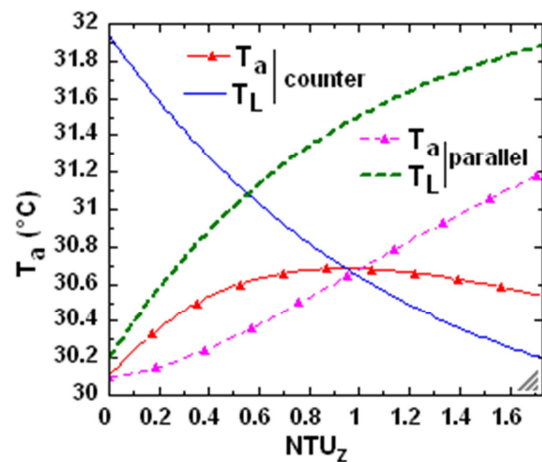
۲-۳- مقایسه پروفیل های دمای هوا و دسیکنت در دو حالت جریان مخالف و موازی در طول رطوبت زدا

با استفاده از کدهای کامپیوتری نوشته شده، ابتدا پروفیل دمای هوا و دسیکنت را برای دو حالت جریان مخالف و موازی به دست می آوریم. این پروفیلها برای دو حالت مختلف در شکل های ۲ و ۳ آورده شده است

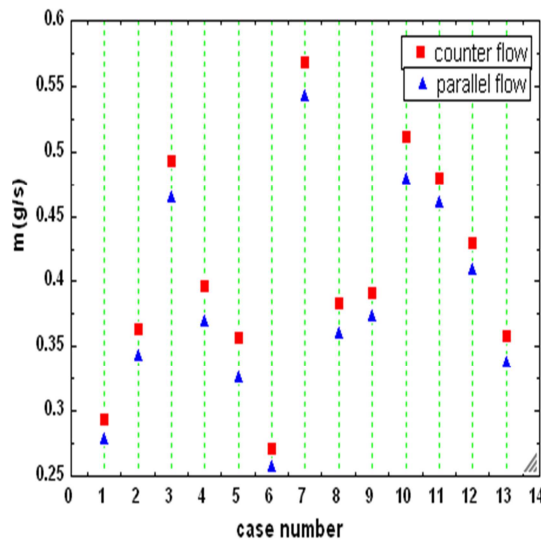


شکل ۳- پروفیل دمای هوا و دسیکنت در دو حالت جریان مخالف و جریان موازی

همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می شود، در رطوبت زدای جریان مخالف در حالتی که مقدار دمای هوا و دسیکنت ورودی به هم نزدیک باشند، در مقطعی از رطوبت زدا پروفیل دمای هوا تغییر جهت می دهد و از این مقطع به بعد رطوبت زدا، علاوه بر رطوبت زدایی نقش مبدل حرارتی را نیز بازی می کند و حرارت را از جریان هوا به جریان دسیکنت منتقل می کند که این خود یک مزیت دوگانه است زیرا اولاً دمای هوا در خروجی رطوبت زدا که به واحد سرمایش ارسال می شود کاهش می یابد و انرژی لازم برای سرد کردن آن کم می شود و از طرفی دمای دسیکنت در خروجی افزایش می یابد و انرژی لازم برای احیای آن در بازیاب کاهش می یابد، در رطوبت زدای جریان موازی در



شکل ۲- پروفیل دمای هوا و دسیکنت در دو حالت جریان مخالف و جریان موازی



شکل ۵- آهنگ چگالش آب از جریان هوا در دو حالت جریان مخالف و جریان موازی

۲-۵- مقایسه غلظت ودبی جرمی دسیکنت در خروجی رطوبت زدا، در دو حالت جریان موازی و جریان مخالف

با توجه به اینکه آهنگ چگالش آب در رطوبت‌زدای جریان مخالف بیشتر از رطوبت‌زدای جریان موازی است، می‌توان پیش‌بینی کرد که چون در رطوبت‌زدای جریان مخالف نسبت به رطوبت‌زدای جریان موازی آب بیشتری از جریان هوا جدا شده و وارد محلول دسیکنت می‌شود، لذا غلظت دسیکنت در خروجی رطوبت‌زدای جریان مخالف کمتر از غلظت آن در خروجی رطوبت‌زدای جریان موازی خواهد بود، ولی بالعکس دبی جرمی محلول دسیکنت در خروجی رطوبت‌زدای جریان مخالف بیشتر از جریان موازی است. نتایج نیز موید همین مطلب است.

جدول ۲ داده‌های مربوط به غلظت محلول را در خروجی رطوبت‌زدا، در دو حالت جریان مخالف و جریان موازی نشان می‌دهد

جدول ۲- داده‌های مربوط به مقایسه غلظت دسیکنت

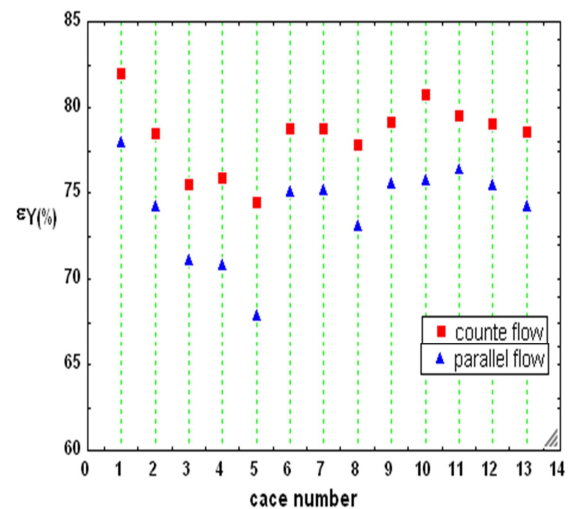
در خروجی رطوبت‌زدا، در دو حالت جریان مخالف و جریان موازی

برای رطوبت‌زدای جریان موازی $X_{out} \%$	برای رطوبت‌زدای جریان مخالف $X_{out} \%$	مورد
۳۴/۵۶۵۱۳	۳۴/۵۶۳۳۴	۱
۳۴/۶۵۷۶۵	۳۴/۶۵۵۲۱	۲
۳۴/۲۴۲۳۵	۳۴/۲۳۸۹۴	۳
۳۴/۴۵۵۱۰	۳۴/۴۵۱۹۰	۴
۳۴/۳۶۰۶۱	۳۴/۳۵۶۷۸	۵
۳۳/۸۶۹۱۵	۳۳/۸۶۷۵۳	۶
۳۳/۸۳۵۲۳	۳۳/۸۳۲۲۷	۷
۳۴/۳۴۵۴۶	۳۴/۳۴۲۰۰	۸
۳۴/۳۶۱۶۷	۳۴/۳۵۹۸۴	۹
۳۴/۶۴۱۳۲	۳۴/۶۳۷۵۵	۱۰
۳۳/۰۴۵۲۹	۳۳/۰۴۳۱۳	۱۱
۳۳/۷۵۱۱۳	۳۳/۷۴۸۸۷	۱۲
۳۴/۷۵۸۰۲	۳۴/۷۵۵۵۵	۱۳

هر حالت پروفیل دمای هوا و دسیکنت تغییر جهت نمی‌دهد. البته همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، در رطوبت‌زدای جریان مخالف نیز در حالتی که اختلاف دمای هوا و دسیکنت در ورودی زیاد باشد، به مانند رطوبت‌زدای جریان موازی تغییر جهتی در پروفیل‌های دمای هوا و دسیکنت رخ نمی‌دهد.

۲-۴- مقایسه پروفیل‌های دمای هوا و دسیکنت در دو حالت جریان مخالف و موازی در طول رطوبت‌زدا

کارایی رطوبت‌زدا و نیز شدت کندانس‌شدن آب با استفاده از کدهای کامپیوتری نوشته شده برای سیزده مورد بررسی و مقایسه گردیده است، نتایج حاصل از این بررسی در مورد کارایی رطوبت‌زدا در شکل ۴ و برای شدت کندانس‌شدن آب در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۴- کارایی رطوبت‌زدا در دو حالت جریان مخالف و جریان موازی

همانگونه که در شکل ۴ دیده می‌شود در رطوبت‌زدای جریان مخالف کارایی بالاتر از رطوبت‌زدای جریان موازی است. مقدار بیشینه اختلاف کارایی رطوبت‌زداها در دو حالت جریان مخالف و جریان موازی برای این سیزده مورد ۶/۴۵٪ می‌باشد.

شکل ۵ نیز آهنگ چگالش آب از جریان هوا را در دو حالت جریان مخالف و جریان موازی مقایسه می‌کند، همچنان که مشاهده می‌شود آهنگ چگالش نیز به مانند کارایی در رطوبت‌زدای جریان مخالف نسبت به رطوبت‌زدای جریان موازی بیشتر است، البته مسلم است که هرچه کارایی افزایش یابد بایستی آهنگ چگالش افزایش یابد، زیرا کارایی به صورت شدت کندانس بر ماکزیمم آهنگ چگالش قابل حصول تعریف می‌گردد. بیشینه مقدار اختلاف آهنگ چگالش آب از جریان هوا در رطوبت‌زداها در دو حالت جریان مخالف و جریان موازی برای این سیزده مورد ۰/۰۳۱ گرم بر ثانیه می‌باشد

h'_G	ضریب همرفت (W/m^2C)
h	گرمای نرمال شده چگالش یا تبخیر ($^{\circ}C$)
j_h	گروه بی بعد انتقال گرما
j_m	گروه بی بعد انتقال جرم
k	رسانایی گرما ($W/m^{\circ}C$)
K_G	ضریب انتقال جرم فاز گازی ($kmol/m^2sPa$)
L	دبی جرمی دسیکنت مایع در واحد سطح مقطع برج (kg/m^2s)
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)
R	ثابت جهانی گازهای ایده آل ($J\ kmol^{-1}K^{-1}$)
T	دما ($^{\circ}C$)
X	کسر جرمی دسیکنت موجود در محلول ($kg\ LiCl/kg\ solution$)
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_0	گرمای نهان تبخیر (kJ/kg)
μ	لزجت ($kg/m\ s$)
ρ	چگالی (kg/m^3)

زیر نویس

O حالت مرجع

۵- 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, Donggen Peng, Xiuwei Li, Model validation and case study on internally cooled/heated dehumidifier/regenerator of liquid desiccant 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] Younus Ahmed S., Gandhidasan P., Al-Farayedhi A. A., 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

جدول ۳ نیز داده‌های مربوط به دبی جرمی محلول را در خروجی رطوبت‌زدا، در دو حالت جریان مخالف و جریان موازی نشان می‌دهد.

جدول ۳- داده‌های مربوط به مقایسه دبی جرمی دسیکنت در خروجی رطوبت‌زدا، در دو حالت جریان مخالف و جریان موازی

	برای رطوبت زدای جریان موازی	برای رطوبت زدای جریان مخالف	
	$L_{out} (kg / m^2 .s)$	$L_{out} (kg / m^2 .s)$	
مورد ۱	۶/۱۳۰۱۷۰	۶/۱۳۰۴۸۴	
مورد ۲	۶/۲۳۴۶۰۲	۶/۲۳۵۰۳۸	
مورد ۳	۶/۱۲۳۲۸۵	۶/۱۲۳۹۱۰	
مورد ۴	۶/۲۹۸۱۸۸	۶/۲۹۸۷۷۶	
مورد ۵	۶/۲۹۴۲۰۹	۶/۲۹۴۸۹۵	
مورد ۶	۶/۲۷۸۷۰۳	۶/۲۷۸۹۹۰	
مورد ۷	۶/۲۸۳۹۹۵	۶/۲۸۴۵۶۶	
مورد ۸	۵/۰۲۶۹۶۷	۵/۰۲۷۴۸۵	
مورد ۹	۷/۴۲۸۲۷۰	۷/۴۲۸۶۵۶	
مورد ۱۰	۶/۲۷۹۶۱۲	۶/۲۸۰۳۰۷	
مورد ۱۱	۶/۱۷۴۱۹۷	۶/۱۷۴۶۰۹	
مورد ۱۲	۶/۲۷۶۰۶۲	۶/۲۷۶۴۸۷	
مورد ۱۳	۶/۲۱۳۴۸۶	۶/۲۱۳۹۲۶	

۳- بحث و نتیجه‌گیری

در حالت کلی از این مقایسه نتیجه می‌شود که کارایی و آهنگ چگالش در رطوبت‌زدا، جریان مخالف بیشتر از رطوبت‌زدا، جریان موازی است ولی این اختلاف چندان فاحش نمی‌باشد و در ماکزیمم مقدار خود برای کارایی به ۶/۴۵٪ می‌رسد، همچنین این اختلاف برای آهنگ چگالش در ماکزیمم مقدار خود به ۰/۰۳۱ گرم بر ثانیه می‌رسد.

همچنین نتیجه می‌شود در حالتی که دمای هوا و دسیکنت ورودی به رطوبت‌زدا، جریان مخالف به هم نزدیک باشند، رطوبت‌زدا از مقطعی به بعد علاوه بر رطوبت‌زدا نقش مبادله‌کن گرما را بازی می‌کند و گرما را از جریان هوا به جریان محلول دسیکنت منتقل می‌کند، که این امر از طرفی موجب کاهش انرژی احیا و از طرف دیگر موجب کاهش انرژی مصرفی برای سرد سازی هوا می‌شود و همانگونه که گفته شد این یک مزیت دوطرفه است.

۴- نمادها

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

- [8] Alizadeh S., Saman W. Y., 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, 2011
- [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, LouaryChamra, 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.
- [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