روشي جديد در تحليل چرخ رطوبت‌زدا براي دستيابي به شرايط كاركرد بهينه

مهدي معرفت[1] ـ سيد جلال قائم مقامي[1] ـ سيد محمد طباطبايي[2]

۱ـ دانشگاه تربيت مدرس ۲ـ شركت صنعتي دقت خودرو كوشا (ايپاكو)

چكيده

بدست آوردن مقادير مناسب كميتهايي نظير دبي جرمي جريانهاي هواي خشك‌شونده و هواي بازيافت‌كننده، دما و رطوبت مطلق هر يك از اين دو جريان، همچنين سرعت دوران چرخ رطوبت‌زدا، جرم مواد جاذب موجود در ماتـريس و ابعـاد و كيفيتهاي ساختماني آن، مساله طراحـي بهينه چرخ رطـوبت‌زدا را بسيـار مشكل و پيچـيده مي‌كند. دشواري مسأله، به دليل تأثير تغيير هر يك از كميتهاي مذكور بر ساير كميتهاست.

در اين مقاله، روشي ساده براي تحليل چرخ رطوبت‌زدا ارائـه شده است كه ضمن سادگي، نياز به تكرار تحليل به ازاي تغييرات تمامي مقادير ورودي ندارد. اين روش بر اين پايه كه حداقل رطوبت مطلق هواي خشك‌شونده خروجي از چرخ رطوبت‌زدا مستقل از دماي هواي بازيافت‌كننده است، استوار مي‌باشد.

واژه‌هاي كليدي: *چرخ رطوبت‌زدا، چرخ آنتالپي، رطوبت زدايي، خنك‌سازي*

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

مقدمه

فرآيند رطوبت‌زدائي از هوا، يكي از فرآيندهاي مورد نياز در عمليات صنعتي و سيستمهاي تهويه مطبوع است. روشهاي متداول در كشور، به طور عمده شامل سه روش رطوبت‌زدايي با مبرد، تراكم سازي واستفاده از مواد جاذب مي‌باشد.

در روش رطوبت‌زدايي با مبرد، هواي مرطوب با گذر از مجاورت سطوح سرد شده (در اثر سرمايش) تا زير نقطة شبنم، رطوبت خود را از دست مي‌دهد. اين روش عمدتاً براي هواي مـرطوب با رطوبت نسبي كمتر از ٤٥% قابل اعمال است و مي‌تواند رطوبت هوا را تا نقطة شبنم ٢/٨C° كاهش دهد. سيستمهاي رطوبت‌زداي مبتني بر اين روش، جهت صرفه‌جويي در مصرف انرژي، به سيستم بازيافت سرما مجهز هستند.

در روش تراكم‌سازي، هواي مرطوب را متراكم مي‌كنند تا فشار جزئي بخار آب و در نتيجه نقطة شبنم هوا تا دماي محيط، افزايش يابد و رطوبت از هوا نيز خارج شود. اين روش، مستلزم بكارگيري كمپرسورهاي متناسب با گذر حجمي هوا است و معمولاً براي گذر هواي كمتر ١٦٠ مترمكعب در ساعت انجام مي‌شود. همچنين اين روش علاوه بر نياز به تجهيزات گران قيمت، از مصرف انرژي بالايي نيز برخوردار است.

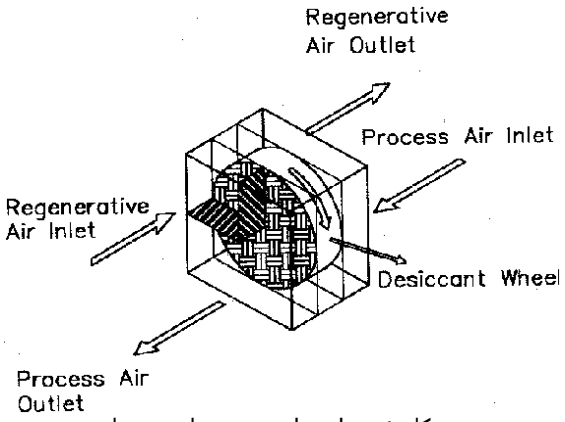
در استفاده از روش رطوبت‌زدايي با مواد جاذب، هواي مرطوب از محيطي كه آكنده از مواد جاذب شيميايي است، عبور داده مي‌شود كه در اثر آن، رطوبت هوا به محيط جاذب منتقل مي‌گردد. براي به دست آوردن هوا با كيفيت مطلوب، معمولاً از اين روش استفاده مي‌شود. همچنين استفاده از اين روش براي گذر حجمي كم و در فرآيندهاي صنعتي مرسوم است. در اين روش هواي مرطوب را مي‌توان تا نقطةشبنم زير C° ٤ كاهش داد.

به دنبال رشد مصرف انرژي در جهان و نياز روز افزون به سيستمهاي تأسيسات خنك كننده و رطوبت‌زداي خانگي و تجاري، امروزه استفاده از چرخ رطوبت زدا بسيار مرسوم شده است. به طوري كه كاربرد سيستمهاي خنك‌كنندة مبتني بر چرخ رطوبت‌زدا، بعنوان جايگزين مناسب سيستمهاي خنك كنندة تبخير تراكمي، در عرصة تجاري مطرح شده و مي‌رود تا كاربرد عمومي در صنايع تأسيسات ساختمان پيدا كند. بنا به گزارشي كه توسط گروه انرژي ايالات متحده (DOE) ارائه شده است، سيستمهاي خنك‌كنندة مبتني بر چرخ رطوبت‌زدا قادرند مصرف انرژي الكتريكي در اقليم شرجي را دست كم ٢٥% در مقايسه با سيستم‌هاي تهو ية تراكمي كاهش دهند. همچنين با بهره‌برداري از اين تكنولوژي، پيش‌بيني مي‌شود از سال ٢٠٠٥ معادل ٠/١ كواد[1] و از سال ٢٠١٠ معادل ٠/٤ كواد صرفه‌جويي سالانه درمصرف انرژي صورت گيرد. به اين ترتيب انتشار گازهاي گلخانه‌اي از سال ٢٠٠٥ به ميزان ٦ ميليون تن و از سال ٢٠١٠ به ميزان ٢٤ ميليون تن در سال كاهش مي‌يابد. بر پاية اين گزارش، پيش‌بيني شده است از سال ٢٠٠٥ حدود ٢٠% و از سال ٢٠١٠ حدود ٣٥% حجم فروش سالانة تأسيسات هواپردازي در سطح جهان را سيستمهاي خنك‌كننده و رطوبت‌زداي مبتني بر چرخ رطوبت‌زدا تشكيل دهند.

١ـ هر كواد معادل 10^{18} ژول انرژي است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

چرخهاي رطوبت‌زدا كه چرخهاي آنتالپي[2] نيز ناميده مي‌شوند، نمونه‌اي از مبدلهاي حرارتي محسوس و نهان متحرك است كه ماتريس آن به صورت بستر دايره‌اي متحرك در گردش مي‌باشد. مطابق شكل(۱) ملاحظه مي‌شود كه دو جريان در جهت مخالف، از داخل ميكروكانالهاي تشكيل‌دهنده ماتريس عبور مي‌كند. ماتريس‌هاي چرخهاي رطوبت‌زدا كه براي انتقال جرم يا رطوبت‌زدايي مورد استفاده قرار مي‌گيرند، معمولاً بصورت ورقهاي سلولزي يا فلزي نازك مي‌باشند. اين ورقها براي ايجاد مسير مناسب جريان هوا كه از داخل آن عبور مي‌كنند، بصورت موجدار ساخته مي‌شوند. جدارة داخلي ميكروكانالهاي مذكور از ذرات مواد جاذب جامد نظير بلورهاي كلريد ليتيم يا سيليكاژل پوشيده شده است. كار چرخ رطوبت زدا در دو مرحله به شرح زير انجام مي‌شود:



شكل ۱ـ نماي يك چرخ رطوبت‌زدا

درطي مرحله جذب، رطوبت هوا از جريان هواي مرطوب اوليه به مواد جاذب منتقل مي‌شود، و در طول مرحله بازيافت، رطوبت از مواد جاذب به جريان هواي گـرم بازيافت‌كننده (با درجه حرارت بين ۸۰ تا ۱۲۰ درجه سانتي‌گراد) منتقل مي‌گردد. مكانيزم انتقال حرارت در چرخ رطوبت‌زدا، بصورت جابجايي و مكانيزم انتقال جرم، بر اساس اختلاف فشار بخار و فرآيند جذب و بازيافت است.

روش تشابه خطي[3] كه به عنوان اولين روش تحليلي مهم چرخ رطـوبت‌زدا مطرح است، توسط Maclain - Cross [1] ارائه شده كه در آن، دما و رطوبت مطلق هواي خروجي از چرخ رطوبت‌زدا، براساس تشابه فرآيندهاي انتقال حرارت و انتقال جرم بيان مي‌شود.

اين روش متعاقباً تحت عنوان (روش تشابه خطي توسعه يافته براي خواص غير خطي مواد جاذب) مطرح گرديد [۲]. كه با استفاده از آن براي اولين بار مدلسازي سيستم خنك‌كننده مبتني بر چرخ رطوبت‌زدا توسط Jurinak به اجرادر آمد [۳].

2- Enthalpy
3- Linear Analogy Method

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

روش تحليل چرخ رطوبت‌زدا به طريقة مدل نيمه پايدار [4] توسط Barlow ارائه شد كه در آن، بدون در نظر گرفتن طبيعت ناپايدار (گذرا[5]) مسأله كل چرخ رطوبت‌زدا بعنوان مقدار معيني جاذب، با كل دبي هواي خشك‌شونده، به شكل حالت پايدار[6] مدل شده است [٤].

به موازات روشهاي تحليلي، روشهاي عددي مختلفي، با تكنيكهاي متفاوت، براي تحليل چرخ رطوبت‌زدا توسعه يافته كه نتايج حاصل از آنها ـ در مقايسه با روشهاي تحليلي ـ به نتايج تجربي، نزديك‌تر است. اما اشكال مهمي كه روشهاي عددي دارند، اين است كه براي روند محاسبات، زمان زيادي صرف مي‌شود و عملاً در مدلسازي سيستمهاي خنك‌كننده و رطوبت‌زدا كه چرخ رطوبت‌زدا يك جزء آن است، كارايي لازم را ندارد.

جامع‌ترين روند تحليل چرخ رطوبت‌زدا، جهت يافتن مقادير بهينة كميتهايي نظير دبي‌هاي هواي خشك‌شونده و بازيافت‌كننده، سرعت دوران چرخ رطوبت‌زدا، خصوصيات هندسي ماتريس و مواد جاذب و شرايط سايكروماتريك جريانهاي هوا و موارد مشابه ديگر، توسط Van Den Bulk ارائه شده است كه براساس آناليز ديمانسيون و تفكيك اثر كميتها، مساله را بسيار ساده نموده است [5]. روش Van Den Bulk، يك روش نيمه تحليلي ـ عددي است. از جمله مزاياي اين روش، آن است كه روند تحليل، مستقل از خواص ترموديناميكي مواد جاذب انجام مي‌شود. ديگر آنكه قادر به تحليل چرخ رطوبت‌زدا با دبيهاي نابرابر هواي خشك‌شونده و بازيافت‌كننده، يا اصطلاحاً حالت غير متعادل[7] مي‌باشد. البته اين روش به نوبه خود مشكلاتي هم دارد. مهمترين آن اين است كه براي پيدا كردن مقدار بهينة هريك از كميتهاي ورودي مساله، بايد دياگرامهاي نتايج مورد نظر، به ازاي تمام حالات، رسم شود.

در اين مقاله ضمن بيان آناليز چرخ رطوبت زدا، روند تحليلي نويني ارائه شده است كه از لحاظ ساختار كلي، مشابه روش Van Den Bulk مي‌باشد. با اين تفاوت كه ديگر نيازي به تغيير شرايط ورودي مسأله (به منظور مقايسه جهت يافتن مقادير بهينه) نيست و به طور مستقيم و بدون سعي و خطا مي‌توان به جواب نهايي رسيد. ضمن اينكه روند مراحل، ساده و نتايج قطعي مي‌باشد، دقت جواب مسأله نيز تا حدود قابل قبولي محفوظ مي‌ماند.

كميتهاي مؤثر در عملكرد چرخ رطوبت‌زدا

در كاركرد چرخ رطوبت‌زدا عوامل و كميتهاي مختلفي مؤثر هستند، به طوري كه براي تحليل جامع چرخ رطوبت زدا، لازم است اين كميتها مورد ارزيابي قرار گيرند. از جمله مهمترين آنها عبارتنداز:

١- مشخصات هـواي محيط، شامل نرخ جريانهاي جـرمي هواي خشك‌كننده و بازيافـت‌كننده و شـــرايط سايكروماتريك (دما و رطوبت مطلق) هريك از اين دو جريان.

4- Pseudo-Steady State Model
5- Transient
6- Steady State
7- Unbalanced

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

مشخصات چرخ رطوبت‌زدا شامل: ضخامت، قطر و سرعت زاويه‌اي دوران چرخ رطوبت‌زدا.

۲- مشخصات هندسي ماتريس چرخ رطوبت‌زدا، نظير قطر هيدروليكي ميكروكانالهاي ماتريس، تعداد ميكروكانالها، سطح انتقال (تبادل) حرارت و رطوبت كلي، ميزان تخلخل ماتريس، نسبت سطح تبادل به حجم ماتريس، ضريب افت فشار هيدروليكي، عدد لوئيس و گروه بي بعد عدد ناسلت مربوط به انتقال حرارت و انتقال جرم.

۳- مشخصات فيزيكي مربوط به مواد جاذب موجود در ماتريس، از قبيل جرم مؤثر كلي مواد جاذب (جرمي كه در معرض جريان هوا قرار دارد)، اندازه متوسط ذرات، گرماي جذب رطوبت توسط ماده جاذب، منحني تعادل همدماي (ايزوترم) مواد جاذب در رطوبتهاي نسبي مختلف و مشخصات ترمو فيزيكي مواد جاذب، نظير چگالي، گرماي ويژه، ضريب هـدايت حرارتي و غيره.

خاطر نشان مي‌شود كه درتحليلهاي ساده‌تر چرخ رطوبت‌زدا، با دبي‌هاي مساوي جريانهاي هواي خشك‌شونده و بازيافت‌كننده، مي‌توان از تأثير برخي از كميتهاي فوق صرف‌نظر كرد.

در طراحي بهينة چرخ رطوبت‌زدا، همواره شرايط كاركرد مطلوب چرخ، مورد توجه است، از اين رو مي‌توان آن را با دو كميت زير بيان نمود.

۱) كمترين مقدار انرژي ورودي هواي بازيافـت كننـده.

۲) بيشترين مقدار نرخ انتقال جرم. اين مقدار به ازاي كمترين مقدار نرخ انتقال حرارت هر يك از كميتهاي مورد اشاره، لزوماً به يكديگر وابسته نبوده و اثرات آنها را مي‌توان كم و بـيش بـه صـورت مستقل با دو شاخص"ضريب عملكرد[8] (COP)" و " اثر خنك‌سازي[9] (CE)" ارزيابي نمود:

(۱) $$CE = (\text{آنتالپي هواي خشك خروجي در دماي هواي مرطوب ورودي}) - (\text{آنتالپي هواي مرطوب ورودي})$$

به عبارت ديگر شاخص فوق، ميزان تغييرات آنتالپي نهان هواي خشك‌شونده را بيان مي‌كند، به طوريكه اگر هواي خشك‌شونده، تحت فرآيند آدياباتيك اشباع، مرطوب شود معادل CE خنك مـي‌گـــردد. بـــه طور كلي كميت CE بيان‌كنندة تغيير آنتالپي است كه صرفاً به ازاي انتقال جرم (گرماي نهان) صورت مي‌گيرد. بالا بـودن آن به معني خشك‌شدن و رطوبت‌زدايي بيشتر هواي خروجي از چرخ رطوبت‌زداست. در واقع معياري است براي كاركرد مطلوب چرخ رطوبت‌زدا كه بيشترين بهره‌برداري تجارتي را معين مي‌كند.

كميت COP، معياري است براي مصرف انرژي چرخ رطوبت‌زدا كه به صورت زير تعريف مي‌شود:

(۲) $$COP = \frac{CE}{\text{تغييرات آنتالپي هواي بازيافت‌كننده}}$$

8- Coefficient of Performance
9- Cooling Effect

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

همچنين كميت بي بعد ديگري، تحت عنوان "فاكتور ظرفيت چرخ رطوبت زدا [10] (CF) " توسط *Van Den Bulk* معرفي شده است.[۵] كه بيان‌كنندة نسبت جرمي ماده جاذب به هواي مرطوبي است كه در هر لحظه با يكديگر تبادل رطوبت انجام مي‌دهند. با فرض يكنواخت بودن سرعت دوران چرخ رطوبت‌زدا و توزيع يكنواخت مواد جاذب در ماتريس، كميت CF براي هريك از مراحل كاري جذب و بازيافت، مقدار ثابتي بوده و به صورت زير تعريف مي شود:

$$CF = \frac{Md}{Mw}$$

كه در آن M_d دبي جرمي هواي بازيافت‌كننده يا خشك‌شونده و M_w دبي جرمي مواد جاذب ورودي به مرحله جذب يا بازيافت مي‌باشند.

كميت CF را به شكل زير هم مي‌توان نوشت:

CF = (پريود زماني چرخش چرخ رطوبت زدا)] / (جـرم مـؤثركل مـواد جاذب مـوجود درچرخ رطـوبت زدا) [(دبــي جـرمي هـواي بازيافت كننده يا خشـك شونـده)×

معادلات حاكم [٦]

$$\frac{\partial Y_a}{\partial x} = \frac{2K_y}{a_p U_a \rho}\left(Y_w - Y_a\right) \qquad (٣)$$

$$\frac{\partial H_a}{\partial x} = \frac{2K_y H_v}{a_p U_a \rho}\left(Y_w - Y_a\right) + \frac{2K_y H_v}{a_p U_a \rho}\left(T_w - T_a\right) \qquad (٤)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{2\mathrm{Ky}}{\mathrm{aw}\rho\mathrm{w\,f}}\left(Y_a - Y_w\right) \qquad (٥)$$

$$\frac{\partial H_w}{\partial t} = \frac{2K_y H_v}{a_w \rho_w}\left(Y_a - Y_w\right) + \frac{2h}{a_w \rho_w}\left(T_w - T_a\right) \qquad (٦)$$

دو معادلة (٣) و (٤) به ترتيب معادلات بقاي جرم و انرژي در هواي عبوري از ماتريس مي‌باشند و دو معادله (٥) و (٦)، معادلات بقاي جرم و انرژي را در جدارة ميكروكانالها يا مواد جاذب نشان مي‌دهند. در اين معادلات، ضرايب جابجايي انتقال حرارت و جرم به ترتيب با U_a و h نمايش داده شده است. انديس a، به هواي عبوري از ماتريس و انديس w به مواد جاذب جامد جداره ميكروكانالهاي ماتريس اشاره دارد. همچنين در معادله (٦) جمله اول طرف راست، به تغييرات آنتالپي نهان و جمله دوم به آنتالـپي محسوس هوا اشاره مي‌كند.

دستگاه معادلات (٣) تا (٦) بيانگر فرآيندهاي انتقال حرارت و جرم در ماتريس چرخ رطوبت‌زدا مي‌باشند . در اين دستگاه، به جهت اينكه تعداد مجهولات(Y_a, Y_w, H_a, H_w بيش از تعداد معادلات است، بنابراين از معادلات تعادل همدما [٧] به عنوان رابطة پنجم استفاده مي‌شود و داريم:

$$Y_w = Y_w(T_w, W) \qquad (٧)$$

10- Capasitance Factor

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

این معادله که جزو خواص فیزیکي ماده جاذب است، بیان کنندة مقدار رطوبت موجود در مادة جاذب در تعادل همدما (ایزوترم) با هواي مرطوب محـیط مي‌باشد [۷]. همچنین این معادله براي هر جاذب، توسط سازندگان ارائـه مي‌شود و فرم کلي آن به صورت معادلة (۷) مي‌باشد که در آن رطوبت مطلق هوا در سطح ماده جاذب، تابعي از دما و رطوبت محتوي جاذب است.

براي حل دستگاه معادلات (۳) تا (٦)، از شرایط اولیه و مرزي استفاده مي‌شود. در مراحل کاري جذب و بازیافت که شرایط مرزي و اولیه، مجزا از یکدیگر هستند، حل معادلات را باید جداگانه بررسي نمود. از طرفي رطوبت و دماي سطح خارجي ماتریس چرخ رطوبت‌زدا، با شرایط سایکرومتریك دما و رطوبت هواي مجاور آن برابر است. بنابراین داریم :

$$Y_a\,(t,o) = Y_{a,ad,in}\,(t) \qquad (۸)$$

$$T_a\,(t,o) = T_{a,ad,in}\,(t) \qquad (۹)$$

با توجه به چرخش مداوم و پیوسته چرخ رطوبت‌زدا و در نتیجه گذرا بودن طبیعت مسأله، دما و رطوبت اولیه تمامي نقاط ماتریس واقـع در مرحله رطوبت‌زدایي، با شرایط هواي بازیافت‌کننده برابر فرض مي‌شود، از این رو داریم:

$$Y_w\,(o,x) = Y_w(\,t_{re}\,,\,X_L - x) \qquad (۱۰)$$

$$T_w\,(o,x) = T_w\,(t_{re}\,,\,X_L - x) \qquad (۱۱)$$

به‌همین ترتیب براي مرحلة بازیافت مي‌توان نوشت:

$$Y_a\,(t,o) = Y_{a,re,in}\,(t) \qquad (۱۲)$$

$$T_a\,(t,o) = T_{a,re,in}\,(t) \qquad (۱۳)$$

براي شرایط اولیة بازیافت داریم:

$$Y_w\,(o,x) = Y_w\,(t_{re}\,,\,X_L - x\,) \qquad (۱٤)$$

$$T_w\,(o,x) = T_w\,(t_{re}\,,\,X_L - x\,) \qquad (۱۵)$$

به منظور ارزیابي عملکرد چرخ رطوبت‌زدا، معادلات (۳) تا (۱۵) به روش عددي حل شده‌اند. در این حل، از مدل تفاضلات محدود غیر صریح [11] معادلات حاکم انتقال حرارت و جرم استفاده شده است.

حل معادلات

فرضیاتي که در این مسأله در نظر گرفته شده است، به قرار زیر است:

الف) جریان سیال، یك بعدي فرض مي‌شود و پروفیل جریان در طول مسیر کانال یکنواخت خواهد بود. به عبارت دیگر از اثرات لزجت هوا و تبادل مومنتوم بین لایه‌هاي هوا صرف‌نظر مي‌شود. در عمل نیز به سهولت نشان داده مي‌شود که اثرات لزجت و گرماي ناشي از آن، در فرآیند انتقال حرارت و جرم تقریباً بي‌اثر است. آزمایشات تجربي نشان داده که معمولاً جریان درون میکروکانالهاي ساختار ماتریس چرخ رطوبت‌زدا، آرام است. و مي‌توان ثابت کرد که اثرات افـــت فشار جریان هواي عبوري از ماتریس، در مقایسه با فشار مطلق، بسیار جزئي است. به

11- Implicit Finite difference

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

طوري كه تغييرات خواص ترموديناميكي هوا و جاذب با تغيير فشار نا چيز مي‌باشد. علاوه بر اين، در مدلسازي يك بعدي، هرگونه تغييرات خواص در راستاي شعاعي منتفي است.

ب) ماتريس به صورت مسيرهاي موازي كاملاً يكسان با خصوصيات ساختماني و هندسي و خواص مشابه و يكنواخت در كل سطح چرخ رطوبت‌زدا در نظر گرفته مي‌شود. همچنين كانالها به صورت كاملاً مستقل از يكديگر عمل مي‌كنند، به طوري كه هيچ‌گونه تأثيري بر عملكرد هم ندارند.

ج) خواص ترموفيزيكي هوا در حالت خشك و در ابتداي هر پريود، ثابت فرض مي‌شود، به طوري كه هيچگونه اختلاط جريان هواي خشك‌شونده و بازيافت‌كننده وجود ندارد. هر چند كه همواره در عمل نشتي در جريان هوا از ناحية آب‌بندي چرخ رطوبت‌زدا با لبه‌هاي كانال، اجتناب ناپذير است.

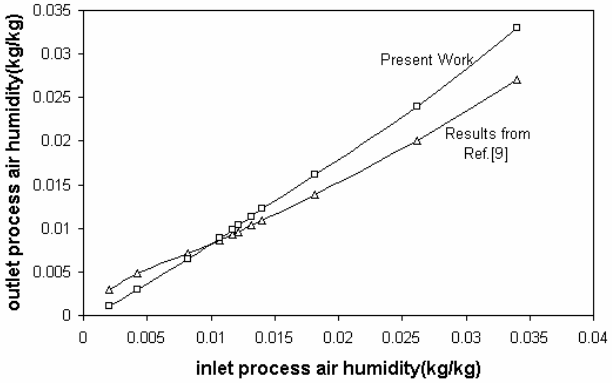
د) خواص فيزيكي و شيميايي جاذب در حالت خشك و در طول كل فرآيند رطوبت‌زدايي و بازيافت، ثابت در نظر گرفته مي‌شود.

هـ) هيچگونه گراديان دما و رطوبت ـ چه در هواي عبوري از كانال و چه در جاذب ـ در راستاي شعاعي وجود ندارد.

و) انتقال محوري حرارت و جرم به‌صورت ديفيوژن در هوا و جاذب، ناچيز بوده و از آن صرف‌نظر شده است[٨].

درون يك چرخ رطوبت‌زدا، دو فرآيند جذب و بازيافت، به طور متوالي و با تناوب در يك كانال صورت مي‌گيرد. اين موضوع (گذرا و متناوب) به روش‌هاي عددي از نوع تفاضلات محدود صريح، تحليل شده و نتايج نسبتاً دقيقي در مقايسه با مقادير تجربي به دست آمده است[٦].

روش تفاضلات محدود غير صريح كه در اين تحقيق مورد استفاده قرار گرفته است، داراي اين مزيت مهم است كه بدون محدوديت در مورد اندازة گام شبكة زماني و مكاني، پايدار مي‌باشد. همچنين اين روش به سرعت و باگامهاي بلند همگرا مي‌شود، ولي از لحاظ زمان اجرا، نمي‌توان نظر مطلقي ارائه نمود. به نظر مي رسد كه شرايط مسأله در اين مورد، بسيار مؤثر مي‌باشند. در شكل (٢) نتايج تحليل چرخ رطوبت‌زدا و نتايج به دست آمده از مرجع [٩] با هم مقايسه شده‌اند.



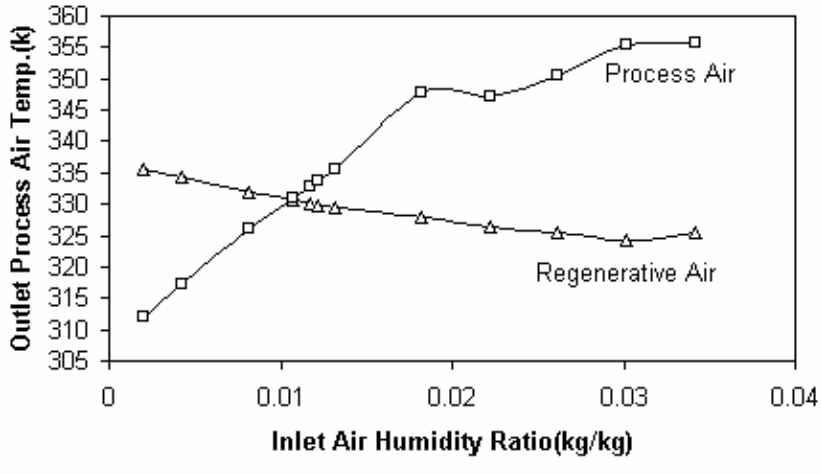
شكل ٢ـ مقايسة نتايج به دست آمده با نتايج مرجع [٩]

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

نتايج مذكور كه متعلق به چرخ رطوبت‌زدا با عامل ظرفيت بسيار كوچك مي‌باشد توافق نسبتاً مناسبي نشان مي‌دهد. خاطر نشان مي‌شود كه در مرجع اشاره شده از مواد جاذب خاصي استفاده شده است كه مانع افزايش دماي جاذب مي‌گردد.

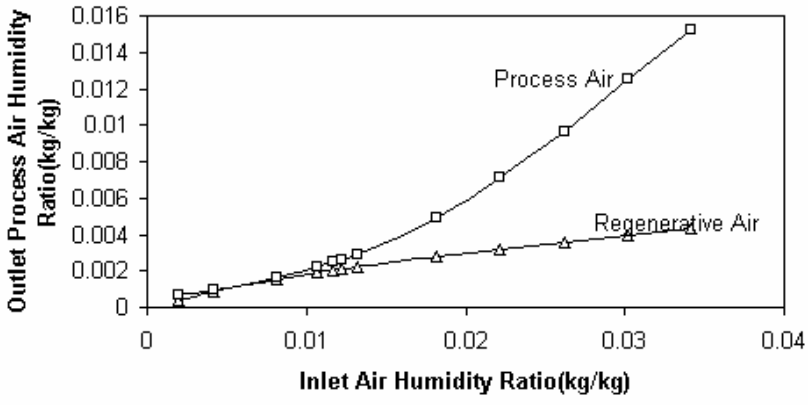
بحث و نتيجه‌گيري

هدف از تحليل چرخ رطوبت‌زدا، بررسي تأثير كميتهاي مختلف بر يكديگر و همچنين بررسي تأثير هر يك، در شاخصهاي عملكرد چرخ رطوبت‌زدا (COP, CE) مي‌باشد. همانگونه كه در بخشهاي قبلي اشاره شد، كميتهاي زيادي در عملكرد چرخ رطوبت‌زدا مؤثرند. بعضي از اين كميتها، با ساده نمودن فرضيات تحليل و بي‌بعد سازي آنها در طي روند تحليل، قابل حذف مي‌باشند. از طرفي ديگر نتايج تجربي نشان داده است كه حوزة تغييرات برخي از كميتهاي بي بعد، ناچيز بوده و مي‌توان با توجيه قابل قبولي آنها را ثابت، و تأثير آنها را در تحليل مسأله ناديده در نظر گرفت. به عنوان مثال آزمايشات تجربي نشان مي‌دهد كه عدد لوئيس در فرآيند انتقال حرارت و جرم در چرخ رطوبت‌زدا، برابر واحد است [۱۱]. در اينجا با توجه به نحوة تأثير كميتها بر شاخصهاي عملكرد چرخ رطوبت‌زدا، مي‌خواهيم علاوه بر ساده كردن مراحل، با ارائه روش تحليلي خاصي، آنها را دسته‌بندي كنيم. شكل (۳) اثر دماي هواي خشك‌شونده و رطوبت هواي بازيافت‌كننده را در ميزان رطوبت هواي خروجي از چرخ رطوبت‌زدا نشان مي‌دهد. همان طور كه ملاحظه مي‌شود، اين دو كميت تأثير جدي در عملكرد چرخ رطوبت‌زدا ندارند، و بنابرين با حفظ دقت نسبي مسأله، مي‌توان آنها را از روند تحليل حذف نمود.



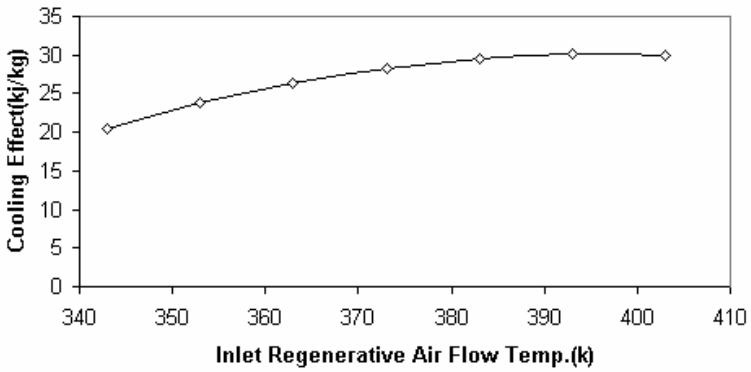
شكل ۳ـ الف ـ تاثير رطوبت هواي ورودي در دماي هواي خروجي

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]



شكل ٣ـ ب ـ تاثير رطوبت هواي ورودي در رطوبت هواي خشك‌شونده خروجي

دماي هواي بازيافت‌كننده در مقدار رطوبت‌زدايي هواي خروجي چرخ رطوبت‌زدا، مؤثر مي‌باشد. يعني با افزايش دماي هواي بازيافت‌كننده و به دنبال آن افزايش دماي جاذب فرآيند بازيافت، فشار بخار آب محتوي مواد جاذب، افزايش يافته و فرآيند بازيافت مؤثرتر انجام مي‌شود. اين روند صعودي در شكل (٤) به وضوح نشان داده شده است.

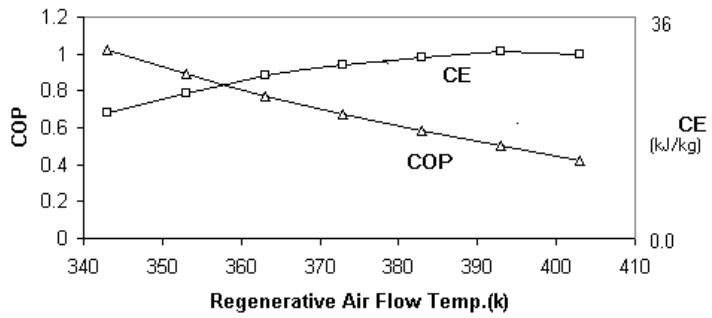


شكل ٤ـ افزايش اثر خنك كنندگي چرخ رطوبت زدا در اثر افزايش دماي هواي بازيافت‌كننده

البته نبايد اين واقعيت را از نظر دور داشت كه اگر چه افزايش بيش از اندازة دماي هواي بازيافت‌كننده موجب خشك‌تر شدن مواد جاذب موجود در چرخ رطوبت‌زدا مي‌شود، ولي به نوبة خود فشار بخار آب در سطح مواد جاذب هم افزايش مي‌يابد كه اين امر، تابع جذب مقادير بيشتر رطوبت از هواي خشك‌شونده مي‌شود. اين واقعيت، ارتباطي به شرايط اوليه و نوع ساختمان چرخ رطوبت‌زدا نداشته و همان‌گونه كه در شكل (٤) نشان داده شده است، تنها به صورت كاهش شيب

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

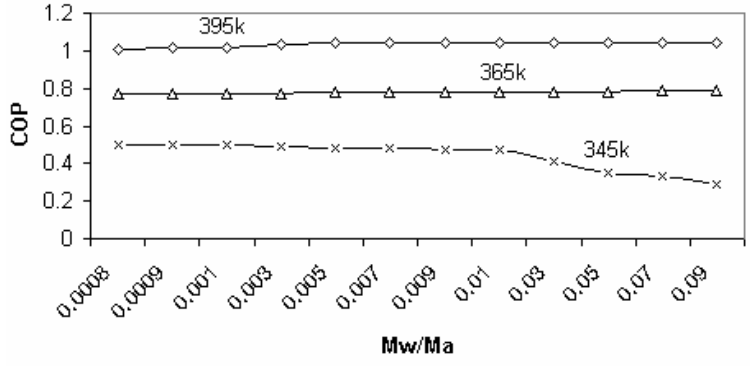
منحني و نهايتاً اندكي كاهش در آن، خود را نشان مي‌دهد. بنابراين افزايش دماي هواي بازيافت كننده تا جايي كه موجب كاهش رطوبت هواي خروجي و افزايش اثر خنك‌كنندگي چرخ رطوبت‌زدا شود، مطلوب است. ولي افزايش بيش از حد آن، ضمن كاهش قابليت كاري چرخ رطوبت‌زدا، مصرف غير اقتصادي انرژي را به دنبال خواهد داشت. اين موضوع به وجود يك مقدار بهينه براي دماي هواي بازيافت‌كننده دلالت دارد كه به ازاي اثر خنك كنندگي و ضريب عملكرد، در شكل (۵) نشان داده شده است.



شكل ۵ـ عملكرد چرخ رطوبت زدا با تغيير دماي هواي بازيافت كننده

با افزايش دماي هواي بازيافت‌كننده، *COP* كاهش و *CE* افزايش مي‌يابد. بنابراين، تنها در دماي بازيافت معيني، مي‌توان بين اين دو روند متضاد، تعادل ايجاد كرد. زيرا همانطور كه قبلاً اشاره شد، بالاترين مقادير *COP* و *CE* براي كاركرد چرخ رطوبت‌زدا مطلوب است.

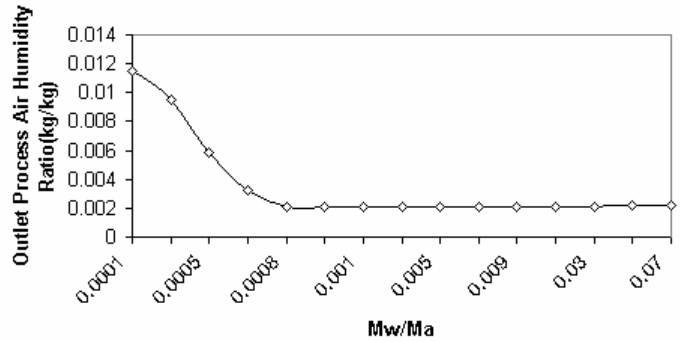
حال به نقش تعيين‌كننده فاكتور ظرفيت، در عملكرد چرخ رطوبت‌زدا مي‌پردازيم. اين موضوع در شكلهاي (٦) و (٧) در مقياس نيمه لگاريتمي نشان داده شده است. شكل (٦) نشان مي‌دهد كه در كاركرد چرخ رطوبت‌زدا، مقدار مطلوب COP به ازاي يك عامل ظرفيت بهينه ايجاد مي‌شود، به طوري كه در ازاي مقادير بيشتر از آن، ضريب عملكرد، مقدارثابتي دارد.



شكل ٦ـ اثر فاكتور ظرفيت در ضريب عملكرد (COP)

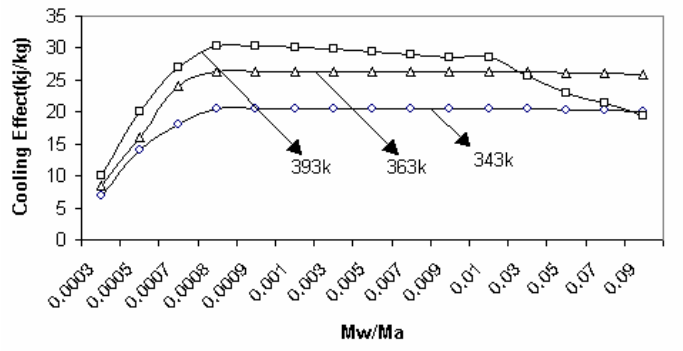
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

شكل (۷) عامل ظرفيت بهينة ديگري را نشان مي‌دهد كه در آن كمترين رطوبت هواي خروجي و در نتيجه بيشترين اثر خنك‌كنندگي چرخ رطوبت زدا را خواهيم داشت. مقادير بهينة مذكور لزوماً بر يكديگر منطبق نمي‌باشند، اما انتظار نهايي از به كارگيري چرخ رطوبت‌زدا، دستيابي به خشك‌ترين هواي ممكن است. اين واقعيت نمي‌تواند تحت تأثير بازده بالاترين مصرف انرژي واقع شود. به عبارت ديگر، انتخاب چرخ رطوبت‌زدا با عامل ظرفيت بهينة مربوط به ضريب عملكرد، يك شرط لازم است، اما كافي نيست. و اين بخاطر اثر تعيين كننده‌اي است كه فاكتور ظرفيت، دركاهش رطوبت هواي خشك خروجي از چرخ رطوبت‌زدا دارد. البته بايد به اين نكته هم توجه داشت كه دماي هواي بازيافت‌كننده، در روند تغييرات منحني شكل (۷)، نيز مؤثر است.



شكل ۷ـ تغييرات رطوبت هواي خروجي در مقادير مختلف عامل ظرفيت

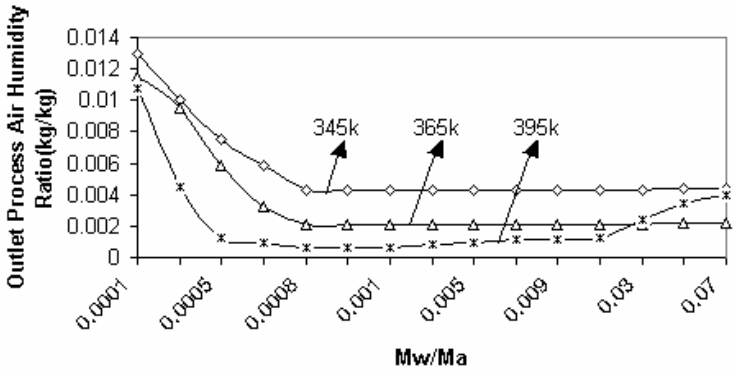
همان‌گونه كه درشكل (۸) نشان داده شده است، در دماهاي پايين (حدود ۸۰ درجه سانتي‌گراد)، هواي بازيافت‌كننده فاكتور ظرفيت بهينه، از محدودة مجاز بيشتري نسبت به هواي بازيافت‌كنندة داغ (بيش از۱۲۰ درجه سانتي‌گراد) برخوردار است. به عبارت ديگر، حساسيت اثر خنك‌كنندگي در دماهاي بالا، بيشتر مي‌شود. در صورتيكه دماي هواي بازيافت‌كننده، خيلي زياد باشد ناپايداري‌هاي مسئله به شدت خودنمايي مي‌كند و تحليل فوق در اين شرايط صحت خود را از دست مي‌دهد.



شكل ۸ـ تأثير فاكتور ظرفيت در اثر خنك كنندگي چرخ رطوبت زدا

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

سؤالي كه در اينجا ممكن است مطرح شود، آن است كه مقادير بهينة هريك از كميتهاي فاكتور ظرفيت و دماي بازيافت، چگونه تعيين شوند تا مطلوبترين حالت كاركرد چرخ رطـوبت‌زدا (يعني بالاترين مقاديرCE وCOP) ايجاد شود. براي پاسخ به اين سئوال شكل (۹) را از نظر مي‌گذرانيم.



شكل ۹ـ اثر فاكتور ظرفيت در ميزان رطوبت گيري از هواي خشك كننده

در اين شكل اثر فاكتور ظرفيت در رطوبت هواي خشك شونده خروجي، به ازاي دماهاي مختلف هواي بازيافت‌كننده، رسم شده است. ملاحظه مي شود كه با افزايش دماي هواي بازيافت‌كـننده، فاصله منحنـيها كاهش يافته و اين موضوع (همان‌طوري كه در شكل (۵) نشان داده شد) بيانگر وجود يك مقدار بهينه در دماي هواي بازيافت‌كنندة چرخ رطوبت‌زدا مي‌باشد.

كمترين مقادير هر يك از اين منحني‌ها، بيان‌كنندة فاكتور ظرفيت بهينه در هر دماي بازيافت‌كننده است. نكتة مهمي كه در اينجا مشاهده مي‌شود آن است كه كمترين مقادير منحني‌هاي مذكور، همگي در فاكتور ظرفيت بهينة يكساني ايجاد شده‌اند. به عبارت ديگر به ازاي تمامي شرايط كاركرد چرخ رطوبت‌زدا، فاكتور ظرفيت بهينه به دماي هواي بازيافت‌كننده بستگي ندارد.

واقعيت فوق، تحـليل چرخ زطوبت‌زدا را بسيـار ساده مي‌كند. بدين‌ترتيب قادر خواهيم بود كه عمدة تأثير دماي هواي بازيافت‌كننده را در ضريب عملكرد، و عمدة تأثير فاكتور ظرفيت را در اثر خنك‌كنندگي چرخ رطوبت‌زدا خلاصه نماييم و اثرات آنها را بصورت مستقل بررسي كنيم.

جمع بندي

در اين مقاله با استفاده از روش مدلسازي و تحليل چرخ رطوبت‌زدا، نشان داده شد كه مقادير رطوبت مطلق هواي بازيافت‌كننده و دماي هواي خشك‌شونده در ورود به چرخ رطوبت‌زدا، تأثير جدي در عملكرد چرخ رطوبت‌زدا ندارند، به طوري كه مي‌توان آنها را در بررسي‌ها حذف نمود. همچين معيارهايـي كه مي‌توان براساس آن عملكرد چرخ رطوبت‌زدا را ارزيابي كرد عبارتند از:

۱- ضريب عملكرد چرخ رطوبت‌زدا (COP) .
۲- اثر خنك كنندگي چرخ رطوبت‌زدا (CE) .

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

مقادير فوق تقريباً از يكديگر مستقل بوده و مي‌توانند عملكرد چرخ رطوبت‌زدا را از نقطه‌نظرهاي بيشترين مقدار رطوبت‌زدايي و كمترين مقدار مصرف انرژي (به صورت هواي بازيافت‌كننده) ارزيابي كنند.

همچنين در اين تحليل نشان داده شد كه كميتهاي مهم و مؤثري كه بايد مقدار بهينة هريك از آنها، جهت كاركرد مناسب چرخ رطوبت‌زدا، تعيين شوند عبارتنداز:

۱- فاكتور ظرفيت چرخ رطوبت‌زدا.

۲- دماي هواي بازيافت‌كننده.

به گونه‌اي كه تأثير دماي هواي بازيافت‌كننده عمدتاً در ضريب عملكرد و تأثير فاكتور رطوبت در توانايي خنك‌كنندگي چرخ رطوبت‌زدا ظاهر مي‌شود.

با توجه به نتايج به دست آمده و همچنين بر پاية اين واقعيت كه مقدار بهينة فاكتور ظرفيت چرخ رطوبت‌زدا، مستقل از دماي هواي بازيافت‌كننده است، مي‌توان مراحل سادة زير را براي انتخاب چرخ رطوبت‌زدا پيشنهاد نمود:

الف) پيدا كردن فاكتور ظرفيت بهينة متناظر با كمترين مقدار رطوبت مطلق هواي خشك‌شونده، بدون نياز به دماي هواي بازيافت‌كننده.

ب) پيدا كردن دماي بهينة هواي بازيافت‌كنندة متناظر با بيشترين مقدار ضريب عملكرد COP و به ازاي مقدار عددي فاكتور ظرفيت بهينة به دست آمده از قسمت (الف).

روش فوق، علاوه بر اينكه در محدوده كاري چرخ رطوبت‌زدا، خطاي قابل توجهي ندارد، داراي مزاياي مهمي است. از جمله اينكه: مراحل انتخاب چرخ رطوبت‌زدا، نياز به سعي و خطا ندارد. همچنين جهت به دست آوردن مقادير بهينة كميتهاي طراحي چرخ رطوبت‌زدا، به محاسبة عكس‌العمل چرخ رطوبت‌زدا براي تمامي مقادير مختلف كميتهاي ورودي و نهايتاً به انتخاب بهترين مقدار، نياز نمي‌باشد.

علائم و نمادها

a_p قطر هيدروليكي ميكروكانالهاي ماتريس چرخ رطوبت زدا

f ضريب تخلخل (درصد جرمي ذرات مواد جاذب به فضاي بين آنها)

h ضريب انتقال حرارت جابجايي

H آنتالپي

K_y ضريب انتقال جرم جابجايي

M_d دبي جرمي مواد جاذب ورودي به مرحلة جذب يا بازيافت

M_w دبي جرمي هواي بازيافت كننده يا خنك شونده

t زمان

T دما

x متغير بعد طولي

X_L ضخامت چرخ رطوبت‌زدا

W رطوبت محتوي ماده جاذب

Y رطوبت مطلق

ρ چگالي

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]

پانویسها

a	هوا	ad	هواي بازيافت كننده
in	ورودي	re	هواي بازيافت كننده
w	ماده جاذب		

منابع

1- I.L. Maclain- Cross, 1972, Coupled Heat and Mass Transfer Regenerators Pridiction Using an Analogy with Heat Transfer, Int J.Heat Mass Transfer, 15, 1225- 1241.

2- P.J. Banks, 1985, Prediction of Heat and Mass Regenerator Performance Using Nonlinear Analogy Method: Part I, II, ASME Journal of Heat Transfer, 109, 222-229.

3- Jurinak, 1984, Open Cycle Solid Desiccant Cooling Component Method and Air Conditioning as an Alternative to Vapor - Compression Cooling in Residential Applications, Journal of Solar Energy Engineering, 106, 252-260.

4- R.S. Barlow, 1982, Analysis of the Adsorption Process of Desiccant Cooling System- A Pseudo Steady state Model for Coupled Heat and Mass Transfer, Solar Energy Research Institute.

5- E.Van Den Bulk, 1985, Design Theory for Rotary Heat and Mass Exchangers Part I, II, Wave Analysis of Rotary Heat and Mass Exchangers with Infinite and Finite Transfer Coefficients, Int.J.Heat Mass Transfer, 28, 1575- 1595.

6- W. Zhena, 1993, Numerical Simulation of Combined Heat and Mass Transfer Processes in a Rotary Dehumidifier, Numerical Heat Transfer, Part A, 23, 211- 232.

7- K. Collier, 1986, Advanced Desiccant Materials Assessment GRI-86/0181.Final Report, February 1985-May 1986. Chicago Gas Research Institute.

8- J.San, 1992, Effect of Axial Solid Heat Conduction and Mass Diffusion in a Rotary Heat and Mass Regenerator. Int. J. Heat Mass Transfer/15/1990-207

9- Solar Energy ASME Trans, 1983, Functional Relationsships for Predicting Rotating Desiccant Wheel Performance in cooling Cycles, 135-138.

10- Toshimi Kuma, 1998, Thermaly Rrgenerative Monolithic Rotor Dehumidifier for Adsorption Cooling System, Journal of Solar Energy Engieering , 120, 45- 50.

11- E. Van Den Bulck, 1990 , A Single - Blow Test Procedure for Compact Heat and Mass Exchangers, ASME Journad of Heat Transfer, 112, 317 - 322.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12]