



د طوبت زنی

مهندس پیمان جعفریان
peyman_jafarian@engineer.com



نقش موثر رطوبت‌زنی

با وجود اینکه رطوبت برای ما قابل مشاهده نیست ولی به راحتی اثرات آن را می‌توان دید. با رطوبت‌زنی مناسب شرایط محیط برای انسان راحت‌تر و دلپذیرتر خواهد بود. در تجارت و محیط‌های صنعتی عملکرد تجهیزات و مواد، با کنترل موثر رطوبت افزایش می‌یابد.

حفظ کیفیت هوای داخل ساختمان به وسیله اعمال مدیریت روی رطوبت هوا، می‌تواند باعث کاهش هزینه انرژی، افزایش سود، کاهش هزینه‌های نگهداری و حصول اطمینان از کیفیت محصول شود.

کنترل رطوبت به ما امکان می‌دهد تا از مواد حساس نسبت به رطوبت، ماشین‌آلات و تجهیزات ظرفیت محافظت کنیم.

علاوه بر مساله مهم کنترل فرآیندها و آسایش انسان، کنترل رطوبت می‌تواند در حفاظت از محیط‌های انفجاری، نقش مهمی را ایفا کند.

اهمیت رطوبت‌زنی

روطوبت‌زنی به سادگی، اضافه کردن آب به هوا است ولی رطوبت تاثیر مهمی روی عوامل محیطی و فیزیولوژی می‌گذارد. سطح نامناسب رطوبت (خیلی بالا یا خیلی پایین) می‌تواند باعث ایجاد ناراحتی برای افراد و صدمه رساندن به تجهیزات شود. بر عکس انتخاب نوع صحیح تجهیزات رطوبت‌زنی به شما کمک می‌کند تا یک کنترل اقتصادی موثر و بدون مشکل بر روی رطوبت محیط داشته باشید.

همان‌طور که اهمیت رطوبت را بین سایر عوامل محیطی مانند دما، حرکت هوا و تابش حرارتی در نظر می‌گیریم، مهم است به این نکته توجه کنیم که رطوبت از اثر کمتری نسبت به سایر عوامل محیطی روی درک و احساس انسان برخوردار است. اگر ما خیلی سریعتر به تغییرات دما و اکتشاف نشان می‌دهیم تا وجود گرد و غبار در هوا یا حرارت تابشی، ولی از آنجاکه رطوبت با این عوامل در ارتباط است یک جز مهم و حیاتی در کنترل محیط محسوب می‌شود.

رطوبت و دما

رطوبت، بخار آبی است که همیشه در هوا وجود دارد. رطوبت را به صورت مقدار مطلق می‌توان بدین صورت تعریف کرد؛ مقدار بخار آب در واحد هوا. اما این تعریف از رطوبت نشان نمی‌دهد که هوا چه مقدار خشک یا مرطوب است. برای رسیدن به این منظور بایستی نسبت فشار جزیی بخار به فشار جزیی بخار اشباع در همان دما معلوم شود. این تعریف رطوبت نسبی است و با فرمول زیر بیان می‌شود:

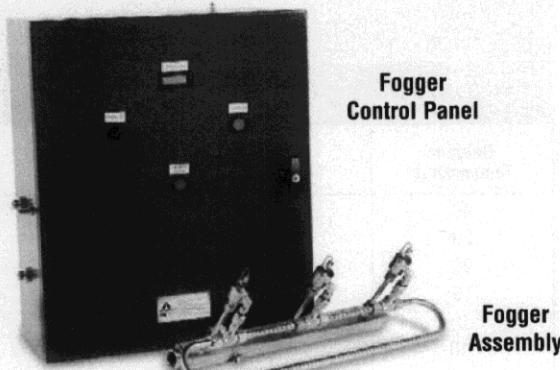
$$RH = \frac{VP_a}{VP_s} \Bigg|_t$$

VP_a = فشار بخار اشباع

VP_s = فشار بخار اشباع در حالت اشباع

t = دمای خشک هوا

«در دمای داده شده» کلید فهم رطوبت نسبی است. هوا گرم قابلیت جذب رطوبت بیشتری نسبت به هوا سرد دارد. برای مثال 10000 ft^3 هوا در دمای 70°F می‌تواند 80550 grain رطوبت را در خود نگه‌دارد در حالی که همان 10000 ft^3 هوا در دمای 10°F تنها می‌توان 7760 grain رطوبت را در خود نگه‌دارد اگر همین هوا در 5820 grain رطوبت داشته باشد رطوبت نسبی آن 75 درصد خواهد بود.



اگر سیستم حرارتی شما دمای آن را تا 70°F بدون هیچ رطوبت‌زنی افزایش دهد همچنان شامل 5820 grain رطوبت است اما 10000 ft^3 هوا در دمای 70°F قابلیت نگهداری 80550 grain رطوبت را دارد. پس رطوبتی که در این هوا وجود دارد رطوبت نسبی 7 درصد را ایجاد می‌کند که به اندازه هوای صحرا خشک است.

رطوبت و جابجایی هوا

متغیرهای دیگری مانند جابجایی هوا به شکل نفوذ هوا از خارج به داخل ساختمان یا بر عکس، بر رابطه بین رطوبت نسبی و دمای هوا تاثیر خواهد گذاشت. معمولاً بین 1 تا 3 مرتبه در ساعت (یا دفاتر بیشتر وقتی از تهویه اجباری استفاده می‌شود یا هوا محلی تخلیه می‌شود) هوا سرد بیرون جایگزین هوای داخل می‌شود. سیستم گرمایشی این هوای سرد را گرم می‌کند و هوای سرد و مرطوب بیرون تبدیل به هوای گرم و خشک داخل می‌شود.

سرومايش تبخيري

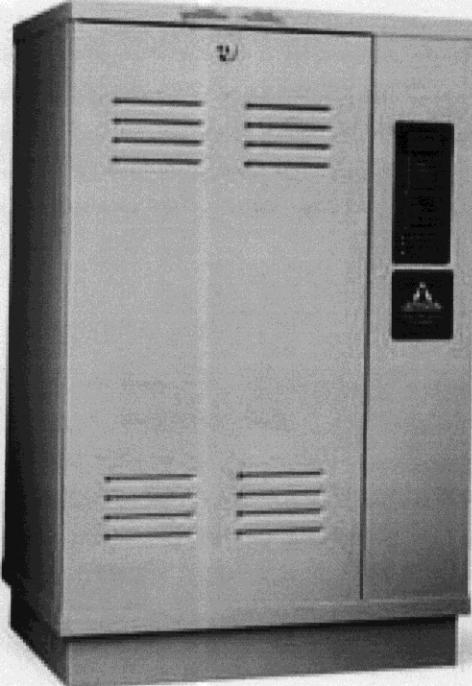
در برآر اثر دما روی رطوبت نسبی مطالعی را بیان کردیم اما رطوبت نسبی نیز می‌تواند به نوعی خود بر روی دما تاثیرگذار باشد. به ازای هر یوند آبی که به وسیله



که توسط دستگاه‌های رطوبت‌سنج مشاهده می‌شود همیشه از مقدار تئوری بیشتر است چون هوای خشک یک هوای نتنه است و از هر جا که بتواند رطوبت به خود جذب می‌کند. بنابراین رطوبت را از موادی مانند چوب، کاغذ، مواد غذایی، چرم وغیره به خود جذب می‌کند. همچنین خشک شدن پوست و مخاط تنفسی انسان‌ها در ساختمان از دیگر انرات هوای خشک است.

مقدار انرژی واقعی که برای رطوبت‌زنی لازم است از روی سطح واقعی رطوبت در داخل ساختمان محاسبه می‌شود نه از روی مقدار تئوری آن. در اکثر حالات واقعی، هزینه کنترل رطوبت در محیط موردنظر جزو انرژی مازاد به حساب می‌آید اما در بعضی حالات منجر به کاهش مصرف انرژی نیز می‌شود. یک موسسه تحقیقاتی در امریکا که عملکرد یک ساختمان را در دو سال متوالی یکبار با وجود رطوبت‌زن و یکبار بدون رطوبت‌زن در فصل سرما بررسی کرده به نتایج جالبی دست یافته است. نتایج نشان می‌دهد که وقتی در ساختمان از رطوبت‌زن استفاده شده مصرف کل بخار کاهش یافته است. مقدار بخاری که برای رطوبت‌زن‌ها استفاده شد در حدود $180,000 \text{ lbs}$ بوده است در حالی که بخار مورد استفاده برای گرمایش با کاهش $248,000 \text{ lbs}$ مواجه شد. این کاهش در حالی رخ داد که هوا در آن سال $7/2$ درصد نسبت به سال قبل سردرتر بوده است نتایج این تحقیقات حاکی از آن است که می‌توان مصرف بخار را با اعمال کنترل بر روی رطوبت نسبی هوای ساختمان کاهش داد.

برای روش شدن مطلب یک سیستم تئوری را بررسی می‌کنیم و آنتالپی را به عنوان مبدأ در نظر می‌گیریم. یک روز زمستانی را فرض کنید که دمای هوای بیرون ${}^{\circ}\text{F}$ ، رطوبت نسبی آن 75% درصد و آنتالپی‌ها $\frac{\text{Btu}}{\text{lb dA}}$ است. اگر هوا تا دمای $72\text{ }^{\circ}\text{F}$ بدون افزودن رطوبت گرم شود آنتالپی آن $\frac{\text{Btu}}{\text{lb dA}}$ خواهد بود

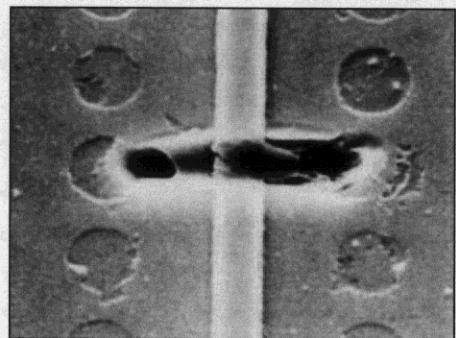


جدول (۱) درصد رطوبت نسبی جابی که در آن، پنجره‌های اتاق با دمای 74°F بدون آنکه سطح شیشه گرم شود شروع به عرق کردن می‌کنند.

Relative Humidities at Which Condensation Will Appear on Windows at 74°F When Glass Surface Is Unheated

Outdoor Temperature	Single Glazing	Double Glazing
40	39%	59%
30	29%	50%
20	21%	43%
10	15%	36%
0	10%	30%
-10	7%	26%
-20	5%	21%
-30	3%	17%

Effect of humidity on electrostatic voltages.



Integrated circuit damaged by ESD.
(Photo courtesy of Motorola Semiconductor, Inc.)

شکل (۱) تاثیر رطوبت روی برق الکتروستاتیک

هوای تبخیر می‌شود گرمای تبخیر باعث کاهش بار حرارتی آشکار در حدود 1000 BTU می‌شود. این رطوبت از انسان یا اشیایی مثل چوب، کاغذ، پارچه یا سایر مواد داخل ساختمان گرفته می‌شود. برعکس اگر مواد، رطوبت را از هوای مطروب جذب کنند گرمای تبخیر در هوا آزاد شده و باعث افزایش بار حرارتی آشکار می‌شود.

نقطه شینیم

هر وقت که دمای سطح شیشه پنجره از دمای نقطه شینیم هوای پایین تر بیاید عمل تقطیر اتفاق می‌افتد. جدول (۱) ترکیب رطوبت نسبی هوای داخل ساختمان و دمای هوای بیرون که در آن دما تقطیر رخ می‌دهد را نشان می‌دهد. واحدهای گرمایشی در ساختمان‌های جدید معمولاً زیر پنجره‌ها نصب می‌شود و با عبور هوای گرم از روی پنجره باعث می‌شود تا هوای داخل ساختمان از رطوبت نسبی بیشتری برخوردار شود بدون اینکه تقطیر قابل مشاهده روی پنجره پدید آید.

ذخیره انرژی با کنترل رطوبت نسبی

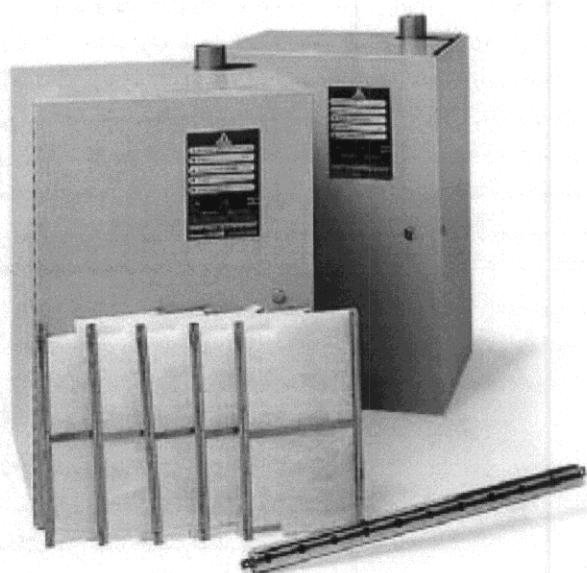
رطوبت نسبی که ما محاسبه می‌کنیم، رطوبت نسبی تئوری هوای داخل (TIRH)² نامیده می‌شود و به صورت واقعی هیچ وقت وجود ندارد. رطوبت نسبی

می‌تواند باعث بروز مشکلات جدی در محصولات شده یا خرابی مواد اولیه را بدنیال داشته باشد. الکتریسته ساکن و تخلیه الکتریکی از دیگر پدیده‌هایی است که در هوای خشک بیشتر انفاق می‌افتد و می‌تواند باعث بروز اختلال در عملکرد ماشین‌های الکترونیکی ادارات یا ماشین‌آلات تولیدی شود. این باشت الکتریسته ساکن در مکان‌هایی که مواد قابل انفجار وجود دارد می‌تواند بسیار خطرناک باشد. در ادامه اثرات کاهش رطوبت در محیط‌های الکترونیکی و تولید کاغذ بررسی می‌شود.

نیاز به کنترل رطوبت در محیط‌های الکترونیکی

الکترونیک، انقلابی در نحوه عملکرد ادارات، ارتباطات، جمع آوری اطلاعات و حفاظت از تجهیزات به وجود آورده است. در ساختمان‌های اداری، سیستم‌های مخابراتی، رایانه، فاکس و حتا ترمومترات دیواری از کنترل‌های الکترونیکی استفاده شده است. امروزه در محیط‌های صنعتی ماشین‌آلات بیشتری نسبت به گذشته به صورت الکترونیکی شود. همه اینها بدین معنی است که طبیعت تجارت جدید رطوبت‌زنی مناسب را به حقیقت مهم و لازم تبدیل کرده است.

روطوبت‌زنی نامناسب تهدیدی برای تجهیزات الکترونیک حساس
 قلب تمام مدارات الکترونیکی امروز IC (مدار مجتمع) است. وجود الکتریسته ساکن و تخلیه الکتریکی به یک سطح با ولتاژ کمتر باعث پدید آمدن جرقه‌ای خواهد شد که با وجود کوتاه بودن زمان آن، ولتاژی به اندازه ولتاژ صاعقه ایجاد می‌کند و باعث ذوب شدن نقطه بسیار کوچکی از سطح نیمه هادی خواهد شد. این انفاق باعث از کار افتادن دستگاه، از دست رفتن حافظه یا خرابی دائم می‌شود. صدمه به دستگاه ممکن است به صورت آنی انفاق بیافتد یا باعث کاهش



**HumidiClean™
with Ionic Beds**

روطوبت نسبی تئوری این سیستم در دمای 72°F حدود $3/75$ درصد است، اما رطوبت نسبی واقعی آن حدود درصد اندازه‌گیری می‌شود. اگر آنتالپی، دوباره در شرایط جدید یعنی دمای 72°F و رطوبت نسبی 25 درصد محاسبه شود مقدار آن $\frac{\text{Btu}}{\text{lb dA}}$ 22 است. این رطوبت اضافی از مواد رطوبتی و افراد داخل فضا گرفته شده است. اما در مورد انرژی اضافه شده یعنی تفاوت بین $\frac{\text{Btu}}{\text{lb dA}}$ 18 و 22 چه می‌توان گفت. این افزایش 22 درصد درصدی باید از سیستم حرارتی ناشی شده باشد تا اثر سرمایش تبخیری را جبران کند ولی اگر از یک سیستم رطوبت‌زن استفاده شود تا رطوبت نسبی هوا را به حدود 35 درصد برساند آنتالپی هوا $23/6$ خواهد بود.

این تنها 7 درصد افزایش نسبت به بار انرژی غیرقابل اجتناب $\frac{\text{Btu}}{\text{lb dA}}$ 22 را نشان می‌دهد و اساساً کمتر از مقدار تئوری، یعنی یک افزایش 31 درصدی از رطوبت نسبی $75/3$ درصد و آنتالپی $18 \frac{\text{Btu}}{\text{lb dA}}$ به رطوبت نسبی 35 درصد و آنتالپی $23/6$ است.

اگر دما 68°F و رطوبت نسبی 35 درصد انتخاب شود (چون افراد در دمای کمتر و رطوبت نسبی بالاتر احساس آسایش بیشتری دارند) آنتالپی هوا $21/8 \frac{\text{Btu}}{\text{lb dA}}$ می‌شود که یک کاهش جزیی در انرژی را نشان می‌دهد.

مشکلات ناشی از هوای خشک

هوای خشک می‌تواند باعث بروز مشکلات متعدد و گاهی اوقات خطرناک شود. کافی نبودن رطوبت نسبی هوا یا بروز نوسان و کاهش در مقدار رطوبت،

جدول (۲) تاثیر رطوبت روی برق الکتروستاتیک		
Means of Static Generation	Electrostatic Voltages	
	10%-20% Relative Humidity	65%-90% Relative Humidity
Walking across carpet	35,000	1,500
Walking over vinyl floor	12,000	250
Worker at bench	6,000	100
Vinyl envelopes for work instructions	7,000	600
Common poly bag picked up from bench	20,000	1,200
Work chair padded with polyurethane foam	18,000	1,500

جدول (۳) چگونه گرمایش داخل RH داصل را کم کرده و کاغذ را خشک می‌کند

How Indoor Heating Reduces Indoor RH and Dries Out Paper		
Outdoor Temperature Degrees	Indoor Temperature 70°F	
	Indoor Relative Humidity %	Approx. Moisture Content of Paper
-20	1.5	0.5
-10	2.5	0.8
0	4.4	1.2
10	7.2	2.2
20	11.6	3.3
30	18.1	4.3
40	26.8	5.3
50	38.3	6.4
60	54.0	8.0
70	75.0	11.6

عمر مفید قطعات یا اجزا دستگاه شود. جدول (۲) ولتاژهایی را که بهواسطه فعالیت‌های مختلف تولید می‌شود نشان داده است. به سطح رطوبتی که این ولتاژها در آن تولید می‌شود توجه کنید. هر چه سطح رطوبت افزایش یابد ولتاژ ناشی از تخلیه الکتریسته ساکن کاهش می‌یابد. چون یک لایه نازک از رطوبت روی سطح شکل می‌گیرد و باعث تخلیه الکتریسته ساکن به زمین می‌شود. گرچه رطوبت نسبی ۶۵-۹۰ درصد که در جدول نشان داده شده در محیط‌های اداری کاربرد ندارد ولی هرچه رطوبت بیشتر باشد امکان تخلیه الکتریکی کمتر خواهد بود.

علاوه بر خطرات ناشی از الکتریسته ساکن برای تجهیزات الکترونیکی، خطر تولید جرقه ناشی از تخلیه الکتریکی بسیاری از فعالیت‌های کاربردی نظیر مهمات سازی، ماشین‌آلات چاپ، کارخانجات داروسازی و همچنین محیط‌هایی که در آنها گاز یا مواد فرار وجود دارد تهدید می‌کند.

کنترل رطوبت در تولید کاغذ

هر تولید کننده‌ای که تجربه مدیریت در صنعت کاغذ را داشته باشد با مشکلات این صنعت آشنا است. مشکلاتی از قبیل:

- تاب برداشت و خمیدگی در محصول

- ترک خوردن یا شکستن در محل تا خوردگی کارتنهای و جعبه‌ها

- کاهش مقاومت بسته‌ها و محتويات آنها

تمام مشکلات بالا یک علت دارد و آن خشک بودن کاغذ بعلت پایین بودن رطوبت نسبی هوا است. همانگونه که در جدول (۳) نشان داده است هنگامی که هوای بیرون با دمای ${}^{\circ}\text{F}$ ۷۵ و رطوبت نسبی ۴/۴ درصد بدون رطوبت‌زنی گرم شود رطوبت هوا ${}^{\circ}\text{C}$ ۵-۷ درصد خواهد شد. ولی مقدار واقعی که مشاهده می‌شود خیلی بالاتر از این مقدار است چون کاغذ رطوبت خود را از دست داده است.

رطوبت نسبی هوای محیط روی رطوبت کاغذ تاثیر می‌گذارد و به آن نفوذمی‌کند. الیاف کاغذ وقتی خشکتر از محیط باشد رطوبت را به خود جذب می‌کند و در حالت عکس آن رطوبت خود را از دست می‌دهند.

حفظ محدوده رطوبت کاغذ بین ۵-۷ درصد برای حصول اطمینان از کیفیت و کارآیی کاغذ ضروری است.

برای دستیابی به این مقدار، رطوبت نسبی محیط باید حدود درصد ۵۰ درصد ۴۰ (با توجه به ترکیبات بکار رفته در کاغذ) باشد. تعییرات در میزان رطوبت باعث می‌شود تا یک کاغذ، خشیم‌تر یا نازک‌تر، نرم‌تر یا زبرتر، کوچکتر یا بزرگتر انعطاف‌پذیر یا ترد و شکننده شود.

رطوبت برای صنایع دیگر مثل چاپ، تولید چرم و چوب نقش مهمی دارد. موزه‌ها و کتابخانه‌ها از دیگر مکان‌هایی هستند که حفظ رطوبت نسبی در سطح مورد نظر بسیار با اهمیت است.

نکات مهم در بکارگیری رطوبت‌زن‌ها

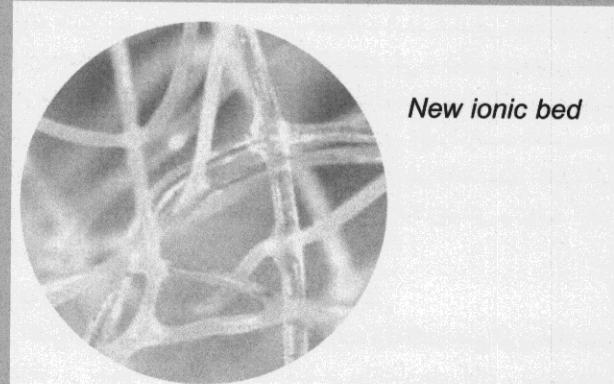
طرح در انتخاب و بکارگیری تجهیزات رطوبت‌زن باید به چند مورد توجه کند:

- ۱- شرایط محیط

- ۲- شرایط ساختمان

- ۳- ملاحظات انرژی

معمولًا نحوه کاربری یا فعالیتی که در یک مکان صورت می‌گیرد ممکن است یک سطح رطوبت خاص یا یک مقدار حداقل و حداقل مشخص و محدودی



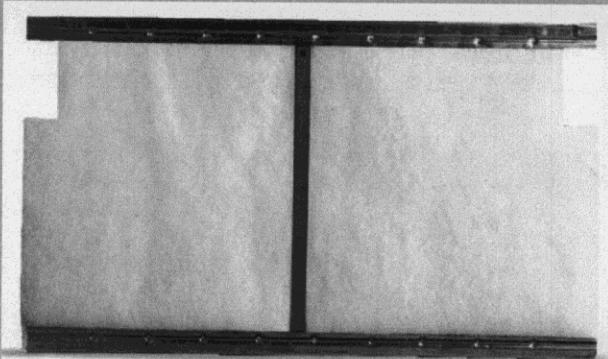
New ionic bed

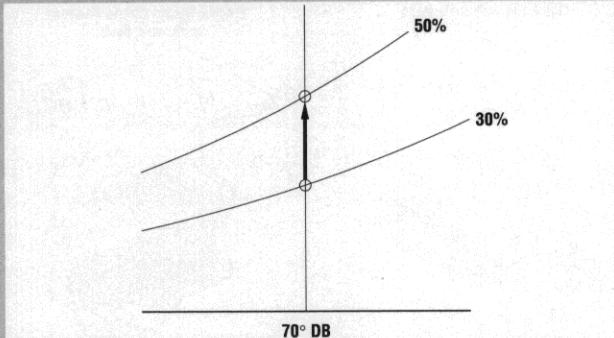


After 400 hours

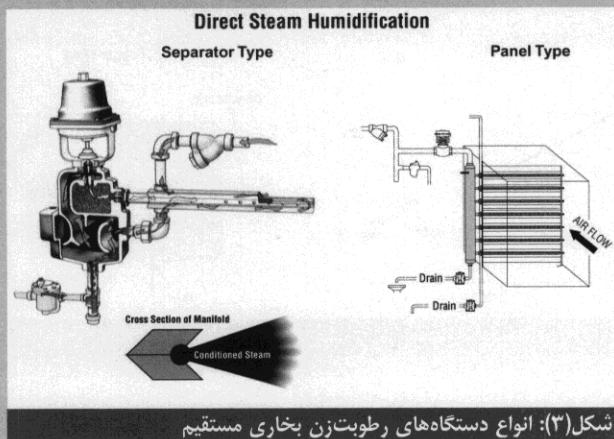


After 800 hours

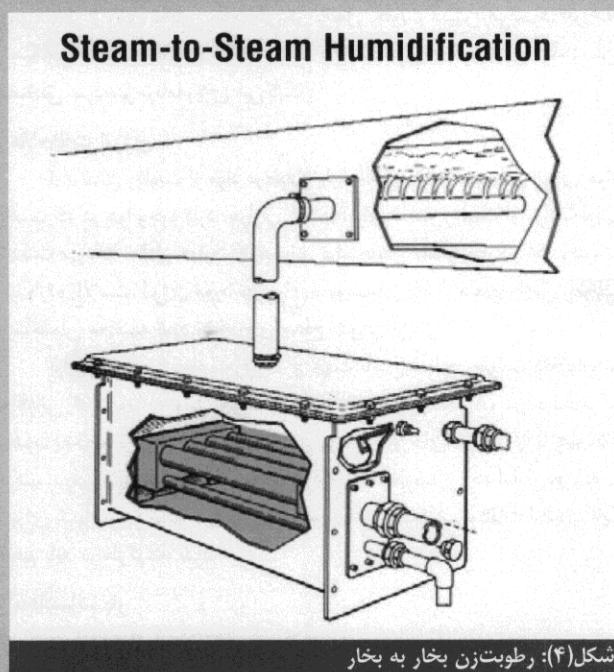




شکل(۲): نمودار سایکرومتری برای نشان دادن عدم تغییر دمای خشک هوا



شکل(۳): انواع دستگاههای رطوبت زن بخاری مستقیم



شکل(۴): رطوبت زن بخار به بخار

را تعیین کند. نکاتی که در شرایط محیطی روی انتخاب تجهیزات و طراحی ما اثر می‌گذارد، می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر بیان کرد:

۱- راحتی و آسایش انسان: همان‌طور که قبل از توضیح داده شد پایین بودن سطح رطوبت نسبی باعث افزایش تبخیر از پوست و مخاط تنفسی شده و باعث خشکی پوست و مو می‌شود. رطوبت بسیار زیاد نیز روحی آسایش، سلامتی و فعالیت انسان اثر زیان‌آور دارد محدوده رطوبت نسبی بین درصد ۶۰-۳۰ (در دمای معمول اتاق) شرایط خوبی را برای انسان فراهم می‌کند.

۲- جلوگیری از بیماری و درمان آن: رطوبت نسبی اثر مهمی روی جلوگیری از شیوع بیماری‌های تنفسی که در فصل زمستان گزارش می‌شود معمولاً مربوط به میزان رطوبت در هوای است. در رطوبت نسبی ۵۰ درصد میزان مرگ و میر یک ارگانیزم معین بیشترین حد خود را دارد. همچنین ویروس آنفلوانزا نیز در این رطوبت بیشترین قدرت واگیری خود را از دست می‌دهد. میزان مرگ و میر ارگانیزم‌ها در رطوبت کمتر یا بیشتر از این مقدار کاهش می‌یابد.

۳- رشد بالقوه باکتری‌ها: معمولاً در رطوبت‌زن‌هایی که به خوبی سرویس و نگهداری نمی‌شوند میکروارگانیزم‌هایی به وجود می‌آید. برای جلوگیری از پخش و انتشار این میکروارگانیزم‌هایی زیان‌آور توزیع دوره‌ای رطوبت‌زن و تخلیه مخزن آن بعد از اتمام فصل رطوبت‌زن ضروری است.

۴- تجهیزات الکتریکی: تجهیزات الکترونیکی و پردازش اطلاعات به یک سطح خاص رطوبت نیاز دارند. افزایش بیش از حد رطوبت باعث تشکیل تقطیر در دستگاه‌ها شده و سطح پایین رطوبت هم ممکن است باعث افزایش الکتریسته ساکن در دستگاه شود.

۵- نگهداری کالا و نوع کار و فعالیت: سطح رطوبت نسبی با توجه به فعالیتی که در محل صورت می‌گیرد یا کالایی را که نگهداری می‌کنند تعیین می‌شود. همان‌طور که در قسمت‌های قبل اشاره شد در نگهداری مواد حساس به رطوبت مثل چوب، چرم، کاغذ و... باید سطح رطوبت نسبی در حد مجاز حفظ شود. همچنین میزان دقت در تولید و کنترل واکنش‌های شیمیایی از جمله مواردی هستند که در محیط‌های کاری حائز اهمیت می‌باشند.

۶- انتقال امواج صوت: میزان جذب صوت توسعه هوا که منجر به کاهش قدرت آن می‌شود در رطوبت ۱۵-۲۰ درصد بیشترین مقدار دارد. با افزایش فرکانس میزان جذب هم افزایش می‌یابد. میزان جذب صوت در رطوبت نسبی درصد ۴۰ کاهش می‌یابد و در رطوبت نسبی ۵۰ درصد میزان جذب صوت ناچیز خواهد بود. جذب صوت توسعه هوا تاثیر مهمی روی گفتگو و صدای افراد ندارد ولی در تالارهای کنفرانس که بهترین شرایط صوتی مورد نیاز است این مساله اهمیت می‌یابد.

جدول (۴): رطوبت نسبی توصیه شده برای کاربردها و فعالیت‌های گوناگون را فهرست کرده است.

شرایط ساختمان

ماکریزم سطح رطوبتی که یک ساختمان می‌تواند در زمستان داشته باشد، به توانایی دیوارها سقف و سایر اجزا که بتواند از تشکیل تقطیر جلوگیری کنند بستگی دارد. وجود تقطیر روی سطح داخلی ساختمان می‌تواند باعث آسیب رساندن به کیفیت سطح و دکور داخل ساختمان شده و باعث رشد قارچ و کاهش دید در پنجره‌ها می‌شود. اگر دیوارها و سقف‌های مخصوص این شرایط را

می شود بستگی دارد (هوای نفوذی). خواه این مقدار هوا توسط تهویه مکانیکی وارد فضا شود یا اینکه از طریق تهویه طبیعی وارد شود. منابع دیگری که رطوبت از دست می دهند یا جذب می کنند نیز باستی در طراحی درنظر گرفته شود.

- برای سیستم های تهویه طبیعی

$$H = \rho V R (\omega_i - \omega_o) - S + L$$

- برای سیستم های تهویه مکانیکی که از یک مقدار ثابت هوا خارج استفاده می کنند

$$H = 3.6 \rho Q_0 (\omega_i - \omega_o) - S + L$$

- برای سیستم های تهویه مکانیکی که از یک مقدار متغیر هوا خارج استفاده می کنند:

$$H = 3.6 \rho Q_t (\omega_i - \omega_o) \left[\frac{t_i - t_m}{t_i - t_o} \right] - S + L$$

$$\frac{\text{Kg water}}{h} = \text{بار رطوبتی بر حسب}$$

$$m^3 = \text{حجم فضایی که رطوبت زنی می شود}$$

$$\frac{\text{air change}}{h} = \text{نرخ تهویه هوا}$$

$$\text{lit/s} = \text{نرخ دبی حجمی هوای خارج}$$

$$\text{lit/s} = \text{نرخ کل دبی حجمی هوای خارج بعلاوه هوای برگشتی}$$

$$t_i = \text{دمای طرح داخل،}$$

$$t_m = \text{دمای هوای مخلوط شده با بخار،}$$

$$t_o = \text{دمای طرح خارج،}$$

$$\frac{\text{Kg water}}{\text{Kg da}} = \text{نسبت رطوبت در شرایط طرح داخل، } \omega_i$$

$$\frac{\text{Kg water}}{\text{Kg da}} = \text{نسبت رطوبت در شرایط طرح خارج، } \omega_o$$

$$\frac{\text{Kg water}}{\text{Kg da}} = \text{سهم منابع داخلی رطوبت، } S$$

$$\frac{\text{Kg water}}{\text{Kg da}} = \text{سایر منابعی که رطوبت از دست می دهند، } L$$

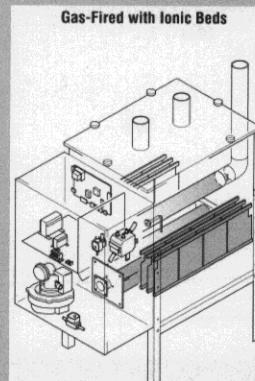
$$\rho = \text{چگالی هوای در سطح دریا، } 1.20 \text{ kg/m}^3$$

نحوه کار رطوبت زن ها

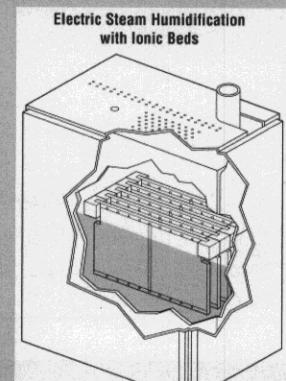
روطوبت زن های بخار (هم دما)

برخلاف سایر روش های رطوبت زنی، رطوبت زن های بخار کمترین انرژی دمای خشک محیط دارند. این دستگاه ها از بخار آب آماده استفاده می کنند. بخار آب برای مخلوط شدن با هوای به هیچ گرمای اضافی نیاز ندارد و رطوبت نسبی هوای تا سطح دلخواه افزایش خواهد داد. شرایط بخار مورد استفاده ۲۱۲°F (۱۰۰°C) است. دمای بالای بخار این تصور غلط را ایجاد می کند که وقتی بخار در هوای تخلیه می شود باعث افزایش دمای هوای خواهد شد.

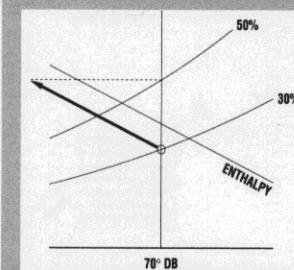
در واقع وقتی رطوبت زن، بخار را در هوای تخلیه می کند مخلوط هوا و بخار آب پدید می آید در این مخلوط دمای بخار بسرعت تا دمای هوای کاهش می یابد. از نمودار سایکرومتریک برای نشان دادن عدم تغییر دمای خشک هوا در طی این فرآیند استفاده می کنیم. اگر از یک نقطه روی خط دمای خشک ثابت،



شکل (۶): رطوبت زن بخار از نوع گازی



شکل (۵): رطوبت زن بخار از نوع برقی



شکل (۷): سیستم مه ساز و نمایش فرآیند آن در نمودار سایکرومتری

نداشته و در آنها عایق رطوبتی به کار نرفته باشد، رطوبت به داخل نفوذ کرده و سبب ایجاد تقطیر پنهان (concealed condensation) می شود که می تواند صدمات جدی به ساختمان وارد کند. در حین طراحی ساختمان سطح رطوبت مورد نظر از روی توانایی ساختمان در تحمل رطوبت تعیین می شود. این نکته هنگامی اهمیت بیشتری خواهد یافت که شما برای رطوبت زنی ساختمان در مناطق سردسیر برنامه ریزی می کنید.

مالحظات انرژی

آزاد شدن رطوبت از مواد مرطوب نیاز به انرژی دارد. منبع این انرژی حرارتی است که در هوای وجود دارد. حرارتی که هوای برای تبخیر رطوبت از مواد مرطوبی از دست می دهد معادل حرارت لازم برای تولید همان مقدار بخار در یک رطوبت زن با بازده بالاست. انرژی مورد نیاز برای رطوبت زنی باید از سطح واقعی رطوبت در ساختمان محاسبه شود نه از روی سطح تشوری آن.

برای اختصاص تمام انرژی لازم جهت تامین سطح رطوبت دلخواه، تمام اجزایی که مربوط به تولید رطوبت و حفظ کیفیت هوای داخل است باید درنظر گرفته شود. به خصوص وقتی که شما بخواهید رطوبت زن های متفاوت را با هم مقایسه کنید. برای مثال هزینه دیگ بخار، هزینه یک رطوبت زن که شامل هزینه بر قریب کمپرسور و موتور آن نیز است، شرایط و کیفیت آب و تلفات اجتناب ناپذیر هم باید درنظر گرفته شود.

محاسبات بار

بار لازم برای رطوبت زنی اصولا به مقدار هوایی که وارد محل رطوبت زنی

جدول (۴) : رطوبت‌زنی توصیه شده برای کاربردها و فعالیت‌های گوناگون

Recommended Relative Humidities								
Process or Product	Temp. °F	%RH	Process or Product	Temp. °F	%RH	Process or Product	Temp. °F	%RH
Residences	70-72	30	Switchgear:			Tea		
			Fuse & cutout assembly	73	50	Packaging	65	65
Libraries & Museums			Capacitor winding	73	50			
Archival	55-65	35	Paper Storage	73	50	Tobacco		
Art storage	60-72	50	Conductor wrapping with yarn	75	65-70	Cigar & cigarette making	70-75	55-65
Stuffed fur animals	40-50	50	Lightning arrester assembly	68	20-40	Softening	90	85-88
Communication Centers			Thermal circuit breakers			Stemming & stripping	75-85	70-75
Telephone terminals	72-78	40-50	assembly & test	75	30-60	Packing & shipping	73-75	65
Radio & TV studios	74-78	30-40	High-voltage transformer repair	79	55	Filler tobacco casing	75	75
General Commercial & Public Buildings	70-74	20-30	Water wheel generators:			Filler tobacco storage		
(including cafeterias, restaurants, airport terminals, office buildings, & bowling centers)			Thrust runner lapping	70	30-50	& preparation	77	70
Hospitals & Health Facilities			Rectifiers:			Wrapper tobacco storage		
General clinical areas	72	30-60	Processing selenium & copper oxide plates	73	30-40	& conditioning	75	75
Surgical area			Fur					
Operating rooms	68-76	50-60	Storage	40-50	55-65	Pharmaceuticals		
Recovery rooms	75	50-60	Gum			Powder storage (prior to mfg)*	*	
Obstetrical			Manufacturing	77	33	Manufactured powder storage		
Full-term nursery	75	30-60	Rolling	68	63	& packing areas	75	35
Special care nursery	75-80	30-60	Stripping	72	53	Milling room	75	35
Industrial Hygroscopic Materials			Breaking	73	47	Tablet compressing	75	35
Abrasive			Wrapping	73	58	Tablet coating room	75	35
Manufacture	79	50	Leather			Effervescent tablets		
Ceramics			Drying	68-125	75	and powders	75	20
Refractory	110-150	50-90	Storage, winter room temp.	50-60	40-60	Hypodermic tablets	75	30
Molding Room	80	60-70	Lenses (Optical)			Colloids	75	30-50
Clay Storage	60-80	35-65	Fusing	75	45	Cough drops	75	40
Decalcomania production	75-80	48	Grinding	80	80	Glandular products	75	5-10
Decorating Room	75-80	48	Matches			Ampoule manufacturing	75	35-50
Cereal			Manufacture	72-73	50	Gelatin capsules	75	35
Packaging	75-80	45-50	Drying	70-75	60	Capsule storage	75	35
Distilling			Storage	60-63	50	Microanalysis	75	50
Storage			Mushrooms			Biological manufacturing	75	35
Grain	6	35-40	Spawn added	60-72	nearly sat.	Liver extracts	75	35
Liquid Yeast	32-33		Growing period	50-60	80	Serums	75	50
General manufacturing	60-75	45-60	Storage	32-35	80-85	Animal rooms	75-80	50
Aging	65-72	50-60	Paint Application			Small animal rooms	75-78	50
Electrical Products			Oils, paints: Paint spraying	60-90	80	*Store in sealed plastic containers in sealed drums.		
Electronics & X-ray:			Plastics					
Coil & transformer winding	72	15	Manufacturing areas:			Photographic Processing		
Semi conductor assembly	68	40-50	Thermosetting molding			Photo studio		
Electrical instruments:			compounds	80	25-30	Dressing room	72-74	40-50
Manufacture & laboratory	70	50-55	Cellophane wrapping	75-80	45-65	Studio (camera room)	72-74	40-50
Thermostat assembly & calibration	75	50-55	Plywood			Film darkroom	70-72	45-55
Humidistat assembly & calibration	75	50-55	Hot pressing (resin)	90	60	Print darkroom	70-72	45-55
Small mechanisms:			Cold pressing	90	15-25	Drying room	90-100	35-45
Close tolerance assembly	72	40-45	Rubber-Dipped Goods			Finishing room	72-75	40-55
Meter assembly & test	75	60-63	Cementing	80	25-30*	Storage room		
			Dipping surgical articles	75-80	25-30*	b/w film & paper	72-75	40-60
			Storage prior to manufacture	60-75	40-50*	color film & paper	40-50	40-50
			Laboratory (ASTM Standard)	73.4	50*	Motion picture studio	72	40-55
						Static Electricity Control		
						Textiles, paper, explosive control		>55
						Clean Rooms & Spaces		45
						Data Processing	72	45-50
						Paper Processing		
						Finishing area	70-75	40-45
						Test laboratory	73	50

*Dew point of air must be below evaporation temperature of solvent

آنچه که این رطوبتزن‌ها بخار آب آماده را مستقیماً به هوا تزریق می‌کند، تنها لازم است این بخار با هوا مخلوط شود تا نیاز سیستم را برآورده کند. همچنین می‌توان خروجی سیستم را با استفاده از یک شیر کنترل تغییر داد. وقتی رطوبتزن به سیستم کنترلی پاسخ می‌دهد و ضعیت شیر بنا به نیاز سیستم می‌تواند از حالت بسته تا تمام باز تغییر کند.

در نتیجه سیستم‌های تزریق بخار خیلی سریعتر و دقیق‌تر به نوسانات پاسخ می‌دهند.

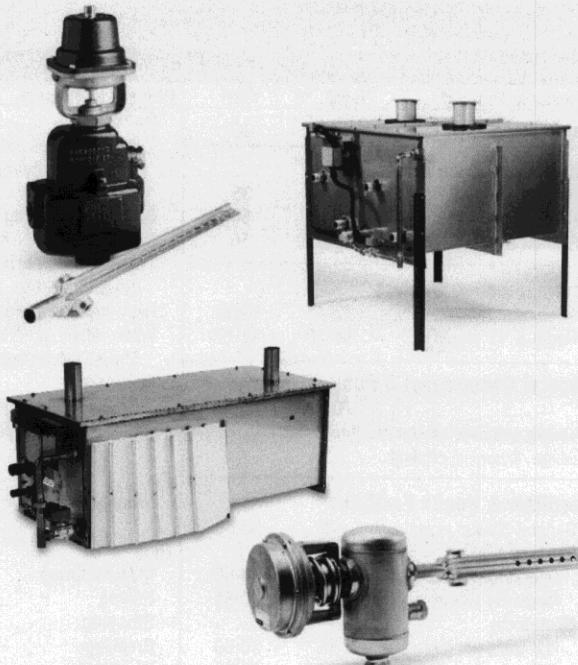
رطوبتزن بخار به بخار

این رطوبتزن‌ها با استفاده از حرارت بخار و یک مبدل حرارتی، بخار آب ثانویه را که برای رطوبتزن استفاده می‌شود تولید می‌کند. بخار ثانویه معمولاً در فشار اتمسفر است. نگهداری و سرویس این دستگاه‌ها به کیفیت آب بستگی دارد. ناخالصی‌هایی مانند کلسیم، منیزیم و فلزات می‌تواند به صورت رسوب تهشیش شده و باعث شود تا دستگاه متابوا نیاز به تمیز کردن داشته باشد.

پاسخ به سیستم کنترلی نسبت به نوع تزریق مستقیم کنترلر می‌باشد. چون برای بخار شدن آب زمان لازم است.

رطوبتزن‌های بخار از نوع برقی
رطوبتزن‌های بخار از نوع برقی زمانی به کار می‌رود که منبع بخار در دسترس نباشد. جریان برق و آب باعث تولید بخار در فشار اتمسفر می‌شود. تاثیر کیفیت آب روی عملکرد و نگهداری این دستگاه‌ها به نوع دستگاه بستگی دارد. رطوبتزن‌های برقی قابلیت تطبیق با سیگنال‌های مختلف کنترلی را دارند. اما زمان مورد نیاز برای تبخیر باعث شده تا این نوع رطوبتزن نسبت به نوع تزریق مستقیم بخار قابل مقایسه نباشد.

رطوبتزن‌های بخار از نوع گازی
در رطوبتزن‌هایی که از حرارت گاز برای تولید بخار استفاده می‌کنند، گاز طبیعی یا پروپان با هوا مخلوط شده و سپس وارد مشعل گازی می‌شوند. حرارت ناشی از احتراق توسط یک مبدل حرارتی به آب متنقل می‌شود و بخار در فشار اتمسفر تولید می‌شود. گازهای سوخته شده نیز باید از محل مناسب تخليه شوند. ترکیب سوخت با اکسیژن، کیفیت هوای مورد استفاده برای احتراق و تهییه



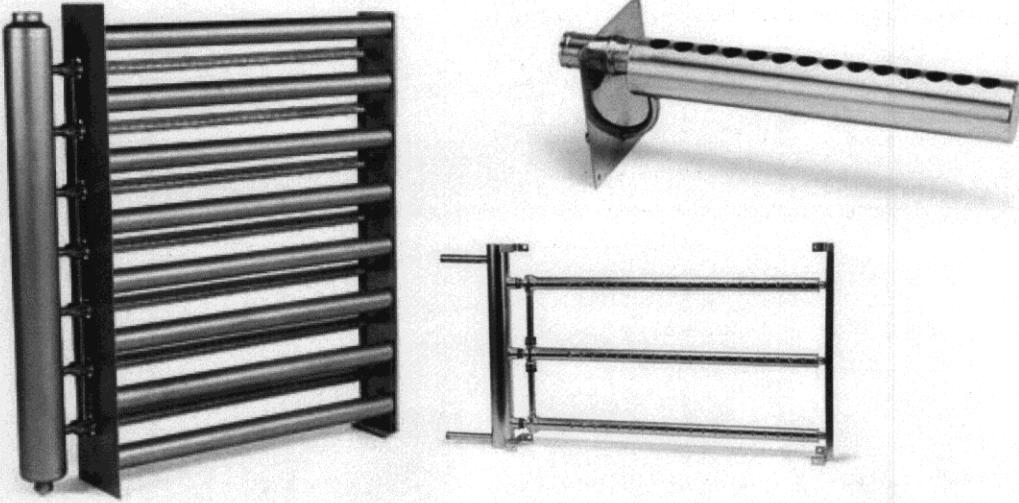
شروع کنیم رطوبتزن‌های بخار باعث ایجاد یک حرکت مستقیم رو به بالا در راستای این خط خواهند شد. در واقع بخار، مقدار حرارت (آنتالپی) لازم برای اضافه کردن رطوبت به هوا را داراست، بدون اینکه باعث کاهش یا افزایش دمای خشک هوا شود. درصورتی که مقدار رطوبت‌زنی بالا باشد (بیشتر از ۵۰°F) یا از بخار با فشار بالا استفاده شود دمای خشک هوا ۲°F - ۱°F افزایش می‌یابد.

رطوبتزن با تزریق مستقیم بخار

معمول‌ترین نوع رطوبتزن‌های بخار، نوع تزریق مستقیم است. این نوع رطوبتزن‌ها هزینه تعمیر و نگهداری خیلی پایینی دارند. بخار خود به عنوان یک عامل تمیز کننده، اجزا سیستم را از رسوبات معدنی محافظت می‌کند. پاسخ به سیستم‌های کنترلی از دیگر مزایای رطوبتزن‌های تزریق مستقیم بخار است. از

جدول (۵): مقایسه‌ی روش‌های رطوبتزنی

Comparison of Humidification Methods						
	Direct Steam	Steam-to-Steam	Electric Steam	Ionic Bed Electric Steam	Ionic Bed Gas-Fired Steam	Fogging Systems
Effect on temperature	Virtually no change				Substantial temperature drop	
Unit capacity per unit size	Small to very large	Small	Small to medium	Small to medium	Small to medium	Small to very large
Vapor quality	Excellent	Good	Good	Good	Good	Average
Response to control	Immediate	Slow	Fair	Fair	Fair	Immediate
Control of output	Good to excellent	Below average	Average	Average	Below average	Good to excellent
Sanitation/corrosion	Sterile medium; corrosion free	Bacteria can be present	Programmed to not promote bacteria	Programmed to not promote bacteria	Programmed to not promote bacteria	Designed to not promote bacteria
Maintenance frequency	Annual	Monthly	Monthly to quarterly	Quarterly to semi-annually	Quarterly	Annual
Maintenance difficulty	Low	High	Medium	Low	Medium	Low
Costs: Price (per unit of capacity)	Low	High	Medium	Medium	High	Medium
Installation	Varies with availability of steam, water, gas, electricity, etc.					
Operating	Low	Low	Medium	Medium	Low	Low
Maintenance	Low	High	High	Low to medium	Low to medium	Low



روطوبت‌زن‌های تزریق مستقیم بخار در ازای هزینه اولیه، بیشترین ظرفیت را نسبت به دیگر انواع رطوبت‌زن دارد ولی سیستم‌های مهساز و گازی به ازای هزینه اولیه مفروض به صرفه و اقتصادی نیستند.

هزینه نصب و نگهداری انواع مختلف رطوبت‌زن را نمی‌توان دقیقاً برآورد کرد. وجود آب، بخار و جریان الکتریسته تاثیر زیادی روی هزینه نصب دستگاه‌ها خواهد گذاشت.

هزینه عملکرد رطوبت‌زن‌های تزریق مستقیم بخار و بخار به بخار نسبتاً پایین است همچنین رطوبت‌زن‌های گازی نیز از هزینه پایین برخوردارند. ولی هزینه انرژی برای نوع الکتریکی آن بالا است. رطوبت‌زن‌های تزریق مستقیم بخار مانند سیستم‌های مهساز کمترین هزینه نگهداری را دارند. رطوبت‌زن‌های گازی نیز به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با شرایط مختلف آب سازگاری دارند و هزینه نگهداری این سیستم‌ها پایین است. هزینه نگهداری سایر سیستم‌ها با توجه به کیفیت آب و کاربرد آنها تقاضوت دارد.

اسفند ۱۱

مناسب حاصل از اختراق روی عملکرد دستگاه تاثیرگذار خواهد بود.

سیستم‌های مهساز (آدیاباتیک)

سیستم‌های مهساز با استفاده از هوا فشرده آب را پودرکرده و پس ذرات میکروسکوپیک آب در اثر گرمای هوا بخار شده و مانند مه به نظر می‌رسند. برای بخار شدن هر پوند آب حدود ۱۰۰۰ BTU حرارت لازم است. ذرات آب وقی که حرارت را از هوا محیط جذب می‌کنند به سرعت از حالت مایع به بخار تبدیل می‌شوند.

در طراحی سیستم‌های مهساز حرارت لازم برای تبخیر آب که توسط هوا تامین می‌شود باید مدنظر باشد تا شاهد افزایش ذرات آب روی سطوح نباشیم. لحاظ نشدن این امر در طراحی می‌تواند باعث بروز مشکلات بهداشتی در ساختمان شود. سیستم‌های مهساز شامل هیچگونه گرمای تبخیر برای افزایش سطح رطوبت نسبی تا شرایط دلخواه نیستند به همین دلیل فرآیندی که در این سیستم‌ها رخ می‌دهد یک فرآیند آنتالپی ثابت است. همانگونه که دیاگرام سایکرومتریک نیز نشان می‌دهد با افزایش رطوبت نسبی از ۳۰ درصد به ۵۰ درصد دمای خشک هوا تغییر می‌کند.

پاسخ این نوع رطوبت‌زن‌ها به سیستم‌های کنترلی خلی سریع است و بازده بالای تبخیر بیشترین عملکرد سیستم را تضمین می‌کند. در صورتی که در دستگاه از آب دیونیزه شده یا اسمز معکوس استفاده نمی‌شود، کنترل کیفیت آب باید به صورت دوره‌ای انجام شود.

مقایسه قیمت

در جدول (۵) مقایسه‌ی کاملی از انواع روش‌های رطوبت‌زنی ارایه داده است.

اگر بخواهیم یک ارزیابی منصفانه از قیمت سیستم‌های رطوبت‌زن داشته باشیم باید علاوه بر هزینه اولیه، هزینه نگهداری نصب و عملکرد دستگاه را نیز در نظر بگیریم.

البته هزینه اولیه بر حسب ظرفیت دستگاه تعییر می‌کند. دستگاه‌هایی که ظرفیت بالایی دارند بسیار اقتصادی هستند. برای مثال قیمت یک دستگاه رطوبت‌زن که در هر ساعت ۱۰۰۰ پوند بخار تولید می‌کند کمتر از دستگاهی از همان نوع است که ۵۰۰ $\frac{\text{lbs}}{\text{hr}}$ بخار تولید می‌کند.

References:

- ASHRAE Handbook 2000 systems and Equipment.
- ASHRAE Handbook 2002 fundamentals.
- ASHRAE Handbook 1999 HVAC applications.
- Static Electricity national fire protection association.

پی‌نوشت:

- (1) 1 grain = 0.0648 gr
- (2) Theoretical indoor relative humidity

برای دستیابی به اطلاعات بیشتر می‌توان به نشانی‌های زیر مراجعه نمود:

www.airshack.com/spec_pgs/
[www.air-conditioners-america.com/
product.asp?...](http://www.air-conditioners-america.com/product.asp?...)
www.condens.fi/eng/nurmijarvie.html
[www.ijot.com/superiorhome/
pages/3_basement04.htm](http://www.ijot.com/superiorhome/pages/3_basement04.htm)
www.biosal.de/.../biosal_wa__ba_franz.html